

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES

**PROJETO DE REDES ÓPTICAS DE
ALTA CAPACIDADE UTILIZANDO
TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO
BIOINSPIRADAS**

VIRTUS IMPAVIDA

RECIFE, FEVEREIRO DE 2012.

DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES

**PROJETO DE REDES ÓPTICAS DE
ALTA CAPACIDADE UTILIZANDO
TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO
BIOINSPIRADAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**

ORIENTADOR: PROF. JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, PhD

CO-ORIENTADOR: PROF. CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO, DOUTOR

Recife, Fevereiro de 2012.

©Daniel Augusto Ribeiro Chaves, 2012

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- C512p Chaves, Daniel Augusto Ribeiro.
Projeto de redes ópticas de alta capacidade utilizando técnicas de otimização bioinspiradas / Daniel Augusto Ribeiro Chaves. - Recife: O Autor, 2012.
xxi, 173 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Joaquim Ferreira Martins Filho.
Co-Orientador: Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.
Inclui Referências Bibliográficas.
1. Engenharia Elétrica. 2. Topologia de redes de telecomunicações. 3. Redes WDM. 4. Inteligência Computacional. 5. Otimização de Pareto. 6. Particle swarm optimization. 7. Cross layer design. 8. Camada física. 9. Equipamentos de comunicação óptica. 10. Comunicação com fibras ópticas. 11. Redes de fibras ópticas. 12. NSGA-II. I. Martins Filho, Joaquim Ferreira. (Orientador). II. Bastos Filho, Carmelo José Albanez. III. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2012-058



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES

TÍTULO

"PROJETO DE REDES ÓPTICAS DE ALTA CAPACIDADE UTILIZANDO TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADAS"

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE; CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO, POLI/UPE; JOÃO CRISÓSTOMO WEYL ALBUQUERQUE COSTA, FACULDADE DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO/UFPB; NELSON LUIS SALDANHA DA FONSECA, UNICAMP; MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, DEE/UFCG e JULIANO BANDEIRA LIMA, DM/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES APROVADO.**

Recife, 24 de fevereiro de 2012.

CECÍLIO JOSÉ LINS PIMENTEL
Coordenador do PPGE

JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Orientador e Membro Titular Interno

JULIANO BANDEIRA LIMA
Membro Titular Externo

CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO
Co-Orientador e Membro Titular Externo

NELSON LUIS SALDANHA DA FONSECA
Membro Titular Externo

MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR
Membro Titular Externo

**JOÃO CRISÓSTOMO WEYL
ALBUQUERQUE COSTA**
Membro Titular Externo

Dedico este trabalho
aos meus pais,
à minha família,
a Maira e a Raissa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho pelo apoio e oportunidades oferecidas.

Ao Prof. Carmelo José Albanez Bastos Filho pela cooperação e dedicação ao trabalho de pesquisa nos últimos anos.

A Renan Vasconcelos Bezerra Carvalho, Erick de Andrade Barboza, Douglas de Oliveira Aguiar, Rodrigo Fonseca de Santa Cruz Oliveira e Caio Fernando Correia Leitão Cardoso Ayres, pela colaboração na realização de simulações apresentadas neste trabalho.

A Danilo Ricardo Barbosa de Araújo, Erick de Andrade Barboza e ao Prof. Helder Alves Pereira, pela cooperação direta no processo de desenvolvimento ou depuração dos programas de simulação utilizado neste trabalho.

Aos revisores deste texto: Carmelo José Albanez Bastos Filho, Cleuma Maria Ribeiro Silva, Helder Alves Pereira e Joaquim Ferreira Martins Filho, por suas valiosas sugestões e contribuições.

Aos meus pais e a minha família por terem me proporcionado o apoio necessário para chegar até aqui.

Finalmente, gostaria de agradecer ao CNPq, à Capes, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPE e à UFPE pelos apoios financeiros fornecidos durante a minha formação.

DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES

Universidade Federal de Pernambuco

24 de Fevereiro de 2012

Onde há verdade há verdadeiro conhecimento.

Onde há conhecimento verdadeiro há sempre alegria.

— **Gandhi**

Resumo da Tese apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

PROJETO DE REDES ÓPTICAS DE ALTA CAPACIDADE UTILIZANDO TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO BIOINSPIRADAS

Daniel Augusto Ribeiro Chaves

Fevereiro/2012

Orientador: Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, PhD

Co-Orientador: Prof. Carmelo José Albanez Bastos Filho, Doutor

Área de Concentração: Fotônica

Palavras-chaves: topologia de redes de telecomunicação, redes WDM, inteligência computacional, otimização de Pareto, *particle swarm optimization*, *cross layer design*, camada física, equipamentos de comunicação óptica, comunicação com fibras ópticas, redes de fibras ópticas, NSGA-II.

Número de páginas: 173

Nesta Tese são propostas diversas estratégias para projetar redes ópticas WDM de forma otimizada. As redes são consideradas com tráfego dinâmico e penalizadas pelas penalidades da camada física. As estratégias propostas lidam com os principais elementos que afetam a relação custo desempenho em uma rede óptica: o algoritmo de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA), a colocação de regeneradores (RP), a atribuição de regeneradores (RA), o projeto da topologia física da rede (PTD) e o dimensionamento dos dispositivos ópticos (DDO) que serão instalados na rede. Esses problemas são tratados tanto de forma separada quanto de forma integrada na Tese. Para o RWA, é proposta uma metodologia para se projetar algoritmos heurísticos de roteamento que têm como objetivo o aumento no desempenho da rede e que levam em conta as penalidades da camada física. Para a solução do RP são propostos algoritmos heurísticos e metaheurísticos para o projeto de redes ópticas translúcidas, considerando simultaneamente a otimização dos custos de capital (CapEx) e operacional (OpEx) e do desempenho da rede. O problema de PTD é tratado em conjunto com o DDO também de forma multiobjetiva, considerando a otimização simultânea do CapEx e do desempenho (probabilidade de bloqueio). Um algoritmo multiobjetivo para realização da expansão de topologia (*i.e.* adição de novos enlaces a uma rede já existente) também é proposto. Além disso, são resolvidos conjuntamente os problemas de PTD, RP e RWA de forma multiobjetiva considerando a otimização simultânea de CapEx e desempenho da rede. As otimizações das soluções são feitas utilizando as seguintes estratégias metaheurísticas propostas na área de inteligência computacional: *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II* (NSGA-II).

Abstract of Thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of
Doctor in Electrical Engineering

DESIGN OF HIGH CAPACITY OPTICAL NETWORKS USING BIO-INSPIRED OPTIMIZATION TECHNIQUES

Daniel Augusto Ribeiro Chaves

February/2012

Supervisor: Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, PhD

Co-Supervisor: Prof. Carmelo José Albanez Bastos Filho, Doutor

Area of Concentration: Photonics

Keywords: telecommunication network topology, WDM networks, computational intelligence, Pareto optimization, particle swarm optimization, cross layer design, physical layer, optical communication equipment, optical fiber communication, optical fiber networks, NSGA-II.

Number of pages: 173

In this thesis several strategies to perform an optimized design of WDM optical networks are proposed. The networks are assumed to have a dynamic traffic and impaired by the physical impairments. The proposals deal with the main elements that affect the cost-performance trade off in an optical network: the routing algorithm and wavelength assignment (RWA), the regenerators placement (RP), the regenerators allocation (RA), the network physical topology design (PTD) and the specification of optical devices (DDO) to be installed in the network. These problems are treated separately and jointly in the thesis. For RWA, a methodology is proposed to design heuristic algorithms for network routing that aims to increase the network performance while taking into account the physical impairments. Regarding the RP problem, heuristic and metaheuristic algorithms to design translucent optical networks considering the simultaneous optimization of the capital (CapEx) and the operational (OpEx) costs and network performance are proposed. The PTD and DDO problems are treated jointly by a multi-objective optimizer, considering the simultaneous optimization of the network CapEx and performance (blocking probability). An algorithm to perform the multi-objective topology upgrade (*i.e.* the inclusion of new links to an existing network) is also proposed. Moreover, the PTD, RP and RWA problems are solved jointly, considering the simultaneous optimization of network CapEx and performance. The optimization solutions are obtained using the following metaheuristics strategies found in the computational intelligence literature: particle swarm optimization (PSO) and non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II).

LISTA DE SIGLAS

- ACO** *Ant Colony Optimization*. 10
- ANN** *Artificial Neural Networks*. 10
- ASE** *Amplified Spontaneous Emission*. 21, 37, 145
- BER** *Bit Error Rate*. 21
- CAC** *Controle de Admissão de Chamadas*. 34
- CapEx** *Capital Expenditure*. 6
- DCF** *Dispersion Compensate Fiber*. 119
- DDO** *Dimensionamento dos Dispositivos Ópticos*. 7, 148
- DLE** *Dynamic Lightpath Establishment*. 14, 35
- EDFA** *Erbium Doped Fiber Amplifier*. 5, 21
- ERBs** *Estações Rádio Base*. 3
- FTTH** *Fiber to the Home*. 3
- FWM** *Four Wave Mixing*. 21, 37, 145
- GA** *Genetic Algorithm*. 10
- GATNU** *Geração Aleatória de Tráfego Não Uniforme*. 63
- GUI** *Graphical User Interface*. 151
- IA-RWA** *Impairment Aware RWA*. 8
- ICBR** *Impairment Constraint Based Routing*. 15
- IRWA** *Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment*. 15
- ISP** *Internet Service Provider*. 3
- JWR** *Joint Wavelength-Route*. 18
- LAN** *Local Area Network*. 3

LCFD *Link Cost Function Design*. 45

LRW *Least Resistance Weighth*. 22

MCMP *Multiple Criteria Mathematical Programing*. 90

MINLP *Mixed Integer Non-Linear Programing*. 112

MIP *Mixed Integer Programming*. 113

MOONTD *Multiobjective ONTD*. 110

MORP *Multiobjective Optimization for Regenerador Placement*. 89

MSU-RP *Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement*. 79

MU-RP *Most Used Regenerator Placement*. 78

NDF *Nodal Degree First*. 26

NLP *Non-Linear Programming*. 50

NSGA-II *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*. 11

OBS *Optical Burst Switching*. 30

OCS *Optical Circuit Switching*. 30

OLT *Optical Line Terminal*. 118

ONTD *Optical Network Total Design*. 110

OpEx *Operational Expenditure*. 6

OSNR *Optical Signal to Noise Ratio*. 20

OSNR-R *Optical Signal to Noise Ratio Routing*. 22

OXC *Optical crossconnect*. 5

PLI *Physical Layer Impairments*. 7

PMD *Polarization Mode Dispersion*. 21, 37, 145

PSO *Particle Swarm Optimization*. 10, 51

PSR *Power Series Routing*. 48

PSTN *Public Switched Telephone Network*. 3

PTD *Physical Topology Design*. 7, 29, 148

QoT *Quality of Transmission*. 6

RA *Regenerator Assignment*. 7, 148

RD *Residual Dispersion*. 37, 145

ROADM *Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers*. 5

RP *Regenerator Placement*. 7, 24, 148

RWA *Routing and Wavelength Assignment.* 7, 148

SIMTON *Simulator for Transparent Optical Networks.* 33

SLE *Static Lightpath Establishment.* 14

SP *Shortest Path.* 22

SQP *Signal Quality Prediction.* 26

SSE *Spontaneous Source Emission.* 37, 145

SSMF *Standard Single Mode Fiber.* 119

TON *Transparent Optical Networks.* 5

UM *unidade monetária.* 118

VTD *Virtual Topology Design.* 28

WA *Wavelength Assignment.* 17

WAN *Wide Area Networks.* 3

WDM *Wavelength Division Multiplexing.* 4

xDSL *Digital Subscriber Line.* 3

XPM *Cross Phase Modulation.* 21

LISTA DE FIGURAS

3.1	Arquitetura assumida pelo SIMTON para os enlaces da rede óptica. Cada enlace possui um par da estrutura mostrada, uma em cada direção de comunicação.	35
3.2	Arquitetura assumida pelo SIMTON para um nó transparente.	36
3.3	Arquitetura assumida pelo SIMTON para um nó translúcido.	36
3.4	Processamento dos pedidos de conexão realizados pelo SIMTON.	43
4.1	Topologias usadas para as simulações de rede: (a) topologia da Finlândia, (b) topologia Americana. Os comprimentos dos enlaces são dados em km.	55
4.2	Evolução da probabilidade de bloqueio da melhor partícula encontrada pelo PSO durante a fase de planejamento para a topologia da Finlândia em função do número de iterações do PSO para: (a) $K = 2$, (b) $K = 3$, (c) $K = 4$ e (d) $K = 6$	58
4.3	Representação em termo de curvas de nível da melhor função-custo $f(a_{i,j}, z_{i,j})$ encontrada pelo PSO em função do comprimento normalizado do enlace e da disponibilidade normalizada do enlace para a topologia da Finlândia nos cenários: (a) S_1 e (b) S_2	60
4.4	Representação em termos de curvas de nível da melhor função-custo $f(a_{i,j}, z_{i,j})$ encontrada pelo PSO em função do comprimento de enlace normalizado e da disponibilidade normalizada para a topologia Americana.	61
4.5	Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede apresentadas pelos algoritmos SP, LRW, LOR, OSNR-R e PSR considerando a topologia da Finlândia para os cenários: (a) S_1 e (b) S_2	62
4.6	Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede apresentada pelos algoritmos SP, LRW, LOR, OSNR-R e PSR considerando a topologia Americana.	63
4.7	Representação em gráfico de caixa e bigodes da análise GATNU. O gráfico mostra o indicador de desempenho relativo, em relação ao PSR, para os algoritmos de RWA SP, LRW e OSNR-R considerando a geração de um conjunto de 30 matrizes aleatórias para: $R = 0$ (símbolos cheios) e $R = 1$ (caixa e bigodes) para a topologia da Finlândia nos cenários (a) S_1 e (b) S_2	65
4.8	Tempo médio por chamada para solução do RWA em função da carga da rede para a topologia da Finlândia no cenário S_1	66
4.9	Efeito de uma falha no enlace que liga os nós 3 e 4 gerada na iteração 500.	68
4.10	Efeito de uma falha no nó 3 gerada na iteração 500.	69
4.11	Efeito da instalação do enlace 4-5 na topologia da Finlândia na iteração 500.	70

5.1	Topologia Pacific Bell. Os comprimentos dos enlaces são dados em km.	81
5.2	Topologia Americana-Estendida. Os comprimentos dos enlaces são dados em km. . .	81
5.3	Probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores para os diferentes algoritmos de RP, para a topologia Pacific Bell, considerando diferentes cargas e números de nós translúcidos: (a) Carga = 50 Erl e $N = 3$, (b) Carga = 50 Erl e $N = 6$, (c) Carga = 50 Erl e $N = 9$, (d) Carga = 60 Erl e $N = 3$, (e) Carga = 60 Erl e $N = 6$, (f) Carga = 60 Erl e $N = 9$, (g) Carga = 80 Erl e $N = 3$, (h) Carga = 80 Erl e $N = 6$, (i) Carga = 80 Erl e $N = 9$. No caso do MSU-RP o número de nós translúcidos é mostrado dentro dos quadrados ao lado de cada solução.	83
5.4	Nós selecionados pelos algoritmos de RP para: (a) a topologia Pacific Bell considerando os pontos circulados na Figura 5.3(e) e (b) para a topologia Americana-Estendida para os pontos circulados na Figura 5.6(e). Quadrados, círculos e triângulos indicam, respectivamente, os nós translúcidos selecionados pelos algoritmos NDF, SQP e MU-RP. Para esses três algoritmos são selecionados 6 nós translúcidos com cada nó recebendo 20 regeneradores. Os números dentro dos nós indicam o número de regeneradores colocados em cada nó pelo algoritmo MSU-RP.	85
5.5	Probabilidade de bloqueio da rede em função da sua carga total (tráfego uniforme), considerando as redes translúcidas projetadas por cada algoritmo de RP para: (a) a topologia Pacific Bell (soluções circuladas na Figura 5.3(e)), (b) para a topologia Americana-Estendida (soluções circuladas na Figura 5.6(d)).	86
5.6	Probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores para os diferentes algoritmos de RP, para a topologia Americana-Estendida considerando diferentes cargas e números de nós translúcidos: (a) Carga = 60 Erl e $N = 20$, (b) Carga = 60 Erl e $N = 30$, (c) Carga = 60 Erl e $N = 40$, (d) Carga = 80 Erl e $N = 20$, (e) Carga = 80 Erl e $N = 30$, (f) Carga = 80 Erl e $N = 40$, (g) Carga = 100 Erl e $N = 20$, (h) Carga = 100 Erl e $N = 30$, (i) Carga = 100 Erl e $N = 40$. No caso do MSU-RP esse valor é mostrado dentro dos quadrados ao lado de cada solução.	87
5.7	Probabilidade de bloqueio em função dos algoritmos de RP, considerando-se um tráfego não-uniforme com diferentes valores de desvio máximo de carga (caixas e bigodes) e probabilidade de bloqueio para o tráfego uniforme (símbolos) para a topologia: (a) Pacific Bell e (b) Americana-Estendida.	89
5.8	Topologia Pacific Bell utilizada nas simulações realizadas para o MORP. Os comprimentos dos enlaces são dados em km. Números no interior dos nós representam o índice do nó.	97
5.9	Melhores frentes de Pareto encontradas pelo MORP após 300 e 1000 iterações considerando 6 execuções com inicializações independentes.	98
5.10	Melhores frentes de Pareto encontradas após 300 iterações de MORP em função da variação da: (a) probabilidade de mutação e (b) probabilidade de cruzamento utilizada no NSGA-II.	99

5.11	Probabilidade de bloqueio em função do número total de regeneradores utilizados pelos algoritmos MORP, MSU-RP, SQP e NDF nas cargas: (a) 60 erlangs, (b) 80 erlangs e (c) 100 erlangs. (d) melhor frente de Pareto encontrada pelo MORP para as cargas de 60, 80 e 100 erlangs. Todos os resultados para o MORP foram obtidos após 300 iterações.	100
5.12	Probabilidade de bloqueio em função da carga retornada pelas redes translúcidas, que possuem aproximadamente 100 regeneradores, encontradas pelos algoritmos MORP, MSU-RP, NDF e SQP para a topologia Pacific Bell.	106
5.13	Comparação entre a solução do RP multiobjetivo considerando apenas dois objetivos (MORP-2o) com o RP multiobjetivo considerando 3 objetivos MORP-3o para as cargas de: (a) 60 erlangs, (b) 80 erlangs e (c) 100 erlangs, na topologia Pacific Bell. .	107
6.1	Topologia Nsfnet originalmente implantada nos EUA escalonada para uma escala metropolitana. Os números nos enlaces correspondem a seus comprimentos em km. .	126
6.2	Melhores frentes de Pareto encontradas (probabilidade de bloqueio em função do custo) pelos algoritmos MOONTD considerando tráfego uniforme com cargas de 50, 100 e 200 Erl e $OSNR_{QoT}$ de 20 e 23 dB para os problemas de: (a) MOONTD-TDP (projeto de redes translúcidas) e (b) MOONTD-TD (projeto de redes transparentes).	127
6.3	Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TDP para uma carga de 50 Erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,010$, $COST_{Net} = 1973,02$ UM, $W = 15$, $\epsilon = -35$ dB, $G_R = 38$, $C_R = 1623$ km.	129
6.4	Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TDP para uma carga de 100 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,010$, $COST_{Net} = 2913,03$ UM, $W = 20$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 44$, $C_R = 2013$ km.	129
6.5	Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TDP para uma carga de 200 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,010$, $COST_{Net} = 4581,66$ UM, $W = 31$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 48$, $C_R = 2315$ km.	129
6.6	Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TD para uma carga de 50 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,010$, $COST_{Net} = 2121,01$ UM, $W = 15$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 40$, $C_R = 1718,5$ km.	130
6.7	Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TD para uma carga de 100 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,011$, $COST_{Net} = 3007,94$ UM, $W = 19$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 48$, $C_R = 2309,5$ km.	130
6.8	Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TD para uma carga de 200 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,013$, $COST_{Net} = 4572,55$ UM, $W = 26$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 58$, $C_R = 3067,5$ km.	130
6.9	Melhores frentes de Pareto encontradas (probabilidade de bloqueio em função do custo) para os algoritmos MOONTD-TDP e MOONTD-TD considerando tráfego uniforme com cargas de 50, 100 e 200 Erl, para $OSNR_{QoT}$ de: (a) 20 dB e (b) 23 dB. 131	131

6.10	Melhores frentes de Pareto encontradas (probabilidade de bloqueio em função do custo), considerando tráfego uniforme e não-uniforme nas cargas de 50, 100 e 200 erlangs e $OSNR_{QoT}$ de 23 dB, por: (a) MOONTD-TDP, (b) MOONTD-TD.	132
6.11	Melhores frentes de Pareto encontradas (símbolos fechados) considerando tráfego uniforme, cargas de 50, 100 e 200 erlangs e $OSNR_{QoT}$ de 23dB pelos algoritmos: (a) MOONTD-TDP, (b) MOONTD-TD. Símbolos vazados representam topologias simuladas em cargas diferentes das cargas para as quais elas foram otimizadas. . . .	134
6.12	Melhores frentes de Pareto encontradas por: (a) MOONTD-TDP e (b) MOONTD-TD após 1250 iterações considerando os algoritmos de roteamento Min Hops, SP, LRW e OSNR-R. Simulações realizadas considerando tráfego uniforme, carga de 100 erlangs e $OSNR_{QoT} = 23$ dB.	135
6.13	Melhor frente de Pareto encontrada por MOONTD-TD (tráfego uniforme, $OSNR_{QoT} = 23$ dB, 100 erlangs) após 1200, 1300 e 10000 iterações considerando 3 execuções com inicializações independentes: (a) inicialização 1, (b) inicialização 2 e (c) inicialização 3.	136
6.14	Melhores frentes de Pareto encontradas pelos algoritmos de expansão considerando como topologia-legada a Nsfnet para os casos de: (a) expansão para uma rede translúcida (b) expansão para uma rede transparente.	137
6.15	Topologia transparente otimizada encontrada por MOONTD-TD para uma carga de 100 erlangs e tráfego uniforme, com $PB = 0,107$, $COST_{Net} = 2300,12$, $W = 16$ e $\epsilon = -35$ dB e usada como topologia-legada. Os números dentro dos nós representam a quantidade de regeneradores em cada nó e os números nos enlaces representam respectivamente o comprimento do enlace, a potência de saturação e a figura de ruído do amplificador óptico.	138
6.16	Melhores frentes de Pareto encontradas pelos algoritmos de expansão considerando como topologia-legada a topologia mostrada na Figura 6.15 para os casos de: (a) expansão para uma rede translúcida (b) expansão para uma rede transparente.	139
6.17	Topologia transparente otimizada encontrada por MOONTD-TD para uma carga de 100 erlangs com tráfego não-uniforme, com $PB = 0,099$, $COST_{Net} = 2228,62$, $W = 18$ e $\epsilon = -35$ dB. Números dentro dos nós representam quantidade de regeneradores em cada nó e números nos enlaces representam respectivamente comprimento do enlace, potência de saturação e figura de ruído do amplificador óptico.	140
6.18	Melhores frentes de Pareto encontradas pelos algoritmos MOONTD-uTDP e MOONTD-P considerando como topologias-legadas as topologias mostradas nas Figuras 6.15 e 6.17 para os casos de: (a) tráfego uniforme (b) tráfego não-uniforme.	141
A.1	Tela de apresentação com a rede a ser simulada.	152
A.2	Telas de configuração dos parâmetros de simulação relativos aos: (a) enlaces e (b) aos nós da rede.	152
A.3	Tela de configuração dos parâmetros da simulação.	153
A.4	Telas informativas quanto ao processo de simulação: (a) em andamento e (b) término da simulação.	153

A.5	Diagrama de casos de uso do módulo de interface gráfica.	154
A.6	Diagrama de casos de uso do módulo de simulação.	156

LISTA DE TABELAS

4.1	Passos para o projeto da função-custo de enlace utilizando o LCFD.	47
4.2	Etapas de LCFD e as respectivas implementações usadas para o projeto do PSR. . . .	51
4.3	Parâmetros ópticos usados na simulação.	56
4.4	Parâmetros de simulação do PSO.	57
4.5	Coeficientes b_{n_0, n_1} da série de funções obtidos pelo PSO durante a fase de planejamento da rede considerando a topologia da Finlândia nos cenários S_1 e S_2	59
5.1	Parâmetros da camada física utilizados na simulação pelo SIMTON.	82
5.2	Formalização do problema de otimização multiobjetiva para projeto de redes translúcidas.	90
5.3	Parâmetros do NSGA-II utilizados para obtenção dos resultados do MORP.	96
5.4	Redes translúcidas encontradas por MORP executado em uma carga de 80 erlangs na topologia Pacific Bell. A coluna N representa o número de nos translúcidos da solução, R_e número total de regeneradores, PB a probabilidade de bloqueio. Os números representam a quantidade de regeneradores colocados em cada nó da rede. Os índices dos nós estão listados na primeira linha da tabela.	102
5.5	Redes translúcidas encontradas por NDF para uma carga de 80 erlangs na topologia Pacific Bell. A coluna N representa o número de nos translúcidos da solução, R_e número total de regeneradores, PB a probabilidade de bloqueio. Os números representam a quantidade de regeneradores colocados em cada nó da rede. Os índices dos nós estão listados na primeira linha da tabela.	103
5.6	Redes translúcidas encontradas por MSU-RP executado em uma carga de 80 erlangs na topologia Pacific Bell. A coluna N representa o número de nos translúcidos da solução, R_e número total de regeneradores, PB a probabilidade de bloqueio. Os números representam a quantidade de regeneradores colocados em cada nó da rede. Os índices dos nós estão listados na primeira linha da tabela.	104
5.7	Redes translúcidas encontradas por SQP executado em uma carga de 80 erlangs na topologia Pacific Bell. A coluna N representa o número de nos translúcidos da solução, R_e número total de regeneradores, PB a probabilidade de bloqueio. Os números representam a quantidade de regeneradores colocados em cada nó da rede. Os índices dos nós estão listados na primeira linha da tabela.	105

6.1	Formalização do problema de otimização multiobjetiva para projeto total de redes ópticas.	112
6.2	Resumo dos subproblemas de projeto de redes tratados neste trabalho.	117
6.3	Rótulos, especificações e valores de custo usados para os amplificadores ópticos. . .	120
6.4	Rótulos, especificações e valores de custo para os dispositivos OXC.	120
6.5	Resumo da formulação usada para cálculo de cada componente de CapEx.	121
6.6	Lista de parâmetros usados na modelagem de CapEx da rede.	121
6.7	Parâmetros da camada física utilizados na simulação pelo SIMTON.	125
6.8	Matriz de tráfego não-uniforme	133

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Redes ópticas	3
1.2	Projeto de redes ópticas	6
1.3	Escopo da Tese	10
1.4	Estrutura do Texto	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1	Roteamento e atribuição de comprimento de onda – RWA	13
2.1.1	Roteamento	15
2.1.2	Atribuição de comprimento de onda	17
2.1.3	RWA conjunto (JWR)	18
2.1.4	RWA levando em conta a camada física (IA-RWA)	19
2.1.5	Algoritmos de RWA utilizados como comparação na Tese	22
2.2	Projeto de redes translúcidas com topologia fixa	23
2.2.1	Colocação de regeneradores	24
2.2.2	Atribuição de regeneradores	27
2.3	Projeto de redes ópticas WDM	28
2.3.1	Atualização de redes WDM	31
3	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO: SIMULADOR SIMTON	33
3.1	Camada óptica: premissas gerais	34
3.2	Geração de chamadas e carga da rede	35
3.3	Modelo da camada física	37
3.3.1	Avaliação das Penalidades da Camada Física	38
3.4	Controle de admissão de chamadas (CAC)	42
3.4.1	CAC transparente	42
3.4.2	CAC translúcido	42
3.5	Cálculo da probabilidade de bloqueio	43
3.6	Lista de publicações referentes a este capítulo	44

4	METODOLOGIA PARA PROJETO DE FUNÇÕES DE CUSTO PARA ROTEAMENTO QUE CONSIDERAM AS PENALIDADES DA CAMADA FÍSICA EM REDES ÓPTICAS	45
4.1	<i>Link cost function design (LCFD)</i>	45
4.2	<i>Power Series Routing Algorithm (PSR)</i>	48
4.2.1	Fase de planejamento	48
4.2.2	Fase operacional	51
4.3	Otimização por Enxame de Partículas (PSO)	52
4.3.1	Análise do tempo computacional durante a fase de planejamento	53
4.4	Resultados	55
4.4.1	Condições de simulação	55
4.4.2	Resultados – fase de planejamento	57
4.4.3	Resultados de tempo para a fase de planejamento	60
4.4.4	Resultados da fase operacional	61
4.4.5	Resultados de tempo para a fase operacional	66
4.4.6	Auto-adaptação a mudanças na topologia	67
4.5	Considerações sobre as propostas apresentadas	70
4.6	Lista de publicações referentes a este capítulo	72
5	PROJETO DE REDES ÓPTICAS TRANSLÚCIDAS CONSIDERANDO APENAS OS RECURSOS DE REGENERAÇÃO 3R	73
5.1	Proposta para alocação de regeneradores (RA)	73
5.2	Propostas heurísticas para colocação esparsa de regeneradores	77
5.2.1	<i>Most Used Regenerator Placement (MU-RP)</i>	78
5.2.2	<i>Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement (MSU-RP)</i>	79
5.2.3	Resultados	80
5.3	Proposta de metaheurística para colocação esparsa de regeneradores	89
5.3.1	<i>Multiobjective Optimization for Regenerator Placement (MORP)</i>	89
5.3.2	Resultados	96
5.4	Considerações sobre as propostas apresentadas	107
5.5	Lista de publicações referentes a este capítulo	109
6	PROJETO TOTAL DE REDES ÓPTICAS	110
6.1	Projeto total multiobjetivo de redes ópticas	111
6.2	Descrição e representação do projeto de redes ópticas	112
6.2.1	Representação da topologia física e dispositivos	113
6.2.2	Representação para a colocação de regeneradores	115
6.2.3	Representação para o algoritmo de RWA	115
6.2.4	Representação para o projeto total	116
6.3	Proposta para a modelagem de CapEx	118
6.4	Algoritmo para projeto total multiobjetivo de redes ópticas	121
6.4.1	Tratamento de indivíduos não factíveis	123
6.5	Resultados	124

6.5.1	Arranjo experimental	124
6.5.2	Resultados para o projeto total de redes	125
6.5.3	Resultados para a convergência do algoritmo	135
6.5.4	Resultados para a expansão de redes	136
6.6	Considerações sobre as propostas apresentadas	140
6.7	Lista de publicações referentes a este capítulo	142
7	CONCLUSÕES	144
7.1	Trabalhos futuros	149
7.2	Resumo quantitativo das contribuições dos trabalhos desenvolvidos para a Tese .	150
Apêndice A	SIMTON - INTERFACE GRÁFICA E CASOS DE USO	151
A.1	Interface gráfica do SIMTON	151
A.1.1	Estudo dos casos de uso do <i>software</i> de simulação	154
Apêndice B	LISTA DE PUBLICAÇÕES	157
B.1	Artigos publicados em periódicos	157
B.2	Artigos submetidos a periódicos	158
B.3	Artigos publicados em conferências	158
	REFERÊNCIAS	163

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Não se pode ensinar tudo a alguém, apenas ajudá-lo a encontrar por si mesmo.

— Galileu Galilei

Os seres humanos sempre demonstraram a necessidade de se comunicar, desde as épocas pré-históricas até os dias atuais. Além de estabelecer essa comunicação, sempre se buscou tanto uma maior rapidez como um maior alcance para essa comunicação. Esse sempre foi um desejo que permeou os seres humanos. Entretanto, apenas nas últimas décadas a tecnologia começou a atender, de forma mais eficiente, aos anseios das pessoas por comunicação. Tecnologias maduras e acessíveis à Engenharia de Telecomunicações tais como a eletrônica moderna e as transmissões por meio óptico vêm proporcionando as bases para uma comunicação rápida e de longo alcance. No entanto, mesmo com os grandes avanços observados nessa área, as demandas dos seres humanos nesse campo são cada vez mais crescentes. Cada vez que a Engenharia de Telecomunicações consegue oferecer um conjunto de recursos de telecomunicação, novas aplicações para o usuário final surgem, e recursos mais avançados e sofisticados são requisitados. Esses recursos mais sofisticados, em geral, demandam maior troca de informações. Isso explica o forte crescimento da demanda por taxa de transmissão que vem se verificando nos últimos anos [1].

O principal impulso para o crescimento dessa demanda por taxa de transmissão é a descoberta do potencial oferecido pela rede mundial de computadores, a Internet [2, 3]. A Internet oferece

às pessoas possibilidades de comunicação quase ilimitadas. E, por isso, surgem a todo instante novas aplicações e serviços. Essas aplicações são cada vez mais sofisticadas, com cada vez mais possibilidades, resultando em um aumento na quantidade de informação que precisa ser transportada pela rede de comunicações. Desse modo, a infra-estrutura de telecomunicações que proporciona os meios de transmissão de dados requisitados pela Internet tem de estar preparada para suportar a crescente demanda [1, 4, 5]. Além disso, é requisitado a essa infra-estrutura que ela seja capaz de entregar as informações em distâncias cada vez maiores.

As telecomunicações modernas se utilizam basicamente de três meios de transmissão, são eles: o ar, para as transmissões sem fios, os cabos de materiais condutores (normalmente o Cobre é utilizado) e as fibras ópticas, para as transmissões com fios. Desses, cronologicamente falando, os primeiros a serem utilizados para a transmissão de informações foram os cabos condutores seguidos pelas transmissões sem fios e finalmente pelo uso das fibras ópticas. Nos dias atuais, dessas três opções, a tecnologia que melhor atende aos requisitos elencados nos parágrafos anteriores é o sistema de comunicação óptica [1, 2, 4]. Os sistemas ópticos mais comuns usam como meio de transmissão a fibra óptica, que apresenta várias vantagens em relação aos seus dois predecessores. Comparando-a com o uso de fios de cobre como meio de transmissão, a primeira vantagem é o material do qual a fibra é feita. A fibra óptica é feita de sílica. A sílica é um material abundante no meio ambiente, muito mais abundante do que o Cobre. Por isso, o custo agregado à matéria prima usada na fibra é menor [6]. Uma segunda vantagem da fibra sobre os sistemas de fios de Cobre e os sistemas sem fios é a largura de banda que ela pode oferecer [2, 6, 7]. A banda disponível na fibra óptica é de aproximadamente 25.000 GHz cerca de 1.000 vezes maior do que todo o espectro de rádio frequência utilizável na atmosfera de planeta Terra [8]. Outras vantagens são a imunidade à interferência eletromagnética, isolamento elétrica, baixa interferência entre canais (diafonia ou *crosstalk*) e maior segurança da informação que trafega na fibra [1, 2, 4].

Tendo em vista essas vantagens, ao longo dos últimos 10 anos, vem ocorrendo uma maciça instalação de cabos ópticos. Cada vez mais, as grandes operadoras de telecomunicações migram seus sistemas para sistemas ópticos. Em 2006 havia cerca de 583 milhões de fibras-km instaladas em todo mundo, isso equivale a 15.000 voltas no planeta Terra. A previsão de alguns especialistas para 2026, é de que se tenha um total de aproximadamente 3000 milhões de fibras-km instaladas, o que equivale a um crescimento de aproximadamente 500% na quantidade de fibras instaladas [1]. Esses números sinalizam uma tendência mundial para o emprego dos sistemas ópticos, e indicam que esses sistemas continuarão vigorando entre as principais tecnologias empregadas em telecomunicações nas

próximas décadas.

As grandes operadoras de telecomunicações estão utilizando o meio óptico para trafegar dados em suas redes de dimensões intercontinentais [1]. Existem atualmente inúmeros cabos ópticos submarinos instalados sob os oceanos interligando os diversos continentes do planeta [9]. Operadoras de telefonia móvel (celular) utilizam fibras ópticas para interconectar suas Estações Rádio Base (ERBs), estações de rádio que captam o sinal dos assinantes móveis. Operadoras de TV por assinatura utilizam fibras ópticas para fazer chegar até seus usuários, canais em alta definição. Os provedores de acesso à Internet (ISP – *Internet Service Provider*) também utilizam, cada vez mais, a tecnologia de comunicações ópticas para oferecer acesso de banda larga aos seus assinantes. Essas últimas duas abordagens referem-se a um novo conceito de entrega de banda larga para assinantes residenciais denominada na literatura FTTH (FTTH – *Fiber to the Home*) [10]. O FTTH consiste em lançar fibras ópticas nas últimas milhas entre a operadora de telecomunicações e o assinante do serviço [10]. Vislumbra-se que, nos próximos anos, a tecnologia FTTH substituirá boa parte da rede de telefonia legada (PSTN – *Public Switched Telephone Network*) que atualmente oferece acesso de banda larga à Internet utilizando a tecnologia xDSL (xDSL – *Digital Subscriber Line*) que oferece possibilidades muito limitadas quando comparadas com as oferecidas pelo FTTH [5, 10].

Tendo em vista o potencial dos sistemas ópticos de comunicações abordados e sua capacidade de acomodar a demanda por capacidade de transmissão, é importante empregar esforços de pesquisa crescentes para a otimização e refinamento dos sistemas de comunicações ópticas.

1.1 Redes ópticas

Como argumentado na seção anterior, existe uma tendência no setor de telecomunicações para o emprego das comunicações ópticas. Outra tendência desse setor é a formação de redes de comunicação, impulsionada principalmente pela Internet [3]. A natural convergência das duas tendências resulta no que é conhecido na literatura por rede óptica [2, 11]. São observadas formações de redes de comunicações desde uma escala global (todo o planeta) denominadas de redes WAN (WAN – *Wide Area Networks*), passando por uma escala corporativa (dentro de uma empresa), até uma escala doméstica (dentro de uma residência). Essas duas últimas são geralmente denominadas redes locais (LAN – *Local Area Network*).

As redes de computadores também utilizam cada vez mais as redes ópticas em sua infra-estrutura [12]. Atualmente, as redes ópticas são muito utilizadas em redes de grande escala, como redes intercontinentais, nacionais e estaduais. A quase totalidade das informações de longa distância que tra-

fegam no mundo, seja tráfego de redes de computadores (principalmente Internet), seja dos serviços de telefonia, passa pelos grandes *backbones* ópticos (enlaces de telecomunicações de alta capacidade usados para interligar países e continentes) instalados ao redor do mundo [12]. Porém, a aplicação das redes ópticas não se resume às redes de grande porte. Cada vez mais as redes ópticas vêm sendo empregadas como redes de acesso (FTTH) ou até mesmo como LANs, tanto residenciais quanto corporativas.

Uma rede óptica constitui-se de um conjunto de nós, que dão acesso aos usuários que necessitam comunicar-se, e um certo conjunto de ligações entre esses nós, os enlaces. O meio utilizado para essa interligação é o meio óptico (fibras ópticas). As redes ópticas podem ser divididas em duas gerações [2]. Na primeira, a camada óptica da rede é utilizada apenas para a transmissão, ou seja, apenas fornece um canal de comunicação de alto desempenho. As redes ópticas de primeira geração são conhecidas na literatura como *Redes Opacas*. Nelas, operações como comutação e gerência são feitas por circuitos eletrônicos. Isso significa que sempre que alguma decisão precisa ser tomada sobre o sinal que está sendo transmitido esse deve ser convertido para o domínio eletrônico. Essa conversão é conhecida na literatura como conversão óptica-elétrica-óptica (O/E/O). Os dispositivos de rede que realizam essa operação são os *transponders*. O *transponder* realiza uma operação de conversão óptico-elétrico (O/E) ou uma conversão elétrico-óptico (E/O). Portanto, dois *transponders* são necessários para se realizar uma operação (O/E/O). Nas redes de primeira geração (Redes Opacas), os enlaces da rede são opticamente isolados uns dos outros por *transponders* que realizam conversões O/E/O. Além da conversão (O/E/O), os *transponders* realizam, naturalmente, a regeneração do sinal óptico, realizando três processos com ele: areamplificação, a reformatação e o reajuste temporal do pulso. A realização desses três processos no sinal que está sendo transmitido é denominada na literatura de regeneração 3R [13]. Nas redes opacas, a cada nó da rede, o sinal óptico é regenerado resultando, geralmente, em uma elevada relação sinal ruído do sinal óptico entregue no destino [12]. Além disso, a regeneração feita em cada nó apresenta outras vantagens como: a fácil conversão de comprimentos de onda nos nós e a fácil obtenção de parâmetros para gerência de redes, aspectos desejáveis num cenário de redes ópticas [2, 12, 14, 15]. Por outro lado, a necessidade de utilizar *transponders* também gera alguns prejuízos [13, 16]. O primeiro deles é que a rede não fica transparente à modulação, à taxa de *bits* ou aos protocolos utilizados na transmissão [13, 16, 17]. Isso significa que, sempre que há uma mudança em algum desses itens, todos os *transponders* da rede precisam ser alterados [17]. A segunda desvantagem vem associada ao uso da tecnologia (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) ou multiplexação por divisão em comprimento de onda. Com o

uso dessa tecnologia, vários comprimentos de onda podem trafegar simultaneamente em uma mesma fibra óptica, cada um carregando uma informação diferente [2, 11]. Ou seja, para cada comprimento de onda instalado em um enlace óptico, dois *transponders* são necessários (um em cada ponta do enlace), isso aumenta muito o número de *transponders* utilizados na rede, aumentando assim o custo financeiro associado à instalação da rede [2, 12, 16, 17].

O elevado custo de instalação de redes ópticas opacas, ou de primeira geração, associado às vantagens oferecidas pelos sistemas ópticos previamente discutidas, levou à pesquisa por novas formas de implementação para as redes ópticas. Nesse contexto, foi proposta uma nova abordagem de implementação de redes ópticas, as redes ópticas de segunda geração [2]. Nessas redes, também chamadas de redes *Totalmente Ópticas* (*All-Optical Networks*) ou *Redes Transparentes* (TON – *Transparent Optical Networks*), as operações de chaveamento e roteamento são realizadas na camada óptica, ou seja, a comunicação ocorre desde o nó de origem até o nó de destino em meio óptico sem sofrer conversão O/E/O. O impulso para essas redes surgiu principalmente com o aparecimento de dispositivos como os amplificadores ópticos à fibra dopada com Érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*), multiplexadores de inserção/remoção óptica reconfiguráveis (ROADM – *Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers*) e comutadores ópticos (OXC – *Optical crossconnect*). Esses dispositivos proporcionaram amplificação e controle dos sinais no domínio óptico, permitindo-lhes trafegar desde o nó de origem até o nó de destino sem a utilização de conversão O/E/O. Um exemplo de como esses novos dispositivos reduzem o custo da rede são os amplificadores EDFA. Com eles, pode-se amplificar dezenas de comprimentos de onda em uma mesma fibra, simultaneamente, o que significa que um único amplificador pode substituir dezenas de *transponders* [2]. A redução de custo proporcionada pelas redes TON em relação às redes opacas depende do cenário que está sendo analisado e das dimensões da rede envolvida. No cenário investigado por Huelsermann *et al.* [18] foi observada uma redução de custo de 30% ao se empregar uma rede TON em lugar de uma rede opaca.

As redes TON, entretanto, também apresentam suas desvantagens. Uma vez que não existe mais regeneradores, o acúmulo de penalidades geradas na camada óptica pode degradar a comunicação, tornando a qualidade do sinal recebido inaceitável para uma comunicação satisfatória [13, 17]. Para solucionar esse problema existem três estratégias que podem ser usadas separadamente ou combinadas, são elas: a utilização de dispositivos ópticos menos ruidosos [19], a utilização de regeneradores 3R em alguns nós da rede [20, 21] e/ou o desenvolvimento de algoritmos de roteamento de alto desempenho, capazes de encontrar rotas que minimizem o impacto das penalidades da camada óptica [22]. Essas três estratégias são utilizadas nesta Tese.

Ramamurthy e colaboradores propuseram uma terceira forma para implementação de redes ópticas [21]. Os autores denominaram essa nova abordagem de *Redes Ópticas Translúcidas*. A proposta das redes ópticas translúcidas é de se combinar, em uma única implementação, as vantagens das redes opacas e das TON reduzindo as desvantagens de ambas. As redes ópticas translúcidas consistem em uma rede TON acrescida de uma certa quantidade de regeneradores 3R, que são estrategicamente posicionados na rede. Um regenerador consiste em um par de *transponders* que realizam a operação de conversão O/E/O, resultando em uma regeneração 3R do sinal óptico. Instalando uma rede translúcida é possível ter, ao mesmo tempo, uma redução de custo da rede (pois um número muito menor de *transponders* é necessário quando comparado com uma rede opaca) e um aumento de desempenho da rede, tendo em vista que se consegue uma qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) satisfatória para boa parte dos sinais que trafegam na rede. Isso é possível pois o sinal óptico pode utilizar um regenerador toda vez que a sua QoT cair abaixo de um limiar aceitável pré-definido. A redução de custo proporcionada pela rede translúcida em relação à rede opaca, assim como a melhora de desempenho em relação às redes TON dependem do cenário investigado. Yang e Ramamurthy [23] concluíram em seu trabalho que a instalação, em uma rede TON, de apenas 20% dos regeneradores necessários para tornar essa rede uma rede opaca, permite que a rede translúcida resultante apresente o mesmo desempenho da rede opaca equivalente. Isso significa o mesmo desempenho com uma economia de 80% no número de *transponders* na rede no caso estudado. Devido a essa boa relação custo-desempenho obtida pelas redes translúcidas, elas são muito utilizadas atualmente, principalmente para implementação de redes de grande porte (tipicamente redes com áreas de cobertura da ordem de centenas a milhares de quilômetros quadrados).

1.2 Projeto de redes ópticas

Na Seção 1.1 foi destacada a importância das redes ópticas para compor redes de telecomunicações que estejam preparadas para as demandas atuais da sociedade. Tendo por base essa premissa, a Engenharia tenta agora responder à pergunta de como seria a melhor forma de implementar tais redes. O objetivo quase sempre é otimizar a relação custo-desempenho envolvida na implementação (diminuir os custos e aumentar o desempenho). Existem dois tipos de custo nas redes: os investimentos relacionados à compra e instalação de dispositivos, também chamado de CapEx (CapEx – *Capital Expenditure*) e os investimentos relacionados à manutenção e operação em si da rede (por exemplo gasto de energia elétrica para manter a rede em funcionamento), também chamado de custo operacional ou OpEx (OpEx – *Operational Expenditure*) [16]. No tocante ao desempenho de rede, diversos

parâmetros podem ser utilizados para valorá-lo, sendo o mais comum deles a medição do número de comunicações efetivamente estabelecidas com sucesso na rede. Na prática, o custo e o desempenho são objetivos conflitantes. Normalmente, quando se muda um parâmetro na rede para melhorar o seu desempenho (por exemplo se instala um dispositivo melhor), seu CapEx aumenta (pois um dispositivo melhor, em geral, custa mais caro). Para um determinado problema de projeto de redes, podem existir soluções de baixo custo e baixo desempenho e soluções de alto custo e alto desempenho e toda uma gama de soluções entre esses dois extremos, que resultam em uma relação custo-desempenho otimizada. Todas essas soluções são igualmente otimizadas e, portanto, são igualmente boas, ou seja, em geral, não se pode afirmar que uma é melhor que a outra. Sendo assim, a maneira mais geral de se fazer o projeto de uma rede de forma mais flexível possível é buscar não somente uma solução única para o problema, mas um conjunto de soluções que otimizem o parâmetro custo/desempenho. Soluções desse tipo podem ser obtidas utilizando processos de otimização multiobjetivos.

Em uma rede óptica, os elementos que influenciam de forma mais preponderante o custo e o desempenho da rede são: o dimensionamento das características dos dispositivos ópticos empregados na rede Dimensionamento dos Dispositivos Ópticos (DDO), o projeto da topologia física da rede (PTD – *Physical Topology Design*), o algoritmo utilizado para fazer o roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*), o algoritmo utilizado para a colocação de regeneradores (RP – *Regenerator Placement*) e o algoritmo de utilização desses regeneradores (RA – *Regenerator Assignment*). A seguir, descreve-se de forma resumida cada um desses elementos destacando suas principais características:

Dimensionamento dos dispositivos ópticos (DDO) A soma dos custos dos dispositivos ópticos a serem empregados em uma rede óptica, tais como, fibras ópticas, regeneradores, ROADMs, OXCs, EDFAs e outros constitui um fator importante na composição do CapEx da rede. Além disso, seus parâmetros determinam como o sinal óptico será degradado pelas penalidades da camada física (PLI – *Physical Layer Impairments*). Ou seja, a escolha dos parâmetros desses dispositivos afeta tanto o CapEx como o desempenho da rede.

Projeto de topologia física (PTD) Decide como os nós da rede óptica devem ser conectados. Em outras palavras, decide quais são os enlaces que devem ser instalados na rede. Quanto maior o número de enlaces a serem instalados, maior é o CapEx da rede, e possivelmente melhor também é seu desempenho, pois mais recursos de infra-estrutura de telecomunicações estarão disponíveis para atender aos usuários da rede. O PTD pode ser pensado em duas vertentes diferentes: o PTD completo e o PTD de expansão. O PTD completo realiza o projeto total da

rede, ou seja, define quais enlaces devem ser instalados na rede assumindo que nenhum enlace foi ainda instalado. O PTD de expansão diz respeito a decisão sobre quais enlaces devem ser adicionados a uma rede que já está instalada.

Roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA) O algoritmo de RWA tem como objetivo selecionar uma rota e um comprimento de onda, através dos nós de uma rede óptica, com o intuito de estabelecer um caminho de comunicação entre dois nós da rede. Uma rota e um comprimento de onda ligando um dado nó fonte e um dado nó destino é definido como caminho óptico [2]. Em redes opacas, o RWA tenta encontrar caminhos ópticos de forma a efetuar um melhor balanceamento de carga entre os diversos enlaces da rede. Em redes ópticas TON e translúcidas, entretanto, o RWA tem uma tarefa extra. Como nessas redes pode haver acúmulo de PLI ao longo de um caminho óptico, esse algoritmo possui a tarefa adicional de encontrar caminhos ópticos que apresentem menor acúmulo de penalidades na camada física. Esses algoritmos são chamados de IA-RWA (IA-RWA – *Impairment Aware RWA*) [22]. O algoritmo de RWA tem forte impacto no desempenho da rede mas tem pouco impacto no seu CapEx, pois mudar o RWA de uma rede consiste, em geral, apenas na mudança no *software* de controle da rede.

Colocação de regeneradores (RP) Essa é uma decisão apenas aplicável às redes translúcidas. Consiste na escolha de quais nós da rede translúcida serão equipados com regeneradores 3R e quantos deles devem ser colocados em cada nó. O algoritmo de RP influencia no CapEx, no OpEx e no desempenho da rede. Quanto mais regeneradores forem colocados, mais custosa é a rede, devido ao custo unitário de cada regenerador (impacto no CapEx), melhor seu desempenho, pois mais caminhos ópticos podem ser regenerados (impacto no desempenho) e maior é o consumo de energia da rede (impacto no OpEx), pois os regeneradores precisam ser energizados.

Atribuição de regeneradores (RA) Essa decisão também se aplica apenas às redes translúcidas. A atribuição de regeneradores deve ser resolvida em tempo de operação da rede. Uma vez que se resolveu o RP, os regeneradores estão disponíveis para uso em cada nó da rede. A decisão de como usar esse recurso de regeneração 3R cabe ao algoritmo de RA. Ou seja, um caminho óptico pode seguir da origem até o destino totalmente no domínio óptico ou então ser regenerado em algum nó da rede. Essa decisão cabe ao algoritmo de atribuição de regeneradores.

Uma proposta eficiente para projeto de redes deve incluir todos esses elementos simultaneamente, uma vez que eles são interdependentes. Por exemplo, uma dada topologia física pode ser a melhor solução para o PTD, quando um determinado algoritmo de RWA é considerado. Entretanto, se um

outro algoritmo de RWA for utilizado, essa mesma topologia pode não ser a melhor opção. Imagine o caso no qual um algoritmo de RWA subutilize um determinado enlace (calculando poucas rotas passando por esse enlace), esse fato poderia levar o PTD a decidir por remover o enlace da topologia, tornando o processo de projeto muito mais eficiente. Considerações similares podem ser feitas para se inferir sobre a interdependência dos problemas de PTD com RA e o RP.

Os problemas de colocação de regeneradores [20], de roteamento e atribuição de comprimentos de onda [24] e de projeto de topologia física [25], considerando tráfego de rede estático são conhecidos na literatura por serem problemas pertencentes à classe denominada NP-completo. Na teoria da complexidade computacional, a classe NP-completo consiste em problemas de decisão para os quais não se conhece algoritmos determinísticos que os solucionem em tempo polinomial ¹. As soluções conhecidas para problemas NP-completos são de ordem exponencial. Isso significa que o tempo (ou número de passos) necessário para encontrar a solução ótima para um problema pertencente a essa classe cresce exponencialmente (ou com uma taxa similar à taxa de uma exponencial) com o aumento no número de variáveis de entrada do problema. Algumas vezes, a solução ótima para esses problemas envolve uma busca exaustiva (*i.e.* testar todas as possibilidades de entradas). Dessa forma, encontrar a solução ótima para os problemas de RWA, PTD e RP pode ser computacionalmente inviável mesmo considerando um reduzido número de variáveis de entrada.

Para tratar da solução desses problemas de forma viável é possível a utilização de algoritmos aproximados [26] ou heurísticos. O primeiro fornece um algoritmo que garante uma solução quase ótima para alguns problemas NP-completos (com um valor de saída próximo ao ótimo), apresentando uma complexidade computacional bastante reduzida em relação ao problema original. O segundo se utiliza de informação ou intuição que se tem a respeito dos problemas para resolvê-lo de forma rápida. Ambas as estratégias permitem a solução de problemas computacionalmente complexos em um tempo viável. Entretanto, elas não garantem que essa solução é ótima. Neste trabalho, optou-se pela abordagem heurística para solução dos problemas listados. Vale destacar que nenhum algoritmo que utiliza a abordagem de algoritmos aproximados foi encontrado na literatura para solução dos problemas de PTD, RWA e RP (esses nas mesmas condições tratadas nesta Tese).

Ao se adotar a forma heurística, para solução dos problemas de interesse para esta Tese, têm-se duas alternativas:

1. Utilizar heurísticas baseadas apenas nas crenças ou experiências do projetista de rede (que podem estar certas ou não),

¹Essa é uma conjectura da teoria da complexidade computacional para qual não se conhece, até o momento, uma demonstração.

2. Utilizar um conjunto de heurísticas adaptativas que descubrem soluções otimizadas para o problema apresentado de forma automática. A inteligência computacional fornece ferramentas muito eficientes e eficazes que implementam a segunda alternativa. Esses algoritmos são conhecidos como algoritmos metaheurísticos [27].

Muitos desses algoritmos metaheurísticos são inspirados em processos de otimização realizados na natureza por sistemas vivos. Por isso, também são chamados de algoritmos bio-inspirados. Como exemplo tem-se: algoritmos genéticos (GA – *Genetic Algorithm*), otimização por enxame de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*), otimização por colônia de formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*), redes neurais artificiais (ANN – *Artificial Neural Networks*), entre outros [28]. Os algoritmos metaheurísticos realizam a otimização de forma iterativa, avaliando diversas soluções candidatas para um determinado problema. Dependendo da avaliação feita, um conjunto de ações é aplicado às soluções avaliadas para que elas sejam alteradas para a iteração seguinte do processo. Ou seja, o algoritmo metaheurístico só precisa ter uma forma objetiva (numérica ou analítica) para avaliar se uma solução é boa ou ruim. A otimização em si fica por conta do algoritmo metaheurístico. Essa é uma solução elegante que se encaixa de forma perfeita nos diversos problemas envolvidos no projeto de redes, elencados nos parágrafos anteriores. Isto é, problemas computacionalmente complexos (os quais serão otimizados pelas metaheurísticas) e cujas possíveis soluções são avaliadas de forma objetiva (numérica). Por exemplo, pode-se avaliar objetivamente o custo de implementação de uma rede e seu desempenho.

O uso da inteligência computacional e dos algoritmos bio-inspirados para se otimizar diversos aspectos de redes de comunicação vem ganhando destaque nos últimos anos. Publicações especializadas em redes têm reservado edições especiais completas dedicadas a esse tema [29, 30].

1.3 Escopo da Tese

Como visto nas seções anteriores, a aplicação das redes ópticas vem crescendo muito nos últimos anos. Por essa razão, é importante fazer uso de uma metodologia para realizar o projeto de tais redes de forma eficiente. Um projeto de redes eficiente deve levar em consideração a solução de muitos subproblemas que são complexos do ponto de vista computacional. Além disso, em termos práticos é razoável imaginar que o projeto de rede deva ser realizado de forma otimizada considerando os parâmetros de custo (CapEx) e desempenho da rede óptica. O objetivo principal desta Tese é propor um algoritmo que realize o projeto de redes ópticas nesses termos.

Para tal, foram eleitos os principais elementos que afetam de forma mais destacada a relação custo/desempenho em uma rede óptica:

- ▷ Projeto da topologia física da rede (PTD);
- ▷ Dimensionamento dos dispositivos ópticos (DDO) que serão instalados na rede;
- ▷ Projeto do algoritmo de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA);
- ▷ Projeto de redes ópticas translúcidas, considerando os problemas de colocação de regeneradores (RP) e de atribuição de regeneradores (RA).

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para realizar projeto de redes ópticas considerando todos esses elementos conjuntamente, de forma integrada e otimizada. O projeto de redes é efetuado segundo uma abordagem multiobjetiva cuja meta é a redução simultânea do CapEx da rede e da sua probabilidade de bloqueio (probabilidade de bloqueio é uma medida de desempenho de rede, definida nos próximos capítulos). Adotou-se a abordagem de se estudar cada elemento eleito de forma separada antes de se fazer o projeto integrado. As contribuições desta Tese para cada um desses elementos elencados são:

Para o problema de RWA – Proposição de uma nova metodologia para se projetar um algoritmo de RWA. Em especial, a proposta apresentada é capaz de tratar as PLIs da rede tornando essa metodologia capaz de projetar algoritmos IA-RWA. A abordagem proposta faz uso da técnica de otimização PSO [31];

Para o problema de RP – Proposição de dois novos algoritmos heurísticos para a solução do problema. Além disso, também é proposto um novo algoritmo multiobjetivo para realizar o RP capaz de otimizar simultaneamente CapEx, OpEx e probabilidade de bloqueio da rede. A técnica de otimização multiobjetiva baseada em algoritmos genéticos denominada NSGA-II (NSGA-II – *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) [32] é usada como otimizador do RP;

Para o problema de RA – Proposição de um novo algoritmo heurístico para se solucionar o problema de RA;

Para o problema de projeto e expansão de rede – Proposição de solução integrada para os problemas de projeto da topologia física da rede e determinação dos dispositivos ópticos que serão instalados na rede. Eles são tratados de forma conjunta por meio de otimização multiobjetiva. A otimização multiobjetiva também é realizada pelo algoritmo NSGA-II. O problema de PTD é tratado nas suas duas vertentes, PTD total e PTD de expansão, ambos em conjunto com o

DDO. Por fim, é proposto um algoritmo de projeto de redes que integra os problemas de PTD (em suas duas vertentes), DDO e RP. Nesse último caso, o projeto de rede proposto apresenta uma forma otimizada (multiobjetiva) de se resolver simultaneamente o PTD, o DDO e o RP.

1.4 Estrutura do Texto

Esta Tese está estruturada da seguinte forma: no Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica referente aos algoritmos de RWA, RP, RA e PTD. No Capítulo 3 é discutida a modelagem matemática e a ferramenta de simulação utilizada para obtenção dos resultados apresentados neste trabalho. No Capítulo 4 é apresentada a proposta de uma metodologia para se projetar o algoritmo de roteamento de uma rede óptica. No Capítulo 5 é apresentada a proposta para se solucionar o problema de RA, além de três propostas para resolução do problema de RP (duas heurísticas e uma metaheurística multiobjetiva). No Capítulo 6 são apresentadas diversas propostas para a realização do projeto de topologia física de redes transparentes e translúcidas. Além disso, é apresentada uma proposta para realização da expansão de uma rede óptica já instalada. No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões da Tese. No Apêndice A são mostradas a interface gráfica e os casos de uso do simulador. No Apêndice B é mostrada a lista de publicações do autor.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

*If I have seen a little farther than others it is
because I have stood on the shoulders of gi-
ants.*

— Isaac Newton

O principal objetivo deste trabalho é o estudo de três aspectos importantes concernentes ao projeto de redes ópticas, são eles: o algoritmo de RWA, o projeto de redes translúcidas, considerando características tanto de implantação da rede (colocação de regeneradores) quanto de operação (atribuição de regeneradores), e o projeto total de redes ópticas. Neste capítulo é feita uma revisão da literatura dos trabalhos sobre esses três aspectos.

2.1 Roteamento e atribuição de comprimento de onda – RWA

Como discutido no Capítulo 1, uma rede óptica é composta por nós e enlaces. Os enlaces interligam os nós da rede. Em cada enlace são utilizados vários comprimentos de onda distintos multiplexados (WDM). O estabelecimento de uma conexão entre dois nós da rede só é possível mediante a seleção de uma rota (composta por um ou mais enlaces), e de um comprimento de onda disponível em cada um dos enlaces componentes da rota escolhida. Esse par rota-comprimento de onda é denominado **caminho óptico**. O processo de obtenção de um caminho óptico, ou seja, uma rota e um comprimento de onda para atender cada pedido de conexão solicitado por um usuário é conhecido

como roteamento e atribuição de comprimentos de onda

Basicamente, há três formas do usuário solicitar pedidos de conexão à rede: estática, incremental e dinâmica [2, 24, 33]. Na primeira delas, que é o estabelecimento de caminhos ópticos estáticos (SLE – *Static Lightpath Establishment*), o conjunto de conexões é conhecido *a priori*. No caso de tráfego SLE, podem existir dois objetivos para o RWA: encontrar caminhos ópticos de modo a minimizar a utilização de recursos de rede, como o número de comprimentos de onda, ou tentar estabelecer o máximo número de conexões possíveis na rede para um determinado número fixo de comprimentos de onda [24, 33]. No caso incremental, pedidos de conexão chegam sucessivamente à rede e, uma vez que um caminho óptico é estabelecido para uma conexão, ele permanece ativo indefinidamente na rede [24, 33]. No caso dinâmico, os pedidos de conexão chegam sucessivamente à rede, mas diferentemente do caso incremental, o caminho óptico é liberado após permanecer ativo por um certo tempo [24, 33]. O objetivo do RWA para estes dois últimos cenários é encontrar uma rota e atribuir um comprimento de onda a cada pedido de conexão de forma a minimizar a quantidade de conexões bloqueadas, ou seja, maximizar o número de conexões aceitas pela rede. Uma conexão é bloqueada quando os recursos necessários para atendê-la não estão disponíveis, ou seja, estão ocupados por outros usuários, de forma que a rede não pode estabelecer essa nova requisição. Os casos dinâmico e incremental são conhecidos como estabelecimento dinâmico de caminho óptico (DLE – *Dynamic Lightpath Establishment*) [24]. Todos os resultados apresentados neste trabalho consideram redes dinâmicas em um cenário DLE.

Os algoritmos empregados para solução de RWA em um cenário DLE utilizam principalmente duas abordagens. A mais comum delas é dividir o problema de RWA em dois problemas separados: o problema de roteamento (R) e o problema de atribuição de comprimento de onda (WA), os quais são resolvidos de forma independente [24, 33]. Outra abordagem possível é a de resolver o RWA de forma conjunta, ou seja, resolver o R e o WA sem separá-los [24, 33]. Em geral, o primeiro método é preferido, pois reduz a complexidade do algoritmo de roteamento facilitando seu projeto. Entretanto, a segunda abordagem é capaz de proporcionar um melhor desempenho de rede, principalmente em redes grandes e bem conectadas (*i.e.* redes com nós bastante conectados) [17, 33, 34].

As primeiras proposições para solução do RWA apenas tratavam do desenvolvimento de um algoritmo capaz de distribuir carga na rede e gerenciar melhor os comprimentos de onda [35, 36]. Essa é uma abordagem satisfatória para as redes ópticas opacas, nas quais o sinal é regenerado a cada nó, ficando assim o sinal com um nível desprezível de degradação. Entretanto, com o avanço das redes totalmente ópticas e translúcidas, essa regeneração a cada nó não é mais realizada, surgindo

um outro fator limitante com o qual o RWA precisa lidar: o ruído acumulado ao longo dos caminhos ópticos [22, 34]. Por isso, recentemente vem aumentando o interesse no desenvolvimento de algoritmos de RWA que consideram os ruídos acumulados na camada óptica da rede [37–43]. Os algoritmos de RWA que levam em consideração esses ruídos são conhecidos na literatura como IRWA (IRWA – *Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment*) [44], ICBR (ICBR – *Impairment Constraint Based Routing*) [45, 46] ou IA-RWA [41, 47, 48]

2.1.1 Roteamento

O roteamento em uma rede consiste em encontrar um conjunto de enlaces, pertencentes à rede, interligando dois de seus nós, de forma a estabelecer uma conexão entre esses nós. Seria plausível pensar que, além de encontrar uma rota, é desejável encontrar também a melhor rota para atender a um determinado par de usuários que desejem se comunicar.

Por exemplo, se alguém desejasse viajar de carro entre duas cidades, provavelmente, a melhor rota seria o conjunto de rodovias que interligasse as duas cidades com a menor distância possível. Para encontrar essa melhor rota poderia ser associada, a cada rodovia, um custo que, neste caso, seria o comprimento da rodovia. Somando o custo de todas as rodovias utilizadas na viagem, obtém-se o custo total de um determinado caminho. A partir disso, encontra-se o caminho mais curto possível, ou seja, de menor custo. Traçando um paralelo com esse exemplo, uma rede óptica é representada por um grafo cujas arestas são associadas a um custo. Existem vários custos possíveis que podem ser utilizados, entre eles: retardo, distância, número de saltos, entre outros [3].

O problema de roteamento é, normalmente, resolvido da seguinte maneira:

1. representa-se a topologia da rede por um grafo;
2. calcula-se o custo de cada enlace (aresta do grafo) utilizando alguma métrica (custo) pré-estabelecida;
3. utiliza-se um algoritmo que encontra a rota de menor custo total entre os nós que desejam realizar uma conexão [11, 24].

Com relação às métricas para se calcular o custo relativo a cada enlace, diversas medidas podem ser usadas e várias delas já foram propostas na literatura [35, 36, 49]. Com respeito ao algoritmo que encontra a rota de menor custo, os mais comuns são o algoritmo de menor caminho de Dijkstra e de Bellman-Ford [3]. O algoritmo de menor caminho, proposto por Dijkstra, é capaz de encontrar a rota de menor caminho sem ter que investigar todas as rotas possíveis que interligam dois nós [3].

A forma com que o custo do enlace é calculado e os parâmetros que são levados em consideração durante esse cálculo dão origem a três classificações para os algoritmos de roteamento: roteamento fixo, roteamento fixo alternativo e roteamento adaptativo [24]. A seguir, cada um deles é descrito em detalhes.

Roteamento com rota fixa (FR) – A forma mais simples de se rotear uma conexão é sempre escolher a mesma rota para um dado par de nós fonte-destino. Neste caso, o custo relativo a cada enlace independe do estado atual da rede, ou seja, é fixo. Ele depende, no entanto, de algum parâmetro pertinente ao próprio enlace (*e.g.* tamanho físico do enlace). Por isso, a rota para cada par fonte-destino é escolhida antes da rede entrar em operação em um processo *offline* que monta uma tabela fixa de roteamento. Uma vez escolhido o custo do enlace, o algoritmo de Dijkstra ou de Bellman-Ford pode ser usado para a determinação da tabela. Em tempo de operação, cada vez que uma conexão é requisitada, a rede consulta a tabela de roteamento e determina a rota que deve ser usada para atender a essa requisição [3, 24, 33]. Apesar de ser de simples implementação, esse algoritmo tem a desvantagem de utilizar mal os recursos de rede, o que pode acarretar uma alta probabilidade de bloqueio de requisições de conexões por falta de recursos disponíveis. Aliado a esta desvantagem, existe outro problema: algoritmos de roteamento fixo são incapazes de contornar situações de falha nas quais um ou mais enlaces deixam de operar por algum motivo, pois na tabela de roteamento há somente um caminho disponível para cada par fonte destino [24].

Roteamento com rota fixa alternativa (FAR) – É um esquema de roteamento que considera múltiplas rotas fixas para cada par fonte-destino. No roteamento fixo-alternativo, cada nó da rede mantém uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada das várias rotas possíveis para cada nó destino [24, 33]. Por exemplo, essas rotas poderiam incluir a rota mais curta, a segunda rota mais curta, a terceira rota mais curta, e assim por diante [24]. O conjunto das possíveis rotas ligando um par fonte-destino também é calculado antes da operação da rede. Uma rota alternativa entre origem e destino é qualquer rota que não compartilhe nenhum enlace com a rota primária (rotas disjuntas) [24]. Quando um pedido de conexão chega, o nó fonte tenta estabelecer a conexão em cada uma das rotas presentes em sua tabela de roteamento do nó fonte, em sequência, até que uma rota disponível seja encontrada. O roteamento fixo alternativo provê simplicidade de controle para admissão e retirada de chamadas e também alguma tolerância à falha em enlaces se rotas alternativas (rotas disjuntas) forem utilizadas nas tabelas de roteamento. Outra vantagem do roteamento fixo alternativo é que ele pode reduzir signifi-

cativamente a probabilidade de bloqueio de chamadas quando comparado com o esquema de roteamento fixo, pois existem várias opções de rotas possíveis para uma determinada requisição [24].

Roteamento adaptativo (AR) – No esquema de roteamento adaptativo, a rota escolhida para atender uma requisição de conexão entre um par fonte-destino é determinada dinamicamente, dependendo do estado atual da rede [24, 33]. Esse estado é determinado pelo conjunto de todas as conexões em progresso no momento. Quando um pedido de conexão chega à rede, o caminho de menor custo entre o nó fonte e o nó destino é determinado. Para cada nova chamada, um novo caminho é encontrado. Um possível custo adaptativo para um enlace seria o número de canais ativos no enlace, de forma que um algoritmo que utilizasse essa métrica encontraria rotas passando por enlaces pouco carregados, distribuindo assim, a carga na rede. Uma dificuldade na implementação de roteamentos adaptativos é que eles requerem extenso apoio dos protocolos de gerência e controle, para que esses últimos atualizem continuamente suas bases de dados com o estado atual da rede. Uma vantagem do esquema adaptativo é a sua capacidade de fornecer uma baixa probabilidade de bloqueio de chamadas pela rede quando comparado com os roteamentos de rota fixa e de rota fixa alternativa, pois a cada nova requisição, a melhor rota atualmente disponível é encontrada seguindo uma métrica pré-estabelecida. Como a rota é calculada a cada nova chamada, o AR apresenta outra vantagem: ela é mais resistente a falhas nos enlaces do que as outras abordagens.

2.1.2 Atribuição de comprimento de onda

Como foi visto na seção anterior, quando uma conexão é requisitada à rede óptica, é necessário encontrar uma rota para atender a esse pedido. Entretanto, como em cada enlace de uma rede óptica WDM existem diversos comprimentos de onda, cada um podendo transportar uma informação diferente, é necessário, além de encontrar uma rota, definir também qual comprimento de onda será utilizado para se estabelecer a chamada. O algoritmo que estabelece qual comprimento de onda será utilizado é chamado de algoritmo de atribuição de comprimento de onda (WA – *Wavelength Assignment*). Muitos algoritmos de atribuição de comprimento de onda foram propostos na literatura. Os mais simples e mais utilizados são os de atribuição aleatória (R), *first fit* (FF) e mais usado (MU) [24, 33]. Esses algoritmos são descritos a seguir.

Atribuição aleatória – Nesse esquema, primeiro procura-se o conjunto de todos os comprimentos de onda que estão disponíveis para a rota encontrada, *i.e.* os comprimentos de onda que não

estão ativos no momento. Entre os comprimentos de onda disponíveis, um é escolhido, aleatoriamente, seguindo uma distribuição de probabilidade uniforme.

Atribuição *first fit* (FF) – Nesse esquema, todos os comprimentos de onda são numerados e dispostos em uma lista. Ao ser requisitado um comprimento de onda, o algoritmo fornece o primeiro comprimento de onda da lista. Se este não puder ser usado, o segundo comprimento de onda da lista é tentado e assim sucessivamente. Esse esquema não requer nenhuma informação global sobre o estado atual da rede. Em comparação com o algoritmo de atribuição aleatória, o esquema de *first fit* apresenta uma menor complexidade computacional, pois uma geração de números aleatórios a cada vez que o algoritmo é executado não é necessária. Além disso, na maioria dos casos, o desempenho do FF supera o desempenho do esquema de atribuição aleatória [24]. A idéia do *first fit* é empacotar todos os comprimentos de onda em uso na rede nos menores índices da lista de comprimentos de onda, de forma que os comprimentos de onda com maiores índices fiquem livres para um possível estabelecimento de rotas mais longas.

Atribuição mais usado (MU - *Most Used*) – Nesse esquema, todos os comprimentos de onda são indexados de acordo com a sua frequência de transmissão. Ao ser requisitado um comprimento de onda, o algoritmo realiza uma pesquisa em toda a rede com o objetivo de encontrar qual é o índice do comprimento de onda que está sendo mais utilizado na rede. Esse último é devolvido como resposta do algoritmo MU. A ideia do MU é uma radicalização do *first fit*: tentar compactar o uso dos comprimentos de onda de forma ainda mais rigorosa que a feita pelo FF. Entretanto, como o MU sempre tenta atribuir o comprimento de onda mais usado, ele consegue uma compactação melhor que o FF. Por isso, em geral, o MU é ligeiramente superior ao FF em termos de desempenho. Por outro lado, o MU tem a necessidade de informação global da rede para saber qual comprimento de onda é o mais utilizado na mesma em um dado instante de tempo.

2.1.3 RWA conjunto (JWR)

Os algoritmos descritos na seção anterior resolvem o RWA em duas etapas independentes e sucessivas: o roteamento e a atribuição de comprimentos de onda. Apesar desses algoritmos serem mais simples de se projetar, a solução para o roteamento e a atribuição de comprimentos de onda feitos de forma conjunta, em geral, resulta em um desempenho de rede superior, uma vez que esses problemas são correlacionados [17, 33]. Seguindo a nomenclatura utilizada por Murthy e Gurusamy [33] esses algoritmos são conhecidos pela sigla JWR (*Joint Wavelength-Route*). Neles, o custo para o

estabelecimento de conexão por um determinado caminho óptico é calculado caminho óptico por caminho óptico, ou seja, para cada par rota comprimento de onda. Por exemplo, se existem cinco rotas entre os nós a e b , em uma rede com cinco comprimentos de onda por enlace, existem 25 possíveis caminhos ópticos para o atendimento de uma chamada entre a e b . O custo associado a cada um destes 25 caminhos ópticos pode ser calculado e se escolhe, por exemplo, o caminho óptico de menor custo dentre essas 25 possibilidades. Ainda utilizando esse exemplo, em um esquema que separe o RWA em duas etapas independentes, seria necessário se calcular o custo para apenas cinco rotas, além é claro, da determinação do comprimento de onda. Pelo exemplo, vê-se que em uma rede com W comprimentos de onda por enlace, o número de cálculos de custo de rota é multiplicado por W para o JRW em relação ao RWA com etapas independentes. Apesar desse último ter de determinar o comprimento de onda que será utilizado após a determinação da rota, ele é, em geral, bem mais rápido que o RWA-JRW.

2.1.4 RWA levando em conta a camada física (IA-RWA)

Até aqui, foram apresentados os algoritmos clássicos para se resolver o problema de RWA. Nenhuma consideração a respeito da degradação do sinal óptico na camada física foi feita. No início da Seção 2.1, foi discutida a importância da aplicação de algoritmos de IA-RWA, os quais são RWA que levam em conta as penalidades impostas ao sinal óptico pela camada física. Os algoritmos tradicionais apresentados não levam em conta a camada física e por isso são inadequados para serem usados em redes transparentes ou translúcidas [12, 17, 34, 45]. Recentemente, muitos esforços têm sido empregados para o desenvolvimento de IA-RWA eficientes [37–43, 48, 50–52]

Como foi visto, os algoritmos de roteamento encontram caminhos para uma requisição de conexão tentando minimizar uma certa função-custo. Os vários efeitos da camada física da rede que degradam o sinal óptico podem ser associados, cada um, a uma determinada função-custo para se montar um IA-RWA. Idealmente, os algoritmos de IA-RWA devem se preocupar em encontrar caminhos ópticos nos quais os sinais ópticos sejam menos degradados pela camada física. Mas só isso não é suficiente. Além disso, devem encontrar rotas que atendam aos requisitos de desempenho de rede como uma utilização otimizada de comprimentos de onda e uma distribuição adequada de carga entre os diversos enlaces da rede [45]. Todos estes parâmetros heterogêneos devem ser modelados de maneira unificada, atendendo aos dois critérios simultaneamente. Isso é particularmente difícil, uma vez que, frequentemente, um caminho que é selecionado por ter a melhor qualidade de sinal pode ser um caminho que prejudique o desempenho de rede, congestionando em demasia um determinado

enlace. Por outro lado, pode ser encontrado um outro caminho, que ainda atenda aos critérios de qualidade de serviço e seja muito mais adequado para o desempenho da rede [45].

Além disso, existem outros aspectos relevantes. Como há muitos tipos de penalidades na camada física, a decisão de quais delas devem ser levadas em conta no processo de IA-RWA pode variar consideravelmente dependendo de aspectos como: detalhes de projeto de equipamento de cada fornecedor, características da fibra óptica utilizada, características de serviço (por exemplo, taxa de transmissão requerida), tamanho e topologia da rede, engenharia do operador de rede e estratégias aplicadas.

Por exemplo, uma rede metropolitana que não pretende utilizar taxas maiores de que 2,5 Gb/s pode não ser limitada por nenhuma penalidade da camada física, ou seja, o algoritmo de RWA não precisaria levar em conta essas penalidades. Por outro lado, uma rede continental que deseja minimizar a quantidade de regeneração O/E/O e suportar conexões com taxas de 40 Gb/s deveria considerar muitas das penalidades explicitamente [34].

Toda essa pesquisa em torno do desenvolvimento de IA-RWA leva a algoritmos cada vez mais elaborados e com desempenho de rede muito superior aos conseguidos pelas abordagens clássicas. Embora esquemas IA-RWA apresentem um melhor desempenho de rede, eles também são computacionalmente mais complexos. Há também uma dificuldade adicional no desenvolvimento de algoritmos IA-RWA: a falta de regeneração elétrica nas redes totalmente ópticas torna difícil a obtenção dos parâmetros necessários para implementá-los [46]. Dispositivos adicionais devem ser implantados na rede para se obter os parâmetros necessários da camada óptica. Para evitar esse custo adicional na implantação de novos equipamentos, pode-se optar pela utilização de modelos analíticos capazes de estimar o impacto de cada penalidade em cada rota. O problema dessa abordagem é a dificuldade de desenvolvimento de tais modelos (principalmente quando efeitos não lineares são incluídos) e o tempo de resposta desses algoritmos, uma vez que as modelagens das penalidades físicas são bastante complexas e as implementações costumam ser lentas.

A maioria dos trabalhos descritos na literatura para o desenvolvimento de IA-RWA em redes ópticas limitadas pela degradação da camada física pode ser classificada em três grandes grupos. Na primeira categoria (tipo 1), o algoritmo de RWA é tratado em dois passos: primeiro é feita uma computação de caminho óptico em um módulo de camada de rede. Isso significa que é executado um algoritmo que não leva em consideração a degradação da relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal to Noise Ratio*), o qual fornece uma rota e um comprimento de onda (se houver alguma disponível). Em seguida, uma verificação de caminho óptico é executada pelo módulo PLI, ou seja,

é calculado o total de degradação do sinal ao longo do caminho óptico encontrado, e esse valor é comparado com um limiar de qualidade de serviço pré-estabelecido. Foram propostos na literatura vários esquemas de RWA diferentes usando essa ideia. Ramamurthy *et al.* modelaram o algoritmo de IA-RWA levando em conta o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) gerado no amplificador óptico (EDFA) e o *crosstalk* adicionado pelo comutador óptico, comparando a taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) calculada com um determinado limiar de qualidade de serviço [21]. Huang e colaboradores modelaram o algoritmo de IA-RWA levando em consideração a penalidade devido à dispersão por modo de polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*) e à OSNR, comparando-os, separadamente, em relação a dois limiares distintos, um para a penalidade de OSNR e outro para a penalidade de PMD [49].

Na segunda categoria (tipo2), o algoritmo de RWA é tratado em três passos: primeiro é feito um cálculo de caminhos ópticos em um módulo de camada de rede, resultando, como no caso anterior, em um (ou nenhum) caminho óptico possível para cada comprimento de onda. Então, para cada possível caminho óptico encontrado, é executada a verificação pelo módulo de camada física, comparando o critério de OSNR pré-estabelecido com o resultado calculado para cada caminho óptico. Entre os caminhos ópticos que passam na verificação de módulo de camada física (*i.e.* caminhos ópticos que têm qualidade de serviço aceitável) é escolhido o melhor, considerando alguma métrica. Pointurier *et al.* [53] usam essa técnica para desenvolver um esquema de roteamento baseado no fator Q que incorpora os efeitos do *crosstalk* heterodino no módulo de verificação de camada física. Anagnostopoulos e colaboradores desenvolveram uma abordagem semelhante, considerando também a mistura de quatro ondas (FWM – *Four Wave Mixing*), a modulação de fase cruzada (XPM – *Cross Phase Modulation*) e o ruído ASE gerado no EDFA [54].

Na terceira categoria (Tipo3) está o algoritmo IA-RWA-JWR, isto é, o algoritmo executa o roteamento e a atribuição de comprimentos de onda juntos, levando em consideração a degradação do sinal imposta pela camada física. Martins-Filho *et al.* [55] propõem um algoritmo de roteamento dinâmico baseado em encontrar rotas que menos degradem a OSNR (caminho com a menor NF), incluindo para tal, o acúmulo de ASE, a saturação de ganho de amplificador e a dependência do ganho do amplificador com o comprimento de onda. Cardillo *et al.* [50] propõem usar o modelo de OSNR considerado por Huang *et al.* [49] com algumas penalidades adicionais: efeitos não lineares que acontecem ao longo da transmissão. Kulkarni *et al.* [56] utilizam o fator Q como um parâmetro de desempenho, levando em conta os efeitos das penalidades de dispersão cromática, PMD, ruído ASE, XPM e concatenação de filtro.

2.1.5 Algoritmos de RWA utilizados como comparação na Tese

Foram selecionados três algoritmos de RWA propostos na literatura com o intuito de realizar comparações entre esses e o algoritmo de RWA proposto nesta Tese. Os dois primeiros selecionados resolvem o RWA dividindo-o em dois problemas: roteamento e atribuição de comprimento de ondas. Para o roteamento, foram escolhidos o SP (SP – *Shortest Path*) e o LRW (LRW – *Least Resistance Weigth*), ambos utilizando o *First Fit* como algoritmo de atribuição de comprimentos de onda. O outro algoritmo de RWA selecionado pertence às classes IA-RWA e JWR. Sua sigla é OSNR-R (OSNR-R – *Optical Signal to Noise Ratio Routing*). Eles são detalhadamente descritos a seguir:

SP: A função custo de cada enlace ($w_{i,j}$) corresponde à distância física entre os nós i e j da rede ($d_{i,j}$) [36] dada por

$$w_{i,j} = d_{i,j}. \quad (2.1)$$

Portanto, o custo de cada enlace é fixo, ou seja, esse algoritmo é do tipo FR. Ele foi escolhido para comparação pois ele é o algoritmo mais elementar e o mais utilizado na literatura para avaliação de desempenho de algoritmos de roteamento.

LRW: A função custo $w_{i,j}$ do enlace que interliga os nós i e j é calculada utilizando uma métrica cujo objetivo é encontrar o caminho menos congestionado, ou seja, encontrar uma rota que passe por enlaces com menor número de comprimento de onda ativos. No esquema LRW, $w_{i,j}$ é calculado por [35]

$$w_{i,j} = \begin{cases} \frac{C_{\max}^T}{C_{i,j}^A} & \text{se } C_{i,j}^A \neq 0, \\ \infty & \text{se } C_{i,j}^A = 0, \end{cases} \quad (2.2)$$

em que $C_{i,j}^A$ representa o número de comprimentos de onda disponíveis no enlace, $C_{i,j}^T$ o número total de comprimentos de onda em um enlace e C_{\max}^T o número máximo de comprimentos de onda, ou seja, $C_{\max}^T = \max(C_{i,j}^T)$. Pela equação, pode-se notar que quanto maior o número de comprimentos de onda disponíveis no enlace ($C_{i,j}^A$), menor é o custo do enlace, uma vez que $w_{i,j}$ é inversamente proporcional a $C_{i,j}^A$. Essa função-custo é interessante a título de comparação, uma vez que ela é capaz de balancear a carga na rede. O LRW é um algoritmo de roteamento adaptativo que resolve os problemas de R e WA de forma separada.

OSNR-R: O objetivo desse RWA é encontrar a rota com menor degradação da OSNR para um determinado comprimento de onda [19]. Uma característica interessante do OSNR-R é que ele faz, naturalmente, uma distribuição de carga na rede. Isso porque os enlaces mais ocupados

da rede tendem a causar maior degradação na relação sinal-ruído dos sinais do que os menos ocupados. Como o algoritmo escolhe o caminho com a maior relação sinal-ruído, os caminhos mais ocupados serão evitados, pois terão maior custo. Matematicamente, se $\pi(i, j)$ representa todas as rotas possíveis entre os nós i e j e $f_{\text{OSNR}}[\pi(i, j), \lambda]$ representa a relação sinal-ruído óptica ao final de uma dada rota $\pi(i, j)$ no comprimento de onda λ , então, a rota determinada pelo algoritmo OSNR-R em λ pode ser expressa por

$$R_{i,j}^{\lambda} = \max \{f_{\text{OSNR}} [\pi(i, j), \lambda]\}. \quad (2.3)$$

Como o *first fit* é utilizado para a atribuição de comprimentos de onda, $R_{i,j}^{\lambda}$ é escolhido para o λ de menor índice que esteja disponível em todos os enlaces pertencentes à rota $\pi(i, j)$. Essa função-custo foi escolhida para comparação de desempenho, pois é uma função de alto desempenho em redes limitadas por penalidades físicas. Perceba que o OSNR-R é um algoritmo de roteamento adaptativo que resolve os problemas de R e WA conjuntamente. Além disso, claramente o OSNR-R é um algoritmo IA-RWA.

2.2 Projeto de redes translúcidas com topologia fixa

Como discutido no Capítulo 1, as primeiras redes ópticas a serem empregadas foram as redes opacas. Logo se percebeu que as redes WDM opacas eram financeiramente muito custosas e, portanto, uma nova abordagem precisava ser pensada para a implementação de redes ópticas. A solução proposta foi a eliminação de toda a eletrônica usada no meio dos caminhos ópticos, movendo-a apenas para suas bordas, onde ela é indispensável. Essa solução é o que se conhece como rede transparente. Entretanto, o acúmulo de degradação do sinal óptico faz com que a rede transparente tenha uma perda de desempenho significativa em relação às redes opacas.

Em 1999, Ramamurthy *et al.* [21] propuseram uma nova abordagem para a implementação de redes ópticas: as redes translúcidas. A proposta inicial foi usar os *transponders* (interfaces de conversão O/E/O) que não estavam sendo usados na interface de inserção/remoção como regeneradores a fim de se recuperar o sinal óptico que estivesse muito prejudicado pela camada física. Quase ao mesmo tempo, Saleh [57] propôs uma estrutura de redes translúcidas baseada no seccionamento da rede em diversos grupos transparentes.

As redes translúcidas constituem uma rede transparente na qual alguns nós possuem capacidade de regeneração. A regeneração do sinal é realizada nos regeneradores. Os regeneradores podem ser eletrônicos ou totalmente ópticos. Os regeneradores totalmente ópticos prometem reduzir ainda mais

o custo da implantação de redes transparentes. Entretanto, essa é uma tecnologia que ainda está em desenvolvimento. Atualmente, a regeneração é realizada utilizando principalmente regeneradores eletrônicos. Eles, transformam o sinal óptico em elétrico, o processam eletronicamente, e depois o sinal é reconvertido para o domínio óptico. Os regeneradores podem realizar três operações no sinal óptico: amplificação, reformatação e retemporização do pulso óptico [2]. A amplificação corrige problemas gerados pela atenuação do sinal óptico na camada física, a reformatação corrige problemas de dispersão gerados na camada óptica, enquanto a retemporização corrige falhas na sincronização na transmissão do sinal óptico. O regenerador que realiza essas três tarefas simultaneamente é chamado de regenerador 3R [2].

Dependendo de como os regeneradores são dispostos em um nó, esse nó recebe diferentes denominações. Se um dado nó não possui regeneradores, então ele é chamado de **nó transparente**. Se todos os caminhos ópticos que passam em um dado nó são obrigatoriamente regenerados, então este nó é chamado de **nó opaco**. Se alguns caminhos ópticos que passam em um dado nó são regenerados e, outros não, denomina-se esse nó de **nó translúcido** [20]. Em um nó translúcido existe uma quantidade limitada de regeneradores que pode não atender a todos os caminhos ópticos que passam em um nó simultaneamente.

2.2.1 Colocação de regeneradores

Se em uma rede translúcida, alguns nós são transparentes e outros são translúcidos ou opacos, então a pergunta que surge é como escolher qual deverá ser o tipo de cada um dos nós da rede. Além disso, uma outra decisão precisa ser tomada se o nó for translúcido: a quantidade de regeneradores colocada no nó. O problema descrito até aqui é denominado na literatura de colocação de regeneradores (RP). O problema de RP é relativo ao planejamento de rede, ou seja ele deve ser resolvido antes de sua operação. Existem duas abordagens para o tratamento da colocação de regeneradores, a colocação esparsa e a formação de ilhas de transparência [20]:

Ilhas de transparência – Na abordagem de ilhas de transparência são formadas diversas redes transparentes na rede óptica. Os nós da rede são divididos em diversos agrupamentos chamados de ilhas de transparência. Cada nó pertencente a uma ilha de transparência deve, necessariamente, ter uma ligação física com todos os nós pertencentes à mesma ilha. Nas bordas de cada agrupamento são instalados nós opacos. Os nós no interior de uma ilha permanecem transparentes. Ou seja, como só há nós com regeneradores nas bordas das ilhas, todas as comunicações que se derem entre nós pertencentes à mesma ilha devem ser feitas de forma totalmente óptica. O

dimensionamento da ilha deve ser feito levando em conta essa característica. Comunicações entre ilhas são sempre possíveis, pois o sinal é sempre regenerado quando passa de uma ilha para outra [20, 57].

Colocação esparsa – Na abordagem de regeneração esparsa, alguns nós da rede são escolhidos assimetricamente na rede. Neles são instalados regeneradores. Os nós não escolhidos permanecem transparentes. Essa abordagem permite uma flexibilidade grande na colocação de regeneradores, uma vez que um regenerador pode ser colocado exatamente no nó em que ele é necessário. O problema de RP considerando a regeneração esparsa é computacionalmente complexo, principalmente se o número de nós da rede considerada é grande. Dependendo de como é considerado, o RP esparsa pode ser um problema NP-completo ou NP-difícil [20, 58].

Neste trabalho opta-se pela utilização da estratégia de regeneração esparsa e, por isso, são discutidas apenas as principais abordagens utilizadas para a solução do RP considerando essa estratégia. Como o problema de RP é NP-completo as soluções propostas na literatura são, em geral, heurísticas. A maior parte dos algoritmos de RP apresentados na literatura baseiam a decisão de colocação ou na topologia da rede [23, 59–61] ou no tráfego previsto para a ela [23, 59, 62]:

RP baseado na topologia – Os algoritmos de RP baseados na topologia consideram em sua decisão apenas informações de topologia de rede, tais como: o número de nós e enlace, o grau do nó, as informações estáticas das penalidade da camada física. Essas abordagens podem ser facilmente implementadas, mas em geral não retornam soluções que apresentam alto desempenho de rede. Isso ocorre pois a rede pode ser submetida a uma ampla variedade de padrões de tráfego, que não foram considerados durante o processo de RP.

RP baseado no tráfego – Por outro lado, os algoritmos de RP baseados na distribuição de tráfego determinam os locais dos regeneradores com base na informação sobre o tráfego previsto para a rede. Essas estratégias são geralmente mais lentas em termos de tempo de resolução do RP, porém levam a um melhor desempenho de rede. Isso acontece pois as características do tráfego previsto para a rede são consideradas durante a distribuição de regeneradores. Entretanto, se o padrão de tráfego previsto for muito diferente do real, o resultado do RP pode não ser satisfatório em termos do desempenho de rede.

Existe também um trabalho propondo colocação de regeneradores utilizando uma modelagem analítica [63].

A maioria dos algoritmos heurísticos relatados na literatura para a solução do RP que consideram DLE são baseados em duas ideias principais: colocação baseada em contador de nó (CBCN) e o *transitional weight* (TW) [60]. Essas estratégias são normalmente utilizadas em conjunto.

A estratégia CBCN consiste na atribuição de um contador dedicado a cada nó da rede. O contador é incrementado de acordo com a heurística utilizada pelo algoritmo de RP. Ao final do processo, os nós são ordenados de acordo com o valor dos contadores de cada nó. A decisão de RP se baseia nesse ordenamento.

A política mais utilizada para a escolha de quais nós devem receber regeneradores e quantos regeneradores devem ser colocados em cada nó é a política-NX. A política-NX assume como entrada para o algoritmo de RP o número de nós translúcidos desejado (N) e o número de regeneradores a ser colocados em cada nó selecionado (X). Ou seja, N e X são parâmetros de entrada do algoritmo e são escolhidos pelo projetista da rede. Em geral, a política-NX é usada em conjunto com CBCN: são colocados X regeneradores nos N nós melhor colocados.

O TW é uma tentativa de se descobrir os nós mais centralizados na rede [64], que por sua vez, são candidatos naturais a serem um nó opaco ou translúcido. A ideia é encontrar todas as rotas ligando os possíveis pares fonte destino da rede e contabilizar, em cada nó, o número de vezes que uma rota passa por ele. Por isso, o TW é frequentemente utilizado como estratégia de incremento do contador de CBCN. Se um determinado algoritmo de roteamento fixo for usado (por exemplo, roteamento por menor caminho), o TW será dependente apenas da topologia, uma vez que a solução para o roteamento de menor caminho é dependente exclusivamente da topologia. Entretanto, o TW também pode ser usado para se montar um RP baseado no tráfego. Para isso, pode ser feita uma simulação de rede considerando, por exemplo, um algoritmo de roteamento adaptativo e incrementar os contadores do nó apenas quando de fato um caminho óptico passar por um dado nó. Neste caso, os contadores dos nós terão uma dependência da matriz de tráfego que está sendo utilizada na rede.

Recentemente, foi proposta uma heurística para otimização cruzada do RWA e do RP para minimização do número de regeneradores e de nós translúcidos [65].

Neste trabalho são propostas três novas estratégias para colocação de regeneradores. Os resultados das propostas são comparados com os obtidos por dois outros algoritmos anteriormente propostos na literatura: o NDF (NDF – *Nodal Degree First*) e o SQP (SQP – *Signal Quality Prediction*), ambos propostos por Yang *et al.* [23]. O NDF é um algoritmo baseado na topologia que utiliza a política-NX para colocação de regeneradores. O pseudocódigo do NDF é mostrado no Algoritmo 1. O SQP é um algoritmo de RP baseado no tráfego, ele usa em conjunto as ideias de CBCN, TW e a política-NX.

O pseudocódigo do SQP é mostrado no Algoritmo 2. No algoritmo aparece o número LN_{max} . Ele denota que o sinal óptico pode atravessar de forma transparente no máximo LN_{max} enlaces sem violar o critério de QoT.

Algoritmo 1 Nodal Degree First (NDF)

- 1: Atribua a cada nó i um número R_i igual ao seu grau $G(i)$.
 - 2: **for** $k=1$ **to** N **do** // Repita N vezes
 - 3: Selecione o nó j com o máximo R_j , e coloque X regeneradores no nó j . Se houver empate, escolha j de forma aleatória entre os nós empatados.
 - 4: Remova o nó j , escolhido no passo anterior, e diminua de uma unidade os números R_i de todos os nós i conectados ao nó j .
 - 5: **end for**
-

Algoritmo 2 Signal Quality Prediction (SQP)

- 1: Atribua a cada nó i um número C_i , inicializado com zero.
 - 2: Execute um algoritmo de RWA predefinido para um número de pedidos de conexão gerados aleatoriamente e seguindo o padrão de tráfego previsto para a rede.
 - 3: Para cada caminho óptico computado pelo RWA, faça o seguinte: Para o j -ésimo nó contando a partir da fonte para o destino, ao longo do caminho óptico, calcule o valor incremental:

$$I_j = \begin{cases} 1, & \text{Se } j \bmod LN_{max} = 0 \text{ ou } (j \pm 1) \bmod LN_{max} = 0 \\ 0, & \text{Caso contrário} \end{cases}$$
 Adicione o número I_j ao número C_i atribuído a esse nó.
 - 4: Ordene os nós em ordem decrescente de C_i .
 - 5: Selecione os primeiros N nós como nós translúcidos e coloque X regeneradores em cada um dos N nós.
-

2.2.2 Atribuição de regeneradores

Como mencionado anteriormente, a colocação de regeneradores é um processo que se realiza na etapa de projeto da rede. Uma vez resolvido o problema de colocação de regeneradores (considerando a regeneração esparsa), surge um outro problema que deve ser resolvido em tempo de operação. O recurso de regeneração está disponível em alguns nós da rede, conforme decidido pelo RP. A pergunta a ser respondida agora é como os caminhos ópticos devem usar e liberar o uso desses regeneradores. Além disso, deve ser decidido em quais nós de um caminho óptico o sinal deve ou não deve ser regenerado. Em um cenário em que pedidos de conexão são dinamicamente solicitados à rede, o plano de controle deve decidir, sob demanda, quando e em qual nó um sinal óptico deve ser regenerado. Esse problema é conhecido como **atribuição de regeneradores** [61] ou **alocação de regeneradores** [23] cuja sigla é RA. Deve-se observar que pode haver vários nós com capacidade de regeneração ao longo do caminho óptico. O algoritmo de RA deve decidir em quais nós

do caminho óptico o sinal deve ser regenerado. Um algoritmo de RA eficiente utiliza o mínimo de regeneradores possível, deixando esses ativos livres para atender às necessidades de caminhos ópticos que futuramente cheguem à rede e que necessitariam de regeneração para serem estabelecidos. Deve-se observar que um RA eficiente pode até mesmo reduzir o número mínimo de regeneradores necessários para manter o desempenho, levando a um menor CapEx.

O algoritmo de RA teria o melhor desempenho se fosse resolvido em conjunto com o RWA. Como a complexidade computacional de se resolver o RWA em conjunto com o RA é alta, em geral, adota-se a estratégia de solução do RA após o RWA. O algoritmo de RA, em geral, divide uma determinada rota (ou caminho óptico) em uma cadeia de vários segmentos transparentes. Essa segmentação pode ser motivada por dois fatores: QoT abaixo do limiar mínimo aceitável ou contenção de comprimentos de onda:

Segmentação motivada por QoT abaixo do limiar mínimo (RA_{QoT}) – O algoritmo de RWA empregado encontrou um caminho óptico válido, em um comprimento de onda contínuo (caminho óptico transparente), do nó fonte ao nó destino, porém a QoT desse caminho óptico é inadequada. Nesse caso, realiza-se um RA disparado por falta de QoT. O algoritmo de segmentação possui duas opções em relação à atribuição de comprimento de ondas: pode manter a decisão tomada pelo algoritmo de RWA e manter um comprimento de onda contínuo desde o nó origem ao nó destino ou optar por refazer o WA em cada segmento utilizando assim o recurso que o regenerador possui de conversão de comprimento de onda. Essa última abordagem leva, em geral, a um melhor desempenho. Porém, ela demanda um custo computacional maior, pois o problema de WA precisa ser resolvido duas vezes.

Regeneração é necessária por contenção de comprimento de onda (RA_{WC}) – O algoritmo de roteamento e atribuição de comprimento de ondas empregado encontrou uma rota mas não encontrou um comprimento de onda contínuo ligando o nó fonte ao nó destino. Nesse caso, realiza-se um RA disparado por contenção de comprimento de onda. Todos os segmentos não podem utilizar o mesmo comprimento de onda uma vez que o RWA não encontrou um caminho óptico que atenda essa restrição. Assim, pelo menos uma conversão de comprimentos de onda é necessária.

2.3 Projeto de redes ópticas WDM

O projeto de redes ópticas WDM é listado na literatura considerando duas vertentes distintas: o projeto de topologia virtual ou lógica (VTD – *Virtual Topology Design*) e o projeto de topologia física

(PTD). A topologia física estabelece quais nós de uma rede devem ser interconectados por enlaces físicos de fibras ópticas [66]. Ela provê a infra-estrutura de telecomunicações necessária para se realizar a comunicação na rede óptica. Por outro lado, a topologia lógica estabelece circuitos virtuais (ou reais) interligando os nós da rede de forma que a comunicação possa ser feita entre qualquer par de nós [67]. Dessa forma, a topologia lógica pode ser completamente diferente da topologia física [66]. O problema de VTD se assemelha ao problema de RWA quando um tráfego SLE é considerado. O VTD é realizado considerando uma certa topologia física, ou seja, o VTD consiste em implementar um conjunto de conexões ou caminhos virtuais em uma topologia física [66]. Há uma vasta literatura no tocante ao VTD e uma extensa revisão sobre o assunto pode ser encontrada em [67]. Neste trabalho é considerado o problema de PTD, portanto o VTD não é mais discutido.

O PTD pode ser pensado de diversas formas, e dependendo da forma pensada, ele pode ser um problema NP-completo [66] ou NP-hard [68]. Esses problemas são computacionalmente complexos. Em geral, a complexidade computacional para se obter a solução ótima do problema de PTD cresce exponencialmente com o número de nós da rede que está sendo projetada. Por esse motivo, poucos trabalhos se propõem a encontrar a solução ótima para o problema de PTD [69–71]. Soluções ótimas para o PTD somente são viáveis para redes muito pequenas (tipicamente no máximo de cinco nós) [72]. Portanto, a maioria dos trabalhos para solução de PTD utiliza heurísticas ou metaheurísticas em sua solução. Além disso, os trabalhos que consideram soluções ótimas também propõem heurísticas por reconhecerem a inviabilidade da solução ótima de PTD para redes médias ou grandes [69–71]. No caso das soluções heurísticas, a maior parte dos trabalhos considera adaptações dos algoritmos de *branch exchange* (BE) [73] e *cut saturation* (CS) [74]. O primeiro deles parte de uma rede totalmente conectada e realiza podas na rede iterativamente [73]. O segundo parte de uma árvore (em geral a árvore mínima considerando algum critério) composta pelos nós da rede e realiza inserções e remoções de enlaces utilizando o critério de corte saturado (*saturated cut*) [74]. Alguns trabalhos que propõem heurísticas que se enquadram nessa categoria são [66, 70, 71, 75]. No tocante ao uso de metaheurísticas para a solução do PTD, já foram propostas abordagens utilizando *simulated annealing* [66, 70, 71, 75], *tabu search* e algoritmos genéticos [68, 72, 76–81].

O PTD vem sendo discutido na literatura desde o início dos anos 70 [73, 74]. Talvez por isso, grande parte dos trabalhos em PTD considera redes eletrônicas em malha que utilizam a comutação por pacotes. O PTD para redes ópticas é mais desafiador do que o tradicional para redes de comunicação eletrônica, principalmente se a rede óptica for transparente pois, nela a restrição de continuidade de comprimentos de onda deve ser satisfeita [66]. Consequentemente, os algoritmos existentes para

projeto de topologia física em redes de comunicações eletrônicas não são diretamente aplicáveis a todas as redes ópticas [66]. Outra diferença importante é a comutação utilizada no chaveamento das comunicações. Nas redes ópticas atuais, o chaveamento é feito por comutação por circuitos (OCS – *Optical Circuit Switching*) em contraste com a comutação por pacotes [3] largamente utilizada em redes eletrônicas [4]. Vale salientar entretanto que intensa pesquisa está sendo feita para implementação de rede ópticas de comutação por pacote e suas variantes: comutação por rajada óptica (OBS – *Optical Burst Switching*) e comutação por pacote óptico (OBS) [4]

A adaptação dos métodos de PTD propostos na literatura para redes eletrônicas para uso em redes ópticas WDM pode ser relativamente simples quando se consideram redes WDM OCS com tráfego estático SLE. Xiao *et al.* [66] propuseram, em 2001, um dos primeiros trabalhos nesse sentido. No trabalho, é apresentado o CS de dois estágios para se projetar redes ópticas WDM transparentes. O CS de dois estágios é uma adaptação do CS. Os autores consideram um tráfego estático SLE em redes WDM OCS. Outros algoritmos utilizando métodos heurísticos, metaheurísticos e de programação linear foram propostos considerando as mesmas condições: redes WDM OCS com tráfego SLE [66, 69, 71, 72, 82–84]. Nesta Tese, considerou-se o projeto de redes WDM OCS com tráfego dinâmico DLE ao contrário desses últimos. Não foi encontrada na literatura nenhuma proposta para solução do PTD nas mesmas condições estudadas nesta Tese que pudesse ser usada para fins de comparação de resultados.

Os algoritmos para solução do PTD encontrados na literatura estruturam-se nas seguintes premissas: há um conjunto de restrições às quais a solução encontrada para a topologia física deve atender e há um ou mais parâmetros que devem ser maximizados ou minimizados, chamados aqui de objetivos de otimização. As restrições formam um conjunto de parâmetros que a topologia física encontrada deve atender obrigatoriamente. No tocante às redes WDM, as restrições comumente encontradas são: número de comprimentos de onda máximo na rede, número de comprimentos de onda por enlace, continuidade de comprimentos de onda, biconectividade dos nós, etc. Quando um algoritmo assume um certo parâmetro como restrição ele não é decidido pelo algoritmo, este apenas verifica se o parâmetro atende ou não as restrições previamente impostas. Os valores dos objetivos de otimização guiam o processo de otimização. O algoritmo faz um conjunto de modificações na topologia da rede para minimizar ou maximizar o parâmetro usado como objetivo de otimização. Todos os algoritmos de PTD que foram encontrados na literatura de redes WDM resolvem o problema considerando um único objetivo de otimização que, em geral, é o CapEx da rede [66, 81] ou o número total de comprimentos de onda a serem utilizados na rede [71, 82].

A consideração de um único objetivo de otimização negligencia a natureza conflitante dos diversos parâmetros envolvidos no PTD. Por exemplo, para se ter um bom desempenho de rede é necessário se gastar uma quantidade proporcionalmente grande de recursos de capital. Ao contrário, para se ter uma rede de baixo desempenho, uma quantidade menor de capital é necessária. Se um algoritmo tenta minimizar apenas o custo da rede, ele pode obter uma solução que não é tão boa em termos de desempenho. Por isso, algoritmos que considerem a otimização de múltiplos objetivos de otimização de forma simultânea são desejáveis no PTD. Essa natureza conflitante apresentada no PTD já é há muito conhecida e artigos apresentados nos anos 70 já trazem essas ideias, porém sem apresentarem soluções sistemáticas para o problema de otimização que considera múltiplos objetivos de forma simultânea [73, 74]. Esses algoritmos são denominados de algoritmos de PTD multiobjetivos. Nenhum algoritmo de PTD multiobjetivo para redes WDM foi encontrado na literatura fora do escopo desta Tese. No entanto, Banerjee e Kumar [76] propuseram um algoritmo de PTD multiobjetivo para redes eletrônicas considerando os objetivos de redução simultânea de custo e retardo médio da rede.

2.3.1 Atualização de redes WDM

Um subproblema do PTD que pode ser tratado em redes é o problema de atualização ou expansão. Essa atualização se dá na forma de mudanças na topologia física de uma rede atualmente sob uso para atender novas demandas exigidas à rede. Isso significa que a topologia atual é mantida, sendo a mesma melhorada pela adição de novos recursos de infra-estrutura de telecomunicações. Xiao *et al.* [66] levantaram dois possíveis casos nos quais surge o problema de atualização de redes ópticas:

Atualização com inserção de novos enlaces e nós – Uma empresa de telecomunicações planeja aumentar a cobertura da rede, a fim de atender mais clientes. É necessário adicionar novos nós e novos enlaces à rede existente, a fim de cobrir as novas regiões. Outro exemplo seria o de uma empresa que tem uma rede totalmente ótica privada. Quando a empresa se expande e estabelece novas filiais, é necessário se adicionar novos nós e ligações à rede existente, a fim de promover as conexões necessárias.

Atualização com inserção apenas de novos enlaces – Quando o tráfego está se tornando mais intenso, é necessário adicionar novos enlaces à rede existente, a fim de fornecer-lhe mais capacidade.

Nesta Tese, é tratado o segundo problema de atualização de redes ópticas em que apenas novos enlaces podem ser adicionados à topologia existente. Apesar da importância prática do assunto,

poucos trabalhos na literatura tratam do problema de atualização de redes. Saha e Chakraborty [85] propuseram um algoritmo de atualização de redes que considera adição de novos nós e enlaces a uma topologia existente. O mesmo problema é tratado por Kumar *et al.* [80]. Ambos os trabalhos são para redes eletrônicas.

CAPÍTULO 3

AMBIENTE DE SIMULAÇÃO: SIMULADOR SIMTON

Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.

— Thomas Edison

NESTE capítulo são discutidos os principais pontos concernentes ao ambiente de simulação que foi usado para obtenção dos resultados da Tese. Um *software* de simulação foi desenvolvido para efetuar tais simulações em redes ópticas. Esse *software* é denominado (SIMTON – *Simulator for Transparent Optical Networks*) [86, 87]. O SIMTON é um software de simulação orientado a eventos implementado em C++ [88]. Ele é constituído de uma interface gráfica e um motor de simulação. Uma descrição da interface gráfica e dos casos de uso do SIMTON são descritas no Apêndice A. O motor de simulação é responsável por realizar a simulação da rede óptica em si, enquanto a interface gráfica oferece um meio prático de realizar as simulações utilizando o motor. Esse motor de simulação também possui uma versão na linguagem de programação JAVA, que foi transcrita da versão original em C++ durante os trabalhos realizados em [89]. Nesta Tese, ambos os motores de simulação são utilizados. O motor de simulação leva em conta as características ópticas dos dispositivos presentes na rede óptica durante a realização das simulações. Para tal, ele usa o modelo de camada física proposto por Pereira *et al.* em [19]. Apesar do seu nome, o SIMTON

também é capaz de realizar simulações em redes translúcidas considerando o efeito de regeneradores eletrônicos colocados na rede óptica. Vários *plug-ins* foram desenvolvidos para tornar isso possível. Nas próximas seções serão discutidas as principais premissas e modelos usados na construção do SIMTON.

3.1 Camada óptica: premissas gerais

O SIMTON assume uma rede óptica WDM. Uma rede WDM consiste de diversos nós conectados por enlaces de fibras ópticas. Cada enlace possui diversos comprimentos de onda que podem ser utilizados para transportar informações diferentes. Cada vez que um usuário de um certo nó A necessita se comunicar com outro usuário de um certo nó B ele faz um pedido de conexão à rede óptica. Esse pedido é analisado pelo plano de controle da rede, mais especificamente pelo Controle de Admissão de Chamadas (CAC), que será discutido nas próximas seções.

Em uma rede real, diversos pedidos de conexão são requisitados à rede óptica. O SIMTON é capaz de simular esse ambiente gerando esses diversos pedidos. Sempre que um pedido de conexão entre dois nós é atendido, um circuito físico é estabelecido entre os nós fonte e destino. Assume-se que a rede é comutada por circuitos [3]. Além disso, esse circuito físico estabelecido é chamando de caminho óptico. O caminho óptico entre dois nós A e B consiste em uma rota composta por diversos enlaces da rede ligando os nós A e B , e um comprimento de onda para cada um desses enlaces. No caso de uma rede transparente, o SIMTON assume que o mesmo comprimento de onda deve ser usado em todos os enlaces de um caminho óptico. Isso é denominado de restrição de continuidade de comprimento de onda (RCCO). Por outro lado, no caso de uma rede translúcida, o SIMTON considera que um regenerador eletrônico pode ser usado para efetuar a conversão de comprimentos de onda de forma que a RCCO não mais se aplica.

O SIMTON assume que os enlaces são bidirecionais na rede óptica. Ou seja, se existe uma ligação física entre dois nós A e B da rede então na verdade existem duas fibras ópticas diferentes conectando esses dois nós, uma que realiza a comunicação no sentido de A para B e outra que realiza a comunicação no sentido oposto, de B para A . A arquitetura assumida para um enlace é mostrada na Figura 3.1. Da esquerda para a direita os dispositivos são: lasers transmissores, comutador óptico, multiplexador, amplificador óptico, fibra óptica, amplificador óptico, demultiplexador, comutador óptico e receptores. Em cada enlace existe um par dessa estrutura, uma em cada sentido de comunicação. Os ganhos dos amplificadores ópticos são ajustados para compensar as perdas nos enlaces e nos dispositivos ópticos. O SIMTON assume também que, para cada pedido de cone-

xão aceite, um caminho óptico bidirecional ligando os nós fonte e destino do pedido de conexão é estabelecido. Ou seja, uma fibra óptica diferente para cada direção de comunicação é usada.

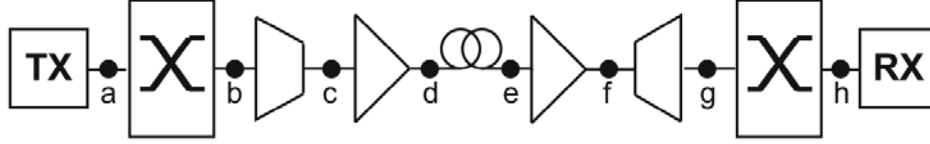


Figura 3.1: Arquitetura assumida pelo SIMTON para os enlaces da rede óptica. Cada enlace possui um par da estrutura mostrada, uma em cada direção de comunicação.

O SIMTON é capaz de simular redes transparentes e redes translúcidas. Para cada situação uma arquitetura diferente de nó deve ser considerada. A arquitetura de planos de comprimentos de onda [2] é usada para ambas as abordagens. No caso da rede transparente, não há regeneradores eletrônicos instalados nos nós. O nó que não possui regeneradores é denominado de *nó transparente* e o SIMTON considera, para esse tipo de nó, a arquitetura mostrada na Figura 3.2. Por outro lado, no caso translúcido, um conjunto de regeneradores eletrônicos pode ser colocado, de forma compartilhada, em cada nó da rede [20]. Isso significa que qualquer caminho óptico que passa por um nó pode usar qualquer um dos regeneradores compartilhados colocados nos nós translúcidos. A arquitetura assumida pelo SIMTON para um nó translúcido é similar à usada em [23] e é mostrada na Figura 3.3. Considerando essa arquitetura, os caminhos ópticos que passam por um nó translúcido podem passar pelo nó de forma totalmente óptica ou podem ser regenerados usando um dos regeneradores compartilhados instalados no nó.

3.2 Geração de chamadas e carga da rede

O SIMTON assume que os pedidos de conexão (também denominados daqui por diante de chamadas) à rede chegam de forma dinâmica (DLE) [24], um após o outro. Além disso, o processo de geração dos pedidos de conexão é um processo estocástico. Para simular os diversos pedidos de conexão requisitados a uma rede real, o SIMTON possui um gerador de chamadas que gera um conjunto de pedidos de conexão em cada simulação realizada. Para cada chamada, dois nós da rede são escolhidos como nós fonte e destino. O processo de chegada de pedidos de conexão segue um processo de Poisson: o intervalo de tempo entre chamadas é exponencialmente distribuído com média $1/\mu$ e a duração de cada chamada também segue uma distribuição exponencial, porém com média H . Define-se $1/\mu_{i,j}$ como o intervalo de tempo médio entre chamadas com origem no nó i e destino no nó j e $H_{i,j}$ como a duração média das chamadas que se originam no nó i e se findam no nó j . Neste caso, a

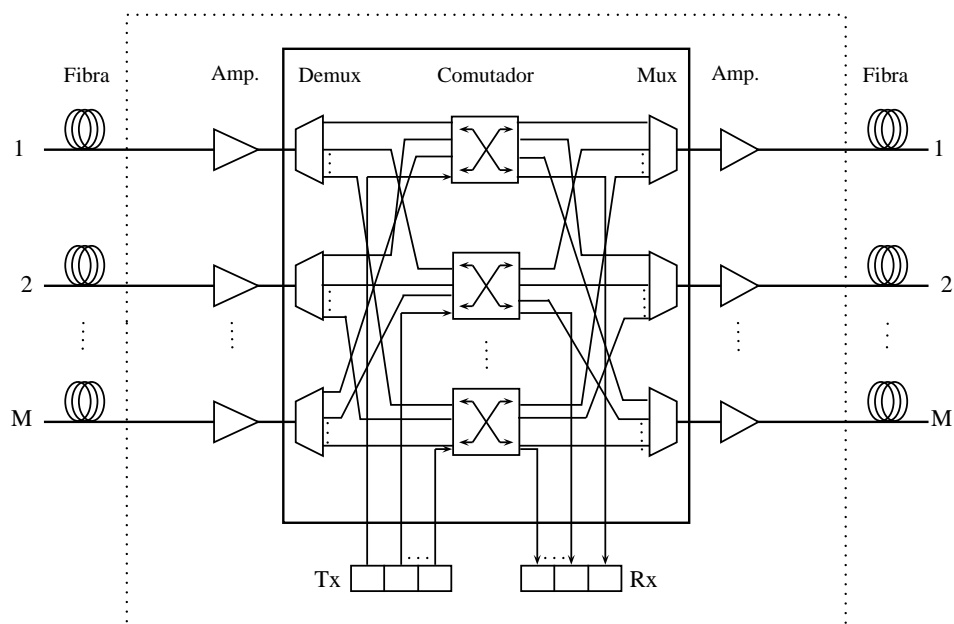


Figura 3.2: Arquitetura assumida pelo SIMTON para um nó transparente.

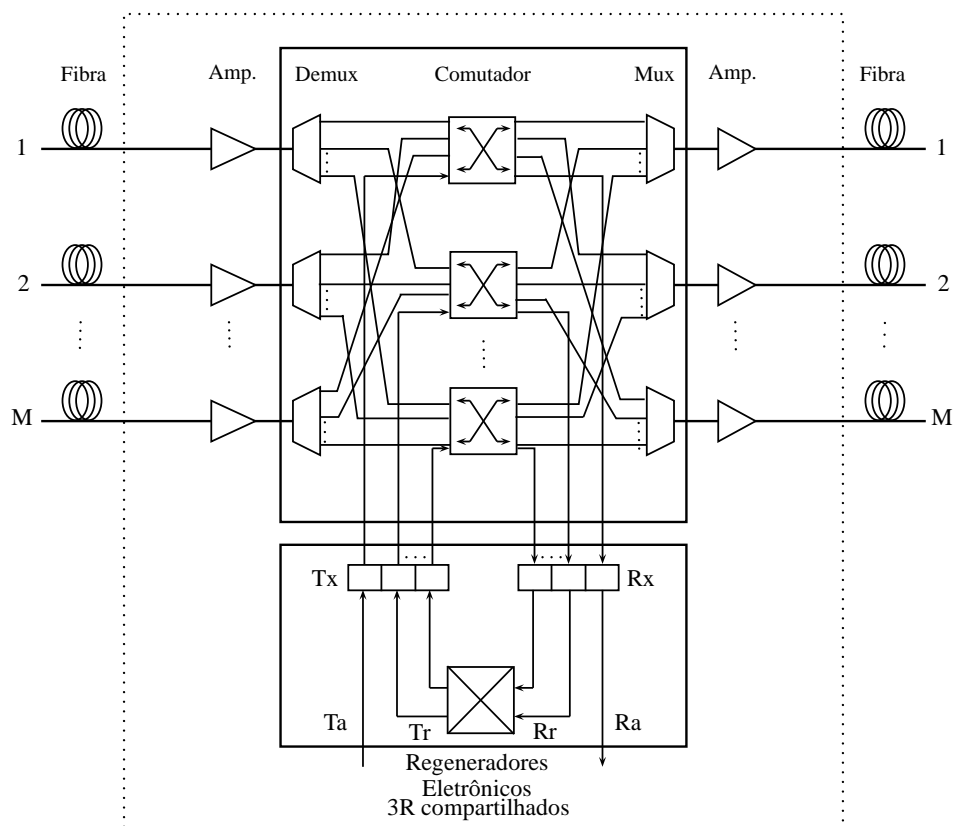


Figura 3.3: Arquitetura assumida pelo SIMTON para um nó translúcido.

carga $\zeta_{i,j}$ das conexões que se originam em i e terminam em j é definida por $\zeta_{i,j} = \mu_{i,j} \cdot H_{i,j}$ [90]. De posse desses parâmetros é possível definir a carga total da rede ζ_{rede} utilizando

$$\zeta_{rede} = \sum_{i=1}^T \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^T \mu_{i,j} H_{i,j}, \quad (3.1)$$

em que T é o número total de nós na rede. O perfil de tráfego da rede depende dos parâmetros $\mu_{i,j}$ e $H_{i,j}$. Se $\mu_{i,j} = \mu \forall i, j$ e $H_{i,j} = H \forall i, j$ o tráfego é dito **uniforme**. Caso contrário, ele é dito **não-uniforme**. Para o caso do tráfego uniforme, (3.1) pode ser simplificada de forma que a carga total da rede pode ser calculada por

$$\zeta_{rede} = T(T-1)\mu H, \quad (3.2)$$

em que T é o número total de nós na rede. Apesar de ζ_{rede} ser adimensional, na literatura é comum se atribuir a unidade erlang à carga da rede. A carga da rede é uma medida de quanto a rede está sendo utilizada. Alta carga significa que há muitas conexões em curso ao longo da rede enquanto que baixa carga significa que há um número pequeno de conexões ativas na rede. Os parâmetros μ e H modelam quantitativamente esse uso. Se, em média, as conexões ficam por muito tempo ativas (H grande), a rede ficará mais ocupada. Se por outro lado as conexões ficam, em média, por pouco tempo ativas (H pequeno), a rede ficará menos ocupada. Além disso, se os pedidos de conexão chegam à rede entre pequenos intervalos de tempo (μ grande) a rede ficará mais ocupada do que se eles chegassem entre intervalos de tempo maiores (μ pequeno).

3.3 Modelo da camada física

Nesta seção será descrita de forma sucinta como o SIMTON calcula as penalidades da camada física (PLI) da rede óptica. A formulação utilizada pelo SIMTON é uma combinação da formulação proposta por Pereira *et al.* em [19] para avaliação da OSNR óptica com as propostas apresentadas em [91, 92] para avaliação da dispersão temporal do pulso óptico. As equações utilizadas para avaliação estão mostradas na Seção 3.3.1. Como se sabe, as diversas penalidades impostas ao sinal pelos dispositivos ópticos utilizados na rede, podem contribuir negativamente na qualidade de transmissão do sinal óptico (QoT) [2, 17, 34]. As penalidades consideradas pelo SIMTON são as seguintes: perdas nos multiplexadores, nos demultiplexadores e nos comutadores ópticos; ruído de emissão espontânea da fonte (SSE – *Spontaneous Source Emission*) no transmissor óptico; mistura de quatro ondas (FWM), dispersão por modo de polarização (PMD) e dispersão cromática residual (RD – *Residual Dispersion*) na fibra óptica de transmissão; ruído (ASE) no amplificador EDFA; a

saturação de ganho no amplificador EDFA e o *crosstalk* homodino no comutador óptico OXC [17]. Para cada caminho óptico LP , a formulação usada para modelagem da camada física retorna dois valores: $OSNR(LP)$, que representa a OSNR no fim do caminho óptico LP (recebida no detetor) e $\Delta_t(LP)$, que representa o alargamento temporal percentual do pulso óptico no final do caminho óptico LP (recebido no detetor). Quanto maior for $OSNR(LP)$ e menor for $\Delta_t(LP)$, menos penalizado está o sinal óptico que se propaga no caminho óptico LP . O melhor valor possível para $OSNR(LP)$ é $OSNR_{in}$ que é a OSNR na saída do laser de transmissão, antes do sinal óptico se propagar na rede. O melhor valor possível para $\Delta_t(LP)$ é zero que significa que o pulso óptico não sofreu dispersão temporal.

Em simulação de uma rede translúcida, o SIMTON deve considerar o caso em que o sinal óptico é regenerado por um regenerador 3R presente em um nó translúcido. Para tal, considera-se que o regenerador recupera completamente o sinal óptico. Isso significa que na saída de um regenerador a $OSNR(LP) = OSNR_{in}$ e $\Delta_t(LP) = 0$.

3.3.1 Avaliação das Penalidades da Camada Física

A avaliação quantitativa de PLI no SIMTON se dá em duas vertentes: cálculo das penalidades em amplitude e cálculo das penalidades em dispersão temporal. A descrição da formulação utilizada pelo SIMTON será iniciada pela primeira.

A Figura 3.1 mostra os componentes considerados em um enlace, a saber: transmissor, OXC, multiplexador, amplificador óptico de potência (*booster*), fibra óptica, pré-amplificador óptico, demultiplexador, OXC e receptor. A formulação considera o ruído agregado nos pontos de A até H mostrados na figuras. Neles são avaliadas a potência do sinal e a potência do ruído no domínio óptico. No ponto A , tem-se as potências ópticas de sinal (P_{in}) e de ruído (N_{in}) na entrada do sistema. A relação entre P_{in} e N_{in} define OSNR do transmissor ou OSNR da entrada do sistema ($OSNR_{in}$) a qual é dada por

$$OSNR_{in} = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{N_{in}} \right). \quad (3.3)$$

Considerando uma rota composta de i enlaces, os dispositivos entre B e H são repetidos $i - 1$ vezes antes do sinal óptico alcançar o receptor no nó destino.

Nos pontos B e H , considera-se o *crosstalk* homodino adicionado na saída do OXC. Isso ocorre porque uma pequena quantidade da potência proveniente de outros canais no mesmo comprimento de onda do canal de interesse é adicionada pelo OXC devido ao isolamento não-ideal do dispositivo.

A potência de ruído produzida por esse efeito, em cada comprimento de onda λ , é dada por [2]:

$$N_{Sw}(\lambda) = \epsilon \sum_{j=1}^{M+1} P_{Swj}(\lambda), \quad (3.4)$$

em que $P_{Swj}(\lambda)$ é a potência óptica do sinal presente na j -ésima porta de entrada no comprimento de onda λ , ϵ representa o fator de isolamento entre as portas do OXC e M é o número total de sinais ópticos presentes nas portas de entrada do OXC no mesmo comprimento de onda λ do sinal.

Nos pontos C e G , considera-se que os multiplexadores e demultiplexadores apenas atenuam os sinais propagantes no domínio óptico.

Nos pontos D e F , tanto se considera o ruído adicionado pelos amplificadores ópticos EDFA, como o efeito de saturação do seu ganho. O ruído ASE representa a principal fonte de ruído no amplificador óptico e ele é calculado por

$$N_{Amp}(\lambda) = P_{ASE} = \frac{hv(\lambda)B_oG_{Amp}F_{Amp}}{2}, \quad (3.5)$$

em que h é a constante de Planck, $v(\lambda)$ representa a frequência do sinal no comprimento de onda λ , B_o é a largura de banda do filtro óptico, G_{Amp} é o ganho dinâmico e F_{Amp} é o fator de ruído dinâmico do amplificador. O efeito de saturação do ganho é calculado por

$$G_{Amp} = \frac{G_{Amp}^o}{1 + \frac{P_{out}}{P_{sat}}}, \quad (3.6)$$

em que G_{Amp}^o representa o ganho não-saturado do amplificador, P_{out} é a potência óptica e P_{sat} é a potência de saturação de saída do EDFA. A figura de ruído F_{Amp} do EDFA é calculada por [93]

$$F_{Amp} = F_{Amp}^o \left(1 + A_1 - \frac{A_1}{1 + \frac{P_{in}}{A_2}} \right), \quad (3.7)$$

em que F_{Amp}^o representa o fator de ruído do amplificador quando potências baixas são consideradas, A_1 e A_2 são parâmetros utilizados na modelagem. Em alguns casos desta Tese (Capítulos 5 e 6), foi considerado o caso de $F_{Amp} = F_{Amp}^o$. Para tal, basta ser feito $A_2 \rightarrow \infty$ em (3.7).

No ponto E considera-se o efeito de FWM que acontece na fibra óptica. A potência de ruído FWM gerada em um comprimento de onda λ é calculada por

$$N_{FWM}(\lambda) = \sum_{j=1}^m P_{FWMj}(\lambda), \quad (3.8)$$

em que m é o número de componentes de FWM que recaem no comprimento de onda λ , enquanto P_{FWMj} representa a potência da j -ésima componente de FWM que recai no comprimento de onda λ [19].

No ponto H , pode-se calcular as potências ópticas do sinal (P_{out}) e do ruído (N_{out}) na saída do enlace. O termo P_{out} depende dos ganhos e das perdas presentes ao longo da propagação do sinal e pode ser calculado por

$$P_{out} = \frac{G_{Amp1}e^{-\alpha d}G_{Amp2}}{L_{Mx}L_{Dx}L_{Sw}^2}P_{in}, \quad (3.9)$$

em que G_{Amp1} e G_{Amp2} representam os ganhos dinâmicos do *booster* e do pré-amplificador. L_{Sw} , L_{Mx} e L_{Dx} representam as perdas do OXC (ambos os OXC's do enlace são considerados com as mesmas perdas), multiplexador e demultiplexador, respectivamente e α a constante de atenuação da fibra.

O termo N_{out} é calculado no nó destino e inclui as potências de ruído adicionadas em cada um dos pontos considerados, e é calculado por

$$\begin{aligned} N_{out}(\lambda) = & \frac{G_{Amp1}e^{-\alpha d}G_{Amp2}}{L_{Mx}L_{Dx}L_{Sw}^2}N_{in} + \frac{G_{Amp1}e^{-\alpha d}G_{Amp2}}{L_{Mx}L_{Dx}L_{Sw}}\epsilon \sum_{j=1}^M P_{Sw1,j}(\lambda) + \\ & + \frac{G_{Amp1}e^{-\alpha d}G_{Amp2}}{L_{Mx}L_{Dx}L_{Sw}} \frac{h\nu(\lambda)B_o}{2} \left(F_{Amp1} + \frac{F_{Amp2}}{e^{-\alpha d}G_{Amp1}} \right) + \\ & + \frac{G_{Amp2}}{L_{Dx}L_{Sw}} \sum_{j=1}^m P_{FWM_j}(\lambda) + \\ & + \epsilon \sum_{j=1}^M P_{Sw2,j}(\lambda). \end{aligned} \quad (3.10)$$

Essa formulação foi obtida para apenas um enlace. Ela pode ser generalizada para uma cascata de i enlaces o que leva a

$$P_{out_i} = \left(\frac{G_{Amp_{i,1}}e^{-\alpha d_i}G_{Amp_{i,2}}}{L_{Mx}L_{Dx}L_{Sw}} \right) P_{out_{i-1}} \quad (3.11)$$

e

$$\begin{aligned} N_{out_i}(\lambda) = & \frac{G_{Amp_{1,i}}e^{-\alpha d_i}G_{Amp_{2,i}}}{L_{Mx}L_{Dx}L_{Sw}}N_{out_{i-1}} + \frac{G_{Amp_{1,i}}e^{-\alpha d_i}G_{Amp_{2,i}}}{L_{Mx}L_{Dx}L_{Sw}}\epsilon \sum_{j=1}^M P_{Sw1,j}(\lambda) + \\ & + \frac{G_{Amp_{1,i}}e^{-\alpha d_i}G_{Amp_{2,i}}}{L_{Mx}L_{Dx}L_{Sw}} \frac{h\nu(\lambda)B_o}{2} \left(F_{Amp_{1,i}} + \frac{F_{Amp_{2,i}}}{e^{-\alpha d_i}G_{Amp_{1,i}}} \right) + \\ & + \frac{G_{Amp_{2,i}}}{L_{Dx}L_{Sw}} \sum_{j=1}^m P_{FWM_{i,j}}(\lambda) + \\ & + \epsilon \sum_{j=1}^M P_{Sw_{i+1,j}}(\lambda). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Um certo caminho óptico LP , composto por i enlaces, tem sua relação sinal-ruído na saída do

i -ésimo enlace dada por

$$OSNR(LP) = 10 \log \left(\frac{P_{out_i}}{N_{out_i}} \right). \quad (3.13)$$

Será considerado agora o efeito de dispersão temporal do pulso óptico. Dado um caminho óptico com i enlaces, então o alargamento do pulso óptico devido ao efeito da dispersão residual na saída deste caminho óptico é dada por [92]

$$\Delta t_{RD_i} = \Delta \lambda_{TX} \sum_{j=1}^i \{ [D_{TF}^{\lambda_{ref}} + (\Delta \lambda_j S_{TF})] d_{TF_j} + [D_{DCF}^{\lambda_{ref}} + (\Delta \lambda_j S_{DCF})] d_{DCF_j} \}, \quad (3.14)$$

em que $\Delta \lambda_{TX}$ representa a largura de linha do transmissor, $D_{TF}^{\lambda_{ref}}$ é o coeficiente de dispersão cromática do comprimento de onda do caminho óptico considerado, S_{TF} é a inclinação da curva de dispersão, d_{TF_j} é o comprimento da fibra óptica no enlace j , $D_{DCF}^{\lambda_{ref}}$ é o coeficiente de dispersão cromática da fibra compensadora de dispersão, S_{DCF} é a inclinação da curva de dispersão da fibra compensadora de dispersão e d_{DCF_j} é o comprimento da fibra compensadora de dispersão, dado por

$$d_{DCF_j} = \left| \frac{d_{TF_j} D_{TF}^{\lambda_{ref}}}{D_{DCF}^{\lambda_{ref}}} \right|. \quad (3.15)$$

O alargamento do pulso óptico, devido ao efeito de PMD, ao final de um caminho óptico composto por i enlaces é calculado por [17]:

$$\Delta t_{PMD_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^i (D_{PMD}^2 d_j)}, \quad (3.16)$$

em que D_{PMD} representa o coeficiente de PMD da fibra óptica e d_j é o comprimento do j -ésimo enlace pertencente à rota.

Um caminho óptico LP composto por i enlaces, tem um alargamento temporal total do pulso óptico δ_{t_i} dado por [91]

$$\delta_{t_i} = (\Delta t_{RD_i} + \Delta t_{PMD_i}). \quad (3.17)$$

Este alargamento pode ser calculado de forma percentual em relação à duração total do pulso óptico. Ou seja, Um caminho óptico LP composto por i enlaces, tem um alargamento temporal total percentual do pulso óptico ($\Delta_t(LP)$) dado por [17]

$$\Delta_t(LP) = 100B(\Delta t_{RD_i} + \Delta t_{PMD_i}), \quad (3.18)$$

em que B representa a taxa de transmissão.

3.4 Controle de admissão de chamadas (CAC)

O controle de admissão de chamadas é parte integrante do plano de controle da rede óptica e é ele que decide se um pedido de conexão pode ser atendido ou não. No CAC implementado para o SIMTON essa decisão é baseada em dois aspectos: se há recursos livres disponíveis na rede que possam ser usados para se implementar o pedido de conexão e se o caminho óptico encontrado para implementar o pedido de conexão atende aos requisitos mínimos de qualidade de transmissão pré-estabelecidos. Uma vez que o SIMTON pode tratar tanto de redes transparentes quanto de redes translúcidas, um CAC diferente para cada caso deve ser fornecido. Isso porque a rede translúcida apresenta um recurso de rede a mais (os regeneradores) que as redes transparentes e este deve ser também analisado pelo CAC em sua decisão.

3.4.1 CAC transparente

Nesta seção, é apresentado o CAC para redes transparentes utilizado pelo SIMTON. O CAC é melhor compreendido no âmbito de como os pedidos de conexão são processados pelo SIMTON. A Figura 3.4 mostra como se dá esse processo em uma rede transparente. O CAC aparece destacado em um quadro hachurado na figura. Para cada pedido de conexão solicitado à rede, um caminho óptico disponível é pesquisado pelo módulo de RWA. A saída do módulo de RWA está ligada à entrada do CAC. Se o módulo de RWA não encontrar um caminho óptico disponível para o pedido de conexão atual, então o CAC bloqueia esse pedido por falta de recurso disponível na rede. Se o algoritmo de RWA retorna um caminho óptico candidato LP , então o CAC avalia a QoT desse caminho. O estado atual da rede é considerado nessa avaliação de QoT. O CAC verifica se ambas as métricas usadas na medição da QoT do caminho óptico estão dentro dos limites pré-estabelecidos, isto é, se $OSNR(LP) > OSNR_{QoT}$ e $\Delta_t(LP) < \Delta_{t_{QoT}}$, em que $OSNR_{QoT}$ é a mínima OSNR aceitável e $\Delta_{t_{QoT}}$ é o máximo alargamento temporal permitido para o pulso óptico. Se as duas desigualdades não são atendidas, o pedido de conexão é bloqueado pelo CAC. Esse é um bloqueio de pedido de conexão por falta de qualidade de transmissão. Caso contrário, se ambas as desigualdades são atendidas, o pedido de conexão é aceito e o caminho óptico encontrado pelo módulo de RWA é estabelecido na rede.

3.4.2 CAC translúcido

O CAC translúcido necessita de um módulo adicional em relação ao CAC transparente: o módulo de atribuição de regeneradores (RA). Nesta Tese é proposto um novo algoritmo para se implemen-

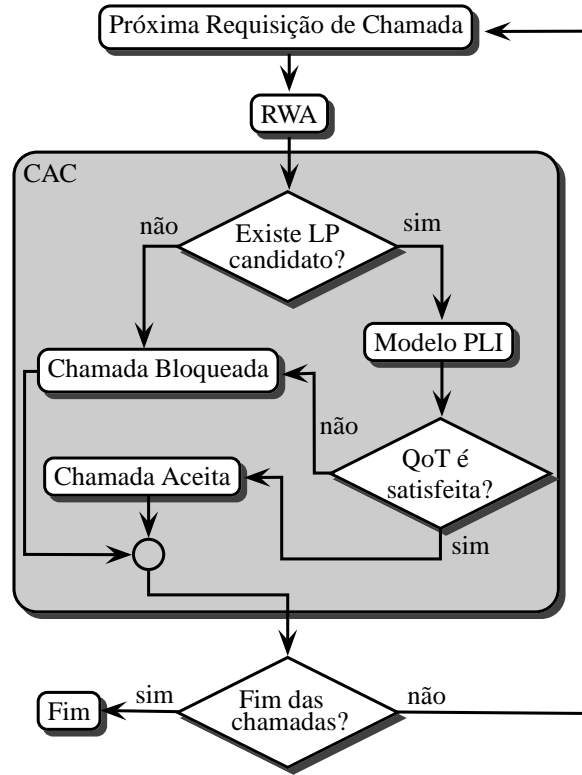


Figura 3.4: *Processamento dos pedidos de conexão realizados pelo SIMTON.*

tar o RA em uma rede óptica. Dessa forma, o CAC translúcido usado pelo SIMTON é descrito conjuntamente com essa nova proposta de RA na Seção 5.1.

3.5 Cálculo da probabilidade de bloqueio

A probabilidade de bloqueio da rede é uma medida da quantidade relativa de pedidos de conexão não atendidos pela rede. Isso significa que quanto maior a probabilidade de bloqueio da rede, menor é o número de usuários atendidos por ela e, conseqüentemente, pior é o seu desempenho. A probabilidade de bloqueio PB pode ser obtida por meio de

$$PB = \frac{\chi_{bloqueadas}}{\chi_{total}}, \quad (3.19)$$

em que $\chi_{bloqueadas}$ é o número de chamadas bloqueadas pela rede e χ_{total} , dado por

$$\chi_{total} = \chi_{bloqueadas} + \chi_{aceitas}, \quad (3.20)$$

é o número total de chamadas solicitadas à rede. Para cada simulação de rede é necessário a geração de um certo conjunto de chamadas. Neste trabalho, o número de chamadas solicitadas à rede durante

a simulação, é escolhido de forma a se ter $\chi_{bloqueadas} \geq 200$. Essa escolha é feita para se ter, ao mesmo tempo rapidez no tempo de simulação e uma confiabilidade estatística na PB , uma vez que a chegada de solicitação de chamadas à rede é um processo estocástico.

3.6 Lista de publicações referentes a este capítulo

- 1) D. A. R. CHAVES, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, SIMTON: A simulator for transparent optical networks, *Journal of Communication and Information Systems (JCIS)*, v. 25, n. 1, p. 1–10, 2010. [Online]. Disponível: <http://iecom.dee.ufcg.edu.br/~jcis/Abril%202010/index.html>
- 2) D. A. R. CHAVES, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, SIMTON: A simulator for transparent optical networks, In: **International Telecommunications Symposium (ITS)**, 2010, p. 1 – 5.
- 3) D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Ferramenta computacional para simulação de redes ópticas transparentes, In: **13^o Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 8^o Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (Momag)**, 2008, p. 1 – 5.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PARA PROJETO DE FUNÇÕES DE CUSTO PARA ROTEAMENTO QUE CONSIDERAM AS PENALIDADES DA CAMADA FÍSICA EM REDES ÓPTICAS

*Penso noventa e nove vezes e nada descubro;
deixo de pensar, mergulho em profundo silêncio - e eis que a verdade se me revela.*

— Albert Einstein

Neste capítulo é apresentada uma abordagem sistemática para se projetar a função-custo de um enlace em uma rede óptica denominada LCFD (LCFD – *Link Cost Function Design*). Além disso, o LCFD é utilizado para se projetar um algoritmo de IA-RWA adaptativo.

4.1 *Link cost function design* (LCFD)

Uma grande variedade de formas de se construir funções de custo de enlace para roteamento já foi proposta na literatura [24, 35, 36, 40]. A função-custo é usada para avaliar o custo de um en-

lace pertencente a uma rede. Com base nesse custo, um algoritmo de roteamento de menor caminho (ex. algoritmo de Dijkstra) pode ser usado para encontrar uma rota entre dois nós da rede. Ou seja, o termo custo neste capítulo não é usado como custo pecuniário, mas sim como uma métrica atribuída a cada enlace da rede que pondera o quão bom ou o quão ruim é esse enlace pertencer a uma dada rota. A função-custo de um enlace é denominada neste capítulo de **função-custo**. A metodologia tradicional para projetar uma função-custo é a seguinte: selecionam-se as variáveis de entrada para compor a função-custo (geralmente variáveis comuns como comprimento e a disponibilidade do enlace) e, considerando as variáveis escolhidas, assume-se uma expressão analítica para a função-custo. Em seguida, testa-se o algoritmo na rede [24, 36]. A escolha das variáveis de entrada da função-custo é relativamente simples, já que elas são escolhidas para tratar um problema específico. Ao contrário, a melhor relação entre essas variáveis na composição do custo de um enlace é complexo de se inferir. Em geral, essa inferência é feita por uma fórmula analítica heurística baseada na experiência do projetista da função-custo. A abordagem aqui proposta para se projetar funções-custo de enlace (LCDF) tem como propósito evitar essa etapa de inferência de forma que a função analítica da função-custo seja determinada por um processo sistemático.

O LCDF é composto por quatro etapas. Primeiro, as variáveis de entrada para o custo do enlace são selecionadas. Segundo, a função-custo é escrita em termos de uma série de funções. Na terceira etapa, é feita a escolha de um indicador global de desempenho da rede a ser usado como objetivo de otimização. Finalmente, na quarta etapa, um algoritmo de otimização é usado para se encontrar os coeficientes da série que otimizam o indicador de desempenho da rede (ex. a probabilidade de bloqueio de rede). O procedimento está resumido na Tabela 4.1.

O primeiro passo de LCDF é o mesmo utilizado na abordagem tradicional. Qualquer parâmetro de enlace numericamente quantificável pode ser escolhido. Múltiplos parâmetros podem ser usados de forma simultânea. Por exemplo, o comprimento de enlace em conjunto com a sua disponibilidade forma um possível conjunto de variáveis que podem ser escolhidas na primeira etapa.

No passo dois, é definida uma representação da função-custo por uma série de funções. A escolha acertada da série a ser usada permite que ela cubra qualquer função de mapeamento entre as variáveis de entrada e o custo do enlace. A expansão de funções em termos de séries de funções é uma ferramenta bastante conhecida na matemática [94]. Por exemplo, é possível expandir uma função de uma única variável $f(x)$ em uma série por meio de

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \varphi_n(x), \quad (4.1)$$

em que $\varphi_n(x)$ com $n = 0, 1, 2, \dots$ é um dado conjunto de funções (usualmente $\varphi_n(x)$ é um conjunto

Tabela 4.1: Passos para o projeto da função-custo de enlace utilizando o LCFD.

Passo	Descrição	Implementação
1	Escolha das variáveis de entrada para a função-custo (parâmetros de rede usados para compor o custo de um enlace. <i>e.g.</i> comprimento, retardo ou disponibilidade de um enlace).	Escolhido pelo projetista.
2	Expansão da função-custo em uma série de funções.	Utiliza uma das representações conhecidas para funções em termos de séries. Ex: séries de Taylor, Legendre, Fourier, Hermite, etc.
3	Escolha do parâmetro de desempenho de rede a ser usado como objetivo de otimização.	Alguns exemplos de possíveis escolhas são: probabilidade de bloqueio da rede, vazão (<i>throughput</i>) da rede e retardo médio.
4	Determinação dos coeficientes da série de funções empregada por meio de um procedimento de otimização cujo objetivo é otimizar o indicador de desempenho de rede escolhido no passo 3.	Uso de alguma uma técnica de otimização. Exemplos: busca exaustiva, programação linear e não linear, algoritmo genético, <i>Particle Swarm Optimization</i> .

completo de funções que formam uma base ortogonal [94]). Diferentes conjuntos $\varphi_n(x)$ formam séries com diferentes denominações: série de Taylor para $\varphi_n(x) = 1, x^1, x^2, \dots$, série de Legendre para $\varphi_n(x) = L_n(x)$ (Polinômios de Legendre), série de Fourier para $\varphi_n(x)$ tomados como funções senos e cossenos, etc. Não somente funções de uma variável podem ser expandidas em termos de séries. É possível também se ter representações em série para funções de múltiplas variáveis [94] como mostrado, de forma genérica, em

$$f(x_0, x_1, \dots, x_k) = \sum_{n_0=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{n_k=0}^{\infty} b_{n_0, n_1, \dots, n_k} \prod_{j=0}^k \varphi_{n_j}(x_j). \quad (4.2)$$

Em termos de (4.2), a etapa dois consiste na escolha do conjunto φ_{n_j} que será usado.

Na etapa três, um indicador de desempenho de rede é escolhido como objetivo de otimização. A escolha pode ser feita de acordo com as necessidades da operadora de rede. Em LCFD, a função-custo do enlace é projetada de forma a minimizar ou maximizar o indicador selecionado. A escolha entre a minimização ou maximização depende do indicador. Por exemplo, se for escolhida a probabilidade de bloqueio como alvo de otimização, o objetivo é realizar uma minimização. Se ao contrário, a vazão (*throughput*) da rede é escolhida, uma maximização deve ser realizada. Uma função de monitorização (ou uma simulação dessa função) no plano de gerência de rede pode ser usada a fim de se avaliar o valor do indicador selecionado [95].

A quarta etapa consiste na execução de um algoritmo de otimização para encontrar os coeficientes b_{n_0, n_1, \dots, n_k} (vide (4.2)) que otimizam o indicador de desempenho escolhido, encontrando assim a função-custo mais adequada. Pode-se observar a partir de (4.2) que os únicos parâmetros a serem otimizados na função f são os coeficientes b_{n_0, n_1, \dots, n_k} da série, uma vez que x_0, x_1, \dots, x_k (variáveis de entrada) foram escolhidos no primeiro passo de LCFD e o conjunto $\varphi_n(x)$ foi escolhido no segundo passo. Isso significa que uma mudança nos coeficientes b_{n_0, n_1, \dots, n_k} altera, de fato, a função-custo. O processo de otimização pode ser formalizado como: encontrar os valores do vetor b_{n_0, n_1, \dots, n_k} que otimizam o indicador de desempenho da rede escolhido como alvo de otimização na etapa 3. É interessante notar que o procedimento de otimização pode ser feito de forma *offline*, em uma fase de planejamento de rede, ou seja, antes de sua operação. Assim, a complexidade computacional do algoritmo de roteamento projetado usando LCFD, durante a fase de operação em si da rede (*online*), fica bastante reduzida. Isso porque na fase operacional, o algoritmo projetado usando LCFD consiste apenas em recolher os valores das variáveis selecionadas no passo 1 e avaliar o valor da função-custo no ponto representado por essas variáveis.

4.2 Power Series Routing Algorithm (PSR)

Nesta seção, a metodologia LCFD proposta na Seção 4.1 é aplicada a fim de se construir uma função-custo. Essa função-custo é usada para projetar um algoritmo IA-RWA adaptativo para ser usado em redes totalmente ópticas com um tráfego dinâmico. Esse algoritmo é denominado de Roteamento por Série de Potências (PSR – *Power Series Routing*). A implantação do PSR na rede é feita em duas fases: a *fase de planejamento* e a *fase operacional*. Na fase de planejamento o LCFD é usado para projetar o algoritmo PSR. A fase de planejamento ocorre antes da operação da rede, ou seja, de maneira *offline*. Na fase operacional, o PSR é usado como algoritmo de IA-RWA durante a operação *online* da rede. São apresentadas nas Seções 4.2.1 e 4.2.2 as duas fases de implantação.

4.2.1 Fase de planejamento

O primeiro passo para aplicar o LCFD consiste em escolher as variáveis de entrada para a função-custo. Uma vez que o objetivo aqui é construir um algoritmo de roteamento que leve em conta as penalidades da camada física (PLI) (ou seja, se projetar um IA-RWA) as variáveis de entrada da função-custo devem, de alguma maneira, refletir as condições dessas penalidades. Portanto, as variáveis de entrada escolhidas devem apresentar alguma relação com as PLIs de interesse que estão penalizando a rede. Em redes ópticas, informações como: comprimento de um enlace, número de

comprimentos de onda ativos em um dado enlace e número de saltos de um caminho óptico têm alta correlação com as penalidades acumuladas ao longo desse caminho. Com o aumento do comprimento do enlace, um maior número de amplificadores ópticos deve ser implantado ou maiores ganhos devem ser fornecidos pelos amplificadores para compensar as perdas nesse enlace. Assim, mais ruído ASE é adicionado pelos amplificadores EDFA ao longo de um caminho óptico que passe por esse enlace. O comprimento do enlace também influencia na dispersão temporal do pulso óptico gerada pelos efeitos da penalidade de PMD e dispersão cromática. Outro parâmetro de enlace que apresenta alta correlação com o acúmulo de penalidades é o número de comprimentos de onda ativos em um enlace. Esse parâmetro tem impacto na saturação do amplificador e também na geração de ruído ASE, uma vez que o ganho do amplificador e a sua figura de ruído dependem da potência total de entrada no dispositivo [2, 19, 96]. O número de comprimentos de onda ativos também tem impacto na geração de efeitos não-lineares como os ruídos de mistura de quatro ondas (FWM) e modulação cruzada de fase (XPM). Finalmente, com o aumento do número de saltos (*hops*) em um caminho óptico, mais ruído de *crosstalk* é adicionado dentro dos OXC localizados nos nós intermediários. Por essas razões, foram escolhidas como variáveis de entrada para a função-custo os parâmetros de rede: comprimento do enlace e a disponibilidade do enlace, ambos normalizados e definidos a seguir. O comprimento normalizado de um enlace entre dois nós i e j é denominado $z_{i,j}$ e definido por

$$z_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{d_{max}}, \quad (4.3)$$

em que $d_{i,j}$ é o comprimento do enlace ligando os nós i e j na rede e d_{max} é o comprimento do maior enlace na rede. A outra variável de entrada escolhida é a disponibilidade de enlace normalizada. A disponibilidade de enlace normalizada $a_{i,j}$, do enlace ligando os nós i e j , é definida em

$$a_{i,j} = \frac{W_{i,j}^a}{W_{i,j}^T}, \quad (4.4)$$

em que $W_{i,j}^a$ e $W_{i,j}^T$ são, respectivamente, o número de comprimentos de onda inativos no enlace ligando os nós i e j e o número total de comprimentos de onda nesse enlace.

O segundo passo do procedimento LCFD é descrever a função-custo em termos de uma série como mostrado em (4.2). Para o PSR, optou-se pela utilização de duas variáveis de entrada para a função-custo como implementação para a etapa 1. Assim, a função-custo do enlace entre os nós i e j deve ser expandida em uma versão de duas variáveis de (4.2). Por simplicidade, o conjunto de funções de expansão escolhido como implementação do terceiro passo de LCFD foi $\varphi_n(x) = 1, x^1, x^2, \dots$

(equivalente a série de Taylor¹). A adaptação de (4.2) para o caso de duas variáveis leva a

$$f(a_{i,j}, z_{i,j}) = \sum_{n_0=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} b_{n_0,n_1} a_{i,j}^{n_0} z_{i,j}^{n_1}. \quad (4.5)$$

Como foram escolhidas variáveis de entrada normalizadas ($a_{i,j}$ e $z_{i,j}$) para a função-custo (ou seja, essas variáveis só podem assumir valores entre 0 e 1), os termos de mais alta ordem em (4.5) têm pouca contribuição no valor final de f à medida que n_0 ou n_1 crescem. Por isso, é possível truncar a série mostrada em (4.5) e obter uma aproximação dela (tão boa quanto necessária) considerando K termos, como mostrado em

$$f(a_{i,j}, z_{i,j}) = \sum_{n_0=0}^K \sum_{n_1=0}^K b_{n_0,n_1} a_{i,j}^{n_0} z_{i,j}^{n_1}. \quad (4.6)$$

Pode-se notar em (4.6) a existência de um termo constante nessa função ($b_{0,0}$). Esse termo representa o custo de um único salto no cálculo de um caminho óptico. Ou seja, sua presença permite ao PSR também levar em conta o número de saltos na decisão de roteamento.

Na terceira etapa, é preciso escolher o indicador de desempenho geral de rede que será otimizado. Para a implementação do PSR, a probabilidade de bloqueio foi escolhida como indicador global de desempenho de rede. No âmbito das condições de rede consideradas neste trabalho e discutidas no Capítulo 3, a probabilidade de bloqueio representa uma importante medida de desempenho de uma rede óptica. São consideradas tanto a disponibilidade de recursos de rede como as PLIs para o cálculo da probabilidade de bloqueio.

A quarta etapa consiste na determinação dos coeficientes da série por meio de um procedimento de otimização. No caso do PSR, essa otimização consiste em encontrar um conjunto de parâmetros reais (os coeficientes b_{n_0,n_1}) de forma a diminuir a probabilidade de bloqueio total da rede. A probabilidade de bloqueio é uma função não linear das variáveis b_{n_0,n_1} , *i.e.*, $PB(b_{n_0,n_1})$. Otimizar uma função não linear cujas variáveis de entrada são variáveis contínuas é um problema de otimização conhecido em pesquisa operacional como Programação não-linear (NLP – *Non-Linear Programming*) [97]. As metodologias disponíveis na literatura para solução ótima de problemas NLP são baseadas, em geral, no conhecimento de certas características da função objetivo (no caso do PSR a função probabilidade de bloqueio $PB(b_{n_0,n_1})$), como sua forma ou suas derivadas. Nenhuma dessas características é conhecida para a função $PB(b_{n_0,n_1})$. Ela é retornada por um simulador de rede (SIMTON) e não apresenta uma expressão analítica. Esse é, portanto, um problema de otimização cujo objetivo é minimizar uma função cujas características não são totalmente conhecidas

¹A série de Taylor pode ser usada aqui sem perda de generalidade. Na verdade, existe um conjunto discreto de valores possíveis para o comprimento e disponibilidade de um enlace. Portanto, há sempre um polinômio de grau finito que interpola a função f , o que garante a convergência da série para todo o domínio da função f .

Tabela 4.2: Etapas de LCFD e as respectivas implementações usadas para o projeto do PSR.

Passo	Descrição	Implementação
1	Escolha das variáveis de entrada para a função-custo (parâmetros de rede usados para compor o custo de um enlace).	Comprimento normalizado do enlace ($z_{i,j}$) e disponibilidade normalizada do enlace ($a_{i,j}$).
2	Expansão da função-custo em uma série de funções.	Série de potência (série de Taylor): $f(a_{i,j}, z_{i,j}) = \sum_{n_0=0}^K \sum_{n_1=0}^K b_{n_0,n_1} a_{i,j}^{n_0} z_{i,j}^{n_1}.$
3	Escolha do parâmetro de otimização global de desempenho da rede a ser usado como objetivo de otimização.	Probabilidade de bloqueio.
4	Determinação dos coeficientes da série de funções empregada por meio de um procedimento de otimização.	Otimização por enxame de partículas (PSO).

($PB(b_{n_0,n_1})$), que apresenta uma alta dimensionalidade (grande número de variáveis de entrada) e que envolve a otimização de parâmetros reais. A técnica de otimização proposta pela inteligência de enxames, denominada de otimização por enxame de partículas (PSO), tem se mostrado como uma técnica bastante eficiente para resolver esse tipo de problema. Sendo assim, no caso do PSR, foi escolhido o PSO para realizar a otimização dos coeficientes b_{n_0,n_1} .

A Tabela 4.2 resume como o LCFD é utilizado para projetar o PSR.

Algoritmo 3 Pseudocódigo do PSR – Fase de operação

- 1: Receba o pedido de conexão entre os nós s (nó fonte) e d (nó destino);
 - 2: Calcule os custos de todos os enlaces usando (4.6) com os b_{n_0,n_1} otimizados encontrados durante a fase de planejamento;
 - 3: Encontre o caminho $\pi(s, d)$ de menor custo entre os nós s e d utilizando o algoritmo de Dijkstra para o menor caminho;
 - 4: Selecione um comprimento de onda disponível λ_i usando a política de *First Fit*;
 - 5: **if** (Há um comprimento de onda disponível) **then**
 - 6: Retorne o caminho óptico encontrado; // rota $\pi(s, d)$ e comprimento de onda λ_i
 - 7: **else**
 - 8: Retorne nenhum caminho óptico foi encontrado; // isto é, chamada deve ser bloqueada
 - 9: **end if**
-

4.2.2 Fase operacional

Após a conclusão da fase de planejamento, o PSR pode ser usado como um algoritmo de IA-RWA na rede óptica. Devido às variáveis escolhidas para a função-custo do enlace, o PSR é um algoritmo

de RWA adaptativo. Isso significa que a rota encontrada pelo PSR depende do estado atual da rede. O procedimento de roteamento do PSR é definido pela função-custo obtida na fase de planejamento. Por simplicidade, o algoritmo de atribuição de comprimento de onda (WA) utilizado com o PSR foi o *First Fit* (ver Seção 2.1.2) [24]. Neste trabalho, o PSR foi aplicado em redes transparentes (contudo, já foi mostrado que o PSR pode ser aplicado também em redes opacas e translúcidas [98]). Portanto, em sua fase de operação, o PSR implementa o bloco denominado “RWA” no diagrama de blocos mostrado na Figura 3.4. O PSR em sua fase de operação pode ser implementado conforme mostrado no Algoritmo 3.

4.3 Otimização por Enxame de Partículas (PSO)

A fim de se encontrar os coeficientes b_{n_0, n_1} a serem usados na função-custo pelo PSR, foi utilizada a técnica de otimização proposta na inteligência computacional, PSO [31, 99]. O PSO é uma técnica de otimização bastante eficiente em problemas nos quais é necessário otimizar um grande conjunto de variáveis contínuas [99]. O problema de otimização apresentado pelo PSR se enquadra exatamente nesse contexto e, por isso, o PSO foi escolhido para realizar essa otimização no PSR. Nesta seção será feita uma breve descrição do PSO.

Dada uma função $g(x_1, \dots, x_n) : R^n \rightarrow R$, o PSO tenta encontrar para quais valores das variáveis x_1, \dots, x_n da função $g(x_1, \dots, x_n)$ apresenta seu valor mínimo (ou máximo). Ou seja, o PSO pode ser usado para efetuar tanto uma minimização quanto uma maximização da função g . Na aplicação aqui proposta para o PSO, as variáveis x_1, \dots, x_n correspondem a uma forma vetorizada dos coeficientes b_{n_0, n_1} que devem ser otimizados. Um conjunto x_1, \dots, x_n é chamado de *partícula* no jargão do PSO. A função $g(x_1, \dots, x_n)$ por sua vez, representa a probabilidade de bloqueio (a que fornecida pelo simulador de rede) resultante de uma simulação de rede considerando um grande número de pedidos de conexão. Cada vez que o PSO propõe uma nova solução para os coeficientes b_{n_0, n_1} , esses são usados no Algoritmo 3, que é aplicado como RWA no simulador de rede, resultando em uma probabilidade de bloqueio referente aos coeficientes testados. A probabilidade de bloqueio retornada pelo PSO é chamada de *função aptidão* ou *fitness*.

O PSO foi proposto por Kennedy e Eberhart em 1995 é inspirado em bandos de aves [31]. O algoritmo é baseado em um refinamento iterativo de um conjunto de soluções candidatas a serem o mínimo (ou máximo) global de uma função. Como foi visto, cada solução candidata é referida como uma partícula. Cada partícula i tem alguns atributos: sua velocidade atual \vec{v}_i , sua posição atual \vec{x}_i , a melhor posição na qual a partícula já esteve durante o processo de busca \vec{p}_i e a sua

aptidão. A propriedade de aptidão de uma partícula representa uma medida de quão boa é a solução representada por essa partícula. Supondo que a função $g()$ está sob um processo de minimização, a aptidão da partícula i pode ser avaliada por sua função aptidão $g(\vec{x}_i)$. Quanto menor é o valor de $g(\vec{x}_i)$, mais apta é a partícula i . O termo posição de uma partícula corresponde a um ponto no hiperespaço n dimensional representado pelo vetor x_1, \dots, x_n da partícula. O refinamento da solução (partícula) de uma iteração para a próxima é realizado por meio das atualizações na velocidade e na posição da partícula. Ambas são atualizadas para todas as partículas a cada iteração do PSO. No PSO usado neste trabalho, as velocidades das partículas são atualizadas usando a abordagem denominada de *constriction factor* [100] que é realizada usando

$$v_{i,d} = \chi[v_{i,d} + c_1\epsilon_1(p_{i,d} - x_{i,d}) + c_2\epsilon_2(p_{n(i),d} - x_{i,d})], \quad (4.7)$$

em que $v_{i,d}$ representa a d -ésima componente de \vec{v}_i (a mesma notação é usada para os outros vetores), c_1 e c_2 são constantes, ϵ_1 e ϵ_2 são números reais aleatórios dentro do intervalo entre 0 e 1 e χ é calculado utilizando

$$\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = c_1 + c_2. \quad (4.8)$$

Neste trabalho foi adotado $\varphi > 4$, seguindo a recomendação de Clerc e Kennedy [100]. O pseudocódigo do PSO utilizado neste trabalho é mostrado no Algoritmo 4. Alguns símbolos, além dos comentados, aparecem nesse pseudocódigo. $n(i)$ representa o índice da partícula mais apta pertencente ao conjunto de vizinhos da partícula i . Os vizinhos de cada partícula são definidos pela topologia de comunicação do enxame [99]. Neste trabalho utilizou-se a topologia de comunicação em anel, também conhecida como *Lbest*. Nessa topologia, cada partícula troca informações com apenas duas outras partículas vizinhas, as quais permanecem as mesmas durante toda a execução do algoritmo [101]. O uso dessa topologia é recomendado por Bratton e Kennedy [101] uma vez que ela diminui a chance do PSO ficar preso em mínimos locais durante o processo de otimização.

4.3.1 Análise do tempo computacional durante a fase de planejamento

Devido às várias chamadas que o PSO faz ao simulador de redes ópticas (dependendo da simulação considerada o simulador pode levar bastante tempo para ser executado) e ao fato do processo de otimização realizado pelo PSO, em geral, necessitar de um elevado número de iterações, pode ser necessário um longo tempo para se prover uma resposta final. Do ponto de vista da operação da rede isso não representa uma desvantagem pois, como foi visto, esse processo é feito na fase de planejamento da rede, a qual acontece antes da operação. A linha 4 do Algoritmo 4 requer um tempo

Algoritmo 4 Pseudocódigo do PSO

```

1: Inicialize a população de forma aleatória (distribuição uniforme);
2: for  $k = 1$  to  $G$  do // Faça até atingir o critério de parada
3:   for  $i = 1$  to  $P$  do // Faça para cada partícula
4:     Calcule  $g(\vec{x}_i)$ ; // Calcula a função aptidão da partícula
5:     if  $g(\vec{x}_i) < g(\vec{p}_i)$  then // A partícula encontrou uma solução melhor?
6:        $\vec{p}_i = \vec{x}_i$ ; // Atualiza a melhor posição encontrada pela partícula
7:     end if
8:     for  $d = 1$  to Dimensão do // Para cada dimensão da partícula
9:        $v_{i,d} = \chi(v_{i,d} + c_1\epsilon_1(p_{i,d} - x_{i,d}) + c_2\epsilon_2(p_{n(i),d} - x_{i,d}))$ ; // Atualiza a velocidade da partícula
10:       $x_{i,d} = (v_{i,d} + x_{i,d})$ ; // Atualiza a posição da partícula
11:    end for
12:  end for
13: end for
14: Retorne  $\vec{p}_i$  com o menor valor de  $g(\vec{p}_i)$ ;

```

de execução algumas ordens de grandeza superior às demais linhas do algoritmo. Nessa linha, é avaliada a probabilidade de bloqueio da rede por meio da simulação de um determinado conjunto de pedidos de conexão. Assim, a quantidade de tempo gasta na fase de planejamento é praticamente proporcional ao número de vezes que a linha 4 é executada pelo PSO. Por isso, o tempo necessário para se realizar a fase de planejamento pode ser avaliada por

$$tempo_{planejamento} = P \cdot G \cdot N_C \cdot t_C \cdot M, \quad (4.9)$$

em que P é o número de partículas pertencentes ao enxame do PSO, G é o número de iterações realizadas pelo PSO, N_C é o número de requisições de chamadas simuladas pelo simulador de redes para se avaliar a probabilidade de bloqueio, t_C é o tempo médio necessário para simular uma requisição de chamada. O resultado da probabilidade de bloqueio de uma rede é obtido por meio de simulação. Portanto, esse resultado possui um comportamento estocástico. Dessa forma, a função de aptidão usada pelo PSO possui uma componente de ruído estatístico. Com o intuito de minimizar esse efeito, cada probabilidade de bloqueio de cada partícula é avaliada M vezes e a média destas M avaliações é considerada como a aptidão da partícula em questão.

Note que o algoritmo PSO pode ser facilmente implementado em um computador paralelo. Nesse caso, cada partícula do enxame pode ser executada em um processador dedicado. Assim, o tempo de computação necessário para executar a fase de planejamento pode ser reduzido, aproximadamente, por um fator de $P \cdot M$, se houver $P \cdot M$ processadores paralelos disponíveis. Nesse caso, o tempo

necessário para se realizar a fase de planejamento pode ser avaliado por

$$tempo_{planejamento, paralelo} = G \cdot N_C \cdot t_C. \quad (4.10)$$

4.4 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados referentes à aplicação do PSR como algoritmo de roteamento em redes ópticas.

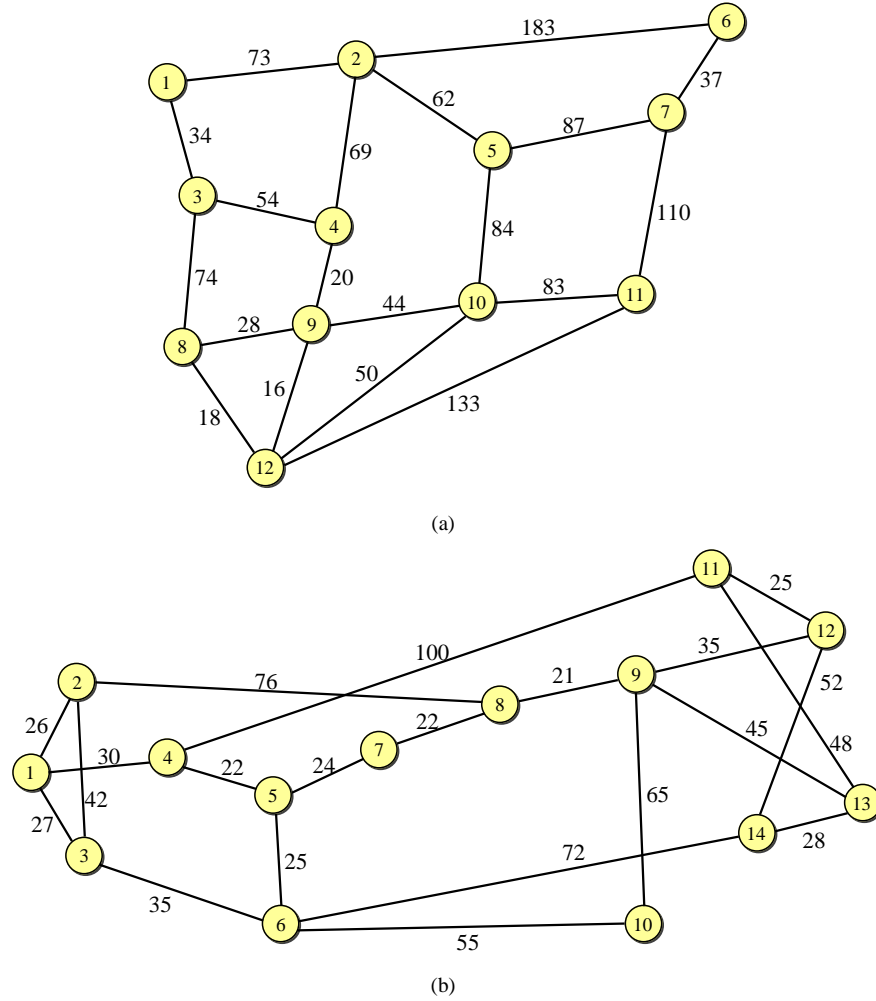


Figura 4.1: Topologias usadas para as simulações de rede: (a) topologia da Finlândia, (b) topologia Americana. Os comprimentos dos enlaces são dados em km.

4.4.1 Condições de simulação

A configuração e os parâmetros ópticos utilizados nas simulações são descritos nessa seção. Os resultados foram obtidos para duas redes em malha utilizadas na literatura: a topologia da Finlândia

(Figura 4.1(a)) e a topologia Americana (Figura 4.1(b)). A fim de evitar a apresentação de resultados repetitivos, foi fornecida uma extensa análise para a topologia da Finlândia, enquanto que para a topologia Americana apenas os principais resultados obtidos são apresentados. Os efeitos de degradação da camada física considerados foram: SSE, PMD (considerado apenas para a rede da Finlândia), ruído ASE, a saturação de ganho no amplificador EDFA, saturação do ruído ASE, perdas nos multiplexadores, nos demultiplexadores e comutadores ópticos e *crosstalk* homodino no comutador óptico OXC.

Tabela 4.3: Parâmetros ópticos usados na simulação.

Parâmetro	Valor			Definição
	Americana	Finlândia S_1	Finlândia S_2	
P_{in}	0 dBm	0 dBm	0 dBm	Potência de saída do transmissor.
$OSNR_{QoT}$	23 dB	23 dB	23 dB	Relação sinal ruído usada com critério de QoT.
B	40 Gb/s	40 Gb/s	40 Gb/s	Taxa de transmissão.
B_o	100 GHz	100 GHz	100 GHz	Largura de banda do filtro óptico.
Δf	100 GHz	100 GHz	100 GHz	Espaçamento entre canais.
λ_i	1550.12 nm	1550.12 nm	1550.12 nm	Primeiro comprimento de onda no <i>grid</i> .
λ_0	1510 nm	1510 nm	1510 nm	Zero de dispersão da fibra.
α	0.2 dB/km	0.2 dB/km	0.2 dB/km	Coefficiente de perda da fibra.
L_{Mux}	3 dB	3 dB	3 dB	Perda no multiplexador.
L_{Demux}	3 dB	3 dB	3 dB	Perda no demultiplexador.
L_{Switch}	3 dB	3 dB	3 dB	Perda no comutador óptico.
ϵ	-41 dB	-41 dB	-41 dB	Fator de isolamento do comutador óptico.
F_0 (NF)	3.162 (5 dB)	3.162 (5 dB)	3.162 (5 dB)	Fator de ruído dos amplificadores (figura de ruído).
A_1	100	100	100	Parâmetro do modelo de fator de ruído [19].
A_2	4 W	4 W	4 W	Parâmetro do modelo de fator de ruído [19].
P_{Sat}	16 dBm	19 dBm	19 dBm	Potência de saturação na saída do amplificador.
$OSNR_{in}$	30 dB	40 dB	40 dB	Relação sinal-ruído do laser de transmissão.
W	36	21	20	Número de comprimentos de onda.
D_{PMD}	não considerado	não considerado	0.145 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Coefficiente de PMD da fibra.

No caso da topologia da Finlândia, os parâmetros da camada física e as características dos dispo-

sitivos foram definidos para duas situações diferentes. No primeiro cenário, denominado S_1 , o efeito PMD é considerado desprezível (considerou-se o uso de novas fibras com um coeficiente de PMD muito baixo). No segundo cenário, denominado S_2 , o alargamento do pulso óptico devido ao efeito de PMD é levado em consideração. Em ambos os cenários, os parâmetros ópticos foram definidos de modo que o número de chamadas bloqueadas devido às penalidades geradas pelos amplificadores ópticos, pelo *crosstalk* homodino do OXC, pela falta de comprimento de onda e pelo alargamento temporal do pulso óptico devido à PMD (apenas no cenário S_2) ocorressem em números praticamente iguais. Os parâmetros ópticos utilizados estão listados na Tabela 4.3 nas colunas Finlândia S_1 e Finlândia S_2 para a topologia da Finlândia e na coluna Americana para a topologia Americana. Para ambas as redes, os ganhos dos amplificadores foram dimensionados para compensar as perdas.

4.4.2 Resultados – fase de planejamento

É necessário encontrar os valores otimizados para os coeficientes b_{n_0, n_1} antes de utilizar o PSR como algoritmo de RWA. Como discutido na Seção 4.2, essa ação é realizada na fase de planejamento usando o PSO. O objetivo dessa otimização é o de minimizar a probabilidade de bloqueio da rede. O SIMTON, em sua versão transparente, é executado para avaliar a probabilidade de bloqueio. A probabilidade de bloqueio é atribuída como aptidão da partícula. Durante a fase de planejamento, a rede é simulada com um conjunto de 20.000 pedidos de conexão considerando uma carga de 80 erlangs e um tráfego uniforme. Para a avaliação da função aptidão de cada partícula, o SIMTON é chamado M vezes de forma independente como discutido na Seção 4.3.1. Os parâmetros utilizados pelo algoritmo PSO para o processo de otimização são listados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros de simulação do PSO.

Parâmetro	Valor	Definição
P	50	Número de partículas.
G	500	Número de iterações.
c_1, c_2	2.05	Parâmetros de atualização de velocidade [100].
ϵ_1, ϵ_2	U[0,1]	Números aleatórios com distribuição uniforme.
χ	0.72984	<i>Constriction factor</i> [100].
S	[-1,+1]	Espaço de busca do PSO.
V_{max}	+1	Velocidade máxima.
V_{min}	-1	Velocidade mínima.
M	3	Número de simulações de rede para definição da função aptidão das partículas do enxame.

O parâmetro K em (4.6) define a dimensão do problema de otimização a ser tratado pelo PSO. Esse número não deve ser grande demais para não tornar a otimização inviável de ser feita pelo PSO, mas deve ser grande o suficiente para se ter uma melhor representação para um maior número possível de funções. É fácil perceber que o número de dimensões do problema de otimização é $(K + 1)^2 - 1$. A fim de se escolher o melhor valor para o parâmetro K a ser usado em (4.6) e demonstrar a convergência do PSO na fase de planejamento, foram traçados os gráficos da probabilidade de bloqueio da melhor partícula do enxame (ou seja, menor probabilidade de bloqueio) para cada iteração do PSO para os casos $K = 2, 3, 4$ e 6 . Esses resultados foram obtidos para a topologia da Finlândia e estão mostrados na Figura 4.2. Com o objetivo de investigar a consistência do procedimento de otimização executado pelo PSO, foram realizadas três otimizações de forma independente. Elas são denominadas nos resultados de PSR-1, PSR-2 e PSR-3.

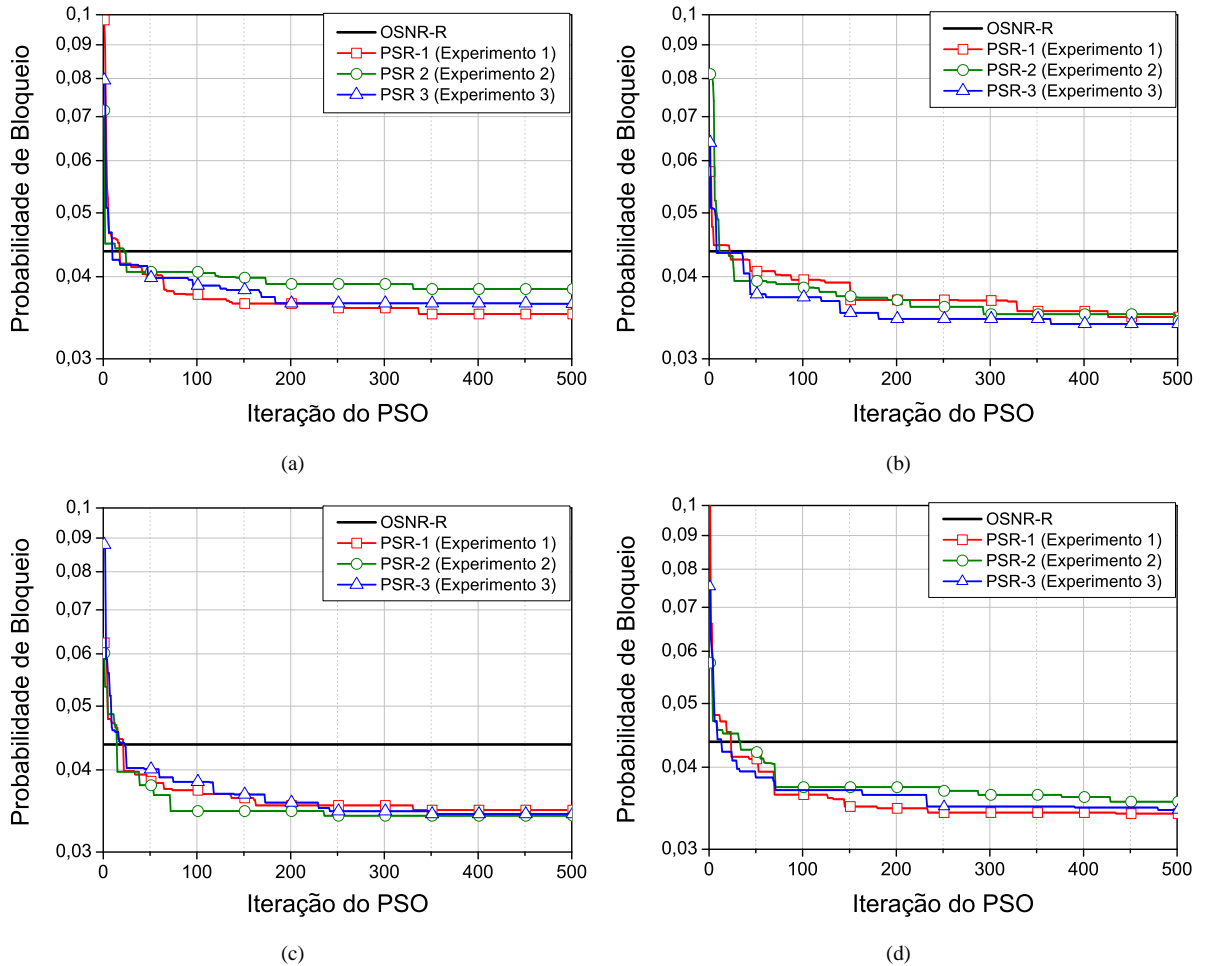


Figura 4.2: Evolução da probabilidade de bloqueio da melhor partícula encontrada pelo PSO durante a fase de planejamento para a topologia da Finlândia em função do número de iterações do PSO para: (a) $K = 2$, (b) $K = 3$, (c) $K = 4$ e (d) $K = 6$.

Tabela 4.5: Coeficientes b_{n_0, n_1} da série de funções obtidos pelo PSO durante a fase de planejamento da rede considerando a topologia da Finlândia nos cenários S_1 e S_2 .

Cenário	S_1			S_2		
Ensaio	$PSR - 1$	$PSR - 2$	$PSR - 3$	$PSR - 1$	$PSR - 2$	$PSR - 3$
$b_{0,0}$	0,6848470	0,4673470	0,4797250	0,5731190	0,4970370	0,5233060
$b_{1,0}$	0,1573230	0,5283410	0,3743070	0,9498750	0,6977420	0,2964300
$b_{2,0}$	1,0000000	0,8591380	0,8312340	-0,2240980	0,6420390	0,8941690
$b_{3,0}$	0,7945840	0,1419640	0,6512840	0,9457810	0,9999730	0,3388510
$b_{0,1}$	-0,9337980	-0,7572170	-0,7870770	-0,9221430	-0,9968630	-0,5595370
$b_{1,1}$	-0,4137700	-0,0334312	-0,9628860	-0,1366310	-0,5720200	-0,1043910
$b_{2,1}$	0,9122760	0,3390390	0,1901600	0,2517180	-0,6893110	0,2181310
$b_{3,1}$	0,0847539	0,1743230	0,5144140	0,2061980	0,8837460	0,8299890
$b_{0,2}$	-0,3877220	-0,2689320	-0,0175953	-0,1503240	0,5165190	-0,6600150
$b_{1,2}$	0,3879080	-0,8348800	0,2106870	-0,1389380	0,1495170	-0,3232600
$b_{2,2}$	0,6533890	0,1676200	-0,3184790	0,6444900	-0,3224310	-0,3582540
$b_{3,2}$	-0,6160160	0,5076180	0,4460430	0,1935000	0,2297560	0,2775370
$b_{0,3}$	0,8628460	0,8288250	0,7852710	0,8813470	0,3884440	0,9732320
$b_{1,3}$	-0,8848070	-0,2619710	-0,6598220	-0,7820940	-0,2467940	-0,0501392
$b_{2,3}$	-0,5578530	0,2688740	-0,6102220	-0,6507130	-0,7149680	-0,3715730
$b_{3,3}$	-0,0147896	-0,7062540	0,0275871	0,1233000	0,0856321	-0,3598710

Na Figura 4.2, a linha preta horizontal representa a probabilidade de bloqueio alcançada pelo algoritmo OSNR-R. O algoritmo OSNR-R é um algoritmo de IA-RWA que leva em conta as PLIs durante a decisão de RWA. Dessa forma, espera-se que ele apresente um bom desempenho em termos de probabilidade de bloqueio. O objetivo do PSR é, portanto, conseguir um desempenho melhor ou similar ao apresentado pelo OSNR-R. Pode-se notar na Figura 4.2 que, após cerca de 350 iterações, todos os ensaios independentes realizados convergem para quase o mesmo nível de probabilidade de bloqueio. Além disso, nenhuma mudança significativa é observada na probabilidade de bloqueio quando se consideram iterações do PSO além desse ponto. Esse comportamento pode ser observado para todos os valores investigados de K . Para todos os valores de K e para todos os ensaios independentes de otimização investigados, o PSO encontra coeficientes b_{n_0, n_1} que resultam em níveis de probabilidade de bloqueio mais baixos do que o alcançado pelo OSNR-R. No melhor dos casos, para $K = 6$, o PSO necessita de apenas 40 iterações para atingir o mesmo nível de bloqueio apresentado pelo OSNR-R. Observando os resultados mostrados na Figura 4.2, selecionou-se $K = 3$ como um bom compromisso entre o número de dimensões a serem tratadas pelo PSO e a probabilidade de bloqueio resultante encontrada pelo PSO após 500 iterações. À medida que K aumenta,

a dimensionalidade da otimização também aumenta e, portanto, o tempo computacional necessário para a convergência PSO também aumenta. Resultados similares foram observados para a topologia Americana, porém para essa topologia foi escolhido $K = 4$.

Os parâmetros b_{n_0, n_1} obtidos para os três ensaios de otimização nos cenários S_1 e S_2 para a topologia da Finlândia estão mostrados na Tabela 4.5. Na Figura 4.3 foram traçadas, em termos de curvas de nível, duas das funções-custo encontradas para a topologia da Finlândia em função de suas variáveis $a_{i,j}$ e $z_{i,j}$. A função-custo encontrada para a topologia Americana em função de suas variáveis $a_{i,j}$ e $z_{i,j}$ foi traçada, em termos de curvas de nível, na Figura 4.4. Como esperado, nota-se que, para ambos os casos, o custo de um enlace é alto para longas distâncias e baixos valores de disponibilidades (regiões mais claras do gráfico) e, baixo para distâncias curtas e disponibilidades altas (regiões mais escuras no gráfico). No entanto, deve-se notar que diferentes cenários resultam em diferentes funções. Isso indica a capacidade do PSR de saber qual a condição atual da rede no que diz respeito às PLIs, ao tráfego e à topologia da rede alvo e de se adaptar da melhor forma a essas condições.

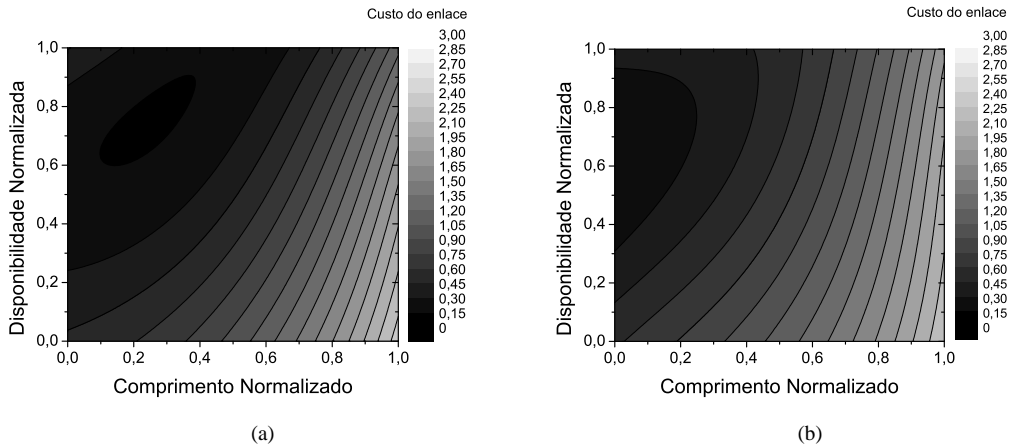


Figura 4.3: Representação em termo de curvas de nível da melhor função-custo $f(a_{i,j}, z_{i,j})$ encontrada pelo PSO em função do comprimento normalizado do enlace e da disponibilidade normalizada do enlace para a topologia da Finlândia nos cenários: (a) S_1 e (b) S_2 .

4.4.3 Resultados de tempo para a fase de planejamento

Uma questão interessante a ser analisada na fase de planejamento é o tempo necessário para se resolver o problema de otimização. Verificou-se que, a execução do SIMTON em um computador Intel® Core™2 @2,13 GHz com 3 GB de memória RAM, apresenta um tempo médio por chamada (t_C) para solucionar o problema de RWA utilizando o PSR de 0, 15 ms. Com o propósito de avaliar a

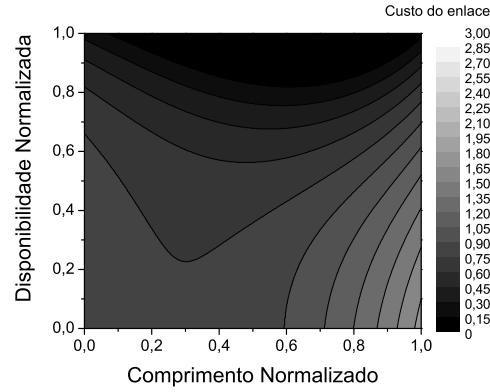


Figura 4.4: Representação em termos de curvas de nível da melhor função-custo $f(a_{i,j}, z_{i,j})$ encontrada pelo PSO em função do comprimento de enlace normalizado e da disponibilidade normalizada para a topologia Americana.

quantidade de tempo necessária para a realização da fase de planejamento, pode-se usar (4.9) e (4.10). Para uma arquitetura de computador não-paralela, a primeira equação é utilizada. Usando os valores listados na Tabela 4.4 e o número de chamadas igual a 20.000, pode-se obter $tempo_{planejamento} = 500 \cdot 50 \cdot 20.000 \cdot 0,15 \text{ ms} \cdot 3 = 62,5$ horas. No entanto, como foi discutido na Seção 4.4.2, apenas 350 iterações são necessárias para o PSO convergir e, portanto ter-se-ia $t_{planejamento} = 43,75$ horas. Por outro lado, fazendo uso de um computador paralelo, é esperada uma redução de tempo por um fator de aproximadamente $P \cdot M$ (que corresponde a 150 de acordo com (4.10)), levando a $tempo_{planejamento} = 17,5$ minutos.

4.4.4 Resultados da fase operacional

Após a determinação dos coeficientes da série na fase de planejamento, pode-se usar o PSR para resolver o RWA durante a operação *online* da rede. A operação *online* consiste em encontrar uma rota e um comprimento de onda para cada pedido de conexão. Esses pedidos chegam para a rede de forma dinâmica usando um certo padrão de tráfego. Todos os resultados de probabilidade de bloqueio em função da carga da rede foram obtidos pela simulação de um conjunto de 10^7 pedidos de conexão gerados e simulados pelo SIMTON.

Os resultados de probabilidade de bloqueio obtidos pelo PSR foram comparados com os resultados obtidos por outros quatro algoritmos de RWA: SP, LRW, LOR e OSNR-R (SP, LRW e LOR utilizam o FF como WA). A Figura 4.5(a) mostra a probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede para os cinco algoritmos considerados quando aplicados à topologia da Finlândia no cenário S_1 . Pode-se notar que o PSR apresenta uma probabilidade de bloqueio muito menor do que as obtidas utilizando os algoritmos SP, LOR ou LRW. Além disso, comparando os resultados alcançados

pela probabilidade de bloqueio do PSR com os obtidos pela abordagem de IA-RWA OSNR-R, o PSR apresenta uma probabilidade de bloqueio ligeiramente melhor para baixos valores de carga e bastante semelhante para cargas médias e altas. Isso significa que o PSR é capaz de atingir o bom desempenho conseguido pelo OSNR-R sem a necessidade de recorrer a avaliações diretas das PLIs em tempo real. Na verdade, a informação sobre as PLIs foram armazenadas de forma indireta nos coeficientes b_{n_0, n_1} durante a fase de planejamento. Isso significa que é possível construir uma função-custo unicamente considerando os parâmetros de comprimento de enlace, disponibilidade de enlace e custo de salto e ainda assim obter uma estimativa muito boa sobre a QoT de um determinado caminho óptico. A chave é encontrar o equilíbrio correto entre as variáveis de entrada que compõem a função-custo do enlace. Os resultados da Figura 4.5(a) mostram que uma maior probabilidade de bloqueio é obtida quando se escolhe ou apenas a distância (como faz o SP), ou apenas a disponibilidade (como faz o LRW), ou uma combinação não otimizada dessas duas métricas (como faz o LOR).

Analisando na Figura 4.5(a) a robustez do PSR em encontrar soluções otimizadas para os coeficientes da função, percebe-se que as três funções-custo diferentes obtidas em três ensaios independentes de otimização (PSR-1, PSR-2 e PSR-3) mostram quase o mesmo desempenho em todo intervalo de cargas considerado. Isso indica robustez e confiabilidade nos resultados obtidos pelo PSR.

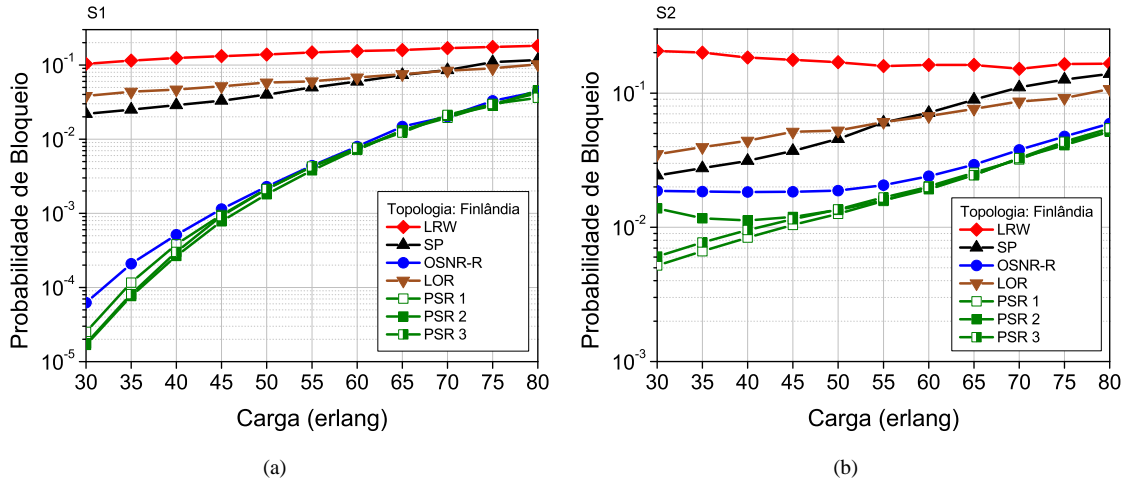


Figura 4.5: Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede apresentadas pelos algoritmos SP, LRW, LOR, OSNR-R e PSR considerando a topologia da Finlândia para os cenários: (a) S_1 e (b) S_2 .

Conclusões semelhantes podem ser obtidas quando o efeito de PMD é considerado (cenário S_2). Realizou-se a mesma análise feita para o cenário S_1 no cenário S_2 na topologia da Finlândia, como mostrado na Figura 4.5(b). O PSR novamente supera os algoritmos de SP, LOR ou LRW. Além disso, no cenário S_2 , o PSR apresenta uma probabilidade de bloqueio menor do que a alcançada

pelo algoritmo OSNR-R para todo o intervalo de carga considerado. O ensaio PSR-2 mostra um desempenho pior do que os ensaios PSR-1 e PSR-3 para cargas baixas (abaixo de 40 erlangs). No entanto, o nível de bloqueio do PSR-2 é ainda menor do que os outros algoritmos de RWA mostrados.

Foi também investigada a aplicação do PSR na topologia Americana. Os resultados são mostrados na Figura 4.6. Novamente o PSR obtém uma probabilidade de bloqueio muito menor do que as obtidas pelos algoritmos SP, LOR e LRW. Além disso, comparando os resultados de probabilidade de bloqueio alcançados pelo PSR com os obtidos pelo OSNR-R, o PSR tem um desempenho de rede ligeiramente melhor para cargas médias e altas, e um desempenho ligeiramente pior para cargas baixas.

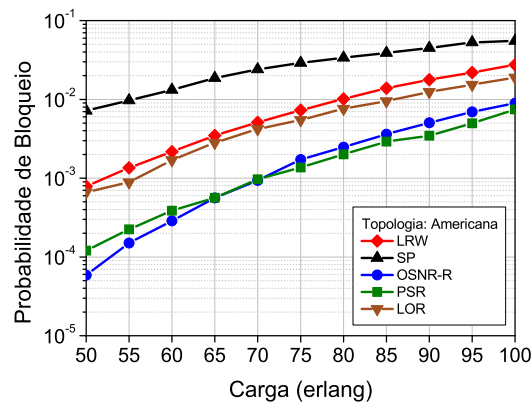


Figura 4.6: Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede apresentada pelos algoritmos SP, LRW, LOR, OSNR-R e PSR considerando a topologia Americana.

Os resultados mostrados nas Figuras 4.5(a), 4.5(b) e 4.6 indicam que o algoritmo PSR mantém seu nível de desempenho, mesmo para cargas diferentes daquelas para a qual o PSR foi otimizado durante a fase de planejamento. Isso indica que o PSR é robusto o suficiente para lidar com variações na intensidade de carga total da rede que podem ocorrer ao longo do tempo.

É também interessante investigar a robustez do PSR quando a distribuição de tráfego na fase de operação é diferente da distribuição uniforme para a qual o PSR foi otimizado na fase de planejamento. Para verificar isso, foi analisado o desempenho dos algoritmos em função da variação na distribuição de carga entre os nós da rede. Essa análise é denominada de Geração Aleatória de Tráfego Não Uniforme (GATNU). A GATNU pode ser usada como métrica de avaliação/comparação de desempenho de algoritmos de RWA. Ela indica de que forma um determinado algoritmo de RWA consegue lidar bem ou mal com padrões de tráfegos diferentes apresentados a uma rede. Ao melhor conhecimento deste autor, GATNU é uma métrica inovadora, proposta nesta Tese, para avaliação de

algoritmos de RWA. Para realizar a análise GATNU, toma-se por base uma matriz de tráfego uniforme $T = \{\rho_{ij}\}$. É produzida uma variação na matriz T para gerar uma matriz $T' = \{\rho'_{ij}\}$, não uniforme, que pode ser interpretada como uma simulação de uma possível flutuação na distribuição de tráfego que pode acontecer ao longo do dia em uma rede real. T' é calculada a partir de T pela multiplicação de cada elemento $\{\rho_{ij}\}$ de T por um número aleatório: $\rho'_{ij} = (1 + r) \cdot \rho_{ij}$, em que r é um número aleatório com uma distribuição uniforme no intervalo $[-R, R]$. R é a variação de carga máxima permitida por par origem-destino. A matriz T' é normalizada para se manter a mesma carga total da rede apresentada pela matriz T . Assim, $R = 0$ corresponde ao caso de tráfego uniforme, enquanto que $R \neq 0$ corresponde a um tráfego não-uniforme. $R = 0,5$ representa o caso no qual a carga de um determinado par origem-destino pode, no máximo, aumentar ou diminuir em 50% em relação ao tráfego uniforme. Pode-se observar que a matriz de tráfego está sendo aleatoriamente modificada. Em alguns casos, a nova matriz pode aumentar a carga em rotas menos congestionadas e diminuir a carga em rotas mais congestionadas, levando a uma menor probabilidade de bloqueio da rede. Em alguns outros casos, a nova matriz gerada pode fazer o oposto, levando a uma maior probabilidade de bloqueio da rede. Esse comportamento é esperado, mesmo que a carga total da rede seja mantida constante para todos os casos. A GATNU consiste na comparação da amplitude dessas variações para cada algoritmo de RWA quando um número considerável de matrizes de tráfego não-uniformes é gerada.

Para realizar a análise GATNU dos algoritmos foi selecionado o caso de uma grande variação na matriz de tráfego (ou seja, $R = 1$) para ser feita uma análise estatística do comportamento da probabilidade de bloqueio do algoritmo PSR, em relação aos outros algoritmos. Foi gerado um conjunto de 30 matrizes de tráfego diferentes e independentes para GATNU. Para cada uma dessas matrizes, obteve-se a probabilidade de bloqueio dos quatro algoritmos considerados: SP, LRW, OSNR-R e PSR. Definiu-se o indicador de *desempenho relativo* como a razão entre a probabilidade de bloqueio obtida para um determinado algoritmo (ou seja, SP, LRW ou OSNR-R) e a probabilidade de bloqueio obtida pelo PSR.

Os resultados da análise GATNU para a topologia da Finlândia são mostrados na Figura 4.7(a) (cenário S_1) e na Figura 4.7(b) (cenário S_2). Nessas figuras são traçados os desempenhos relativos dos algoritmos SP, LRW e OSNR-R em termos de um gráfico de caixa e bigodes (*box and whisker plot*). A caixa representa a região na qual se encontram 50% dos resultados obtidos para o indicador de desempenho relativo quando 30 experimentos independentes são realizados (30 matrizes não uniformes geradas para realização de GATNU). Os bigodes do gráfico de caixa e bigodes correspondem

a 100% dos dados obtidos, os símbolos representam o valor médio e a linha horizontal no interior da caixa a mediana. Os símbolos do lado esquerdo da caixa representam o desempenho relativo de um determinado algoritmo obtido quando se considera um tráfego uniforme. Note que valores acima de 1 para o indicador de desempenho relativo significam que o PSR tem uma menor probabilidade de bloqueio do que um determinado algoritmo (SP, LRW ou OSNR-R), enquanto que se for inferior a 1, o PSR apresenta uma maior probabilidade de bloqueio que um determinado algoritmo (SP, LRW ou OSNR-R). Claramente, o desempenho médio do PSR em relação aos outros algoritmos, dado pelos símbolos nas Figuras 4.7(a) e 4.7(b), não se alterou significativamente quando se compara o caso de tráfego uniforme ($R = 0$) com o caso de tráfego não-uniforme ($R = 100\%$). Além disso, a variação no desempenho relativo, dado pelas caixas e bigodes nas Figuras 4.7(a) e 4.7(b), indicam que, para algumas matrizes, o PSR é ligeiramente melhor do que os outros algoritmos, em relação ao caso do tráfego uniforme, e para algumas outras matrizes é um pouco pior. Note que para os dois gráficos apresentados o valor do indicador de desempenho relativo permanece acima de 1 para todos os algoritmos investigados, ou seja, isso significa que, para as 30 matrizes aleatórias geradas, o PSR foi melhor que os outros algoritmos em termos de desempenho. Esses resultados não mostram nenhuma indicação de que o desempenho do PSR seja consideravelmente degradado se a distribuição do tráfego na rede for diferente da considerada durante a fase de planejamento para obter os parâmetros (b_{n_0, n_1}) de sua função. Assim, isso indica que o PSR também é robusto para lidar com variações na distribuição de tráfego na rede.

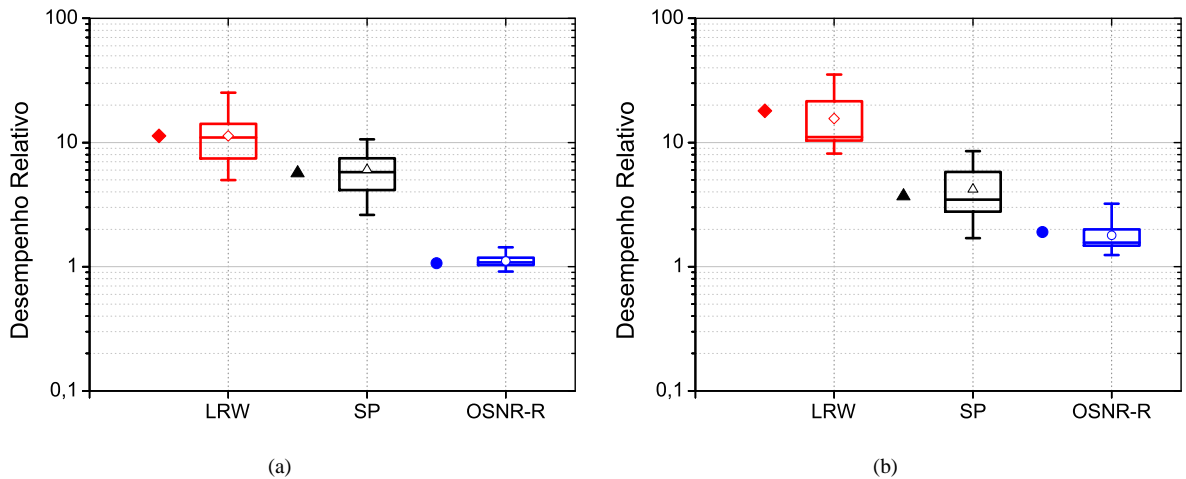


Figura 4.7: Representação em gráfico de caixa e bigodes da análise GATNU. O gráfico mostra o indicador de desempenho relativo, em relação ao PSR, para os algoritmos de RWA SP, LRW e OSNR-R considerando a geração de um conjunto de 30 matrizes aleatórias para: $R = 0$ (símbolos cheios) e $R = 1$ (caixa e bigodes) para a topologia da Finlândia nos cenários (a) S_1 e (b) S_2 .

4.4.5 Resultados de tempo para a fase operacional

Pode-se observar a partir das Figuras 4.5(a), 4.5(b) e 4.6 que o PSR e o OSNR-R apresentam desempenho bastante semelhantes em termos de probabilidade de bloqueio. No entanto, deve-se também comparar o tempo gasto por essas abordagens para resolver o problema de RWA. Foi utilizado um computador Intel® Core™2 @2,13 GHz com 3 GB de RAM para realizar essa comparação. A Figura 4.8 mostra o tempo médio gasto por chamada para se resolver o RWA em função da carga da rede. Os resultados obtidos para o algoritmo OSNR-R mostram que o tempo médio por chamada necessário para se resolver o RWA apresenta uma dependência com a carga. Isso pode ser explicado pelo fato de, ao se aumentar a carga na rede, mais caminhos ópticos estão estabelecidos em um dado momento, e portanto, o modelo de PLI (usado durante a decisão de roteamento do OSNR-R) necessita de mais cálculos para a descoberta de um caminho óptico candidato. Em oposição, tal dependência não é observada para os algoritmos LRW e PSR. Nesses dois algoritmos, o modelo de PLI ou é usado apenas uma vez em cada chamada (para verificar a QoT do caminho óptico) ou não é usado, se a chamada for bloqueada devido à falta de comprimentos de onda disponíveis. De acordo com os resultados mostrados na Figura 4.8, o PSR resolve o problema de RWA seis vezes mais rápido que o OSNR-R para uma carga de rede de 20 erlangs, 10 vezes mais rápido para 80 erlangs e 13 vezes mais rápido para 120 erlangs. Além disso, o PSR é 1,5 vezes mais lento do que o algoritmo LRW. Essa pequena diferença é devido ao fato da função-custo do LRW ser mais simples (envolve apenas uma única operação de divisão) do que a do PSR. O algoritmo SP não foi considerado nesse último estudo uma vez que ele possui uma tabela de roteamento fixa.

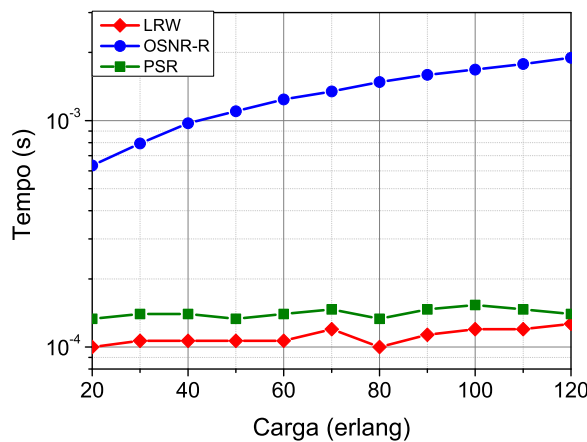


Figura 4.8: Tempo médio por chamada para solução do RWA em função da carga da rede para a topologia da Finlândia no cenário S_1 .

4.4.6 Auto-adaptação a mudanças na topologia

Os coeficientes b_{n_0, n_1} encontrados na fase de planejamento armazenam o conhecimento sobre a topologia da rede e a maneira pela qual as penalidades da camada física devem ser consideradas. Isso significa que esses coeficientes são otimizados para a topologia considerada e para um certo perfil de penalidades ao qual a rede está sujeita. Nesse caso, surgem duas perguntas:

1. Como o desempenho do PSR seria afetado na ocorrência de uma falha em um nó ou enlace da rede?
2. Como a adição de um enlace extra (devido a uma atualização de rede por exemplo) afetaria o desempenho do PSR?

A resposta para essas perguntas é que o PSR, ainda nesses cenários extremos, apresenta um bom desempenho (quando comparado com os outros algoritmos), apesar dele não funcionar de forma totalmente otimizada. Entretanto, é fácil implementar um processo de reotimização na ocorrência de um desses eventos. A reotimização consiste em reavaliar os coeficientes b_{n_0, n_1} para o PSR se adaptar à nova realidade da rede. Essa reavaliação pode ocorrer em paralelo com a operação normal da rede quando essa se fizer necessária (pode ser disparada por uma falha em um enlace ou a inclusão de um novo nó/enlace na rede). Essa reotimização pode ser feita usando o mesmo procedimento mostrado no Algoritmo 4 com uma pequena modificação na linha 1 do algoritmo: ao invés de se inicializar o PSO com uma população aleatória, adiciona-se na população inicial uma partícula com os coeficientes usados atualmente na rede. Essa é uma abordagem comumente usada em algoritmos de inteligência de enxames para acelerar a convergência do processo de otimização.

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram os resultados para a probabilidade de bloqueio apresentada pelos algoritmos de RWA considerados na ocorrência de uma falha ou adição de um enlace ou falha de um nó. Esses resultados foram obtidos para a topologia da Finlândia sob as condições do cenário S_1 . As figuras mostram os resultados da probabilidade de bloqueio em função do número de iterações do PSO. Note que os algoritmos SP, LRW e OSNR-R não são dependentes da iteração PSO, uma vez que esses não estão sob otimização. O eixo iteração do PSO é fornecido para mostrar a convergência do PSO na reotimização. Nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, as iterações de 0 a 500 do PSO são equivalentes à fase de planejamento, como discutido na Seção 4.2.1. É gerada uma falha ou inclusão de recursos (nós ou enlaces) na iteração 500. A re-otimização do PSR é iniciada imediatamente após a falha. Uma falha em um recurso de rede significa que ele não está mais disponível para ser utilizado.

A Figura 4.9 mostra a evolução do desempenho dos algoritmos de RWA após a ocorrência de uma falha no enlace que liga os nós 3-4 da topologia da Finlândia. Pode-se notar que essa falha de enlace não causou mudança na probabilidade de bloqueio encontrada pelo algoritmo LRW. Por outro lado, a mesma falha causa uma mudança brusca (maior que uma ordem de magnitude) na probabilidade de bloqueio apresentada pelo algoritmo SP. Os algoritmos PSR e OSNR-R apresentaram um ligeiro aumento em sua probabilidade de bloqueio devido a falha no enlace 3-4. O PSR, embora trabalhando de forma não mais otimizada, mantém uma probabilidade de bloqueio que permanece menor que a obtida pelo OSNR-R mesmo após a falha. Devido ao processo de reotimização, observa-se uma redução na probabilidade de bloqueio do PSR no intervalo entre as iterações 500 e 1000. Isso indica a capacidade do PSR para adaptar-se à nova topologia de rede (com um enlace a menos). Não há nenhuma mudança significativa na probabilidade de bloqueio do PSR após a iteração 600, o que significa que o PSO precisou de apenas 100 iterações para realizar a reotimização dos coeficientes do PSR. Nesse caso, o tempo necessário para a reotimização (realizando 100 iterações e utilizando um computador paralelo) é de aproximadamente 15 minutos (usando (4.10)).

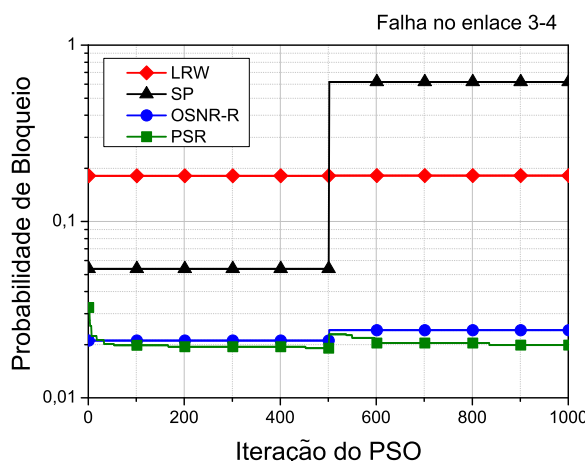


Figura 4.9: Efeito de uma falha no enlace que liga os nós 3 e 4 gerada na iteração 500.

A Figura 4.10 mostra a evolução do desempenho dos algoritmos de RWA após uma falha no nó 3 da topologia da Finlândia. Pode-se notar que, após a falha, a probabilidade de bloqueio do LRW permanece quase inalterada, ao passo que a mesma aumentou em cerca de 35% para o algoritmo SP. Além disso, as probabilidades de bloqueio do PSR e do OSNR-R aumentaram em cerca de 100% como resultado da falha. No entanto, como verificado na Figura 4.9 os desempenhos do PSR e do OSNR-R permanecem melhores do que os dos outros algoritmos após a falha do nó. Devido ao processo de reotimização, observa-se uma redução na probabilidade de bloqueio do PSR no intervalo entre as iterações 500 e 1000. Nesse caso, o PSR permanece com maior probabilidade de bloqueio

que o OSNR-R por cerca de 25 iterações (ou 3,75 minutos usando um computador paralelo). Como resultado da reotimização, a diferença entre a probabilidade de bloqueio do PSR e do OSNR-R é restabelecida após esse procedimento, mostrando mais uma vez a capacidade do PSR para se adaptar à nova topologia de rede. Como no caso da Figura 4.9, o processo de re-otimização levou pouco mais de 100 iterações. Portanto, obtém-se a mesma estimativa de 15 minutos para a reotimização (usando o computador paralelo) encontrada anteriormente.

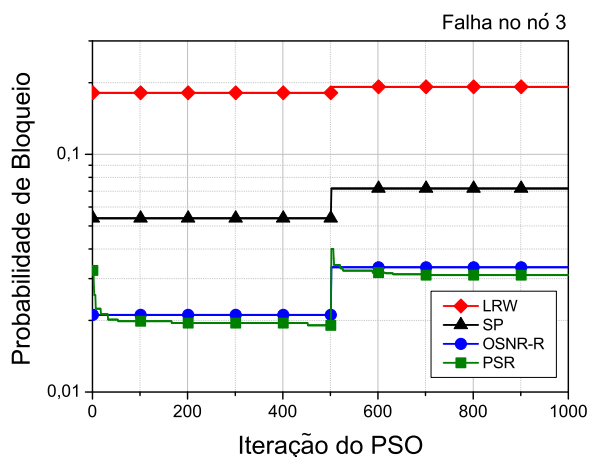


Figura 4.10: Efeito de uma falha no nó 3 gerada na iteração 500.

A Figura 4.11 mostra a evolução do desempenho dos algoritmos de RWA após a adição de uma nova ligação entre os nós 4 e 5 da topologia da Finlândia. Nesse caso, uma redução na probabilidade de bloqueio é esperada uma vez que um novo recurso é adicionado à rede. Pode-se notar na Figura 4.11 que após a adição, as probabilidades de bloqueio do LRW e do SP permanecem quase inalteradas, porém um pouco menor. As probabilidades de bloqueio do OSNR-R e do PSR diminuem em cerca de 50%. Devido ao processo de re-otimização, observa-se uma redução na probabilidade de bloqueio do PSR entre as iterações 500 e 1000. Nesse caso, o PSR permanece com maior probabilidade de bloqueio que o OSNR-R por menos de 25 iterações do PSO (ou menos de 3,75 minutos usando um computador paralelo). Como resultado da reotimização, a diferença entre a probabilidade de bloqueio apresentada pelo PSR e OSNR-R é muito mais acentuada após esse procedimento, mostrando mais uma vez, a capacidade do PSR para se adaptar à nova topologia de rede e para aproveitar o novo recurso disponível na rede. Não há alterações significativas na probabilidade de bloqueio do PSR após a iteração 700, o que significa que o PSO precisou de apenas 200 iterações para o processo de reotimização. O tempo necessário para a reotimização, realizando 200 iterações e usando um computador paralelo, é estimado em 30 minutos (usando a (4.10)).

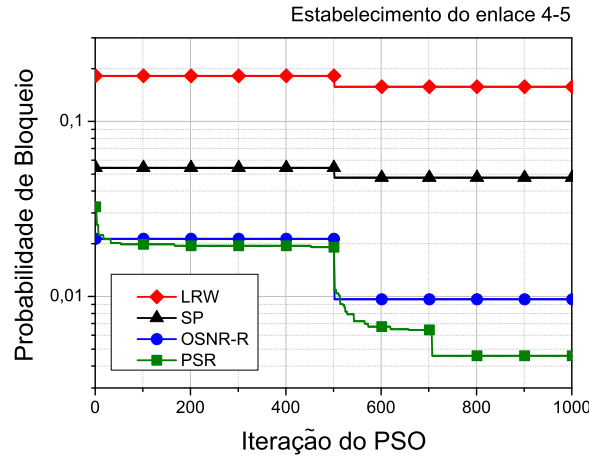


Figura 4.11: Efeito da instalação do enlace 4-5 na topologia da Finlândia na iteração 500.

4.5 Considerações sobre as propostas apresentadas

Nesse capítulo foi apresentada uma nova abordagem sistemática para se construir uma função-custo do enlace. A abordagem pode ser usada como uma forma sistemática para se projetar um algoritmo de RWA, que consiste em quatro etapas: 1) escolha das variáveis de entrada para a função-custo, 2) expansão da função-custo em uma série de funções, 3) escolha de um indicador global de desempenho da rede como objetivo de otimização e 4) determinação dos coeficientes da série de funções por meio de um procedimento de otimização a fim de minimizar/maximizar o indicador de desempenho escolhido na etapa 3. Essa última etapa é chamada de fase de planejamento, uma vez que ela consiste em um processo de otimização dos parâmetros do algoritmo de roteamento RWA que é executado de modo *offline*, antes da operação de rede, usando simulações de rede.

A metodologia proposta foi aplicada para se construir um algoritmo de IA-RWA adaptativo, que foi chamado de roteamento por série de potência (PSR). O PSR proposto utiliza a série de Taylor para realizar a expansão da função-custo de um enlace e utiliza como variáveis de entrada, para composição da função-custo, o comprimento e a disponibilidade de enlace normalizados. O número de saltos em uma rota também é contabilizado, de forma indireta, pela expansão considerada. A otimização dos coeficientes da função na fase de planejamento levou em conta as penalidades da camada física, o que confere ao PSR as características de um algoritmo de IA-RWA.

O desempenho do algoritmo PSR foi comparado, em termos de probabilidade de bloqueio, com outros quatro algoritmos de IA-RWA com diferentes características, em duas topologias de rede distintas e em dois cenários diferentes para as penalidades da camada física. Os resultados de simulação mostraram que o algoritmo PSR superou os outros algoritmos considerados de forma consistente na

maioria dos casos testados.

Também foi comparado o desempenho do algoritmo PSR, em termos de tempo computacional, com outros dois algoritmos de IA-RWA. Os resultados de simulação mostraram que o PSR está entre os mais rápidos. No entanto, isso só é possível devido à fase de planejamento demorada, na qual o PSR toma ciência das penalidades da camada física e da topologia de rede armazenando essas informações de forma indireta nos parâmetros da função custo.

Também foi demonstrado que o desempenho do PSR não é degradado (se comparado de forma relativa aos outros algoritmos) quando a carga ou a distribuição de tráfego da rede flutuam em torno da situação para a qual o PSR foi otimizado. Isso é importante pois essas alterações podem ocorrer ao longo do tempo em uma operação realista de rede.

Além disso, foi analisada a sensibilidade do algoritmo PSR às mudanças na topologia da rede e sua capacidade de se adaptar às novas condições de rede em termos de topologia. Os resultados de simulação mostraram que, em caso de mudança na topologia da rede, o algoritmo PSR permaneceu como o algoritmo de menor probabilidade de bloqueio. Além disso, ele foi capaz de adaptar-se às novas condições, recuperando um patamar de desempenho otimizado em até 200 iterações no processo de reotimização. Com o uso de LCFD e PSR, é possível projetar um RWA personalizado para cada topologia de forma que ele extraia o máximo de desempenho de uma determinada topologia. Essa é uma novidade em termos de algoritmos de RWA. Os algoritmos de RWA listados na literatura são estáticos em relação à topologia da rede. Ou seja, o algoritmo não muda quando aplicado a diferentes topologias as quais podem ter características completamente diferentes que não são exploradas adequadamente pelo RWA estático.

A principal contribuição da metodologia proposta é a construção de um algoritmo de IA-RWA de alto desempenho com complexidade computacional reduzida. Isso ocorre porque os cálculos das penalidades físicas (que consomem mais tempo) são realizados de maneira *offline* na fase de planejamento, antes da operação da rede, em vez de *online*, chamada por chamada, como na maioria dos algoritmos de IA-RWA. A consequência direta dessa característica é que a fase de planejamento é muito demorada. No entanto, com computadores paralelos e cada vez mais poderosos, compactos e acessíveis, acredita-se que esse tempo de computação pode ser bastante reduzido para aplicações reais. De fato, nesses cenários, os modelos de penalidades da camada física podem ganhar em precisão e serem calculados de forma numérica. Outra contribuição importante é a de que, com o uso de LCFD, também é possível construir algoritmos de IA-RWA adaptativos (no sentido de que podem considerar o estado atual da rede na decisão de roteamento) e adaptáveis (no sentido de que podem

se adaptar às características peculiares de cada rede como perfil de penalidades físicas e topologia da rede considerada).

Acredita-se que a metodologia LCFD proposta pode ser usada para projetar algoritmos de RWA e de IA-RWA, para redes opacas, translúcidas ou transparentes, desde que as condições de operação da rede possam ser reproduzidas nas simulações de rede durante o processo de otimização. Resultados mostram a aplicabilidade do LCFD/PSR para implementação de algoritmos de restauração [102], algoritmos de IA-RWA alternativo adaptativo [103, 104] e para algoritmos de IA-RWA tanto para redes opacas quanto para redes translúcidas [105].

4.6 Lista de publicações referentes a este capítulo

- 1) D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks, *Photonic Network Communications*, v. 22, n. 2, p. 133–150, 2011.
- 2) D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel adaptive routing algorithm for all-optical networks based on power series and particle swarm optimization, In: **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)**, 2008.
- 3) D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Impairment aware routing algorithm for all-optical networks based on power series and particle swarm optimization, In: **XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)**, 2008.
- 4) J. F. MARTINS-FILHO, J. L. SANTANA, H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, Assessment of the power series routing algorithm in translucent, transparent and opaque optical networks, *Submetido à IEEE Communications Letters*, 2011.
- 5) J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. O. AGUIAR, Intelligent and fast irwa algorithm based on power series and particle swarm optimization, In: **10th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) (Convocado)**, v. 3, 2008, p. 158–161.

CAPÍTULO 5

PROJETO DE REDES ÓPTICAS TRANSLÚCIDAS CONSIDERANDO APENAS OS RECURSOS DE REGENERAÇÃO 3R

*Escolha um trabalho que ame e não terás que
trabalhar um único dia em sua vida.*

— Confúcio

NESTE capítulo são propostos novos algoritmos para solucionar problemas clássicos envolvendo projeto e operação de redes ópticas translúcidas relatados na literatura. São propostos: um algoritmo heurístico para resolução do problema de RA e dois algoritmos heurísticos e um metaheurístico para resolução do problema de RP. Os algoritmos de RP propostos consideram a estratégia de regeneração esparsa [20].

5.1 Proposta para alocação de regeneradores (RA)

A algoritmo de alocação de regeneradores (RA) é responsável por determinar em que nós pertencentes a uma dada rota o sinal óptico deve ser regenerado. Neste trabalho assumiu-se que o RA

é executado após o procedimento de RWA. O algoritmo de RA proposto é capaz de lidar com três casos possíveis que podem acontecer com um dado pedido de conexão que está sendo solicitado à rede, são eles:

Nenhuma regeneração do sinal óptico é necessária – O algoritmo de RWA empregado encontrou uma rota e um comprimento de onda contínuo do nó fonte ao nó destino com QoT adequada capaz de estabelecer o pedido de conexão. Nesse caso, o pedido de conexão é atendido e estabelecido de forma totalmente óptica sem utilizar regeneradores.

Regeneração é necessária por QoT insuficiente (RA_tQoT) – O algoritmo de RWA empregado encontrou uma rota e um comprimento de onda contínuo do nó fonte ao nó destino, porém a QoT desse caminho óptico é inadequada. Nesse caso, realiza-se um RA disparado por falta de QoT.

Regeneração é necessária por contenção de comprimento de onda (RA_tWC) – O algoritmo de RWA empregado encontrou uma rota mas não encontrou um comprimento de onda contínuo ligando o nó fonte ao nó destino. Nesse caso, realiza-se um RA disparado por contenção de comprimento de onda.

A cada pedido de conexão requisitado à rede, o controle de admissão de chamada translúcido (CAC translúcido) identifica qual dos casos citados ocorreu e aciona a estratégia RA adequada para lidar com cada caso. O pseudocódigo para o CAC translúcido é apresentado no Algoritmo 5. Esse algoritmo é utilizado para implementar o CAC translúcido do SIMTON discutido na Seção 3.4.2. O primeiro passo do CAC translúcido após a chegada de um pedido de conexão, é a execução do algoritmo de roteamento. Esse, retorna uma rota π ($\pi = \{t_1, t_2, \dots, t_Z\}$), composta por Z nós, ligando o nó fonte (t_1) ao nó destino (t_Z). Note que o t_i é o índice do nó na rede, enquanto i representa a posição do nó t_i na rota π . Então, o algoritmo de WA é executado na rota π selecionada, a fim de atribuir um comprimento de onda disponível. O algoritmo de WA pode ter sucesso ou não, dependendo da disponibilidade de comprimentos de onda na rede. Se o algoritmo de WA conseguir encontrar um comprimento de onda contínuo (λ_i) a partir do nó fonte até o nó destino, então a QoT do caminho óptico formado por π e λ_i é verificada. Essa verificação é realizada no Algoritmo 5 pela função $QoT(t_x, t_y, \lambda_i, \pi)$ que retorna “1” se a QoT do caminho óptico (em ambos os sentidos) ligando os nós t_x e t_y no comprimento de onda λ_i estiver acima de um limite mínimo pré-estabelecido, e retorna “0” caso contrário (o cálculo da QoT e seus limites são discutidos na Seção 3.3). No primeiro caso, o caminho óptico é estabelecido de forma totalmente óptica na rota π usando o comprimento de onda encontrado pelo algoritmo de WA. Se a QoT não for aceitável, o algoritmo de RA disparado por QoT insuficiente (RA_tQoT) é executado. RA_tQoT determina em

que nós pertencentes à rota π o sinal deve ser regenerado. Caso não haja recurso de regeneração disponível ou caso os recursos de regeneração na rede não sejam suficientes, no momento, para trazer a QoT do caminho óptico encontrado para o pedido de conexão atual para níveis acima dos mínimos pré-estabelecidos, então o CAC decide pelo bloqueio desse pedido de conexão atual.

Algoritmo 5 CAC Translúcido

```

1: Chegada de um pedido de conexão;
2: Execute o algoritmo de roteamento, que resulta em uma rota  $\pi$  ( $\pi = \{t_1, t_2, \dots, t_Z\}$ ) composta por  $Z$  nós interligando o nó fonte ( $t_1$ ) ao nó destino ( $t_Z$ );
3: Execute o algoritmo de atribuição de comprimentos de onda na rota  $\pi$  selecionada;
4: if (Existe um comprimento de onda  $\lambda_i$ , disponível desde o nó fonte até o nó de destino ao longo da rota  $\pi$ )
   then
5:   if ( $QoT(t_1, t_Z, \lambda_i, \pi) = 1$ ) then // Regeneração não é necessária
6:     Estabeleça a chamada utilizando o lightpath composto pela rota  $\pi$  e pelo comprimento de onda  $\lambda_i$ ; // um caminho óptico totalmente óptico é estabelecido
7:   else // Regeneração é necessária
8:      $RA\_tQoT(1, 2, \lambda_i, \pi)$ ; // Regeneração disparada por falta de QoT
9:   end if
10: else // Regeneração é necessária
11:    $RA\_tWC(1, 2, \pi)$ ; // Regeneração disparada por falta de disponibilidade de um comprimento de onda contínuo
12: end if

```

Por outro lado, se o algoritmo de WA falhar em conseguir encontrar um único comprimento de onda disponível a partir do nó de origem até o nó de destino na rota π , significa que uma conversão de comprimento de onda é necessária a fim de estabelecer o pedido de conexão. Nesse caso, o algoritmo de RA disparado por contenção de comprimento de onda (RA_tWC) é executado. Esse algoritmo tenta usar a infra-estrutura instalada de regeneradores eletrônicos 3R para realizar a conversão de comprimento de onda.

Ambos $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$ e $RA_tWC(x, y, \pi)$ são funções recursivas aplicadas à rota π . Uma chamada tanto para $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$ quanto para $RA_tWC(x, y, \pi)$ com $x = 1$ (nó fonte) e $y = 2$ (nó mais próximo ao nó fonte) é usada para iniciar o procedimento recursivo.

A função $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$ possui quatro parâmetros de entrada: uma rota π , os índices x e y de dois nós que pertencem à rota π e um comprimento de onda λ_i . O pseudocódigo para essa função é mostrado no Algoritmo 6. Nesse pseudocódigo, f_i representa o número de regeneradores disponíveis no nó i . Quando $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$ é chamada, isso significa que existe uma rota e um comprimento de onda disponível desde o nó origem até o nó de destino, no entanto com uma

QoT inadequada. Assim, esse procedimento tenta estabelecer o pedido de conexão que está sendo requisitado utilizando o comprimento de onda λ_i encontrado pelo algoritmo de WA (conversão de comprimento de onda não é realizada por esse algoritmo). Além disso, ele tenta usar regeneradores nos nós mais distantes possíveis da fonte, dividindo o caminho óptico em vários segmentos totalmente ópticos ligados por regeneradores eletrônicos nas bordas de cada segmento. A QoT para cada segmento totalmente óptico é verificada antes do estabelecimento do caminho óptico. Caso não haja regeneradores disponíveis na rota ou a QoT de um segmento não atenda ao requisito mínimo para a QoT, então o pedido de conexão é bloqueado.

Algoritmo 6 Pseudocódigo da função $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$

```

1: if  $y = Z$  then
2:   Fim do algoritmo;
3: end if
4: if  $(f_y = 0)$  then // Nenhum regenerador está disponível no nó  $t_y$ 
5:    $RA\_tQoT(x, y + 1, \lambda_i, \pi)$ ; // Tente alcançar o próximo nó sem usar regenerador
6: end if
7: if  $(QoT(t_x, t_y, \lambda_i, \pi) = 1)$ , then // A QoT é aceitável
8:    $RA\_tQoT(x, y + 1, \lambda_i, \pi)$ ; // Tente alcançar o próximo nó sem usar regenerador
9: else // Regeneração é necessária
10:  if  $(\exists k \text{ de forma que } f_k \neq 0 \text{ e } x < k < y)$  then
11:    Regenere o sinal no nó  $t_k$  mais perto possível do nó  $t_y$  ao longo da rota  $\pi$  de forma que  $f_k \neq 0$ ;
12:     $RA\_tQoT(k, k + 1, \lambda_i, \pi)$ ;
13:  else
14:    O sinal não pode ser regenerado (i.e. o pedido de conexão é bloqueado);
15:    Fim do algoritmo;
16:  end if
17: end if

```

Por outro lado, quando o $RA_tWC(x, y, \pi)$ é executado, não há um único comprimento de onda disponível a partir do nó de origem até o nó de destino na mesma frequência. O $RA_tWC(x, y, \pi)$ apresenta três parâmetros de entrada: a rota π e os índices x e y de dois nós pertencentes à rota π (que determina a sub-rota atualmente sob análise). Uma vez que comprimentos de onda diferentes podem ser atribuídos para cada segmento transparente, nenhum comprimento de onda é dado como parâmetro de entrada para essa função. O pseudocódigo para a função $RA_tWC(x, y, \pi)$ é fornecido no Algoritmo 7. Esse algoritmo tenta usar regeneradores no nó mais distante possível do nó fonte, dividindo o caminho óptico em múltiplos segmentos totalmente ópticos ligados por regeneradores eletrônicos nas bordas de cada segmento. Além disso, uma conversão de comprimento de onda pode ser feita de um segmento transparente para o próximo. Novamente, a QoT de cada segmento

totalmente óptico é verificada antes do estabelecimento do caminho óptico. No caso de haver pelo menos um segmento que não atenda aos requisitos mínimos de QoT, então o pedido de conexão atual é bloqueado. Nesse algoritmo, a função $QoTW(t_x, t_y, \lambda, \pi)$ retorna “1”, se houver pelo menos um comprimento de onda disponível λ entre os nós t_x e t_y ao longo do percurso π que atenda o requisito mínimo de QoT (em ambas as direções da rota), e retorna “0” caso contrário.

Algoritmo 7 Pseudocódigo da função $RA_tWC(x, y, \pi)$

```

1: if  $y = Z$  then
2:   Fim do algoritmo;
3: end if
4: if ( $f_y = 0$ ) then // Nenhum regenerador está disponível no nó  $t_y$ 
5:    $RA\_tWC(x, y + 1, \pi)$ ; // Tente alcançar o próximo nó sem usar regenerador
6: end if
7: if ( $\exists \lambda$  de forma que  $QoTW(t_x, t_y, \lambda, \pi) = 1$ ), then
8:    $RA(x, y + 1)$ ; // Tente alcançar o próximo nó sem usar regenerador
9: else // Regeneração é necessária
10:  if ( $\exists k$  de forma que  $f_k \neq 0$  e  $x < k < y$ ) then
11:    Regenere o sinal no nó  $t_k$  mais perto possível do nó  $t_y$  ao longo da rota  $\pi$  de forma que  $f_k \neq 0$ ;
12:    Escolha o comprimento de onda  $\lambda$  que apresenta  $QoTW(t_x, t_k, \lambda) = 1$  usando o FF;
13:     $RA\_tWC(k, k + 1, \pi)$ ;
14:  else
15:    O sinal não pode ser regenerado (i.e. o pedido de conexão é bloqueado);
16:    Fim do algoritmo;
17:  end if
18: end if

```

5.2 Propostas heurísticas para colocação esparsa de regeneradores

São propostos nesta seção dois algoritmos heurísticos para a colocação esparsa de regeneradores baseada no tráfego. Como foi discutido no Capítulo 1, a solução ótima para o problema de colocação esparsa de regeneradores é computacionalmente intratável até mesmo para redes com um reduzido número de nós. Sendo assim, heurísticas podem ser aplicadas para resolver o problema em um tempo aceitável. Em ambos os algoritmos, a decisão sobre o número de regeneradores que devem ser instalados em cada nó da rede é feita a partir da análise de uma simulação *offline*. A simulação *offline* consiste na execução de um conjunto grande de requisições dinâmicas de chamadas em uma rede opaca (*i.e.*, cada nó da rede é equipado com uma capacidade ilimitada de regeneradores). A estratégia é permitir que a rede funcione folgada em seu caso de melhor desempenho para se descobrir

informações de quais são os melhores nós para se colocar os regeneradores. Essa abordagem permite que se descubra os nós de estrangulamento (os nós nos quais a regeneração é mais requisitada) quando a rede trabalha em seu caso de melhor desempenho. Deve-se, entretanto, observar que essa capacidade ilimitada de regeneração é considerada apenas durante o processo de RP. A análise de desempenho realizada na Seção 5.2.3 é realizada utilizando o número de regeneradores determinado pelos algoritmos durante a fase de RP.

As considerações e premissas adotadas para o tratamento de uma rede translúcida estão discutidas no Capítulo 3. As propostas heurísticas para o RP são MU-RP e MSU-RP, as quais são detalhadas nas Seções 5.2.1 e 5.2.2 .

5.2.1 *Most Used Regenerator Placement* (MU-RP)

O primeiro algoritmo proposto é denominado de *Colocação dos Regeneradores Mais Usados* (MU-RP – *Most Used Regenerator Placement*). O pseudocódigo para o MU-RP é mostrado no Algoritmo 8. Ele usa a *política-NX* de colocação de regeneradores. Isso significa que o objetivo do algoritmo é colocar um número X de regeneradores em cada um dos N nós selecionados pelo algoritmo. O N e o X são parâmetros de entrada para o MU-RP. Esse algoritmo define um contador para cada nó da rede. Esse contador é iniciado com zero para todos os nós. Um grande número de pedidos de conexão é gerado (*e.g.* 1.000.000 pedidos de conexão) considerando uma dada distribuição de tráfego ao longo da rede, uma certa carga e uma capacidade de regeneração ilimitada. Cada vez que o algoritmo de RA decide usar uma regeneração em um dado nó i , o contador desse nó é incrementado de uma unidade. Após o processamento do último pedido de conexão, os N nós com os maiores valores de contagem recebem um conjunto de X regeneradores compartilhados.

Algoritmo 8 MU-RP(N, X)

- 1: Faça $R_i \leftarrow 0$ para cada nó da rede;
 - 2: Inicie uma simulação *offline* (considerando um tráfego dinâmico) considerando todos os nós da rede com capacidade ilimitada de regeneração;
 - 3: **for** Para cada requisição de chamada **do**
 - 4: Execute o algoritmo de CAC translúcido (Algoritmo 5);
 - 5: **if** (O algoritmo de RA decidir regenerar o sinal no nó i) **then**
 - 6: $R_i \leftarrow R_i + 1$;
 - 7: **end if**
 - 8: **end for**
 - 9: Coloque X regeneradores nos N nós que apresentarem os maiores valores de R_i ;
-

5.2.2 Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement (MSU-RP)

O segundo algoritmo proposto é denominado de Colocação de Regeneradores Baseada no Máximo de Regeneradores Simultaneamente Utilizados (MSU-RP – *Maximum Simultaneously Used Regenerator Placement*). Esse algoritmo não utiliza a *política-NX*. Ele distribui R_e regeneradores entre os nós da rede com base no número máximo instantâneo de regeneradores utilizados em um dado nó durante a simulação *offline*. O número total de regeneradores a ser colocado na rede é dado pelo parâmetro R_e , que é uma entrada para MSU-RP em substituição a X e N como acontece para MU-RP. Note que é possível realizar uma comparação justa entre os algoritmos MU-RP e MSU-RP definindo $R_e = N \cdot X$, uma vez que $N \cdot X$ é o número total de regeneradores a ser colocado na rede por MU-RP ou por qualquer algoritmo que utilize a *política-NX* de colocação de regeneradores.

Algoritmo 9 MSU-RP(R_e)

- 1: Faça $R_i \leftarrow 0$ para cada nó da rede;
 - 2: Inicie uma simulação *offline* (considerando um tráfego dinâmico) considerando todos os nós da rede com capacidade ilimitada de regeneração;
 - 3: **for** Para cada requisição de chamada **do**
 - 4: Execute o algoritmo de CAC translúcido; // Algoritmo 5
 - 5: **if** (O RA decidir regenerar o sinal no nó i) **then**
 - 6: $R_i \leftarrow \max(R_i, r_i)$; // $\max(R_i, r_i)$ retorna o maior entre R_i e r_i
 - 7: **end if**
 - 8: **end for**
 - 9: Coloque $\text{ROUND}(R \cdot R_i / \sum_{i=1}^n R_i)$ regeneradores no nó i ;
-

A metodologia para a colocação de regeneradores por MSU-RP é similar à utilizada para o MU-RP. O algoritmo MSU-RP define um contador R_i para cada nó da rede. Esse contador é iniciado com zero para todos os nós. Um grande número de pedidos de conexão é gerado (*e.g.* 100.000 de pedidos de conexão) considerando uma dada distribuição de tráfego ao longo da rede, uma certa carga na rede e uma capacidade de regeneração ilimitada. Cada vez que o algoritmo de RA decide usar um regenerador em um dado nó i , o contador R_i desse nó é atualizado de acordo com o número atual de regeneradores r_i que está sendo utilizado nesse nó no momento em que o pedido de conexão que está sendo atualmente tratado for totalmente processado. Se o número atual de regeneradores r_i é maior do que o armazenado no contador R_i , então o contador R_i é atribuído com r_i . Caso contrário, o contador R_i permanece inalterado. Usando essa estratégia, fica armazenado em cada R_i o número máximo de regeneradores usados de forma simultânea em um determinado nó i (*i.e.*, o pior caso de uso de regeneradores neste nó). Dessa forma, é possível decidir a colocação de regeneradores

levando em conta esse pior caso. Após o último pedido de conexão ser processado, cada nó tem armazenado em seu R_i o pior caso de uso de regeneradores. Então, os R_e regeneradores dados como entrada para MSU-RP são proporcionalmente distribuídos entre os nós da rede de acordo com o R_i de cada nó. MSU-RP pode ser implementado usando o pseudocódigo mostrado no Algoritmo 9. Nesse pseudocódigo, r_i é o atual número de regeneradores utilizados no nó i , N é o número total de nós na rede e a função $ROUND(w)$ retorna o número inteiro mais próximo de w .

5.2.3 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados concernentes aos dois algoritmos heurísticos de RP propostos nesse trabalho: MU-RP e MSU-RP. Como foi visto, esses algoritmos obtêm uma solução para o número de regeneradores que serão colocados em cada nó da rede. De posse das soluções obtidas, é possível investigar o desempenho das redes translúcidas projetadas pelos algoritmos em questão. Os resultados dos algoritmos de RP são avaliados e comparados entre si de acordo com os seguintes parâmetros: probabilidade de bloqueio da rede (desempenho) e o número de regeneradores da rede (CapEx). Os algoritmos de RP propostos são comparados com dois outros algoritmos propostos na literatura: o NDF e o SQP [23]. O algoritmo de RA proposto na Seção 5.1 é usado para todos os algoritmos sob análise, isto é, NDF, SQP, MU-RP e MSU-RP. Além disso, uma vez que o foco aqui é o estudo dos algoritmos de RA e de RP, foram selecionados algoritmos simples para resolver o problema de RWA: o algoritmo de menor caminho de Dijkstra para o roteamento e o algoritmo de *First Fit* para a atribuição de comprimento de onda (WA). No entanto, praticamente qualquer outro RWA mais sofisticado poderia ser usado em conjunto com a abordagem aqui proposta. As topologias utilizadas para a simulação são a Pacific Bell (mostrada na Figura 5.1), composta por 17 nós e 23 enlaces e a Americana-Estendida (mostrada na Figura 5.2), composta por 61 nós e 76 enlaces. Elas são semelhantes às redes usada em [23]. O simulador SIMTON em sua versão translúcida (descrito no Capítulo 3) foi utilizado para realizar as simulações. A modelagem da camada física considera todas as penalidades que o SIMTON é capaz de considerar, as quais foram listadas na Seção 3.3. Na Tabela 5.1 estão listados os parâmetros de simulação utilizados pela modelagem da camada física e pelo SIMTON.

A Figura 5.3 mostra os resultados obtidos para a topologia Pacific Bell. Essa figura mostra, para todos os gráficos apresentados, a probabilidade de bloqueio em função do número total de regeneradores. Os resultados para os quatro algoritmos de RP considerados na análise são apresentados nos gráficos da seguinte forma: NDF (quadrados), SQP (círculos), MU-RP (triângulos para cima) e

Tabela 5.1: Parâmetros da camada física utilizados na simulação pelo SIMTON.

Parâmetro	Valor	Descrição
α	0, 2 dB/km	Coeficiente de atenuação da fibra.
Δt_{QoT}	0, 10	Alargamento máximo permitido do pulso óptico.
$\Delta \lambda_{Tx}$	0, 013 nm	Largura de linha do transmissor.
λ_i	1528, 77 nm	Primeiro comprimento de onda no <i>grid</i> .
λ_0	1450 nm	Zero de dispersão da fibra de transmissão.
λ_{ORD}	1528, 77 nm	Zero de dispersão residual.
ε	-38 dB	Fator de isolamento do comutador óptico.
B_o	100 GHz	Largura do filtro óptico.
B	40 Gb/s	Taxa de transmissão.
$D_{DCF} (@1550 \text{ nm})$	-110 ps/km.nm	Coeficiente de dispersão da fibra de compensação.
D_{PMD}	0, 04 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Coeficiente de PMD.
$D_{Tx} (@1550 \text{ nm})$	4, 5 ps/km.nm	Coeficiente de dispersão da fibra de transmissão.
F_o (NF)	3, 548 (5, 5 dB)	Fator de ruído do amplificador (figura de ruído).
L_{Mx}	2 dB	Perda no multiplexador.
L_{Dx}	2 dB	Perda no demultiplexador.
L_{Sw}	2 dB	Perda no comutador óptico.
P_{Sat}	20 dBm	Potência de saturação do amplificador.
P_{in}	3 dBm	Potência de transmissão.
$S_{DCF} (@1550 \text{ nm})$	-1, 87 ps/km.nm ²	Slope da fibra de compensação.
$S_{Tx} (@1550 \text{ nm})$	0, 045 ps/km.nm ²	Slope da fibra de transmissão.
W	24/36	Número de comprimentos de onda por enlace para as topologias Pacific Bell /Americana-Estendida.
$OSNR_{in}$	40 dB	Relação sinal ruído óptica do laser de transmissão.
$OSNR_{QoT}$	20 dB	Relação sinal ruído óptica usada como critério de QoT.

uma vez que os resultados são traçados para o mesmo número total de regeneradores para todos os algoritmos. Isto pode ser alcançado mediante a fixação de $R_e = N \cdot X$, como discutido anteriormente. Além disso, foram realizadas simulações para três valores de carga da rede: 50, 60 e 80 erlangs. Os níveis de probabilidade de bloqueio para rede transparente e para a rede opaca também são indicados na figura.

A Figura 5.3 mostra que o algoritmo NDF tem o pior desempenho. Isso pode ser explicado pelo fato de que esse algoritmo decide como fazer o RP apenas com base na topologia física, o que significa que nenhuma informação de tráfego é usada durante sua decisão. Os três outros algoritmos são estratégias de RP baseadas no tráfego. Para $N = 3$ (Figuras 5.3(a), 5.3(b) e 5.3(c)), o SQP supera o MU-RP para qualquer número de regeneradores na rede e supera o MSU-RP quando o número de regeneradores é menor que 36 para uma carga de 50 erlangs e menor que 48 para as cargas de 60

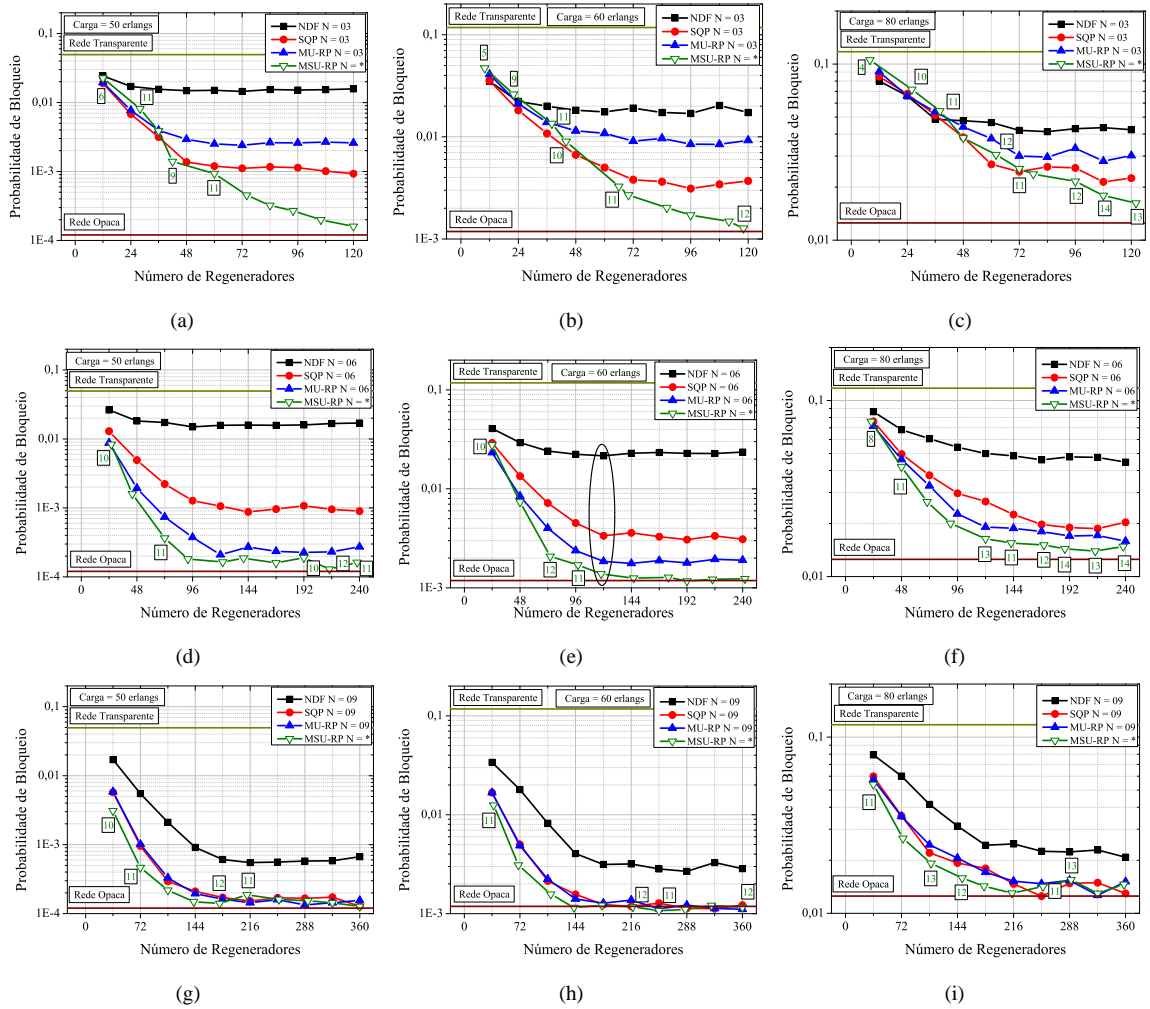


Figura 5.3: Probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores para os diferentes algoritmos de RP, para a topologia Pacific Bell, considerando diferentes cargas e números de nós translúcidos: (a) Carga = 50 Erl e $N = 3$, (b) Carga = 50 Erl e $N = 6$, (c) Carga = 50 Erl e $N = 9$, (d) Carga = 60 Erl e $N = 3$, (e) Carga = 60 Erl e $N = 6$, (f) Carga = 60 Erl e $N = 9$, (g) Carga = 80 Erl e $N = 3$, (h) Carga = 80 Erl e $N = 6$, (i) Carga = 80 Erl e $N = 9$. No caso do MSU-RP o número de nós translúcidos é mostrado dentro dos quadrados ao lado de cada solução.

e 80erlangs. Para $N = 6$ (Figuras 5.3(d), 5.3(e) e 5.3(f)) e para $N = 9$ (Figuras 5.3(g), 5.3(h) e 5.3(i)), MU-RP supera SQP, enquanto MSU-RP supera todos os outros algoritmos. Observa-se um valor de saturação da probabilidade de bloqueio a partir de um certo número total de regeneradores na rede para todos os algoritmos. Isso significa que um aumento no número de regeneradores além de um certo valor não traz redução na probabilidade de bloqueio, ou seja, não há praticamente melhora no desempenho da rede. Deve-se observar que o algoritmo MSU-RP atinge o nível de probabilidade de bloqueio da rede opaca equivalente (melhor desempenho possível) para quase todos os casos (exceção feita para $N = 3$ e $N = 6$ com carga = 80 erlangs). Os algoritmos MU-RP e SQP somente

atingem o nível de probabilidade de bloqueio da rede opaca equivalente para $N = 9$, enquanto o NDF não foi capaz de atingir esse nível em nenhum dos casos investigados.

Na Figura 5.3(e), é possível se observar que o algoritmo MSU-RP atinge o desempenho de uma rede opaca equivalente utilizando apenas 118 regeneradores. Para a topologia Pacific Bell, a configuração opaca equivalente requer 1104 regeneradores 3R. O número total de regeneradores, R_{total} , em uma rede opaca pode ser obtido pela multiplicação do número de comprimentos de onda em cada enlace ($W = 24$ no caso considerado) pela soma dos graus dos nós da rede (igual a 46 na Pacific Bell) [23], ou seja,

$$R_{total} = W \sum_{i=1}^T G(i). \quad (5.1)$$

Esses números significam que a configuração de rede translúcida encontrada por MSU-RP para a topologia Pacific Bell alcança o mesmo nível de probabilidade de bloqueio da rede opaca, necessitando de apenas 11% do número de regeneradores requeridos por essa última.

O resultado de um algoritmo de RP consiste na decisão do número de regeneradores que devem ser colocados em cada nó da rede. Foram selecionadas algumas soluções obtidas (soluções circuladas na Figura 5.3(e)) para ilustrar essas configurações de regeneradores obtidas por cada um dos algoritmos de RP considerados. Elas são mostradas na Figura 5.4(a). Nessa figura, cada nó selecionado para ter capacidade de regeneração pelos algoritmos NDF, SQP e MU-RP é marcado, respectivamente, com um quadrado, um círculo e um triângulo para cima ao lado do respectivo nó conforme legenda na figura. Para os algoritmos NDF, SQP e MU-RP são colocados, nesse caso, 120 regeneradores igualmente distribuídos em seis nós translúcidos ao longo da rede, o que significa 20 regeneradores por nó. O número dentro dos nós representa o número de regeneradores colocados em cada nó pelo algoritmo MSU-RP. O algoritmo MSU-RP decidiu colocar, nesse caso, 118 regeneradores em 10 nós diferentes.

As configurações de rede mostradas na Figura 5.4(a) foram utilizadas para obter os resultados apresentados na Figura 5.5(a) que apresenta a probabilidade de bloqueio obtida por algoritmo de RP considerado quando se varia a carga total da rede. A Figura 5.5(a) mostra que o desempenho relativo entre os algoritmos investigados não é afetado (o melhor algoritmo permanece melhor e o pior continua sendo o pior) quando a carga da rede é variada. No entanto, as diferenças entre os algoritmos tendem a aumentar à medida que a carga da rede diminui.

A mesma metodologia usada para a rede Pacific Bell foi aplicada à topologia Americana-Estendida. A Figura 5.6 mostra os resultados obtidos para a probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores colocados na rede. Os níveis de probabilidade de bloqueio das redes transparente

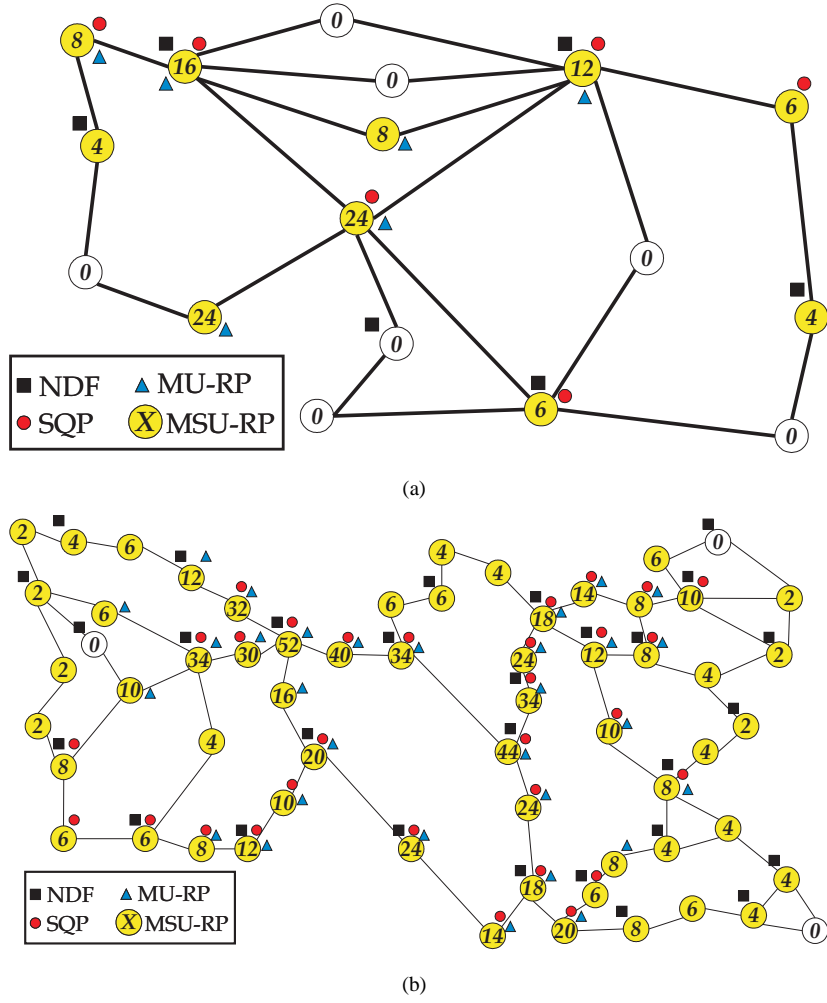


Figura 5.4: Nós selecionados pelos algoritmos de RP para: (a) a topologia Pacific Bell considerando os pontos circulos na Figura 5.3(e) e (b) para a topologia Americana-Estendida para os pontos circulos na Figura 5.6(e). Quadrados, círculos e triângulos indicam, respectivamente, os nós translúcidos selecionados pelos algoritmos NDF, SQP e MU-RP. Para esses três algoritmos são selecionados 6 nós translúcidos com cada nó recebendo 20 regeneradores. Os números dentro dos nós indicam o número de regeneradores colocados em cada nó pelo algoritmo MSU-RP.

e opaca também são mostrados. Os resultados foram obtidos para três números diferentes de nós translúcidos ($N = 20, 30$ e 40), os quais são iguais para todos os algoritmos de RP, com exceção de MSU-RP. O número de nós translúcidos encontrados pelo algoritmo MSU-RP é retratado da mesma forma como foi retratado na Figura 5.3. Foram considerados três valores de carga para serem simulados 60, 80 e 100 erlangs. O mesmo algoritmo de RWA utilizado na Pacific Bell foi utilizado. Os parâmetros de simulação não mencionados permanecem os mesmos da Tabela 5.1.

A Figura 5.6. mostra mais uma vez que o algoritmo NDF tem o pior desempenho em comparação com todos os outros algoritmos de RP em todos os casos investigados. O algoritmo MU-RP supera o algoritmo SQP para quase todos os casos investigados. O algoritmo MSU-RP superou os outros

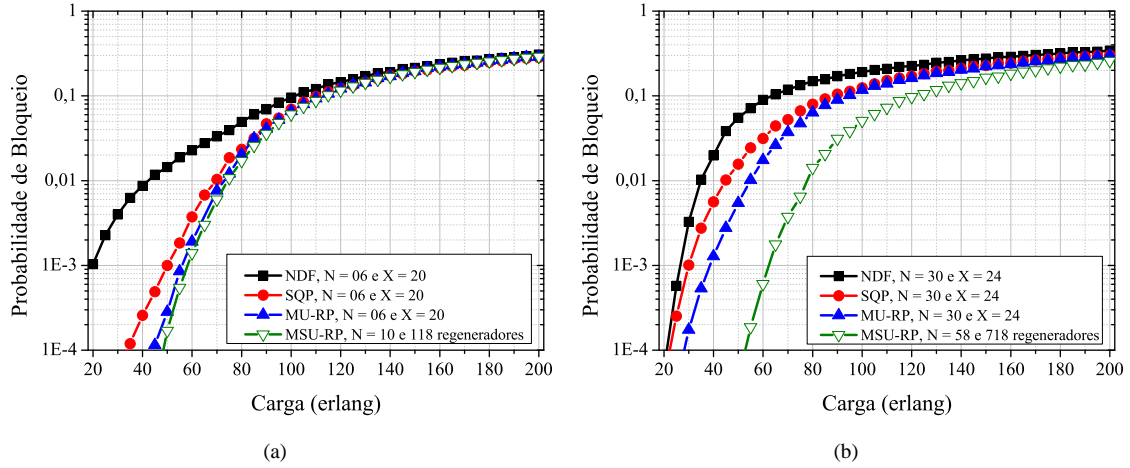


Figura 5.5: Probabilidade de bloqueio da rede em função da sua carga total (tráfego uniforme), considerando as redes translúcidas projetadas por cada algoritmo de RP para: (a) a topologia Pacific Bell (soluções circuladas na Figura 5.3(e)), (b) para a topologia Americana-Extendida (soluções circuladas na Figura 5.6(d)).

algoritmos de forma destacada e alcançou o patamar de probabilidade da rede opaca equivalente para todos os casos investigados. Além disso, MSU-RP é o único algoritmo que foi capaz de alcançar esse nível. Novamente, pode-se observar um valor de saturação para a probabilidade de bloqueio quando o número total de regeneradores aumenta acima de um determinado valor. Ou seja, colocar regeneradores além do ponto em que se inicia a saturação somente resulta em aumento do CapEx da rede sem trazer benefícios ao desempenho da mesma.

Na Figura 5.6(d), observa-se que o algoritmo MSU-RP atinge o nível de desempenho da rede opaca equivalente utilizando aproximadamente 718 regeneradores. A configuração opaca respectiva para essa rede requer 5472 regeneradores ($W=32$ e soma dos graus dos nós igual a 171). Esses números significam que a configuração de rede translúcida encontrada por MSU-RP para a topologia Americana-Extendida alcança o mesmo nível de probabilidade de bloqueio da rede opaca, necessitando de apenas 13% do número de regeneradores requeridos por essa última.

A Figura 5.4(b) mostra as distribuições de regeneradores encontradas pelos algoritmos de RP para os pontos circulados na Figura 5.6(d) na topologia Americana-Extendida. Os algoritmos NDF, SQP e MU-RP colocaram 720 regeneradores igualmente distribuídos na rede, ou seja, 24 regeneradores em cada um dos 30 nós translúcidos escolhidos pelos algoritmos. O algoritmo MSU-RP implantou um total de 718 regeneradores, distribuindo-os em 58 nós da rede.

As configurações mostradas na Figura 5.4(b) foram usadas para se obter os resultados apresentados na Figura 5.5(b), que apresenta a probabilidade de bloqueio para as configurações de rede definidas pelos algoritmos de RP em função da carga da rede. Uma análise da Figura 5.5(b) mostra

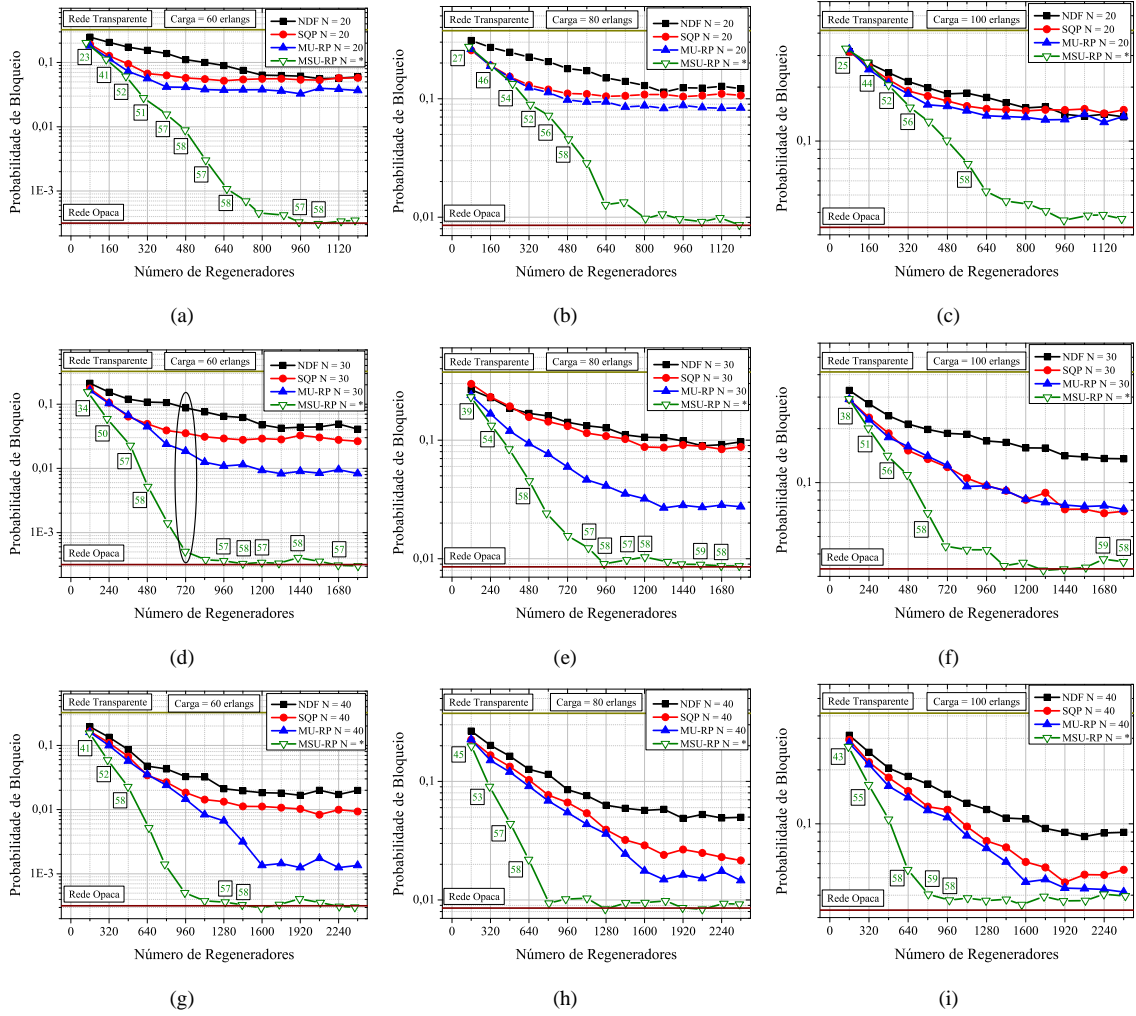


Figura 5.6: Probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores para os diferentes algoritmos de RP, para a topologia Americana-Extendida considerando diferentes cargas e números de nós translúcidos: (a) Carga = 60 Erl e $N = 20$, (b) Carga = 60 Erl e $N = 30$, (c) Carga = 60 Erl e $N = 40$, (d) Carga = 80 Erl e $N = 20$, (e) Carga = 80 Erl e $N = 30$, (f) Carga = 80 Erl e $N = 40$, (g) Carga = 100 Erl e $N = 20$, (h) Carga = 100 Erl e $N = 30$, (i) Carga = 100 Erl e $N = 40$. No caso do MSU-RP esse valor é mostrado dentro dos quadrados ao lado de cada solução.

que o desempenho relativo entre os algoritmos investigados não é afetado novamente quando se varia a carga total da rede.

Análise de desempenho sob padrão de tráfego não uniforme

A solução de RP encontrada pelas propostas MU-RP e MSU-RP é obtida para uma dada distribuição de carga e tráfego na rede. Os resultados mostrados na Figura 5.5 indicam que os algoritmos MU-RP e MSU-RP apresentam melhor desempenho que os outros algoritmos no cenário uniforme de distribuição de tráfego, mesmo quando a carga total da rede é variada. Isso indica que ambos

os algoritmos são robustos o suficiente para lidar com variações na carga total da rede que podem ocorrer ao longo do tempo. No entanto, também é interessante investigar a consistência de MU-RP e MSU-RP quando a distribuição de carga *online* de tráfego varia após a colocação dos regeneradores.

Para efetuar essa análise, foi estudado o desempenho dos algoritmos em função da variação na distribuição de carga entre os nós da rede. Realizou-se a mesma análise GATNU proposta na Seção 4.4.4. Foi gerado um conjunto de 30 diferentes matrizes de tráfego independentes. Para cada uma dessas matrizes, obteve-se a probabilidade de bloqueio de cada algoritmo considerado. Na análise feita neste capítulo considerou-se a plotagem direta da probabilidade de bloqueio no gráfico de caixa e bigodes diferentemente do que está feito na Seção 4.4.4, na qual foi considerado um indicador de desempenho relativo.

A Figura 5.7 mostra a probabilidade de bloqueio para cada algoritmo de RP considerado em um gráfico de caixa e bigodes. Três diferentes valores de R (no gráfico expresso como desvio máximo em percentual) são considerados, $R = 0,2$, $R = 0,5$ e $R = 1$. A caixa no gráfico representa 50% dos dados obtidos, os bigodes correspondem a 100% dos dados obtidos. Os símbolos abertos no interior da caixa representam a mediana. Os símbolos fechados no lado esquerdo da caixa representam a probabilidade de bloqueio de um determinado algoritmo obtida para o caso do tráfego uniforme. A carga total da rede é mantida constante em um valor de 60 erlangs, independentemente do valor considerado para R . As 30 matrizes são simuladas utilizando as redes translúcidas mostradas na Figura 5.4.

Nota-se que o desvio observado para o tráfego não-uniforme (*box chart*), quando comparado ao resultado obtido para o tráfego uniforme (símbolos fechados), tem quase a mesma magnitude para todos os algoritmos investigados. Note ainda que, como discutido na Seção 4.4.4, as matrizes de tráfego são geradas aleatoriamente e, por isso, para algumas matrizes a probabilidade de bloqueio aumenta enquanto para outras ela diminui. Claramente, o desempenho médio dos algoritmos de RP, dado pelos símbolos na Figura 5.7, não se alterou significativamente quando se compara o caso de tráfego uniforme com os casos de tráfego não uniforme. Esses resultados não mostram nenhuma indicação de que os algoritmos MU-RP e MSU-RP propostos possam apresentar um desempenho relativo pior se a distribuição do tráfego na rede flutuar em torno do ponto considerado durante a decisão de RP. Os resultados mostrados na Figura 5.7 indicam que os algoritmos de RP propostos também são suficientemente robustos para lidar com variações na distribuição de carga que podem ocorrer na rede durante sua operação.

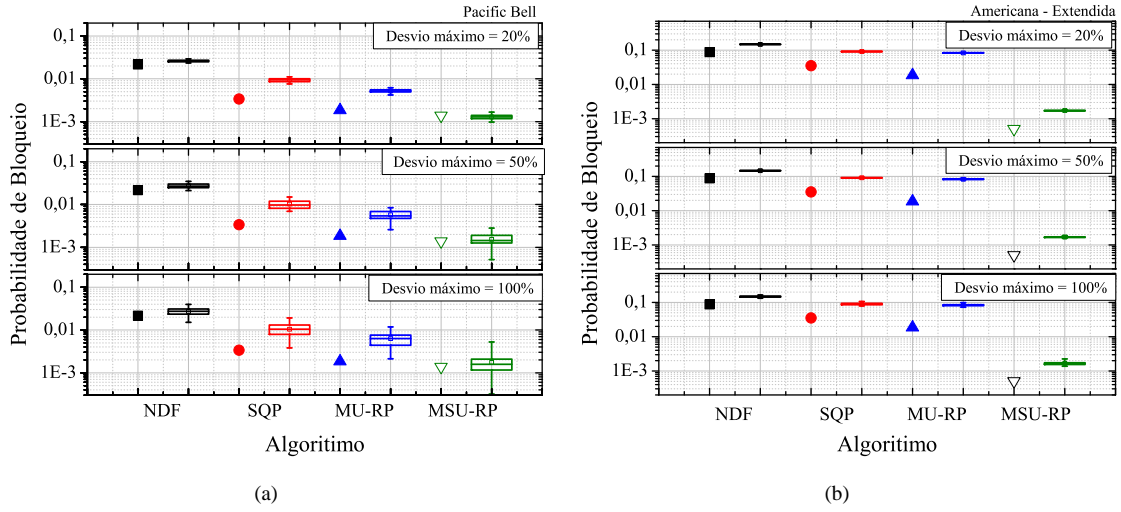


Figura 5.7: Probabilidade de bloqueio em função dos algoritmos de RP, considerando-se um tráfego não-uniforme com diferentes valores de desvio máximo de carga (caixas e bigodes) e probabilidade de bloqueio para o tráfego uniforme (símbolos) para a topologia: (a) Pacific Bell e (b) Americana-Estendida.

5.3 Proposta de metaheurística para colocação esparsa de regeneradores

Observando os resultados obtidos na Seção 5.2, percebe-se claramente que o projeto de uma rede translúcida considerando a regeneração esparsa é um problema multiobjetivo. Isso deve-se ao fato de ser necessário, para se efetuar o projeto, reduzir o número de regeneradores (CapEx) na rede ao mesmo tempo que se reduz também a sua probabilidade de bloqueio (desempenho). O objetivo é realizar uma minimização simultânea do número de regeneradores e da probabilidade de bloqueio. Há claramente um conflito ao se tentar minimizar esses dois últimos de forma simultânea: para diminuir a probabilidade de bloqueio da rede é necessário aumentar o número de regeneradores, enquanto que, ao diminuir o número de regeneradores, aumenta-se a probabilidade de bloqueio.

Nesta seção é proposto o uso de um algoritmo evolucionário de otimização multiobjetiva para resolver o problema de colocação de regeneradores. O algoritmo é denominado otimização multiobjetiva para colocação de regeneradores (MORP – *Multiobjective Optimization for Regenerator Placement*).

5.3.1 Multiobjective Optimization for Regenerator Placement (MORP)

O algoritmo MORP se propõe a resolver o seguinte problema: dada uma topologia de rede já instalada, um algoritmo de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA) e um algoritmo

Tabela 5.2: Formalização do problema de otimização multiobjetiva para projeto de redes translúcidas.

Dado	<ul style="list-style-type: none"> • Topologia física; • Matriz de tráfego dinâmica para a rede óptica a ser projetada; • RWA e RA;
Minimize	<ul style="list-style-type: none"> • O número total de regeneradores implantados na rede (MORP e MORP-3o); • A probabilidade de bloqueio total da rede (MORP e MORP-3o); • Número de nós translúcidos (apenas MORP-3o);
Sob as variáveis de projeto	<ul style="list-style-type: none"> • Número de regeneradores em cada nó da rede;
Sujeito às restrições	<ul style="list-style-type: none"> • QoT mínima aceitável para todos os caminhos ópticos; • Número máximo de regeneradores em um determinado nó.

de RA, determinar quais os nós da rede devem ter capacidade de regeneração compartilhada, com o objetivo de minimizar, de forma simultânea, o número de regeneradores (CapEx) e a probabilidade de bloqueio (desempenho) da rede translúcida a ser projetada.

Sabe-se que o número de nós translúcidos na rede também tem um impacto no custo operacional da rede (OpEx). Por esse motivo, também será proposta uma variação do MORP denominada MORP-3o (MORP com três objetivos). O MORP-3o se propõe a resolver o seguinte problema: dada uma topologia de rede já instalada, um algoritmo de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA) e um algoritmo de RA, determinar quais os nós da rede devem ter capacidade de regeneração compartilhada, com o objetivo de minimizar, de forma simultânea, o número de regeneradores (CapEx), a probabilidade de bloqueio (desempenho) e o número de nós translúcidos (OpEx) da rede translúcida a ser projetada. A Tabela 5.2 formaliza os problemas de otimização tratados pelo MORP e pelo MORP-3o. Em pesquisa operacional, o problema de otimização definido na Tabela 5.2 é conhecido como MCMP (MCMP – *Multiple Criteria Mathematical Programing*) [97]. O problema envolve três funções objetivos: duas lineares (o número total de regeneradores implantados na rede e o número de nós translúcidos) e uma não linear (probabilidade de bloqueio). Além disso, a otimização se dá em variáveis inteiras (número de regeneradores). O problema considera ainda um tráfego dinâmico. A solução ótima para esse problema é dada por um algoritmo NP-difícil [97], o que o torna computacionalmente inviável, mesmo para uma rede com um número pequeno de nós (número pequeno de variáveis de entrada). Flammini *et al.* [58] estudaram uma versão monobjetiva desse problema que considera um tráfego estático e concluíram que não há um algoritmo aproximado que soluciona o problema por eles estudado. Como o problema tratado nessa Tese é computacionalmente mais complexo que o tratado por Flammini *et al.*, há, portanto, uma boa indicação de que soluções heurísticas ou metaheurísticas são convenientes para se tratar o problema formalizado na Tabela 5.2

MORP e MORP-3o necessitam de uma estratégia de otimização multiobjetiva para sua implementação. Para realizar essa otimização multiobjetiva, foi aplicado o algoritmo NSGA-II. O NSGA-II foi proposto por Deb *et al.* e é baseado em algoritmos genéticos (GA) [32]. O algoritmo genético é uma técnica que tem se mostrado eficiente para solucionar problemas de otimização que consideram variáveis discretas. Por essa razão, foi escolhido um otimizador multiobjetivo que utiliza essa técnica. Note que a implementação do NSGA-II é independente do número de objetivos do problema e, portanto, ele pode ser usado tanto para o MORP quanto para o MORP-3o.

Em algoritmos genéticos, um indivíduo representa uma possível solução para o problema. Na implementação do NSGA-II utilizada neste trabalho, um vetor \mathbf{V} é utilizado como indivíduo. Esse vetor é capaz de representar qualquer escolha possível para a colocação de regeneradores. No algoritmo genético, uma população de S indivíduos é formada para otimizar um problema. O i -ésimo indivíduo da população é representado pelo vetor \mathbf{V}^i . Para cada indivíduo i , as componentes de \mathbf{V}^i são definidas por $\mathbf{V}^i = \{v_j^i\}$, para $j = 1, 2, 3, \dots, T$, em que T é o número total de nós na rede considerada. Cada v_j^i é um número inteiro que representa o número de regeneradores a serem implantados no nó de índice j quando se considera o indivíduo de índice i . Na terminologia usada em GA, cada v_j^i é chamado de gene. O MORP decide quais nós devem ter capacidade de regeneração (isto é, tornarem-se translúcidos) e quantos regeneradores devem ser implantados em cada nó translúcido. Assim, cada componente v_j^i é um inteiro no intervalo $[0, R_i^{max}]$, em que R_i^{max} é o número máximo de regeneradores que podem ser implantados no nó de índice i . R_i^{max} é calculado por

$$R_i^{max} = G(i) \cdot W, \quad (5.2)$$

em que $G(i)$ é o grau do nó de índice i e W é o número de comprimentos de onda em cada enlace da rede óptica [23]. Note que, para o problema de otimização considerado por MORP e por MORP-3o, uma busca exaustiva (avaliação de todas as possíveis combinações para efetuar a colocação esparsa de regeneradores) resultaria na avaliação de

$$\prod_{i=1}^T (R_i^{max} + 1) \quad (5.3)$$

combinações. Esse número cresce rapidamente com o aumento do número de nós na rede.

Exemplo 5.1 Suponha uma rede com 16 comprimentos de onda ($W = 16$) e 6 nós ($T = 6$), todos de grau 3. Nesse caso, seria necessário o cálculo de

$$\prod_{i=1}^6 (3 \times 16 + 1) = 49^6 \quad (5.4)$$

combinações para a solução exaustiva to problema. Se fosse necessário 1 ms (estimativa bastante otimista) para cada avaliação, seriam necessários 5,3 meses para avaliar todas as possibilidades. Ao se aumentar o número de nós da rede para 10, a mesma avaliação necessitaria de $2,6 \times 10^6$ anos. Por esse exemplo, nota-se que a avaliação exaustiva é computacionalmente inviável para resolver os problemas de otimização tratados por MORP e por MORP-3o. ■

O Algoritmo 10 mostra o pseudocódigo utilizado para a implementação do NSGA-II [32]. O algoritmo é iniciado com a geração da população inicial P_0 composta por S indivíduos (linha 2 do Algoritmo 10). A população inicial é formada de forma aleatória. Para a população inicial, cada gene v_j^i dos S indivíduos é preenchido a partir da geração de dois números aleatórios $rand()$ (um número aleatório uniformemente distribuído entre 0 e 1) e $rand(R_{max}^i)$ (um número aleatório uniformemente distribuído entre 1 e (R_{max}^i)). Esse números aleatórios são gerados para cada índice i e j e com distribuição uniforme no intervalo considerado. A partir dos dois números aleatórios, os genes v_j^i são atribuídos na população inicial segundo

$$v_j^i = \begin{cases} rand(R_{max}^i), & \text{Se } rand() > 0,5 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}. \quad (5.5)$$

De acordo com (5.5), há 50% de chance de um nó ser transparente e 50% de chance de um nó ser translúcido na inicialização do NSGA-II. Essa estratégia é adotada para acelerar o processo de convergência do NSGA-II, uma vez que em termos de soluções de redes, espera-se que uma rede translúcida tenha o mínimo possível de nós translúcidos. Portanto, iniciar o algoritmo com soluções que possuem, em média, 50% de nós translúcidos parece ser mais conveniente. No segundo passo do algoritmo, as funções objetivo são calculadas para cada um dos S indivíduos (linha 3 do Algoritmo 10). No MORP, duas funções objetivo são consideradas para cada indivíduo \mathbf{V}^i : $PB(\mathbf{V}^i)$ e $CapEx(\mathbf{V}^i)$. Já no MORP-3o, são consideradas três funções objetivo para cada indivíduo \mathbf{V}^i : $PB(\mathbf{V}^i)$, $CapEx(\mathbf{V}^i)$ e $NNT(\mathbf{V}^i)$, em que $NNT(\mathbf{V}^i)$ representa o número de nós translúcidos da rede representada por \mathbf{V}^i . $PB(\mathbf{V}^i)$ é o resultado da simulação feita pelo SIMTON da probabilidade de bloqueio da rede translúcida que possui v_j^i regeneradores em cada nó de índice j na rede. $CapEx(\mathbf{V}^i)$ é a soma de todos os regeneradores colocados na rede e pode ser calculado por

$$CapEx(\mathbf{V}^i) = \sum_{j=1}^T v_j^i. \quad (5.6)$$

$NNT(\mathbf{V}^i)$ é a quantidade de nós translúcidos da rede \mathbf{V}^i a qual é calculada por

$$NNT(\mathbf{V}^i) = \sum_{j=1}^T (1 - \delta[v_j^i]), \quad (5.7)$$

Algoritmo 10 NSGA-II

```

1:  $t \leftarrow 0$ ;
2: Inicialize uma população  $P_t$ ;
3: Calcule as funções objetivo para todos os indivíduos de  $P_t$ ;
4:  $P_t = (\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_m)$ ; // Classifique os indivíduos em frentes de Pareto, usando o critério de dominância

5: Calcule o crowding distance para todas as frente de Pareto  $\mathcal{F}_k$  ( $k \in 1, 2, \dots, m$ ) de  $P_t$ ;
6: while ( $t < G$ ) do // O número máximo de iterações  $G$  não for atingido
7:    $Q_t \leftarrow \text{novaPopulação}(P_t)$  // Cria uma nova população aplicando a seleção mutação e cruzamento.
8:   Calcule as funções objetivo para todos os indivíduos de  $Q_t$ ;
9:    $R_t \leftarrow P_t \cup Q_t$ ; // Faz a união entre a população atual e a população criada.
10:   $R_t = (\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_m)$ ; // Classifique os indivíduos em frentes de Pareto, usando o critério de dominância
11:   $k \leftarrow 1$ ;
12:   $P_{t+1} \leftarrow \emptyset$ ; // inicialize a população da próxima iteração.
13:  while ( $|P_{t+1}| + |\mathcal{F}_k| \leq S$ ) do // Copie frentes de Paretos completas de  $R_t$  para  $P_{t+1}$  enquanto  $P_{t+1}$  possuir menos que  $S$  indivíduos
14:    Avalie o crowding distance de cada indivíduo da frente de Pareto  $\mathcal{F}_k$ ;
15:     $P_{t+1} \leftarrow P_{t+1} \cup \mathcal{F}_k$ ;
16:     $k \leftarrow k + 1$ ;
17:  end while
18:  Avalie o crowding distance de cada indivíduo da frente de Pareto  $\mathcal{F}_k$ ;
19:  Copie para  $P_{t+1}$  os  $S - |P_{t+1}|$  indivíduos de  $\mathcal{F}_k$  com maiores crowding distance;
20:   $t \leftarrow t + 1$ ;
21: end while

```

em que $\delta[x]$ é a função delta de Kronecker [94] aplicada ao argumento inteiro x .

$PB(\mathbf{V}^i)$, $CapEx(\mathbf{V}^i)$ e $NNT(\mathbf{V}^i)$ são chamadas de funções objetivo no âmbito dos algoritmos de otimização multiobjetivos. As funções objetivo, juntamente com o critério de dominância (definido mais à frente nesta seção), são usadas para se definir a aptidão $A(\mathbf{V}^i)$ do indivíduo \mathbf{V}^i . Em um algoritmo genético, a qualidade de um indivíduo (solução) é avaliada por sua função aptidão (*fitness*).

Nos algoritmos propostos nesta Tese dois objetivos (MORP) ou três (MORP-3o) são considerados, porém o NSGA-II pode lidar como múltiplos objetivos. Para simplificar a notação e tornar as explicações das próximas etapas do NSGA-II genéricas, as funções objetivo serão denominadas daqui por diante $f_1(\mathbf{V}^i)$, $f_2(\mathbf{V}^i)$, \dots , $f_K(\mathbf{V}^i)$. No caso do MORP, $K = 2$ com $f_1(\mathbf{V}^i) = PB(\mathbf{V}^i)$ e $f_2(\mathbf{V}^i) = CapEx(\mathbf{V}^i)$. No caso do MORP-3o, $K = 3$ com $f_1(\mathbf{V}^i) = PB(\mathbf{V}^i)$, $f_2(\mathbf{V}^i) = CapEx(\mathbf{V}^i)$ e $f_3(\mathbf{V}^i) = NNT(\mathbf{V}^i)$.

Definição 5.1 (Espaço de objetivos) *O espaço vetorial K -dimensional cujos eixos ortogonais são formados pelas funções objetivo $f_1(\mathbf{V}^i), f_2(\mathbf{V}^i), \dots, f_K(\mathbf{V}^i)$ é chamado de **espaço de objetivos**.*

O terceiro passo do algoritmo constitui a divisão da população em frentes de Pareto (linha 4 do Algoritmo 10). A divisão em frentes de Pareto é baseada na ideia de dominância. O conceito de dominância é apresentado na Definição 5.2.

Definição 5.2 (Dominância [106]) *A dominância é um operador booleano aplicado a dois indivíduos da população. Se o problema apresenta K funções objetivo e o objetivo do problema é minimizar, simultaneamente, essas K funções, então diz-se que a solução \mathbf{V}^x **domina** a solução \mathbf{V}^y (cuja notação é $\mathbf{V}^y \prec \mathbf{V}^x$), se $f_k(\mathbf{V}^x) \leq f_k(\mathbf{V}^y)$ para todo $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ e existe pelo menos um k tal que $f_k(\mathbf{V}^x) < f_k(\mathbf{V}^y)$.*

Ou seja, se \mathbf{V}^x domina \mathbf{V}^y então \mathbf{V}^x é melhor que \mathbf{V}^y em pelo menos um dos objetivos (condição “existe pelo menos um k tal que $f_k(\mathbf{V}^x) < f_k(\mathbf{V}^y)$ ” na definição) e não é pior nos outros objetivos (condição “ $f_k(\mathbf{V}^x) \leq f_k(\mathbf{V}^y)$ para todo $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ ” na definição).

Definição 5.3 (Indivíduo não dominado [106]) *Um indivíduo \mathbf{V}^x é dito **não dominado** se não existe nenhum indivíduo $\mathbf{V}^y \in P_t$ (na população), com $y \neq x$, tal que $\mathbf{V}^x \prec \mathbf{V}^y$.*

Com o conceito de dominância, a população P_t pode ser dividida em m frentes de Pareto $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_m$. Os indivíduos não dominados da população são colocados na primeira frente de Pareto \mathcal{F}_1 . A primeira frente de Pareto representa as melhores soluções encontradas pelo processo de otimização multiobjetivo (NSGA-II) até a iteração atual. Note que existe um conjunto de soluções otimizadas e não apenas uma. A primeira frente de Pareto fornece as soluções encontradas que realizam o melhor balanço entre as várias funções objetivo. Se o conjunto \mathcal{F}_1 for removido da população P_t , então um novo conjunto de soluções não dominadas irá aparecer em P_t . Esse novo conjunto é a segunda frente de Pareto \mathcal{F}_2 . Retirando-se \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 da população P_t , sobrarão indivíduos não dominados que formarão a terceira frente de Pareto. Dessa forma, podem ser formadas m frentes de Pareto até não mais restarem indivíduos em P_t . A divisão em frentes de Pareto é importante pois o NSGA-II usa o índice da frente à qual o indivíduo pertence como sua função aptidão. Ou seja, a função aptidão $A(\mathbf{V}^i)$ do indivíduo \mathbf{V}^i é definida por

$$A(\mathbf{V}^i) = k \iff \mathbf{V}^i \in \mathcal{F}_k. \quad (5.8)$$

Como o NSGA-II considera que todas as soluções pertencentes a uma mesma frente de Pareto \mathcal{F}_k têm a mesma aptidão, então é necessário um outro critério de comparação para os indivíduos dentro

de uma mesma frente. O NSGA-II usa para isso um critério denominado de *crowding distance* [32]. De forma simplificada, o *crowding distance* de um indivíduo V^i mede a distância de um indivíduo para seus dois vizinhos mais próximos no espaço de objetivos. Possuir vizinhos muito próximos significa valor baixo de *crowding distance*, enquanto que possuir vizinhos distantes significa valores altos de *crowding distance*. Como o ideal é ter soluções igualmente espaçadas em uma determinada frente de Pareto, indivíduos que estão muito próximos de seus vizinhos devem ser penalizados. Por isso, quanto maior o valor do *crowding distance*, melhor é o indivíduo. A linha 5 do Algoritmo 10 efetua o cálculo do *crowding distance*.

Logo após, inicia-se o processo iterativo no algoritmo NSGA-II (linha 6) que é repetido G vezes. O critério de parada utilizado neste trabalho é o número de iterações realizadas. Após esse passo, uma população auxiliar Q_t é gerada a partir de P_t aplicando os operadores de seleção, mutação e cruzamento (linha 7). Q_t é gerada com S indivíduos cuja notação é $|Q_t| = S$. São calculadas as funções objetivo dos indivíduos de Q_t . Feito esse cálculo, uma segunda população auxiliar R_t é formada pela união das populações P_t e Q_t . A população R_t é dividida em frentes de Pareto. Nesse ponto, a população R_t possui $2S$ indivíduos ($|R_t| = 2S$). A população para a próxima iteração P_{t+1} precisa também ser formada por S indivíduos e ela é formada pelos S melhores indivíduos de R_t . Os S piores indivíduos de R_t são descartados. O laço na linha 13 faz a cópia, frente de Pareto por frente de Pareto, dos indivíduos de R_t para P_{t+1} . É importante perceber que as frentes de Pareto de menor índice (melhores) são copiadas antes das de maior índice (piores). No caso da cópia de uma frente inteira \mathcal{F}_k fazer com que o número de indivíduos em P_{t+1} exceda S , então são copiados para P_{t+1} os indivíduos de \mathcal{F}_k com maiores *crowding distance* até completar S indivíduos em P_{t+1} .

Neste trabalho, a população Q_t é formada conforme mostrado no Algoritmo 11. O operador

Algoritmo 11 *novaPopulação(P_t)*

- 1: $R_t = \text{Seleção}(P_t)$ // Seleciona S indivíduos de P_t usando torneio binário;
 - 2: **while** (R_t não está vazio) **do**
 - 3: Escolha aleatoriamente dois indivíduos I_1 e $I_2 \in R_t$;
 - 4: Faça o cruzamento(I_1, I_2) dos indivíduos de acordo com a probabilidade de cruzamento P_C ;
 - 5: Copie os dois filhos resultantes para Q_t ;
 - 6: Remova I_1 e I_2 de R_t ;
 - 7: **end while**
 - 8: **for** (Cada gene g de todos os indivíduos $\in Q_t$) **do**
 - 9: Faça a mutação em g de acordo com a probabilidade de mutação P_M ;
 - 10: **end for**
 - 11: Retorne Q_t ;
-

de seleção utilizado é o torneio binário. O cruzamento uniforme [107] é usado como operador de cruzamento. A mutação é realizada gene por gene. Quando um gene é selecionado para ser mutado, ele é substituído por um novo número inteiro sorteado aleatoriamente dentro dos limites do gene de acordo com (5.5). P_M e P_C são as probabilidades de mutação e cruzamento, respectivamente.

5.3.2 Resultados

A presença de múltiplos objetivos conflitantes em um problema de otimização, em princípio, implica um conjunto de soluções otimizadas (primeira frente de Pareto) e não apenas uma única solução ideal. Na ausência de qualquer informação adicional, uma solução que pertence à frente de Pareto não pode ser dita melhor que as outras soluções pertencentes ao mesmo conjunto [32]. No caso do MORP, tem-se duas funções objetivo: a probabilidade de bloqueio e o número total de regeneradores colocado na rede. O conjunto de soluções (no espaço de objetivos) retornados pelo MORP é portanto uma curva no plano cartesiano cujos eixos são esses dois objetivos. O conjunto de soluções encontradas é um conjunto de soluções para o RP na rede. A escolha por uma solução ou outra poderá ser feita de acordo com o orçamento disponível ou dos requisitos de desempenho para a rede.

Os parâmetros de simulação da camada óptica utilizados são os mesmos mostrados na Tabela 5.1. Os efeitos de degradação da camada física considerados na simulação foram os mesmos considerados na Seção 5.2.3. Foi utilizada a rede Pacific Bell mostrada na Figura 5.8 em todas as simulações. Todas as simulações foram realizadas sob tráfego uniforme.

Convergência e variação paramétrica do NSGA-II

Foram utilizados, para o NSGA-II, os parâmetros mostrados na Tabela 5.3 na realização das simulações e obtenção dos resultados referentes ao MORP.

Tabela 5.3: *Parâmetros do NSGA-II utilizados para obtenção dos resultados do MORP.*

Parâmetro	Valor	Descrição
G	300	Número de Iterações do NSGA-II
P_M	0,1	Probabilidade de mutação
P_C	1	Probabilidade de Cruzamento
S	100	Indivíduos na população

Foram variados os parâmetros G , P_M e P_C a fim de verificar a sensibilidade do algoritmo a

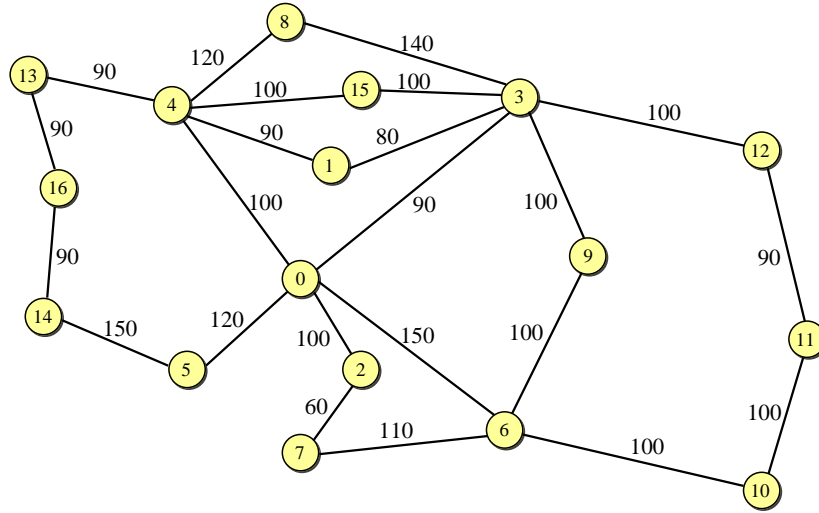


Figura 5.8: Topologia Pacific Bell utilizada nas simulações realizadas para o MORP. Os comprimentos dos enlaces são dados em km. Números no interior dos nós representam o índice do nó.

esses parâmetros. A primeira análise mostrada é a análise de convergência do MORP. A mesma foi realizada para uma carga de 80 erlangs. O MORP foi executado seis vezes com inicializações independentes por um total de $G = 2000$ iterações. Verificou-se que, nos seis casos, a melhor frente de Pareto encontrada pelo MORP após 2000 iterações é praticamente idêntica à encontrada para 1000 iterações. Escolheu-se um valor de G razoavelmente pequeno para que o algoritmo fosse executado o mais rápido possível, e ao mesmo tempo, uma boa frente de Pareto fosse encontrada ao final do processo de otimização. O menor valor que melhor atendeu a essa especificação foi $G = 300$. A Figura 5.9 mostra as melhores frentes de Pareto encontradas pelo MORP após $G = 300$ e $G = 1000$ iterações para cada um dos seis experimentos independentes. É perceptível nos gráficos que a frente de Pareto encontrada para $G = 300$ é dominada pela frente de Pareto encontrada para $G = 1000$, porém o $G = 300$ foi escolhido para se reduzir o tempo necessário para a execução do MORP. Outro fato a se destacar na Figura 5.9 é de que as frentes de Pareto encontradas em todos os seis experimentos são bastante concordantes. Isso mostra a consistência da solução encontrada por MORP. Além disso, percebe-se que a frente de Pareto nos seis casos está bem preenchida, não apresentando descontinuidades significativas no resultado final.

Outro estudo feito foi a variação da probabilidade de mutação P_M utilizada com o NSGA-II. A Figura 5.10(a) mostra a melhor frente de Pareto encontrada por MORP após $G = 300$ iterações considerando as probabilidades de mutação de 0,03; 0,07; 0,1 e 0,13, mantendo fixa a probabilidade de cruzamento em $P_C = 1$. Note que os valores de P_M investigados não interferem significativamente

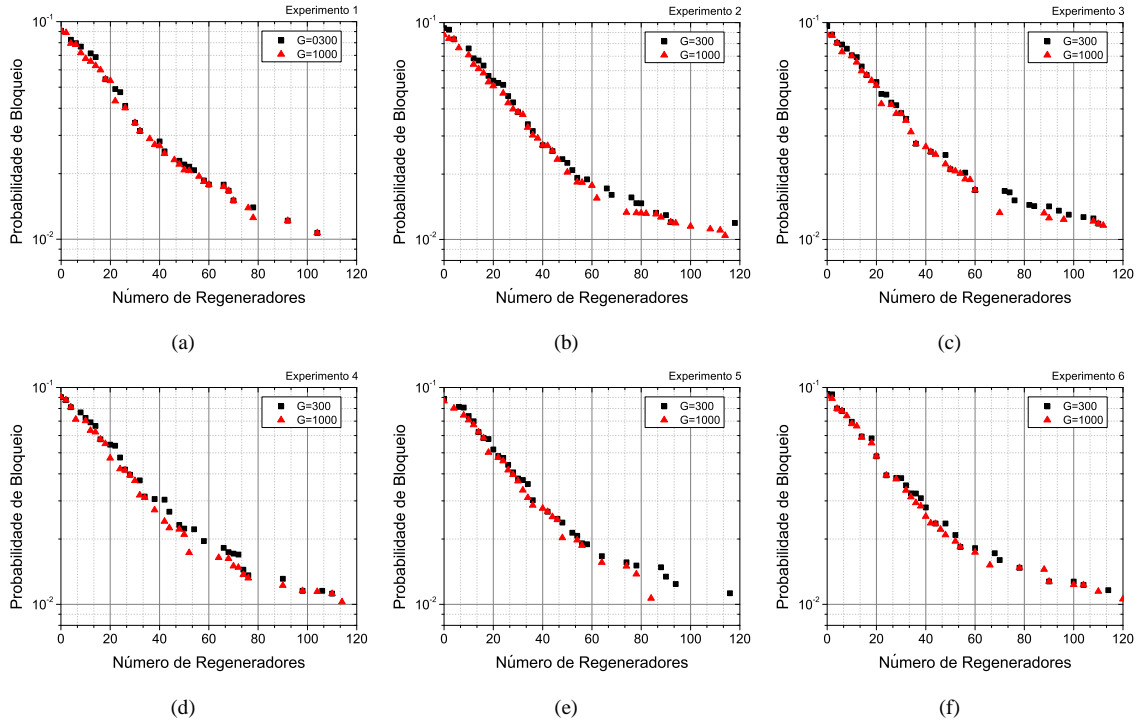


Figura 5.9: Melhores frentes de Pareto encontradas pelo MORP após 300 e 1000 iterações considerando 6 execuções com inicializações independentes.

na convergência do MORP, pois as frentes de Pareto encontradas são praticamente as mesmas. O mesmo estudo foi realizado mantendo fixo o valor de $P_M = 0,1$ e variando P_C para os valores de $P_M = 0,8; 0,9$ e $1,0$ conforme mostrado na Figura 5.10(b). Percebe-se novamente que a probabilidade de cruzamento não influencia de forma significativa a convergência do algoritmo. Foram escolhidos os valores de $P_C = 1$ e $P_M = 0,1$ para a realização dos experimentos realizados para o MORP neste trabalho.

Resultados para o MORP

Os resultados obtidos por MORP são comparados com outros dois algoritmos que aparecem na literatura para a colocação de regeneradores: NDF e SQP (descritos na Seção 2.2.1) e com o algoritmo MSU-RP, proposto neste trabalho. A comparação entre os algoritmos não é direta pois NDF, SQP e MSU-RP fornecem apenas uma única solução para o problema enquanto MORP fornece um conjunto de soluções. Decidiu-se fazer uma comparação ponto a ponto com o NDF e o SQP e uma variação do parâmetro de entrada de MSU-RP. Para cada solução encontrada por MORP são obtidos: o número de nós translúcidos N e o número total de regeneradores R_e . Executam-se os algoritmos SQP e NDF utilizando como entrada N e X , em que X é calculado a partir dos valores de

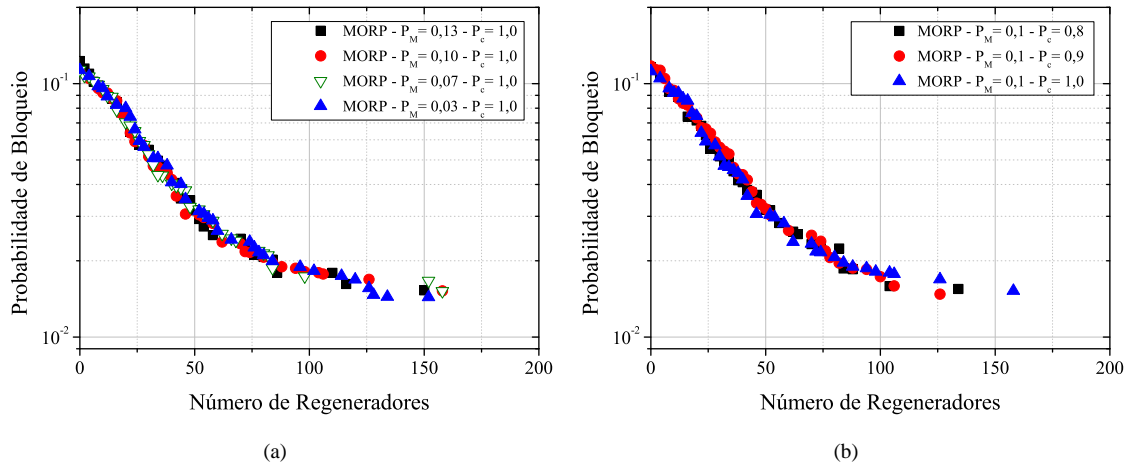


Figura 5.10: Melhores frentes de Pareto encontradas após 300 iterações de MORP em função da variação da: (a) probabilidade de mutação e (b) probabilidade de cruzamento utilizada no NSGA-II.

N e R_e (encontrados por cada solução de MORP) por $X = [R_e/N]$ em que $[y]$ representa o inteiro mais próximo de y . Executa-se o algoritmo MSU-RP usando alguns R_e igualmente espaçados no intervalo de valores encontrados por MORP.

A Figura 5.11 mostra o número total de regeneradores instalados por cada algoritmo em função da probabilidade de bloqueio obtida por cada rede translúcida (cada ponto no gráfico representa uma rede translúcida diferente, ou seja, uma solução de RP diferente). Além disso, a Figura 5.11 mostra a frente de Pareto obtida por MORP após 300 iterações em comparação com o NDF, SQP e MSU-RP. As Figuras 5.11(a), 5.11(b) e 5.11(c) mostram, respectivamente, os resultados obtidos para as cargas de 60, 80 e 100 erlangs. Como se pode observar na Figura 5.11, para qualquer número fixo de regeneradores, a solução fornecida por MORP apresenta um valor menor ou igual às probabilidades de bloqueio encontradas por NDF, SQP e MSU-RP. Isso significa que as soluções fornecidas por MORP dominam as soluções encontradas pelos outros algoritmos e portanto são melhores. As diferenças entre o MORP e os outros algoritmos se acentuam à medida que a carga da rede diminui. Note que para uma região de probabilidade de bloqueio típica de trabalho de uma rede óptica (probabilidade de bloqueio entre 10^{-3} e 10^{-2}), a diferença entre MORP e os outros algoritmos considerados é claramente visualizada (Figura 5.11(a)). O algoritmo MSU-RP é o que fornece resultados mais próximos dos obtidos por MORP, porém isso é conseguido utilizando um maior número de nós translúcidos, como será discutido mais adiante. Note que nas Figuras 5.11(a), 5.11(b) e 5.11(c) são apresentados dois níveis constantes que representam a probabilidade de bloqueio que a rede teria se ela fosse transparente (denotado no gráfico por “rede transparente”) e se ela fosse opaca (denotado no gráfico por “rede opaca”). Para as três cargas investigadas, o MORP e o MSU-RP encontram soluções de

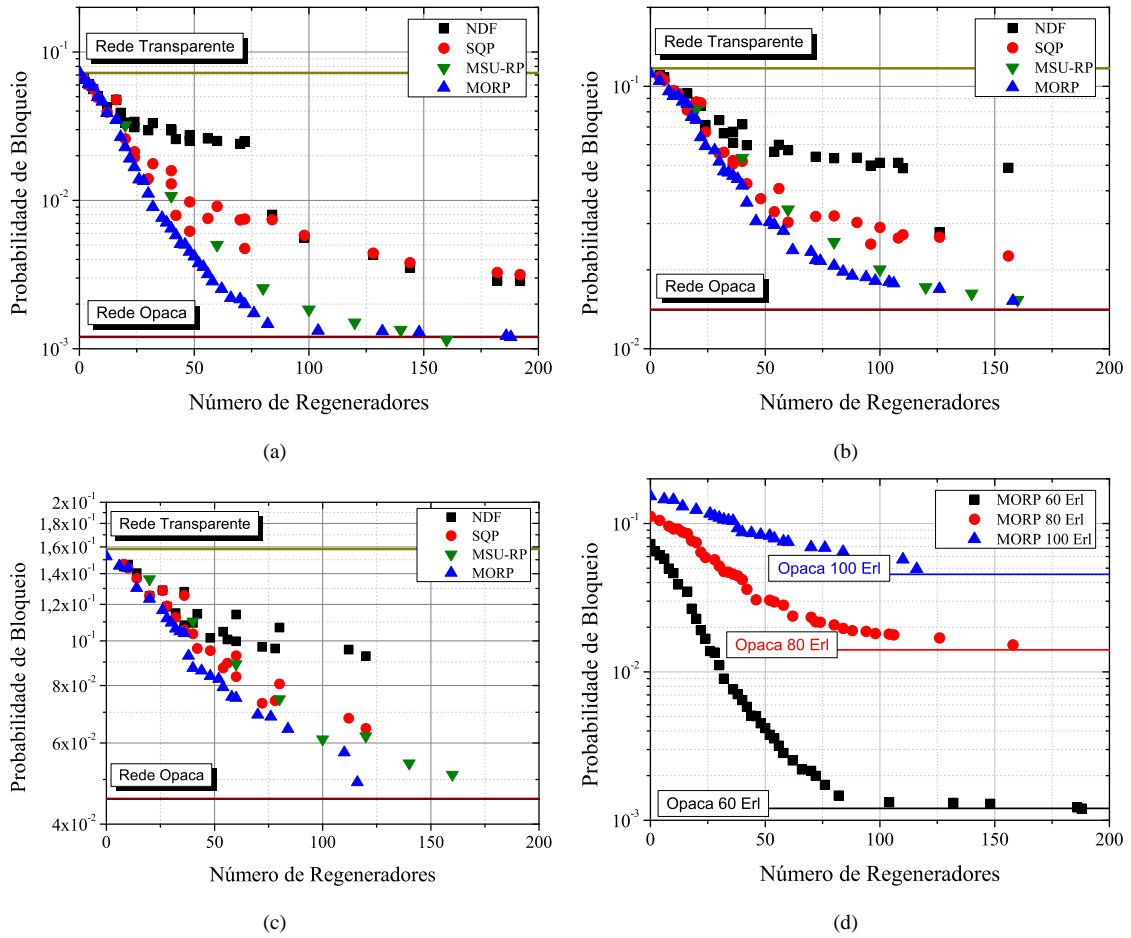


Figura 5.11: Probabilidade de bloqueio em função do número total de regeneradores utilizados pelos algoritmos MORP, MSU-RP, SQP e NDF nas cargas: (a) 60 erlangs, (b) 80 erlangs e (c) 100 erlangs. (d) melhor frente de Pareto encontrada pelo MORP para as cargas de 60, 80 e 100 erlangs. Todos os resultados para o MORP foram obtidos após 300 iterações.

redes translúcidas que têm o desempenho igual ou muito próximo ao obtido pela rede opaca equivalente (que seria o caso ideal em termos de probabilidade de bloqueio). O mesmo não pode ser dito para o NDF e o SQP. A Figura 5.11(d) mostra a probabilidade de bloqueio em função do número de regeneradores instalados na rede destacando apenas os resultados encontrados por MORP para as cargas de 60, 80 e 100 erlangs. A figura também mostra os níveis de probabilidade de bloqueio da rede opaca equivalente para as três cargas investigadas. Note que para as cargas de 60 e 80 erlang (Figura 5.11(a)), há um nível de saturação para a probabilidade de bloqueio. Isso significa que o aumento no número de regeneradores além desse ponto não produz uma redução da probabilidade de bloqueio. Esse nível corresponde à probabilidade de bloqueio obtida para a rede opaca. O número total de regeneradores necessários para uma rede totalmente opaca na topologia considerada é de 1104 de acordo com (5.1). Percebe-se que para todos os casos investigados, o MORP encontra redes

translúcidas com probabilidades de bloqueio idênticas à probabilidade de bloqueio da rede opaca equivalente utilizando um número de regeneradores muito menor. É possível se avaliar o número relativo de regeneradores utilizados na solução proposta por MORP para uma rede translúcida que atinge o desempenho de uma rede completamente opaca. Para 60 erlangs, MORP encontrou uma rede translúcida com desempenho de opaca utilizando apenas 104 regeneradores, o que equivale a 9,4% do total necessário para a rede opaca. Para 80 erlangs, são necessários 158 regeneradores ou 14,3% e, para 100 erlangs, são necessários 116 regeneradores ou 10,5%. Ou seja, entre os casos investigados, o MORP encontrou uma rede translúcida com o mesmo desempenho da opaca equivalente utilizando apenas 14,3% dos regeneradores requeridos para a rede opaca.

Como mencionado anteriormente, cada ponto mostrado na Figura 5.11 para um determinado algoritmo representa uma solução diferente de RP encontrada para a rede considerada. Nas Tabelas 5.4 a 5.7 são mostradas todas as soluções de RP encontradas para os quatro algoritmos considerados sob a carga de 80 erlangs. As tabelas mostram o número de nós translúcidos (coluna N), o número total de regeneradores colocados na rede (coluna R_e), o número de regeneradores colocados em cada nó da rede (colunas numeradas) e a probabilidade de bloqueio obtida pela solução em questão. A indexação dos nós (colunas numeradas) corresponde aos índices utilizado na Figura 5.8. Cada linha corresponde a uma rede translúcida diferente. Percebe-se que a solução fornecida por MSU-RP que apresenta menor número de nós translúcidos, apresenta nove nós translúcidos (primeira linha da Tabela 5.6). Enquanto que o MORP seleciona, no máximo, sete nós translúcidos (última linha da Tabela 5.4). Isso mostra que o MORP é mais eficaz que o MSU-RP em termos de redução de OpEx. Nas quatro tabelas estão destacadas em cinza as soluções de RP retornadas por cada algoritmo, que atingiram o desempenho mais próximo possível da rede opaca equivalente (compare com a Figura 5.11(b)). O MORP necessitou de seis nós translúcidos com um total de 158 regeneradores, o MSU-RP de 14 nós translúcidos e um total de 156 regeneradores e o SQP e o NDF de seis nós translúcidos e um total de 156 regeneradores. Como foi discutido anteriormente, as probabilidades de bloqueio alcançadas por MORP e MSU-RP são menores que as obtidas por NDF e SQP. Além disso, as probabilidades de bloqueio resultantes para as soluções encontradas por MORP e MSU-RP são similares (0,015230 contra 0,01536) assim como o número total de regeneradores colocados na rede pelas duas estratégias (158 contra 158). No entanto, o MORP necessita de apenas seis nós translúcidos para essa solução enquanto o MSU-RP necessita de 14. Ou seja, em termos de OpEx, o MORP é mais de que duas vezes mais eficiente que o MSU-RP no caso investigado.

Outra investigação feita foi a variação na intensidade de carga. Na Figura 5.11(b), foram esco-

Tabela 5.4: Redes translúcidas encontradas por MORP executado em uma carga de 80 erlangs na topologia Pacific Bell. A coluna N representa o número de nós translúcidos da solução, R_e número total de regeneradores, PB a probabilidade de bloqueio. Os números representam a quantidade de regeneradores colocados em cada nó da rede. Os índices dos nós estão listados na primeira linha da tabela.

N	R_e	Índice do nó translúcido																PB	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		16
1	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,104904
1	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,091924
1	12	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,091844
1	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,074474
1	22	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,063938
2	14	2	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,087374
2	16	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0,085623
2	24	14	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,059143
2	30	22	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,051639
2	32	22	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,047397
2	34	22	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,046927
3	8	2	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,095813
3	28	14	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0,057054
3	36	22	4	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,045577
3	38	22	4	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,044361
3	42	22	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,036021
3	46	22	0	0	10	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,030617
3	54	28	0	0	12	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,029641
3	62	28	0	0	20	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,023755
4	18	2	0	0	4	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,076473
4	40	22	4	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0,041845
4	52	22	4	0	12	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,030395
4	58	28	0	0	12	14	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0,028130
4	70	22	0	0	20	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,023368
4	72	24	0	0	20	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,021759
4	74	24	0	0	20	14	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,021597
4	94	28	0	0	20	24	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,018715
5	80	24	0	0	20	14	14	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0,020699
5	84	24	4	0	20	14	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,019662
5	88	28	0	0	20	14	22	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0,018967
5	98	34	0	0	20	14	22	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0,018715
5	106	28	0	0	30	14	22	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,017759
6	104	28	0	0	30	14	22	0	0	6	0	0	0	0	4	0	0	0	0,017954
6	158	28	0	0	30	24	40	12	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0,015230
7	126	28	0	0	30	16	30	10	0	8	0	0	0	0	4	0	0	0	0,016910

Tabela 5.5: Redes translúcidas encontradas por NDF para uma carga de 80 erlangs na topologia Pacific Bell. A coluna N representa o número de nós translúcidos da solução, R_e número total de regeneradores, PB a probabilidade de bloqueio. Os números representam a quantidade de regeneradores colocados em cada nó da rede. Os índices dos nós estão listados na primeira linha da tabela.

N	R_e	Índice do nó translúcido																PB	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		16
1	4	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,11047
1	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09603
1	12	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09374
1	20	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08703
1	22	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08428
2	16	0	0	0	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08391
2	24	0	0	0	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07115
2	32	0	0	0	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06621
2	36	0	0	0	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06097
3	6	0	0	0	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10824
3	30	0	0	0	10	10	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07435
3	36	0	0	0	12	12	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06708
3	42	0	0	0	14	14	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05964
3	54	0	0	0	18	18	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05632
3	60	0	0	0	20	20	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05714
4	16	0	0	0	4	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,09404
4	40	0	0	0	10	10	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0,07164
4	56	0	0	0	14	14	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0,05983
4	72	0	0	0	18	18	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0,05391
4	96	0	0	0	24	24	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0,04995
5	80	0	0	16	16	16	0	16	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0,05325
5	90	0	0	18	18	18	0	18	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0,05352
5	100	0	0	20	20	20	0	20	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0,05114
5	110	0	0	22	22	22	0	22	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0,04878
6	108	0	0	18	18	18	0	18	0	0	0	0	18	0	0	0	0	18	0,05113
6	156	0	0	26	26	26	0	26	0	0	0	0	26	0	0	0	0	26	0,04893
7	126	0	0	18	18	18	18	18	0	0	0	0	18	0	0	0	0	18	0,02781

Tabela 5.6: Redes translúcidas encontradas por MSU-RP executado em uma carga de 80 erlangs na topologia Pacific Bell. A coluna N representa o número de nós translúcidos da solução, R_e número total de regeneradores, PB a probabilidade de bloqueio. Os números representam a quantidade de regeneradores colocados em cada nó da rede. Os índices dos nós estão listados na primeira linha da tabela.

N	R_e	Índice do nó translúcido																PB	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		16
9	20	4	2	0	2	2	2	2	0	0	0	0	2	2	2	0	0	0	0,0816
11	40	8	2	2	6	4	4	4	0	0	0	0	2	4	2	0	0	2	0,05344
12	64	12	4	4	8	8	8	4	0	0	2	0	4	4	4	0	0	2	0,03397
12	78	16	4	4	10	10	10	6	0	0	0	2	4	6	4	0	0	2	0,02553
12	100	20	8	4	14	12	12	10	0	0	2	0	4	6	6	0	0	2	0,02006
14	128	24	8	6	18	14	18	10	2	0	2	2	6	6	8	0	0	4	0,01717
14	140	28	10	6	20	18	18	10	2	0	2	2	6	6	8	0	0	4	0,01624
14	158	30	12	8	22	18	18	10	2	0	2	2	10	10	10	0	0	4	0,01536

lhidos os pontos (um para cada algoritmo considerado) mais próximo possível de 100 regeneradores. Essas redes translúcidas foram submetidas à variação na intensidade de carga. A Figura 5.12 mostra a probabilidade de bloqueio retornada pelas redes translúcidas encontradas pelos quatro algoritmos de RP em função da intensidade de carga na rede óptica. Note que a mudança na intensidade de carga não afeta o desempenho relativo dos algoritmos (o melhor algoritmo continua sendo o melhor e o pior continua sendo o pior), entretanto ocorre uma dilatação das diferenças entre os algoritmos à medida que ocorre uma redução na carga total da rede.

Resultados para o MORP-3o

A estratégia de colocação que considera uma diminuição simultânea da probabilidade de bloqueio e do número total de regeneradores (como faz o MORP) parece ser adequada para o caso de ser considerado o par custo-desempenho como determinante no projeto de uma rede translúcida. Entretanto, o MORP não leva em conta também a redução no número de nós translúcidos na rede óptica. Esse número tem influência tanto no CapEx como no OpEx da rede. No CapEx, pois cada novo nó translúcido instalado na rede necessita de uma infra-estrutura extra no mesmo para comportar os regeneradores e no OpEx, pois a cada novo nó translúcido instalado na rede é necessário se aumentar a complexidade da manutenção desse nó além de prover interfaces de gerenciamento e controle para os regeneradores [20]. A relação de custo entre o CapEx gerado pelo preço de uma unidade de regenerador, e os CapEx e OpEx gerados pela instalação de um nó translúcido não é claramente

Tabela 5.7: Redes translúcidas encontradas por SQP executado em uma carga de 80 erlangs na topologia Pacific Bell. A coluna N representa o número de nós translúcidos da solução, R_e número total de regeneradores, PB a probabilidade de bloqueio. Os números representam a quantidade de regeneradores colocados em cada nó da rede. Os índices dos nós estão listados na primeira linha da tabela.

N	R_e	Índice do nó translúcido																PB	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		16
1	4	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10901
1	10	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09642
1	12	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09397
1	20	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08723
1	22	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08651
2	16	8	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08116
2	24	12	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06686
2	32	16	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05612
2	36	18	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05217
3	6	2	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10549
3	30	10	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05542
3	36	12	0	0	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0506
3	42	14	0	0	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04253
3	48	16	0	0	16	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03735
3	54	18	0	0	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03328
3	60	20	0	0	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03036
4	16	4	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0,0847
4	40	10	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0,05184
4	56	14	0	0	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0,04083
4	72	18	0	0	18	18	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0,0319
4	96	24	0	0	24	24	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0,02505
5	80	16	0	0	16	16	0	0	0	0	0	0	0	16	16	0	0	0	0,03208
5	90	18	0	0	18	18	0	0	0	0	0	0	0	18	18	0	0	0	0,0303
5	100	20	0	0	20	20	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	0	0	0,02899
5	110	22	0	0	22	22	0	0	0	0	0	0	0	22	22	0	0	0	0,0272
6	108	18	0	0	18	18	0	18	0	0	0	0	0	18	18	0	0	0	0,02644
6	156	26	0	0	26	26	0	26	0	0	0	0	0	26	26	0	0	0	0,02257
7	126	18	0	18	18	18	0	18	0	0	0	0	0	18	18	0	0	0	0,02663

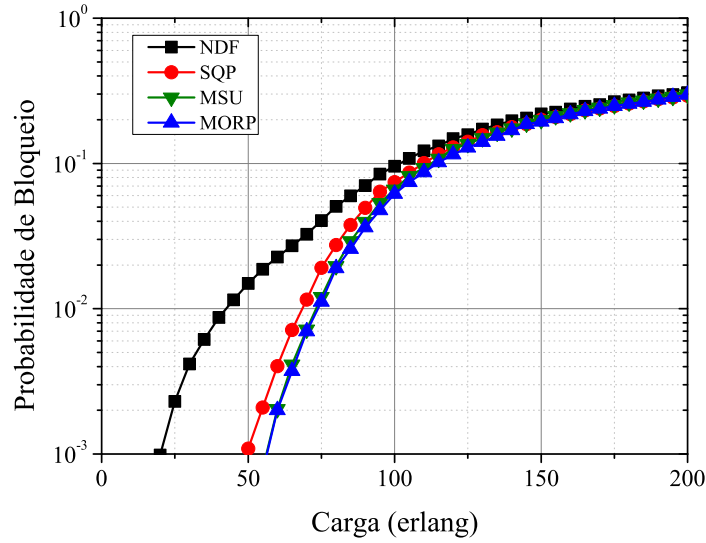


Figura 5.12: Probabilidade de bloqueio em função da carga retornada pelas redes translúcidas, que possuem aproximadamente 100 regeneradores, encontradas pelos algoritmos MORP, MSU-RP, NDF e SQP para a topologia Pacific Bell.

conhecida e pode variar de acordo com a tecnologia ou fornecedor dos equipamentos utilizados. Para se prover uma solução que seja independente dessa relação, pode-se adicionar um terceiro objetivo ao MORP, a redução do número de nós translúcidos. Denominou-se o algoritmo que implementa essa abordagem de MORP-3o. O MORP-3o fornece uma relação custo benefício otimizada considerando desempenho e custo sem a necessidade de se conhecer *a priori* nenhum modelo de custo. Ao se utilizar custo, está se falando de CapEx + OpEx.

A Figura 5.13 mostra os resultados obtidos pelo MORP-3o nos mesmos cenários investigados para o MORP. A Figura 5.13 mostra os gráficos de probabilidade de bloqueio em função do número total de regeneradores. A melhor frente de Pareto encontrada após 300 iterações é mostrada na figura para as cargas de 60, 80 e 100 erlangs, respectivamente Figuras 5.13(a) a 5.13(c). Como o MORP-3o possui três objetivos, a rigor, a frente de Pareto encontrada é uma superfície tridimensional. Para mostrar o gráfico em apenas duas dimensões, são mostradas curvas de nível dessa superfície parametrizadas pelo número de nós translúcidos. Um símbolo diferente é utilizado para cada valor de número de nós translúcidos encontrado por MORP-3o (notado por N no gráfico). Note que o valor de N é encontrado pelo MORP-3o em cada caso. As curvas cheias representam a frente de Pareto encontrada pelo MORP (notado nos gráficos por MORP-2o).

É fácil perceber das Figuras 5.13(a) a 5.13(c) que a melhor frente de Pareto encontrada por MORP-3o é totalmente concordante com a melhor frente de Pareto encontrada por MORP. Além disso, é possível visualizar claramente qual o melhor desempenho que pode ser alcançado por uma

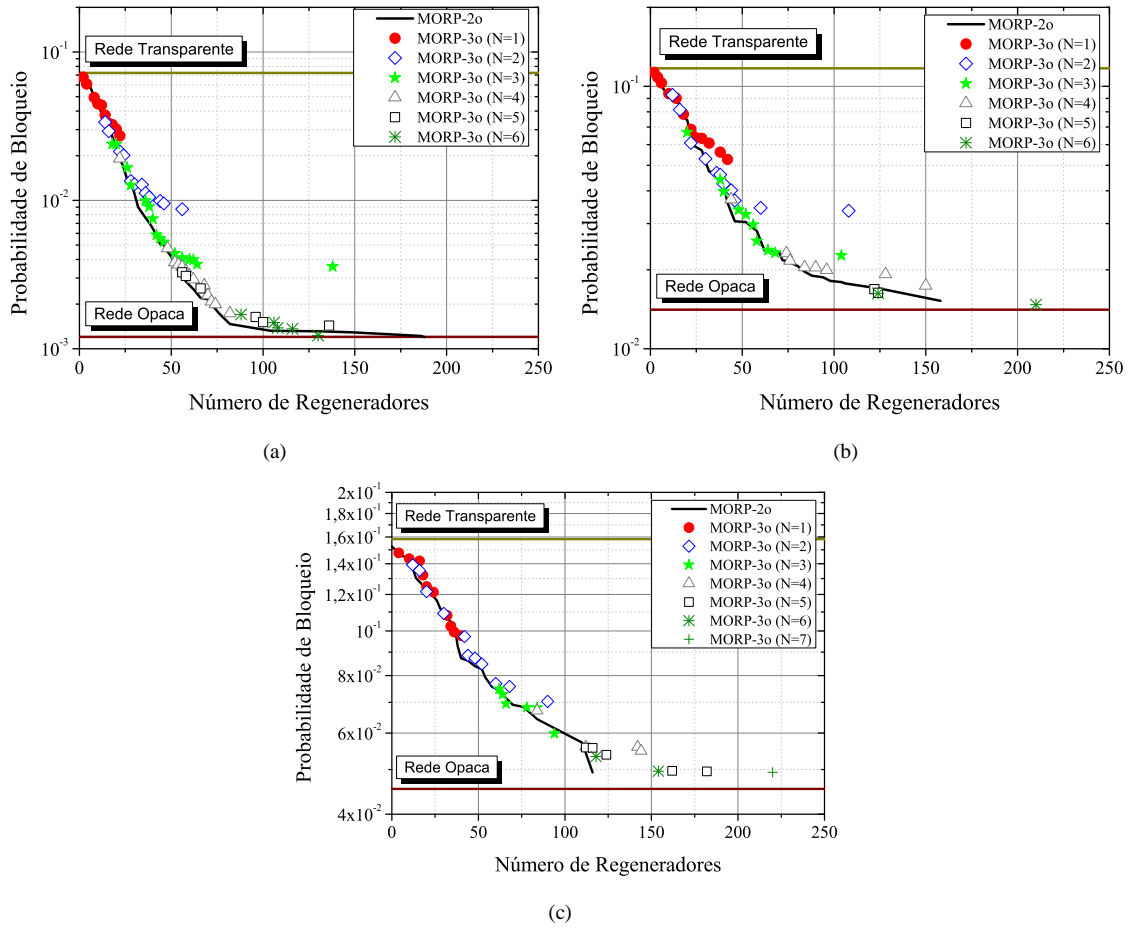


Figura 5.13: Comparação entre a solução do RP multiobjetivo considerando apenas dois objetivos (MORP-2o) com o RP multiobjetivo considerando 3 objetivos MORP-3o para as cargas de: (a) 60 erlangs, (b) 80 erlangs e (c) 100 erlangs, na topologia Pacific Bell.

rede translúcida que possui uma certa quantidade de nós translúcidos. Por exemplo, os círculos vermelhos (redes translúcidas encontradas por MORP-3o que possuem apenas um nó translúcido), no melhor dos casos, encontram redes com probabilidades de bloqueio de 0,02724; 0,053 e 0,097, respectivamente para as cargas de 60, 80 e 100 erlangs. Para se obter uma rede translúcida com uma probabilidade de bloqueio menor é necessário se aumentar o número de nós translúcidos instalados (por exemplo $N = 2$ soluções mostradas em losangos nos gráficos). Note-se também que as soluções que atingem o nível de probabilidade de bloqueio da rede opaca (ou próximo dele) necessitam de seis nós translúcidos (pontos notados por asteriscos nos gráficos).

5.4 Considerações sobre as propostas apresentadas

Neste capítulo foram propostos quatro novos algoritmos para o tratamento de problemas clássicos

concernentes ao projeto de redes ópticas translúcidas: um algoritmo heurístico para se resolver o problema de RA, dois algoritmos heurísticos (MU-RP e MSU-RP) e dois metaheurísticos (MORP e MORP-3o) para se resolver o problema de RP.

Foi realizada uma extensa análise do desempenho dos algoritmos de RP propostos por meio de simulações. Os algoritmos de RP foram comparados com dois algoritmos propostos na literatura: o SQP e o NDF. A análise comparativa entre os algoritmos foi feita considerando os parâmetros de número total de regeneradores e probabilidade de bloqueio da rede.

Entre os algoritmos heurísticos investigados, o MSU-RP foi aquele que mostrou melhores resultados em termos de relação entre CapEx (número de regeneradores) e probabilidade de bloqueio (desempenho). Entretanto, esse resultado foi obtido por meio da utilização de um número maior de nós translúcidos. Ou seja, se o OpEx for desprezível em uma certa rede, então MSU-RP é de fato a melhor solução para se fazer o RP dentre as soluções apresentadas. Caso contrário, dependendo do peso que o OpEx representa no custo total da rede, o MSU-RP pode ter seu desempenho degradado em relação aos outros algoritmos investigados. Outra característica importante apresentada por MSU-RP é a de que ele foi capaz de encontrar uma rede translúcida com desempenho de rede opaca na quase totalidade dos cenários investigados. Se esse for um requisito da rede, então o MSU-RP provavelmente será uma boa opção para realizar o RP. O NDF o SQP e o MU-RP conseguiram atingir o desempenho de rede opaca apenas em alguns casos.

Foi proposto também o algoritmo multiobjetivo para colocação de regeneradores MORP (implementado com o auxílio do NSGA-II) que otimiza de forma simultânea o CapEx e o número total de regeneradores na rede óptica. A comparação realizada mostrou que MORP obtém soluções melhores que os demais algoritmos em todos os casos investigados. Além disso, MORP difere dos outros algoritmos heurísticos investigados pelo fato de fornecer um conjunto de soluções otimizadas para o problema de RP enquanto os outros fornecem apenas uma única solução. Assim como o MSU-RP, o MORP também foi capaz de encontrar redes translúcidas com desempenho equivalente (ou muito próximo) ao de uma rede opaca em todos os casos investigados. O MORP também não leva em conta em sua decisão o OpEx gerado pela implementação de um nó translúcido na rede. Por isso, foi proposta uma modificação no MORP, o MORP-3o, a qual considera também o OpEx. O MORP-3o considera a otimização simultânea de três objetivos: OpEx, CapEx e desempenho e rede. A solução fornecida por MORP-3o é elegante pois ela fornece uma solução otimizada para essas três vertentes importantes de serem consideradas em um projeto de redes translúcidas sem assumir, no entanto, nenhum modelo de custo. Esse modelo de custo pode variar bastante de operadora para operadora,

de fabricante para fabricante, de forma que encontrar uma solução que considera custo, mas de forma desvinculada de qualquer modelagem em particular é interessante.

Os algoritmos propostos MSU-RP, MORP e MORP-3o encontraram soluções de redes translúcidas com probabilidade de bloqueio igual ou muito próxima à probabilidade de bloqueio atingida pela rede opaca equivalente em todos os casos analisados. Nos casos analisados, esses algoritmos atingiram esse nível de probabilidade de bloqueio utilizando menos do que 15% dos regeneradores necessários para se implantar uma rede opaca, o que significa uma economia no CapEx da rede.

5.5 Lista de publicações referentes a este capítulo

- 1) D. A. R. CHAVES, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Multiobjective design of translucent WDM networks considering CapEx, OpEx and QoT, *a ser submetido ao IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012.
- 2) D. A. R. CHAVES, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel strategies for sparse regenerator placement and regenerator allocation in translucent optical networks, *Submetido ao Photonic Network Communications*, 2012.
- 3) D. A. R. CHAVES, R. V. B. CARVALHO, C. F. C. L. C. AYRES, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel strategies for sparse regenerator placement and allocation in translucent optical networks, In: **XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)**, 2011, p. 1 – 5.
- 4) D. A. R. CHAVES, C. F. C. L. C. AYRES, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Sparse regeneration placement for translucent optical networks using multiobjective evolutionary algorithms considering quality of service and capital cost, In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**, Novembro 2009, p. 417 –422.
- 5) D. A. R. CHAVES, C. F. C. L. C. AYRES, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Multiobjective sparse regeneration placement algorithm in optical networks considering network performance and capex, In: **12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**, 2010, p. 1–4.

CAPÍTULO 6

PROJETO TOTAL DE REDES ÓPTICAS

Não te preocupes com os que não te conhecem, mas esforça-te por seres digno de ser conhecido.

— Confúcio

COMO discutido no Capítulo 1, existem quatro aspectos principais que influenciam de forma preponderante a relação custo-desempenho em redes ópticas, são eles: o dimensionamento das características dos dispositivos ópticos empregados na rede (DDO), o projeto da topologia física da rede (PTD), o algoritmo utilizado para fazer o roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA) e os algoritmos utilizados para a colocação (RP) e a atribuição (RA) de regeneradores. Realizar o projeto de redes ópticas considerando todos esses aspectos de forma simultânea é denominado na Tese de projeto total de redes ópticas (ONTD – *Optical Network Total Design*). Neste capítulo, é proposto um algoritmo multiobjetivo para resolver o problema de ONTD considerando dois objetivos: reduzir o custo total necessário para implantação da rede e maximizar o seu desempenho por meio da minimização da probabilidade de bloqueio da rede. A abordagem multiobjetiva para tratar o problema de ONTD é denominada MOONTD (MOONTD – *Multiobjective ONTD*).

6.1 Projeto total multiobjetivo de redes ópticas

Usando notação similar à adotada em [73], o problema de MOONTD pode ser formalizado por meio da Tabela 6.1. A primeira seção da tabela (nomeada “Dado”) destaca os dados de entrada do problema. Em uma rede de alta capacidade, a posição dos nós da rede e o tráfego que irá passar por ela são, em geral, requisitos dos planos de negócios das operadoras de telecomunicações que irão instalar ou operar a rede. Por isso, essas duas entidades são consideradas como dados de entradas para o ONTD. Além disso, todos os dispositivos utilizados na implantação da rede óptica possuem um custo pecuniário (CapEx) e possuem especificação de como eles penalizam o sinal óptico. Esses são parâmetros intrínsecos de cada dispositivo e o projeto apenas deve utilizá-los como entrada. Formalizando a notação para os dados de entrada, primeiramente tem-se as posições dos nós da rede, definidas por $P = \{(x_i, y_i)\} (i \in 1, 2, \dots, T)$, em que x_i e y_i são as coordenadas cartesianas x e y (posição geográfica do nó) do i -ésimo nó da rede e T o número total de nós da rede. Outro dado de entrada para o projeto de redes é a matriz de tráfego dinâmico Λ . As especificações de CapEx dos dispositivos são feitas por meio do modelo de custo discutido na Seção 6.3. Já as penalidades impostas por cada dispositivo óptico são calculadas por meio dos parâmetros dos dispositivos. Esses parâmetros são usados nos cálculos do modelo de PLI.

Na segunda seção da Tabela 6.1, nomeada “Minimize”, são destacadas as duas figuras de mérito usadas como objetivo de otimização: minimização simultânea do CapEx da rede e da probabilidade de bloqueio.

Na terceira seção da Tabela 6.1, nomeada “Sob as variáveis de projeto”, são elencadas as variáveis que podem ser alteradas com o objetivo de se obter soluções otimizadas considerando o CapEx e a probabilidade de bloqueio.

Na quarta seção, são mostradas as restrições do problema. Duas restrições são consideradas: a qualidade de transmissão dos caminhos ópticos e a biconectividade da rede. A primeira significa que o projeto de rede considera o fato de que os pedidos de conexão, cujos caminhos ópticos candidatos a serem usados para sua implementação não possuam uma QoT mínima aceitável, não poderão ser estabelecidos na rede. A segunda garante a biconectividade de todos os nós da rede, que é um requisito desejável em uma rede óptica para se garantir a sobrevivência na ocorrência de uma falha em um dos seus enlaces. Se todos os nós da rede possuírem pelo menos dois enlaces (biconectividade) ligados a eles, há uma garantia de que, na ocorrência de uma falha em um enlace da rede, nenhum nó ficará totalmente ilhado sem poder ser alcançado pelos outros nós da rede.

Tabela 6.1: Formalização do problema de otimização multiobjetiva para projeto total de redes ópticas.

Dado	<ul style="list-style-type: none"> • Localização dos nós da rede; • Requisitos de tráfego para a rede óptica a ser projetada (matriz de tráfego desejada para a rede); • CapEx envolvido na implantação de todos os dispositivos da rede óptica; • Especificação das penalidades da camada óptica geradas por cada dispositivo óptico sendo considerado no projeto;
Minimize	<ul style="list-style-type: none"> • O CapEx total da rede; • A probabilidade de bloqueio total da rede;
Sob as variáveis de projeto	<ul style="list-style-type: none"> • Escolha da topologia física; • Especificação dos dispositivos WDM a serem implantados na rede (parâmetros dos amplificadores ópticos, isolamento entre portas do OXC, número de comprimentos de onda por enlace); • Escolha do número de regeneradores 3R a serem colocados em cada nó da rede; • Escolha do algoritmo de RWA;
Sujeito às restrições	<ul style="list-style-type: none"> • QoT mínima aceitável para todos os caminhos ópticos; • Biconectividade de todos os nós da rede.

6.2 Descrição e representação do projeto de redes ópticas

Uma vez que o ONTD envolve um conjunto de problemas diferentes, é interessante formalizar uma maneira generalizada para representar as variáveis de projeto relativas ao ONTD. Nesta seção é apresentada a representação adotada neste trabalho. As seguintes variáveis de projeto são consideradas tendo em vista o item “Sob as variáveis de projeto” da Tabela 6.1: o projeto da topologia física da rede, a potência de saturação e a figura de ruído dos amplificadores ópticos EDFA a serem colocados em cada enlace da rede, o fator de isolamento entre portas do OXC, o número de comprimentos de onda a serem usados na rede, o número de regeneradores 3R a serem colocados em cada nó da rede e o algoritmo de RWA. Para o projeto de redes, foi utilizado o algoritmo de RA proposto no Capítulo 5.

Em pesquisa operacional, o problema de otimização definido na Tabela 6.1 é conhecido como um problema de programação matemática de múltiplos critérios (*Multiple Criteria Mathematical Programming*) no que diz respeito aos objetivos de otimização, isso porque o problema requer a otimização simultânea de dois objetivos [97]. No tocante às variáveis de projeto e à natureza da função objetivo, o problema é denominado de programação não-linear inteira mista (MINLP – *Mixed Integer*

Non-Linear Programing) [97]. Essa denominação refere-se ao fato do problema possuir variáveis de projeto inteiras (número de regeneradores por nó, escolha da topologia física e de dispositivos ópticos) e contínuas (algoritmo de roteamento), e possuir funções não-lineares como função objetivo (probabilidade de bloqueio e CapEx). Nas Seções 6.2.1 a 6.2.4 são explicitadas as representações adotadas para cada componente das variáveis de projeto, estabelecendo de forma clara quais variáveis são inteiras e quais são contínuas. Uma vez que as subclasses de programação inteira mista (MIP – *Mixed Integer Programming*) e NLP que compõem um problema MINLP pertencem à classe de problemas NP-Completo, a solução em conjunto desses dois problemas (problema MINLP) é ainda mais complexa [108]. Somado a isso, ainda existe o problema multicritério (vários objetivos de otimização simultânea) que deve ser resolvido segundo o problema estabelecido na Tabela 6.1. Como visto nos capítulos anteriores, a solução geral e exata para problemas NP-Completo é, até o momento, computacionalmente intratável. Aqui foi adotada a estratégia de se realizar a otimização utilizando uma estratégia metaheurística (NSGA-II) para solução do problema.

6.2.1 Representação da topologia física e dispositivos

O primeiro passo no processo de projeto de rede é a determinação de uma representação adequada para a topologia física. A forma mais utilizada para essa representação é a matriz de adjacência. A matriz de adjacência $\mathbf{A} = \{a_{i,j}\}$ é uma matriz booleana e representa a conectividade entre os nós da rede. Se $a_{i,j} = 1$, os nós de índice i e j são ligados por um enlace físico, enquanto que, se $a_{i,j} = 0$, eles não são. Usa-se uma abordagem similar para representação da topologia da rede que é dada pela matriz de inteiros $\mathbf{M} = \{m_{i,j}\}$ com $m_{i,j} \in \{0, 1, \dots, L_A\}$. Se $m_{i,j} = 0$, os nós de índices i e j não estão conectados. Caso contrário, eles estão conectados usando um dos L_A tipos de amplificadores ópticos pré-determinados disponíveis para serem usados. Um número inteiro $(1, 2, \dots, L_A)$ representa um rótulo para uma possível escolha de amplificador. Cada rótulo representa um EDFA com diferente figura de ruído e potência de saturação. Além disso, considerou-se que a rede possui ligações bidirecionais iguais, ou seja, $m_{i,j} = m_{j,i}$.

Exemplo 6.1 *Representação de uma rede de 5 nós. A matriz \mathbf{M} representando uma rede de 5 nós está mostrada em (6.1). Como se assumiu que $m_{i,j} = m_{j,i}$ então a parte destacada (triângulo superior) na matriz \mathbf{M} é suficiente para representar completamente uma rede e os possíveis amplificadores ópticos a serem colocados em cada enlace. Pode-se, portanto, escrever esses elementos do triângulo superior em forma de vetor, linha após linha para formar o vetor mostrado em (6.2).*

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & m_{1,4} & m_{1,5} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} & m_{2,4} & m_{2,5} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} & m_{3,4} & m_{3,5} \\ m_{4,1} & m_{4,2} & m_{4,3} & m_{4,4} & m_{4,5} \\ m_{5,1} & m_{5,2} & m_{5,3} & m_{5,4} & m_{5,5} \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

$$[m_{1,2}, m_{1,3}, m_{1,4}, m_{1,5}, m_{2,3}, m_{2,4}, m_{2,5}, m_{3,4}, m_{3,5}, m_{4,5}]. \quad (6.2)$$

■

Para o caso de uma rede com T nós, o triângulo superior de \mathbf{M} possui $E = T(T - 1)/2$ elementos. Assim, generalizando para o caso de uma rede de T nós, pode-se montar um vetor $\mathbf{\Gamma} = \{e_i\}$, $i \in \{1, 2, \dots, E\}$ a partir do triângulo superior de \mathbf{M} . Dois outros parâmetros da rede também são considerados na sua representação e são adicionados ao final do vetor $\mathbf{\Gamma}$: um rótulo inteiro correspondente à isolamento entre portas dos comutadores ópticos ϵ e o número de comprimentos de onda na rede W . Portanto, o vetor $\mathbf{\Gamma}$ é redefinido por

$$\mathbf{\Gamma} = [e_1, e_2, \dots, e_E, e_{E+1}, e_{E+2}], \quad (6.3)$$

com cada e_i sendo assim definido:

$$e_i = \begin{cases} 0, 1, 2, \dots, L_A, & \text{se } 1 \leq i \leq E \text{ (Topologia e amplificadores)} \\ 1, 2, \dots, L_S, & \text{se } i = E + 1 \text{ (Tipo dos comutadores ópticos)} \\ W_{min}, \dots, W_{max}, & \text{se } i = E + 2 \text{ (Número de comprimentos de onda).} \end{cases} \quad (6.4)$$

Os números $1, 2, \dots, L_S$ são rótulos para possíveis escolhas de comutadores ópticos e W_{min} e W_{max} são, respectivamente, o número mínimo e máximo de comprimentos de onda que podem ser utilizados na rede. A relação entre $\mathbf{\Gamma} = \{e_i\}$ e $\mathbf{M} = \{m_{i,j}\}$ pode ser estabelecida por

$$e_k = m_{i,j}, \quad (6.5)$$

em que $k = (j - i) + (i - 1)T - \frac{i(i-1)}{2}$, $j > i$ e $k \neq E + 1, E + 2$ [68]. Note que o vetor $\mathbf{\Gamma}$ pode representar todas as escolhas possíveis de topologia de rede, tipos de amplificadores ópticos, tipos de comutadores ópticos e número de comprimentos de onda.

Uma busca exaustiva de todas as possíveis combinações do vetor $\mathbf{\Gamma}$ resulta na avaliação de

$$L_A^{T(T-1)/2} (W_{max} - W_{min} + 1) L_S \quad (6.6)$$

combinações. Esse número cresce exponencialmente com o aumento do número de nós T , o que torna inviável a implementação de uma busca exaustiva para resolver o problema.

Exemplo 6.2 *Suponha uma rede de seis nós ($T = 6$) que poderia ser projetada com quatro diferentes amplificadores EDFA ($L_A = 4$), quatro diferentes comutadores ópticos ($L_S = 4$) e com no mínimo quatro comprimentos de onda ($W_{min} = 4$) e no máximo com 16 comprimentos de onda ($W_{max} = 16$). Nesse caso são necessárias*

$$4^{6(6-1)/2} \cdot (16 - 4 + 1) \cdot 4 = 55,83 \times 10^9, \quad (6.7)$$

avaliações para a resolução do problema de forma exaustiva. Se cada avaliação for feita em 1 ms, seria necessário 1,7 ano para avaliar todas essas combinações. Ao se aumentar o número de nós para 10, o tempo necessário para a avaliação de todas as combinações aumenta para $2,0 \times 10^{18}$ anos. ■

6.2.2 Representação para a colocação de regeneradores

É usada uma abordagem similar à usada na Seção 5.3.1 para determinar o número de regeneradores em cada nó da rede. Um vetor $\Omega = \{r_i\}$ é usado para representar a colocação de regeneradores. Cada r_i ($i \in 1, 2, \dots, T$) representa a quantidade de regeneradores a ser colocada no nó de índice i . Cada componente r_i é um inteiro no intervalo $[0, R_i^{max}]$, em que R_i^{max} é o número máximo de regeneradores que pode ser implantado no nó de índice i . R_i^{max} é calculado por $R_i^{max} = G(i) \cdot W$, em que $G(i)$ é o grau do nó de índice i e W (ou e_{E+2}) é o número de comprimentos de ondas na rede óptica. O número de diferentes vetores Ω é dado por

$$\prod_{i=1}^T (R_i^{max} + 1). \quad (6.8)$$

O Exemplo 5.1 mostra a inviabilidade de se tratar esse problema de forma exaustiva.

6.2.3 Representação para o algoritmo de RWA

A metodologia para projeto de algoritmos de RWA proposta no Capítulo 4 pode ser usada aqui. Especificamente, se o PSR for utilizado ter-se-ia um vetor $\Psi = \{p_i\}$ para representar os coeficientes da expansão em série. Se a expansão em série for feita considerando N termos, então $i \in \{1, 2, \dots, (N + 1)^2 - 1\}$. Nesse caso porém, as entradas $\{p_i\}$ do vetor Ψ são número reais.

6.2.4 Representação para o projeto total

Para o projeto total de rede são considerados simultaneamente os vetores Γ , Ω e Ψ . Com isso, é possível representar todas as possibilidades consideradas para o projeto da topologia física da rede, dimensionamento de dispositivos ópticos, colocação de regeneradores e projeto de RWA de forma simultânea. Define-se o vetor \mathbf{V} capaz de realizar essa representação pela justaposição dos outros três vetores $\mathbf{V} = [\Gamma | \Omega | \Psi]$. Ou reescrevendo tem-se

$$\mathbf{V} = \{v_j\} = [e_1, e_2, \dots, e_E, e_{E+1}, e_{E+2}, |r_1, r_2, \dots, r_T, |p_1, p_2, \dots, p_{(N+1)^2-1}], \quad (6.9)$$

ou ainda

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= \{v_j\} \\ &= [e_1, e_2, \dots, v_E, v_{E+1}, v_{E+2}, |v_{E+3}, \dots, r_{T+E+2}, |p_{T+E+3}, \dots, p_{(N+1)^2+T+E-1}]. \end{aligned} \quad (6.10)$$

A partir dessa representação por meio do vetor \mathbf{V} , diversos subproblemas do projeto total (ONTD) de redes podem ser tratados separadamente. Os seguintes problemas são tratados neste trabalho:

Colocação de Regeneradores com RWA fixo (ONTD-P) – Esse caso consiste em resolver o problema de RP como tratado no Capítulo 5. Para esse problema, uma topologia com seus respectivos componentes ópticos é fornecida como entrada para o problema de forma que Γ é constante. Ψ é desconsiderado uma vez que o RWA é fixo. O projeto se dá por meio de modificações em Ω .

Projeto de topologia física e dispositivos para redes transparentes com RWA fixo (ONTD-TD)

– Esse é o caso de se projetar a topologia física e seus dispositivos quando se considera que não podem ser instalados regeneradores na rede. Dessa forma, Ω é um vetor nulo ou $\Omega = \mathbf{0}$. Ψ é desconsiderado uma vez que o RWA é fixo. O projeto se dá por meio de modificações em Γ .

Projeto de topologia física e dispositivos para redes translúcidas com RWA fixo (ONTD-TDP)

– Esse caso é similar ao anterior, porém é permitida a inclusão de regeneradores na rede. Ψ é desconsiderado uma vez que o RWA é fixo. Ou seja, o projeto se dá por meio de modificações em Γ e Ω .

Atualização de rede e dispositivos para redes translúcidas com RWA fixo (ONTD-uTD) – Esse

é o caso de se atualizar uma topologia já existente. A atualização pode ser necessária, por exemplo, se a operadora da rede desejar aumentar o tráfego que a rede suporta mantendo a mesma qualidade de serviço atualmente entregue aos seus clientes. Nesse caso, é razoável portanto que a operadora queira manter a sua infra-estrutura atual (topologia e dispositivos) e acrescentar novos recursos à rede, tais como novos comprimentos de onda ou novos enlaces. Além

disso, ONTD-uTD considera uma rede transparente. Ou seja, nenhum regenerador pode ser incluído na rede e, portanto, tem-se $\Omega = \mathbf{0}$. A topologia atual da rede é representada no vetor Γ por meio de algumas entradas desse vetor que são fixas e não podem ser alteradas. Novos enlaces podem ser acrescentados alterando os valores nulos atuais de Γ (ou seja, inclusão de novos enlaces). Além disso, a entrada e_{E+1} (tipo do OXC) de Γ não pode ser alterada e a entrada e_{E+2} (número de comprimentos de onda) somente pode ser aumentada. Ψ é desconsiderado, uma vez que o RWA é fixo.

Atualização de rede e dispositivos para redes translúcidas com RWA fixo (ONTD-uTDP) – Esse caso é similar ao caso anterior porém, uma rede transparente é fornecida na entrada e é permitida também a inclusão de regeneradores na rede. Portanto, o projeto se dá por meio de alterações nos vetores Γ e Λ lembrando as restrições impostas em Γ discutidas no problema anterior.

Projeto total (ONTD-TDPR) – Nesse caso, os três vetores são deixados livres e consequentemente participam do projeto. O projeto decide a topologia da rede, os dispositivos a serem nela empregados, a colocação dos regeneradores e o algoritmo de RWA que será usado na rede.

A Tabela 6.2 resume quais vetores podem ser modificados em cada subproblema.

Tabela 6.2: *Resumo dos subproblemas de projeto de redes tratados neste trabalho.*

Problema	Γ (topologia)	Ω (regeneradores)	Ψ (RWA)	O problema trata de:
ONTD-P	Fixo	Variável	–	Colocação de regeneradores.
ONTD-TD	Variável	$\Omega = \mathbf{0}$	–	Topologia física e dispositivos.
ONTD-TDP	Variável	Variável	–	Topologia física, dispositivos, e colocação de regeneradores.
ONTD-uTD	Fixo e variável	$\Omega = \mathbf{0}$	–	Expansão de topologia física e dispositivos.
ONTD-uTDP	Fixo e variável	Variável	–	Expansão de topologia física, dispositivos e colocação de regeneradores.
ONTD-TDPR	Variável	Variável	Variável	Topologia física, dispositivos, e colocação de regeneradores e RWA.

As siglas dos subproblemas são definidas a partir do que cada subproblema considera. Cada subproblema recebe um sufixo cujas letras são referentes ao que cada subproblema considera: T se o subproblema considera o projeto de topologia física, D se o subproblema considera o projeto

de dispositivos, P se o subproblema considera a colocação de regeneradores e R se o subproblema considera o projeto do RWA. Se o projeto de topologia não é considerado em um dado subproblema, a topologia é considerada fixa, o mesmo acontecendo para o projeto de dispositivos. Se a colocação de regeneradores não é considerada em um dado subproblema, significa que a rede, é transparente. Se o projeto de RWA não é considerado em um dado subproblema, o algoritmo de menor caminho (SP) é utilizado para o roteamento, enquanto o algoritmo *First Fit* é utilizado para a atribuição de comprimentos de onda, a menos que haja indicação contrária. A letra *u* minúscula no sufixo indica que esse subproblema é de expansão da rede.

6.3 Proposta para a modelagem de CapEx

Neste Tese deseja-se projetar uma rede óptica considerando dois objetivos de forma simultânea, o desempenho e o CapEx empregado para instalação da rede. É necessário portanto ter um modelo de CapEx para que seja possível avaliar o custo de implementação de uma rede em particular. O modelo proposto nesta Tese é uma adaptação do modelo de custo de dispositivos ópticos elaborado por Huelsermann *et al.* [18]. O modelo de CapEx proposto considera cinco diferentes fontes de custo:

1. custo fixo por comprimento de onda utilizado,
2. custo de implantação dos cabos de fibra óptica,
3. custo dos amplificadores ópticos,
4. custo dos dispositivos OXCs,
5. custo dos regeneradores 3R.

Uma unidade monetária (UM) genérica foi utilizada para comparar o custo das diversas configurações de rede. Cada comprimento de onda possui associado a ele dois *transponders* ou OLT (OLT – *Optical Line Terminal*) por cada par de fibra que se liga a um determinado nó. Esse dispositivo é responsável por inserir e remover sinais eletrônicos na rede óptica. O custo associado ao número de comprimentos de onda ($COST_{lambda}$) é dado em UM por

$$COST_{lambda} = 2W\eta_{lambda} \sum_{i=1}^T G(i), \quad (6.11)$$

em que W ($W = e_{E+2}$) é o número de comprimentos de onda por enlace, η_{lambda} é um valor constante relacionado com o custo de um *transponder* e $G(i)$ é o grau do i -ésimo nó. η_{lambda} é dado em UM.

Com relação aos enlaces da rede, existem dois custos envolvidos: o custo do cabo de fibra óptica em si e o custo de instalação da fibra óptica (obras de engenharia civil envolvidas na instalação). Ambos os custos são, em geral, proporcionais ao comprimento dos cabos instalados. Esses custos são calculados, em UM, por

$$COST_{cable} = (\beta_{dcf} + \beta_{ssmf} + \beta_{dep}) \sum_{i=1}^T \sum_{j=i+1}^T d_{i,j}, \quad (6.12)$$

em que $d_{i,j}$ é a distância física entre os nós i e j em quilômetros, β_{dcf} , β_{ssmf} e β_{dep} são, respectivamente, os custos por quilômetro do cabo de fibra compensadora de dispersão (DCF – *Dispersion Compensate Fiber*), do cabo da fibra de transmissão (SSMF – *Standard Single Mode Fiber*) e das obras de engenharia envolvidas na implantação dos cabos de fibras ópticas. β_{dcf} , β_{ssmf} e β_{dep} são dados em UM/km.

Outro custo levado em conta é o dos amplificadores ópticos EDFA. O custo dos amplificadores ópticos é considerado de acordo com a sua potência de saturação na saída e a sua figura de ruído. Cada par potência de saturação de saída e figura de ruído é rotulado conforme mostrado na Tabela 6.3. Esses rótulos numéricos são usados no vetor \mathbf{V} durante o projeto de rede. O custo total relacionado aos amplificadores ($COST_{amplifier}$) é dado por

$$COST_{amplifier} = \gamma_{amp} \sum_{i=1}^E C_{amp}(v_i), \quad (6.13)$$

em que v_i é uma entrada do vetor de representação da rede \mathbf{V} , ou seja, um dos possíveis rótulos mostrados na Tabela 6.3. Lembrando que $E = \frac{T^2-T}{2}$, em que T é o número de nós na rede. O significado de $C_{amp}(v_i)$ é explicado a seguir. Escolhe-se um dos rótulos como amplificador de referência cujo custo é γ_{amp} . Na Tabela 6.3, o amplificador cujo rótulo é igual a 5 (potência de saturação 16 dBm e figura de ruído 7 dB) foi escolhido como de referência, pois $C_{amp}(5) = 1$. O custo dos outros amplificadores rotulados por l é maior (se $C_{amp}(l) > 1$) ou menor (se $C_{amp}(l) < 1$) que o custo do amplificador de referência de forma relativa. Portanto, o custo de uma dado amplificador de rótulo l é dado pelo seu custo relativo $C_{amp}(l)$ multiplicado por uma constante adimensional γ_{amp} .

Um método semelhante é usado para definição do custo do OXC ($COST_{OXC}$). O custo total do OXC é dado por

$$COST_{OXC} = C_{sw}(v_{K+1}) \sum_{i=1}^T [(\gamma_1 W + \gamma_2)G(i) + \gamma_3], \quad (6.14)$$

em que $G(i)$ é o grau do i -ésimo nó, $C_{sw}(l)$ é o custo do OXC o qual está relacionado ao fator de isolamento do mesmo. γ_1 , γ_2 e γ_3 são constantes adimensionais de ponderação de custo similares

Tabela 6.3: Rótulos, especificações e valores de custo usados para os amplificadores ópticos.

Rótulo (ℓ)	Potência saída	Figura de ruído	Custo ($C_{amp}(\ell)$)
1	13 dBm	5 dB	0,75 UM
2	16 dBm	5 dB	1,50 UM
3	19 dBm	5 dB	2,25 UM
4	13 dBm	7 dB	0,50 UM
5	16 dBm	7 dB	1,00 UM
6	19 dBm	7 dB	1,50 UM
7	13 dBm	9 dB	0,25 UM
8	16 dBm	9 dB	0,50 UM
9	19 dBm	9 dB	0,75 UM

às usadas em [18]. Os diversos rótulos adotados neste trabalho para o OXC, com seus fatores de isolamento do comutador óptico e seus respectivos custos estão listados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Rótulos, especificações e valores de custo para os dispositivos OXC.

Rótulo (ℓ)	Fator de isolamento	Custo ($C_{sw}(\ell)$)
1	-30 dB	0,50 UM
2	-33 dB	0,75 UM
3	-35 dB	1,00 UM
4	-38 dB	1,50 UM
5	-40 dB	2,00 UM

Outro custo considerado é o relativo aos regeneradores eletrônicos. O custo devido aos regeneradores ($COST_{reg}$) é calculado por

$$COST_{reg} = \eta_{reg} \sum_{i=1}^T r_i, \quad (6.15)$$

em que r_i representa o número de regeneradores presentes no i -ésimo nó cuja definição foi feita por meio do vetor Ω e η_{reg} é o custo unitário de um regenerador, dado em UM.

Considerando as cinco diferentes fontes de custo, o custo total da rede ($COST_{Net}$) é definido por

$$COST_{Net} = COST_{lambda} + COST_{amplifier} + COST_{cable} + COST_{OXC} + COST_{reg}. \quad (6.16)$$

A Tabela 6.5 resume a formulação adotada para cada custo.

Tabela 6.5: Resumo da formulação usada para cálculo de cada componente de CapEx.

Custo	Cálculo
Tranponders	$2W\eta_{\lambda} \sum_{i=1}^T G(i)$
Fibras	$(\beta_{dcf} + \beta_{ssmf}) \sum_{i=1}^T \sum_{j=i+1}^T d_{i,j}$
Instalação	$\beta_{dep} \sum_{i=1}^T \sum_{j=i+1}^T d_{i,j}$
Regeneradores	$\eta_{reg} \sum_{i=1}^T r_i$
OXCs	$C_{sw}(v_{K+1}) \sum_{i=1}^T ((\gamma_1 W + \gamma_2) \cdot G(i) + \gamma_3)$
Amplificadores	$\gamma_{amp} \sum_{i=1}^E C_{amp}(v_i)$

A Tabela 6.6 lista os parâmetros usados na modelagem de custo e os valores utilizados para cada parâmetro neste trabalho. Os valores dos parâmetros foram adaptados de [18]. Note que o custo de um *transponder* é unitário e portanto todos os custos da modelagem são relativos aos custos do *transponder*. Outro conjunto de parâmetros poderia ser utilizado dependendo das especificações feitas pelos fabricantes/vendedores dos dispositivos de rede.

Tabela 6.6: Lista de parâmetros usados na modelagem de CapEx da rede.

Parâmetro	Valor	Descrição
η_{λ}	1 UM	Custo do <i>transponder</i> .
η_{reg}	1,4 UM	Custo do regenerador eletrônico 3R.
β_{dcf}	0,0036 UM/km	Custo por km de enlace da fibra compensadora de dispersão.
β_{ssmf}	0,013 UM/km	Custo por km de enlace da fibra de transmissão.
β_{dep}	0,2 UM/km	Custo por km das obras de engenharia civil para instalação do cabo de fibra óptica.
γ_{amp}	3,84	Poderação de custo do amplificador EDFA de referência.
γ_1	0,05225	Constante de modelagem do custo do OXC.
γ_2	6,24	Constante de modelagem do custo do OXC.
γ_3	2,5	Constante de modelagem do custo do OXC.

6.4 Algoritmo para projeto total multiobjetivo de redes ópticas

O problema multiobjetivo para ONTD de redes ópticas foi definido na Seção 6.1. Nesta seção é discutido o algoritmo de otimização multiobjetivo considerado para a implementação do MOONTD. Note que todas as variações de problemas listadas na Seção 6.2.4 são implementadas pelo mesmo algoritmo de otimização, bastando apenas restringir, convenientemente de acordo com o problema

tratado, as entradas do vetor \mathbf{V} nas quais os operadores genéticos (definidos a seguir) podem atuar e obedecendo as regras estabelecidas na Seção 6.2.4.

Assim como feito no Capítulo 5, o algoritmo NSGA-II foi utilizado como algoritmo de otimização multiobjetivo. Os trabalhos [89, 109, 110], desenvolvidos em colaboração com este trabalho, investigaram a aplicação de diversos algoritmos multiobjetivos para o projeto de redes ópticas transparentes. Como conclusão, observou-se que os algoritmos multiobjetivos NSGA-II e SPEA-II se sobressaíram em relação aos outros investigados com leve vantagem do primeiro. Por isso, o NSGA-II é utilizado para a realização do MOONTD neste trabalho.

O NSGA-II está descrito na Seção 5.3.1. São discutidas aqui as particularidades referentes à implementação do MOONTD. O vetor \mathbf{V} definido por (6.9) pode ser usado para representar qualquer possível rede. Para diferenciar uma rede em particular de outra, é utilizada a notação \mathbf{V}^i . Ou seja, uma rede 1, representada por \mathbf{V}^1 , é diferente de uma rede 2, representada por \mathbf{V}^2 , porém, ambas usam a representação definida pelo vetor \mathbf{V} .

O pseudocódigo para ONTD é o mesmo mostrado no Algoritmo 10 do Capítulo 5. O algoritmo inicia com a geração da população inicial P_0 composta por S indivíduos (linha 2 do Algoritmo 10). A população inicial é formada aleatoriamente. Como o vetor \mathbf{V} é composto por três partes distintas, cada uma é inicializada de forma conveniente. Define-se $rand(x, y)$ como uma função que gera um número inteiro aleatório uniformemente distribuído no intervalo $[x, y]$ e $rand_R(x, y)$ uma função que gera um número real aleatório uniformemente distribuído no intervalo $[x, y]$. Cada gene v_j^i dos S indivíduos é preenchido a partir da geração de dois números aleatórios. Esses números aleatórios são gerados para cada índice i e j . A partir dos dois números aleatórios, os genes v_j^i são atribuídos na população inicial segundo

$$v_j^i = \begin{cases} a_j^i, & \text{Se } 1 \leq j \leq E \text{ (Região dos enlaces)} \\ rand(1, L_S), & \text{Se } j = E + 1 \text{ (Tipo de OXC)} \\ rand(W_{min}, W_{max}), & \text{Se } j = E + 2 \text{ (Número de comprimentos de onda)} \\ b_j^i, & \text{Se } E + 3 \leq j \leq T + E + 2 \text{ (Região dos regeneradores)} \\ rand_R(-1, 1), & \text{Se } j \geq T + E + 3 \text{ (Coeficientes do PSR)} \end{cases} \quad (6.17)$$

em que:

$$a_j^i = \begin{cases} rand(1, L_A), & \text{Se } rand(0, 1) > 0,5 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.18)$$

e

$$b_j^i = \begin{cases} rand(1, R_i^{max}), & \text{Se } rand(0, 1) > 0,5 \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (6.19)$$

O NSGA-II é implementado de forma idêntica à realizada no Capítulo 5, exceto por pequenas diferenças nos operadores de mutação e cruzamento. Se for decidido que um gene v_j^i deve ser mutado, o novo valor de v_j^i é calculado pelas equações

$$v_j^i = \begin{cases} a_j^i, & \text{Se } 1 \leq j \leq E \text{ (enlaces)} \\ rand(1, L_S), & \text{Se } j = E + 1 \text{ (Tipo de OXC)} \\ v_j^i + rand(-2, 2), & \text{Se } j = E + 2 \text{ (Número de comprimentos de onda)} \\ b_j^i, & \text{Se } E + 3 \leq j \leq T + E + 2 \text{ (Região dos regeneradores)} \\ gauss(), & \text{Se } j \geq T + E + 3 \text{ (Coeficientes do PSR)} \end{cases} \quad (6.20)$$

em que, $gauss()$ é uma mutação gaussiana e

$$a_j^i = \begin{cases} rand(1, L_A), & \text{Se } rand(0, 1) > 0,5 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.21)$$

e

$$b_j^i = \begin{cases} rand(1, R_i^{max}), & \text{Se } rand(0, 1) > 0,5 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}. \quad (6.22)$$

O cruzamento realizado nas entradas inteiras de \mathbf{V} é o cruzamento uniforme [107]. O cruzamento SBX [111] é aplicado nas entradas reais de \mathbf{V} . Os cruzamentos são sempre realizados entre entradas de mesmo índice no vetor \mathbf{V} .

Cada indivíduo \mathbf{V}^i é avaliado segundo dois critérios: o seu CapEx, $COST_{Net}(\mathbf{V}^i)$, e a sua probabilidade de bloqueio resultante $PB(\mathbf{V}^i)$. O CapEx é calculado por (6.16), enquanto a probabilidade de bloqueio é retornada pelo SIMTON com CAC translúcido.

As redes com probabilidade de bloqueio acima de 0,1 são de pouco interesse prático, e por esse motivo, são descartadas do processo de otimização a partir de um certo número de iterações. Neste trabalho, adotou-se o descarte a partir da 1000ª iteração do processo de otimização.

6.4.1 Tratamento de indivíduos não factíveis

Os operadores de mutação e cruzamento utilizados neste trabalho podem gerar indivíduos que não atendem às restrições do problema de projeto de redes. Dois casos são possíveis: a geração de

redes que não são biconectadas (o que viola a restrição listada na Tabela 6.1) e a geração de ilhas na rede, de tal sorte que nós pertencentes a uma ilha não podem se conectar com nós pertencentes a outra ilha (o que não faz sentido se o intuito é projetar uma rede única). Cada vez que isso acontece é gerada uma violação. Um tratamento que pode ser dado para esse problema é a eliminação sumária dessas soluções não factíveis todas as vezes que elas aparecerem. Entretanto, estudos apontam que essa não é a melhor maneira de lidar com essas restrições. Para tratar desse problema, modificou-se o critério de dominância utilizado com o NSGA-II. O número de violações é contabilizado para cada indivíduo. Se dois indivíduos não possuírem nenhuma violação, então o critério de dominância é o mesmo apresentado na Seção 5.3.1. Caso um indivíduo apresente violações e outro não, então o indivíduo que não apresenta violação domina o que apresenta violação. Caso ambos os indivíduos apresentem violações, então o que apresentar menos violações domina o que apresentar mais violações. Em caso de empate nessa última verificação, nenhum indivíduo domina o outro.

6.5 Resultados

6.5.1 Arranjo experimental

O arranjo utilizado para realização das simulações é descrito nesta seção. A Tabela 6.7 mostra os parâmetros da camada física utilizados.

O algoritmo multiojetivo proposto para o projeto de redes toma como entradas as posições dos nós na rede óptica. Considera-se para a localização dos nós, os pontos da topologia Nsfnet (a topologia Nsfnet é mostrada na Figura 6.1) escalonados para uma escala metropolitana. Esses pontos são $P = \{(40,4;84,6), (39,7;46,0), (54,1;101,1), (69,1;72,7), (87,6;75,5), (115,6;110,8), (111,8;72,3), (135,4;75,0), (158,6;73,9), (146,5;97,5), (148,0;67,1), (168,4;66,5), (173,6;74,5), (167,4;79,0)\}$.

As PLIs consideradas pelo SIMTON para a avaliação das redes ópticas são as mesmas listadas na Seção 3.3. Os experimentos foram feitos para dois valores distintos de relação sinal-ruído de limiar: uma com uma restrição maior na qualidade do sinal ($OSNR_{QoT} = 23$ dB) e outra com uma restrição menor na qualidade do sinal óptico ($OSNR_{QoT} = 20$ dB). Além disso, os experimentos foram realizados para três cargas distintas: 50 erlangs, 100 erlangs e 200 erlangs.

Define-se duas métricas para avaliação dos resultados: grau total da rede (G_R) e comprimento total de fibras lançadas (C_R). A primeira consiste na soma dos graus de todos os nós da rede e mede o grau de conectividade da rede. G_R é calculado por

$$G_R = \sum_{i=1}^T G(i), \quad (6.23)$$

Tabela 6.7: Parâmetros da camada física utilizados na simulação pelo SIMTON.

Parâmetro	Valor	Descrição
α	0, 2 dB/km	Coeficiente de atenuação da fibra.
Δt_{QoT}	0, 10	Alargamento máximo permitido do pulso óptico.
$\Delta \lambda_{Tx}$	0, 013 nm	Largura de linha do transmissor.
λ_i	1528, 77 nm	Primeiro comprimento de onda no <i>grid</i> .
λ_0	1450 nm	Zero de dispersão da fibra de transmissão.
λ_{ORD}	1528, 77 nm	Zero de dispersão residual.
B_o	100 GHz	Largura do filtro óptico.
B	40 Gbps	Taxa de transmissão.
$D_{DCF} (@1550 \text{ nm})$	-110 ps/km.nm	Coeficiente de dispersão da fibra de compensação.
D_{PMD}	0, 04 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Coeficiente de PMD.
$D_{Tx} (@1550 \text{ nm})$	4, 5 ps/km.nm	Coeficiente de dispersão da fibra de transmissão.
$F_o \text{ (NF)}$	3, 548 (5, 5 dB)	Fator de ruído do amplificador (figura de ruído).
L_{Mx}	2 dB	Perda no multiplexador.
L_{Dx}	2 dB	Perda no demultiplexador.
L_{Sw}	2 dB	Perda no comutador óptico.
P_{in}	3 dBm	Potência de transmissão.
$S_{DCF} (@1550 \text{ nm})$	-1, 87 ps/km.nm ²	<i>Slope</i> da fibra de compensação.
$S_{Tx} (@1550 \text{ nm})$	0, 045 ps/km.nm ²	<i>Slope</i> da fibra de transmissão.
W_{min}	4	Número máximo de comprimentos de onda por enlace.
W_{max}	40	Número mínimo de comprimentos de onda por enlace.
$OSNR_{in}$	40 dB	Relação sinal ruído óptica do laser de transmissão.
$OSNR_{QoT}$	20/23 dB	Relação sinal ruído óptica usada como critério de QoT.

em que $G(i)$ é o grau do i -ésimo nó na rede e T é o número de nós da rede. Quanto maior o G_R de uma rede, mais conectada é a rede. O segundo consiste no total de fibras lançadas para se instalar uma determinada rede. C_R é calculado por

$$C_R = \sum_{i=1}^T \sum_{j=i+1}^T d_{i,j}, \quad (6.24)$$

em que $d_{i,j}$ é a distância física entre os nós i e j em quilômetros. Quanto maior o C_R de uma rede, maior é o comprimento total de fibras instaladas para implementá-la.

6.5.2 Resultados para o projeto total de redes

A Figura 6.2 mostra a probabilidade de bloqueio em função do custo da rede. Cada curva traçada representa a primeira frente de Pareto encontrada pelo algoritmo multiobjetivo após a realização de 1250 iterações. Cada ponto no gráfico representa uma topologia de rede distinta. Os resultados são

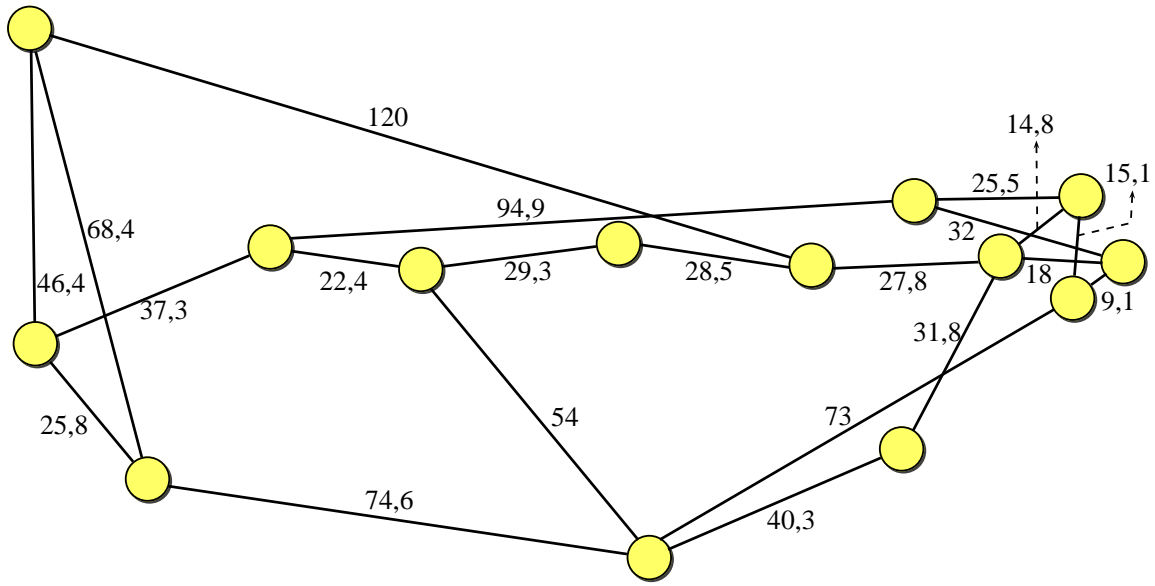


Figura 6.1: Topologia Nsfnet originalmente implantada nos EUA escalonada para uma escala metropolitana. Os números nos enlaces correspondem a seus comprimentos em km.

mostrados considerando três cargas: 50 erlangs (notados por quadrados), 100 erlangs (notados por triângulos) e 200 erlangs (notados por círculos). Além disso, duas relações sinal-ruído de limiar foram testadas $OSNR_{QoT} = 20$ dB (símbolos abertos) e $OSNR_{QoT} = 23$ dB (símbolos fechados). A Figura 6.2(a) mostra os resultados obtidos por MOONTD-TDP, enquanto a Figura 6.2(b) mostra os resultados obtidos por MOONTD-TD. As cruzes mostradas no gráfico como Nsfnet são obtidas considerando a topologia Nsfnet fixa, existente (mostrada na Figura 6.1). Esses resultados foram obtidos para uma carga de 100 erlangs e uma $OSNR_{QoT} = 20$ dB. Uma vez que a topologia é considerada fixa, é possível encontrar pontos não dominados para essa topologia fixa. Ou seja, mantida a topologia Nsfnet, investigou-se todas as combinações possíveis de melhores e piores valores (extremos) para todos os tipos de amplificadores, número de regeneradores (apenas na Figura 6.2(a), pois na Figura 6.2(b) a rede é transparente), número de comprimentos de onda e isolamento dos comutadores ópticos. Ou seja, considerando a topologia Nsfnet e o intervalo de variação dos parâmetros usados no projeto não há nenhuma solução que domina os pontos marcados em cruz no gráfico.

Pode-se perceber na Figura 6.2 que as redes projetadas levando em conta uma $OSNR_{QoT}$ de 20 dB apresentam um custo mais baixo que as projetadas para 23 dB, quando se considera uma mesma probabilidade de bloqueio. Ou seja, como é de se esperar, se há uma menor restrição na QoT então é possível se obter um mesmo desempenho de rede (probabilidade de bloqueio) a um custo menor. Além disso, essa diferença é maior quando se considera uma rede transparente (Fi-

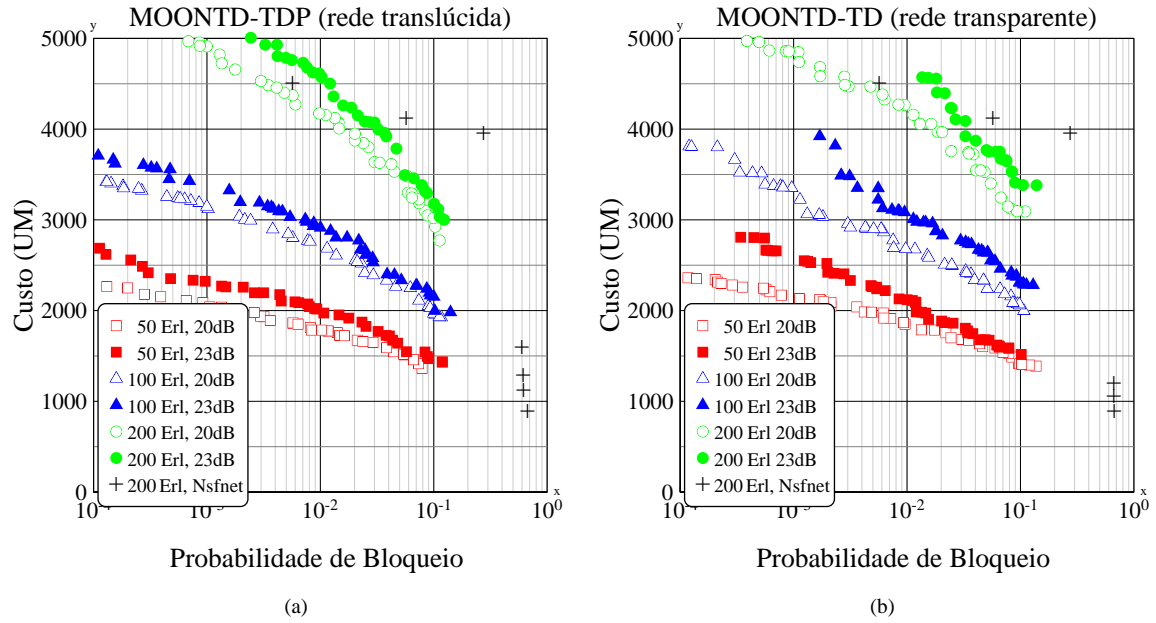


Figura 6.2: Melhores frentes de Pareto encontradas (probabilidade de bloqueio em função do custo) pelos algoritmos MOONTD considerando tráfego uniforme com cargas de 50, 100 e 200 Erl e $OSNR_{QoT}$ de 20 e 23 dB para os problemas de: (a) MOONTD-TDP (projeto de redes translúcidas) e (b) MOONTD-TD (projeto de redes transparentes).

gura 6.2(b)) do que quando se considera uma rede translúcida (Figura 6.2(a)). Ou seja, a implantação de regeneradores na rede reduz o impacto do CapEx extra gerado como consequência da imposição de uma QoT mais restritiva. Percebe-se também que para se obter uma mesma probabilidade de bloqueio há um custo por cada erlang a mais de tráfego que se deseja colocar na rede. Quando se comparam as soluções mostradas por cruzes no gráfico com as soluções obtidas pelos algoritmos MOONTD-TD e MOONTD-TDP, vê-se a vantagem do uso desses últimos. Os pontos mostrados por cruzes consideram a topologia Nsfnet (a qual passou por um outro processo de projeto) e eles podem ser comparados com os pontos mostrados em triângulos abertos nas Figuras 6.2(a) e 6.2(b). Tanto MOONTD-TDP quanto MOONTD-TD encontraram redes com CapEx muito menor que a Nsfnet quando se considera uma dada probabilidade de bloqueio. Note ainda que as primeiras frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TDP e por MOONTD-TD, para uma carga de 200 erlangs, dominam a melhor frente de Pareto que pode ser realizada para a Nsfnet. Isso sinaliza que as estratégias propostas conseguiram projetar uma rede com mais do que o dobro da capacidade de carga da Nsfnet quando se considera um mesmo par custo-probabilidade de bloqueio.

Como comentado, cada ponto mostrado na Figura 6.2 corresponde a uma topologia de rede. Selecionou-se mostrar as topologias encontradas por MOONTD-TDP e por MOONTD-TD mais próximas a uma probabilidade de bloqueio de 1% para uma $OSNR_{QoT}$ de 23 dB. Uma probabilidade de

bloqueio por volta de 1% é um valor bastante usado por legislação regulatória ou por plano de negócios das operadoras de telecomunicações. As Figuras 6.3(a), 6.4(a) e 6.5(a) mostram três topologias de rede encontradas por MOONTD-TDP para cerca de 1% de probabilidade de bloqueio para as cargas de 50 erlangs (Figura 6.3(a)), 100 erlangs (Figura 6.4(a)) e 200 erlangs (Figura 6.5(a)). Além disso, as figuras mostram a distribuição de CapEx encontrada para cada rede (valor absoluto entre parênteses). Esses custos estão relacionados com os listados na Tabela 6.5. Os números dentro de cada nó da rede representam o número de regeneradores colocados em tal nó. Os números entre parênteses em cada enlace da rede representam, respectivamente, o comprimento do enlace, a potência de saturação do amplificador óptico colocado no enlace e a figura de ruído desse último. O número de comprimentos de onda, o tipo de OXC, a probabilidade de bloqueio e o CapEx encontrados para cada rede aparecem na legenda da figura.

Comparando as topologias mostradas nas Figuras 6.3(a), 6.4(a) e 6.5(a), percebe-se que, à medida que se aumenta a intensidade de carga exigida à rede (fixando uma dada probabilidade de bloqueio), o número de comprimentos de onda, o grau total de rede e o comprimento total das redes encontradas por MOONTD-TDP também aumentam: $W = 15$, $G_R = 38$ e $C_R = 1623$ km para uma carga de 50 erlangs (Figura 6.3), $W = 20$, $G_R = 44$ e $C_R = 2013$ km, para uma carga de 100 erlangs (Figura 6.4) e $W = 31$, $G_R = 48$ e $C_R = 2315$ km para uma carga de 200 erlangs (Figura 6.5). Isso é esperado, pois para se aumentar a carga de uma rede é intuitivo se pensar que se deve ter uma rede mais conectada, com mais comprimentos de onda e com uma maior extensão de fibras ópticas instaladas.

Comparando os perfis de CapEx mostrados nos gráficos torta das Figuras 6.3(b), 6.4(b) e 6.5(b) percebe-se, nos três casos, que cerca de 60% do custo da rede é devido aos *transponders*. Além disso, os custos devidos aos amplificadores e às fibras ópticas são praticamente desprezíveis.

A mesma análise é repetida para as topologias encontradas por MOONTD-TD (rede transparente). As topologias com probabilidade de bloqueio mais próxima de 1% encontrada por MOONTD-TD para as cargas de 50, 100 e 200 erlangs são mostradas nas Figuras 6.6(a), 6.7(a) e 6.8(a), respectivamente. Novamente, percebe-se que, à medida que se aumenta a intensidade de carga exigida à rede (para uma dada probabilidade de bloqueio), o número de comprimentos de onda, o grau total de rede e o comprimento total da rede encontrados por MOONTD-TD também aumentam: $W = 15$, $G_R = 40$ e $C_R = 1718,5$ km para uma carga de 50 erlangs (Figura 6.6(a)), $W = 19$, $G_R = 48$ e $C_R = 2309,5$ km para uma carga de 100 erlangs (Figura 6.7(a)) e $W = 26$, $G_R = 58$ e $C_R = 3067,5$ km para uma carga de 200 erlangs (Figura 6.8(a)). Percebe-se também que a distribui-

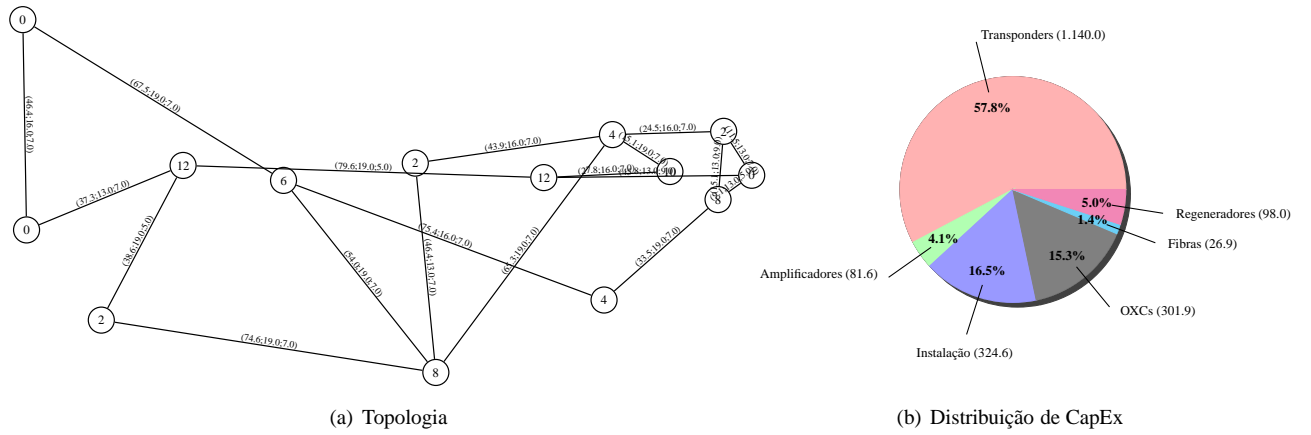


Figura 6.3: Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TDP para uma carga de 50 Erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,010$, $COST_{Net} = 1973,02$ UM, $W = 15$, $\epsilon = -35$ dB, $G_R = 38$, $C_R = 1623$ km.

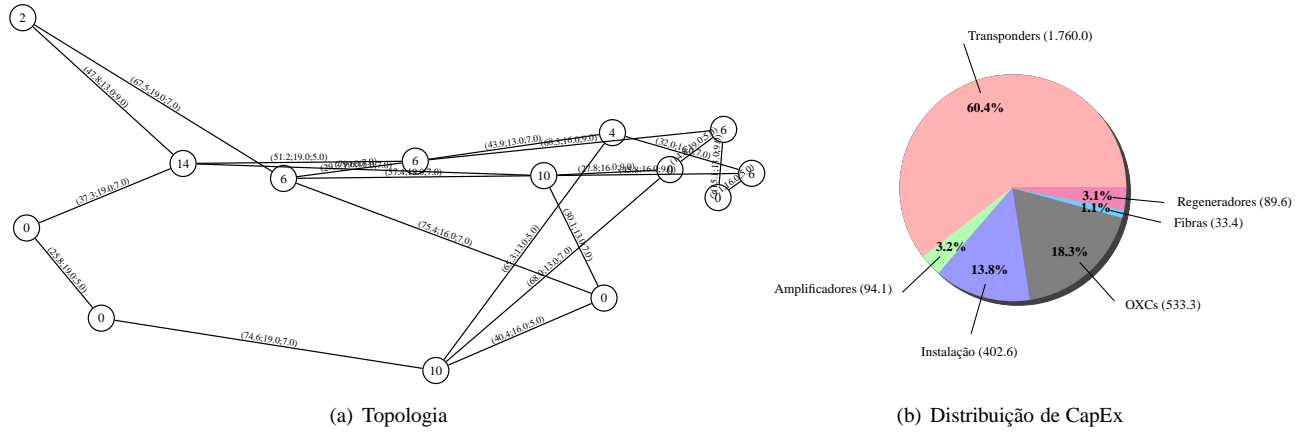


Figura 6.4: Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TDP para uma carga de 100 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,010$, $COST_{Net} = 2913,03$ UM, $W = 20$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 44$, $C_R = 2013$ km.

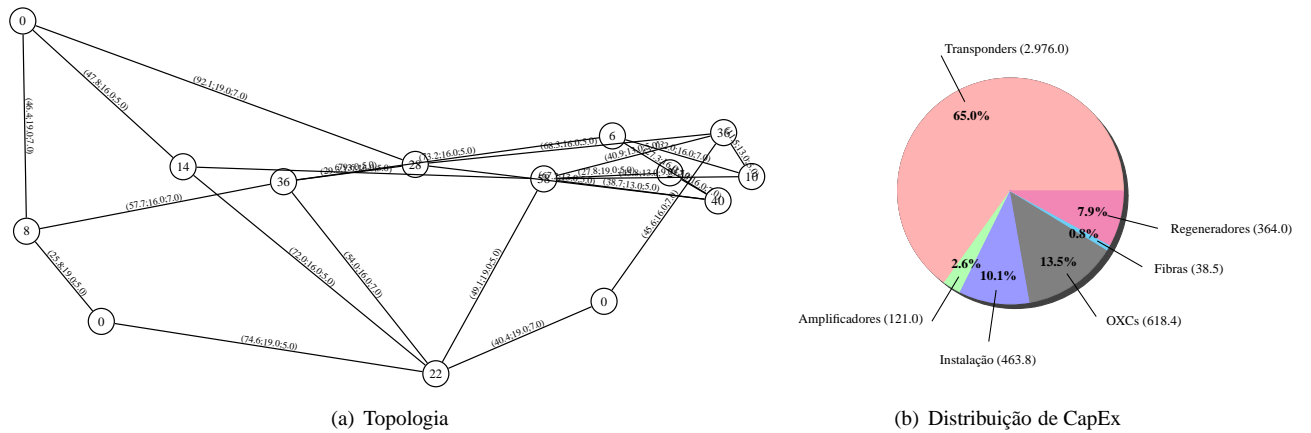


Figura 6.5: Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TDP para uma carga de 200 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,010$, $COST_{Net} = 4581,66$ UM, $W = 31$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 48$, $C_R = 2315$ km.

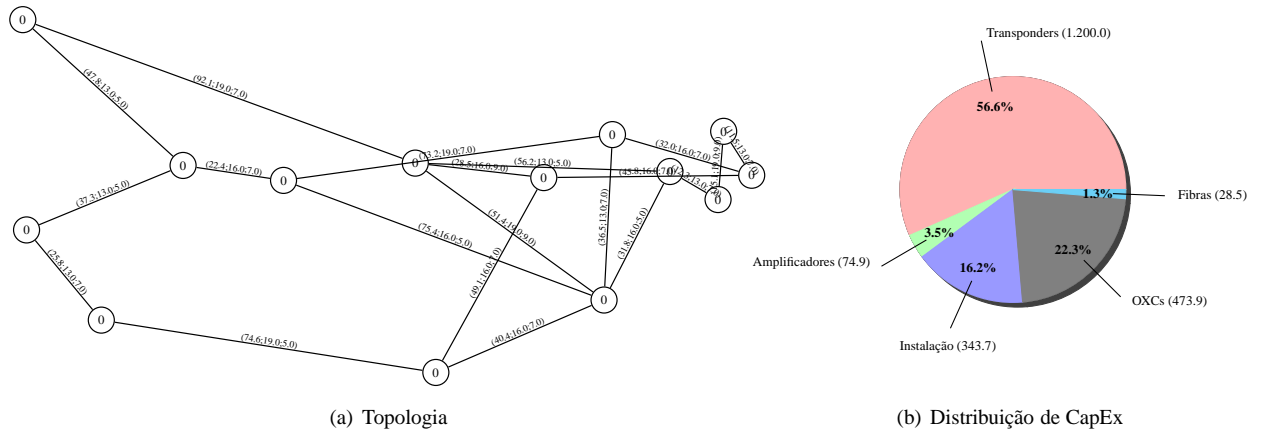


Figura 6.6: Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TD para uma carga de 50 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,010$, $COST_{Net} = 2121,01$ UM, $W = 15$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 40$, $C_R = 1718,5$ km.

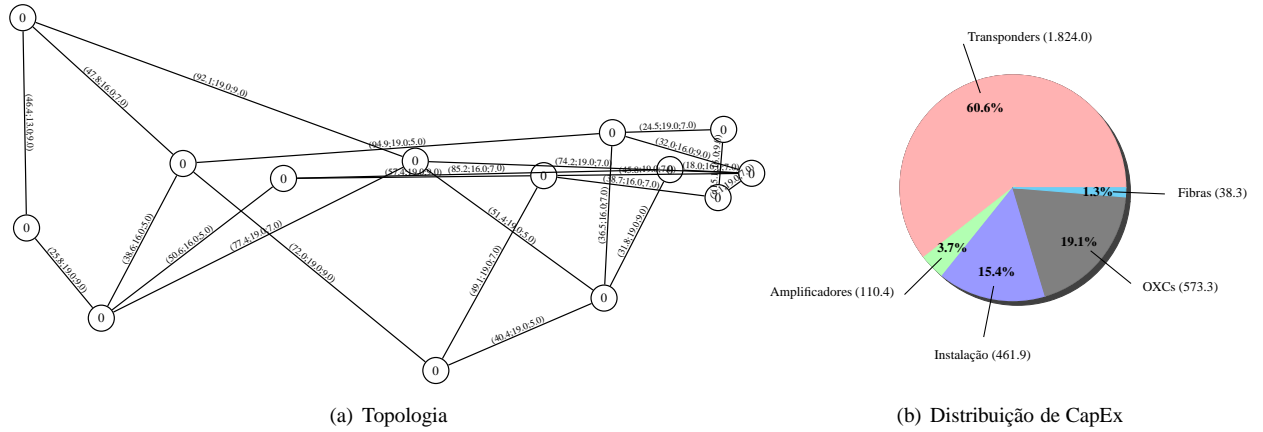


Figura 6.7: Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TD para uma carga de 100 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,011$, $COST_{Net} = 3007,94$ UM, $W = 19$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 48$, $C_R = 2309,5$ km.

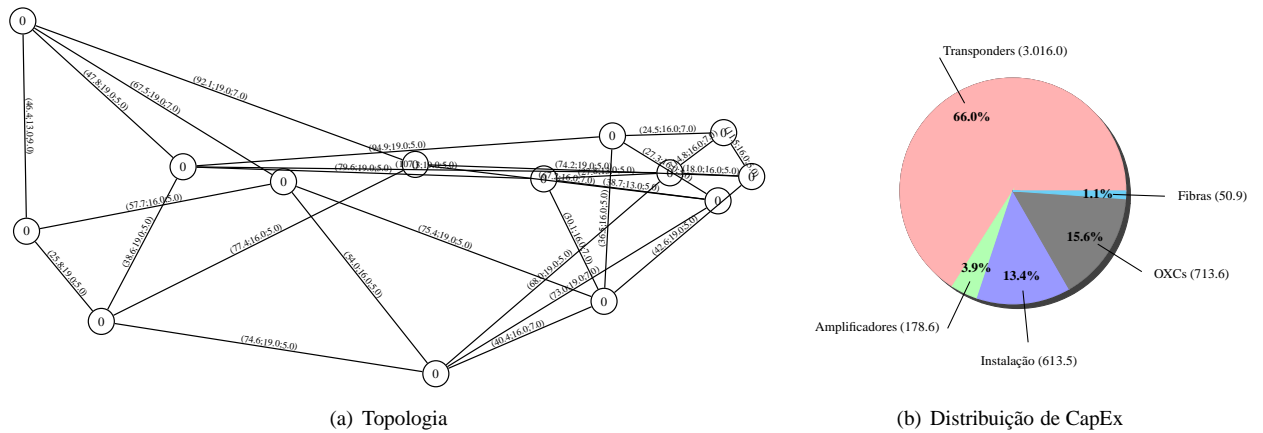


Figura 6.8: Topologia e seus valores de CapEx encontrados por MOONTD-TD para uma carga de 200 erlangs. Parâmetros dessa rede são: $PB = 0,013$, $COST_{Net} = 4572,55$ UM, $W = 26$, $\epsilon = -38$ dB, $G_R = 58$, $C_R = 3067,5$ km.

ção percentual de CapEx não se altera significativamente entre os casos investigados.

Fazendo uma comparação entre as topologias encontradas por MOONTD-TDP e MOONTD-TD (para cargas iguais), percebe-se que as redes translúcidas necessitam estar mais conectadas e com um comprimento total maior em todos os casos investigados (compare os valores de C_R e G_R encontrados para as topologias mostradas nas Figuras 6.3(a) a 6.8(a)).

A Figura 6.9 compara, em termos de custo e probabilidade de bloqueio, os resultados obtidos por MOONTD-TDP e MOONTD-TD. Os símbolos abertos representam a melhor frente de Pareto encontrada por MOONTD-TDP, enquanto os símbolos fechados representam a melhor frente de Pareto encontrada por MOONTD-TD. Se a restrição na QoT dos caminhos ópticos for pequena ($OSNR_{QoT} = 20$ dB na Figura 6.9(a)), não há praticamente diferença entre as frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TDP e MOONTD-TD, o que de fato é esperado uma vez que regeneradores somente serão necessários se houver uma restrição de QoT mais severa. Se a restrição de QoT for maior ($OSNR_{QoT} = 23$ dB na Figura 6.9(b)), nota-se um descolamento nas frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TDP e MOONTD-TD, sendo a frente de Pareto do segundo totalmente dominada pela frente de Pareto do primeiro. Isso mostra como a implantação de uma rede translúcida impacta positivamente na relação CapEx-desempenho em uma rede óptica.

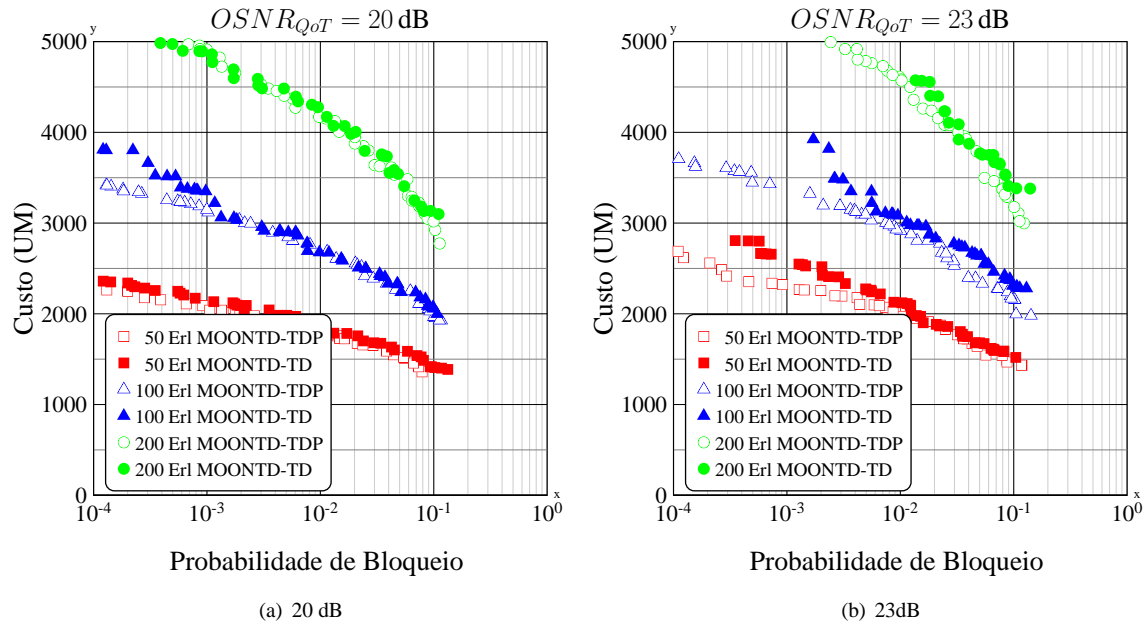


Figura 6.9: Melhores frentes de Pareto encontradas (probabilidade de bloqueio em função do custo) para os algoritmos MOONTD-TDP e MOONTD-TD considerando tráfego uniforme com cargas de 50, 100 e 200 Erl, para $OSNR_{QoT}$ de: (a) 20 dB e (b) 23 dB.

A Figura 6.10 mostra a comparação entre as melhores frente de Pareto encontradas por MOONTD-

TDP e MOONTD-TD para uma $OSNR_{QoT} = 23$ dB, considerando o projeto de rede sob um tráfego uniforme (símbolos abertos) e sob um tráfego não-uniforme (símbolos fechados). Três cargas totais são consideradas 50, 100 e 200 erlangs. A matriz de tráfego não-uniforme está mostrada na Tabela 6.8. Esta última é escalonada para se obter as cargas totais desejadas. Note que, para ambas as estratégias, MOONTD-TDP e MOONTD-TD, as melhores frentes de Pareto encontradas após 1250 iterações são praticamente idênticas, quando são comparadas as redes projetadas sob tráfego uniforme e sob tráfego não-uniforme (*i.e.* compare triângulo aberto com triângulo fechado, quadrado aberto com quadrado fechado e assim por diante). Isso indica que, para uma mesma carga total de rede, MOONTD-TDP e MOONTD-TD encontram topologias que realizam praticamente a mesma relação custo-desempenho independente de como esse tráfego esteja espalhado na rede.

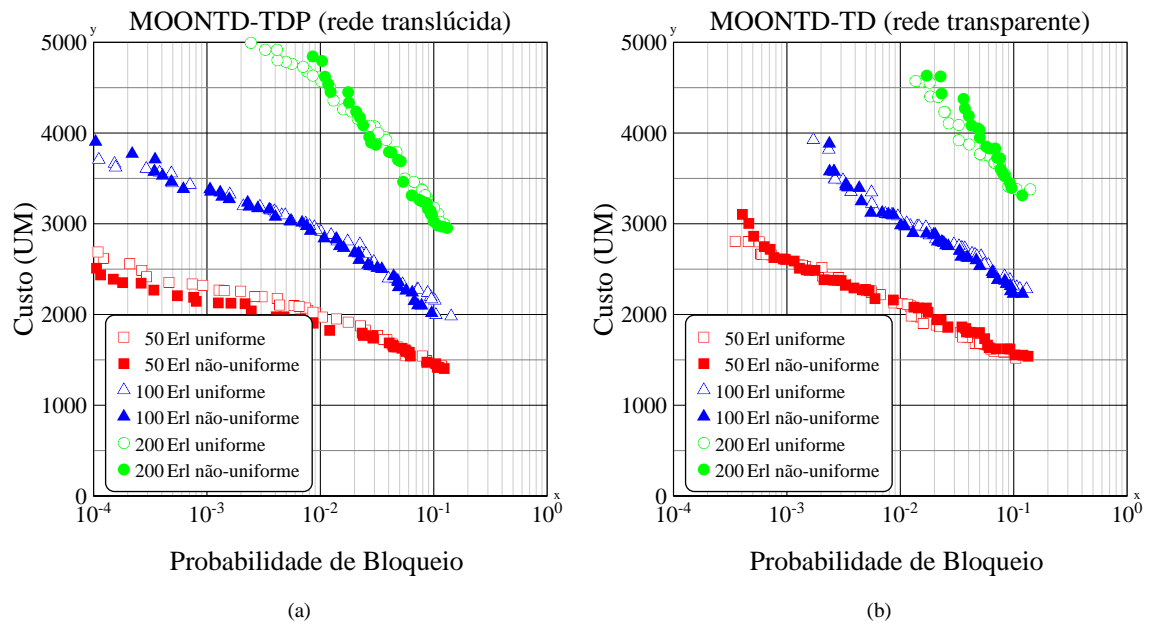


Figura 6.10: Melhores frentes de Pareto encontradas (probabilidade de bloqueio em função do custo), considerando tráfego uniforme e não-uniforme nas cargas de 50, 100 e 200 erlangs e $OSNR_{QoT}$ de 23 dB, por: (a) MOONTD-TDP, (b) MOONTD-TD.

Outro ponto interessante a ser investigado é se carga total na qual o projeto é feito exerce forte influência na relação custo-probabilidade de bloqueio encontrada pelo MOONTD. Para realizar esse estudo, foram gerados os gráficos mostrados na Figura 6.11. Os eixos dos gráficos são similares aos mostrados nos gráficos anteriores. As melhores frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TDP para as cargas de 50, 100 e 200 erlangs estão mostradas em símbolos cheios na Figura 6.11(a), enquanto que as frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TD estão mostradas na Figura 6.11(b). Em ambas as figuras, as topologias encontradas utilizando uma carga de otimização de 100 erlangs,

Tabela 6.8: Matriz de tráfego não-uniforme

Nó	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	–	1,32	0,70	1,22	0,57	0,61	1,01	0,83	2,08	0,72	0,36	2,11	1,29	0,99
1	1,73	–	0,96	0,32	0,86	2,02	1,18	0,47	1,00	1,61	0,20	0,47	1,45	1,56
2	0,63	0,52	–	1,44	0,30	1,56	1,45	0,97	2,02	1,74	0,44	1,71	0,97	1,95
3	0,67	1,17	0,94	–	2,02	0,13	0,21	0,95	1,99	2,03	1,58	1,28	1,07	1,47
4	0,74	0,84	1,33	1,52	–	0,22	0,20	1,32	1,05	0,70	0,17	1,87	1,20	2,01
5	1,50	1,29	1,40	0,16	1,92	–	0,95	1,11	0,61	2,02	0,27	0,17	1,14	0,92
6	0,27	1,19	1,15	0,08	0,84	0,81	–	0,54	0,93	1,52	0,05	0,16	1,25	1,31
7	1,58	1,96	1,74	1,81	0,17	1,64	1,93	–	1,11	1,74	2,04	1,21	1,21	2,02
8	1,16	1,54	1,32	0,59	0,62	1,93	1,80	1,20	–	1,10	1,52	0,91	0,70	1,92
9	0,82	1,91	0,61	0,34	0,25	0,80	0,02	2,04	1,10	–	0,29	1,71	0,70	1,22
10	0,63	0,20	1,36	0,80	0,44	1,17	0,89	1,32	0,07	2,05	–	1,37	0,40	1,75
11	0,67	1,92	1,47	1,81	0,53	1,97	1,79	1,85	0,10	1,10	0,06	–	1,67	1,27
12	0,04	0,47	0,47	1,75	0,91	0,28	1,70	2,00	1,04	1,29	1,02	1,75	–	1,69
13	0,58	1,35	1,36	1,63	1,30	0,82	0,44	0,07	1,27	0,94	1,34	0,80	1,16	–

foram simuladas novamente nas cargas de 50 erlangs (quadrados vazados) e 200 erlangs (círculos vazados). Na legenda, a carga que vem após o símbolo @ indica a carga de otimização usada na obtenção do ponto, enquanto a carga antes do símbolo @ indica a carga na qual foi obtida a probabilidade de bloqueio. Note que, projetar a rede para uma carga de 100 erlangs e depois submetê-la a uma carga de 200 erlangs (círculos vazados) gera uma relação custo-probabilidade de bloqueio quase idêntica à obtida ao se otimizar a rede diretamente para 200 erlangs (círculos cheios), pois ambas frentes de Pareto se sobrepõem. O mesmo pode ser observado ao se projetar a rede para uma carga de 100 erlangs e depois submetê-la a uma carga de 50 erlangs (quadrados vazados), pois é gerada uma relação custo-probabilidade de bloqueio quase idêntica a se otimizar a rede diretamente para 50 erlangs (quadrados cheios). A sobreposição não é total, pois há um deslocamento natural da frente de Pareto quando essas soluções são executadas em cargas diferentes das usadas na otimização pois uma mudança na carga gera um consequente aumento/diminuição na probabilidade de bloqueio. Esse resultado mostra que a topologia projetada é pouco influenciada pela intensidade de carga que irá trafegar na rede.

Até aqui, todos os resultados foram obtidos considerando o algoritmo de roteamento de menor caminho (SP). A pergunta que surge é, qual é a influência que o algoritmo de roteamento exerce na relação CapEx-probabilidade de bloqueio em uma rede? Para investigar isso, foram realizadas as simulações cujos resultados são mostrados na Figura 6.12. Nela, são apresentadas as melhores frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TDP e MOONTD-TD quando utilizados os seguintes algorit-

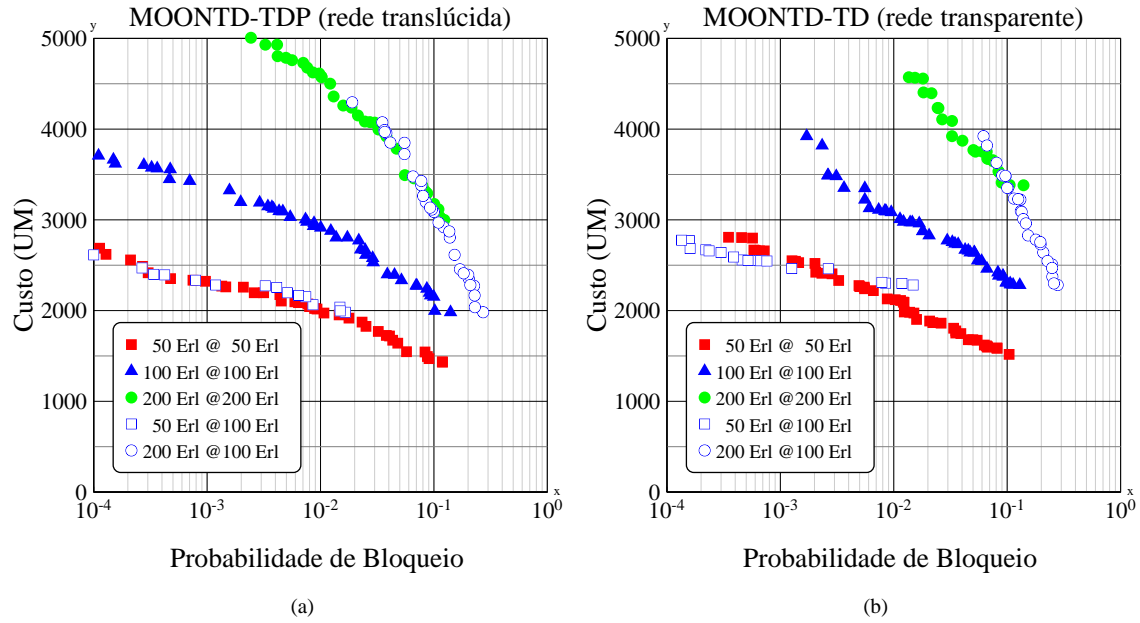


Figura 6.11: Melhores frentes de Pareto encontradas (símbolos fechados) considerando tráfego uniforme, cargas de 50, 100 e 200 erlangs e $OSNR_{QoT}$ de 23dB pelos algoritmos: (a) MOONTD-TDP, (b) MOONTD-TD. Símbolos vazados representam topologias simuladas em cargas diferentes das cargas para as quais elas foram otimizadas.

mos de roteamento: mínimo número de saltos (Min Hops), menor caminho (SP), *Least Resistance Weight* (LRW) e máxima relação sinal-ruído de saída (OSNR-R). Todos eles foram simulados para um tráfego uniforme e uma carga de 100 erlangs utilizando o *First Fit* como WA (exceto o OSNR-R). Percebe-se que se o projeto for feito considerando uma rede translúcida (MOONTD-TDP), o algoritmo de roteamento exerce pouca influência na relação CapEx-probabilidade de bloqueio uma vez que as melhores frentes de Pareto encontradas para todos os algoritmos de roteamento são praticamente idênticas. O algoritmo SP se sobressai dos demais para probabilidades de bloqueio abaixo de 10^{-3} . Isso é um indicativo de que se o projeto for feito considerando uma rede translúcida e o algoritmo de RWA que será usado na operação, então o algoritmo escolhido tem pouca relevância na relação CapEx-probabilidade de bloqueio da rede. No caso de uma rede transparente, o mesmo não pode ser dito. A Figura 6.12(b) mostra as melhores frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TD para os quatro algoritmos de roteamento considerados. Perceba, por exemplo, que para um custo de 3500, há uma grande diferença de desempenho entre as redes que foram projetadas assumindo um dos quatro algoritmos de RWA considerados. Isso mostra a importância de se aplicar algoritmo IA-RWA em redes transparentes, uma vez que o algoritmo que realizou a melhor relação CapEx-probabilidade de bloqueio foi exatamente o algoritmo OSNR-R, que é um algoritmo IA-RWA.

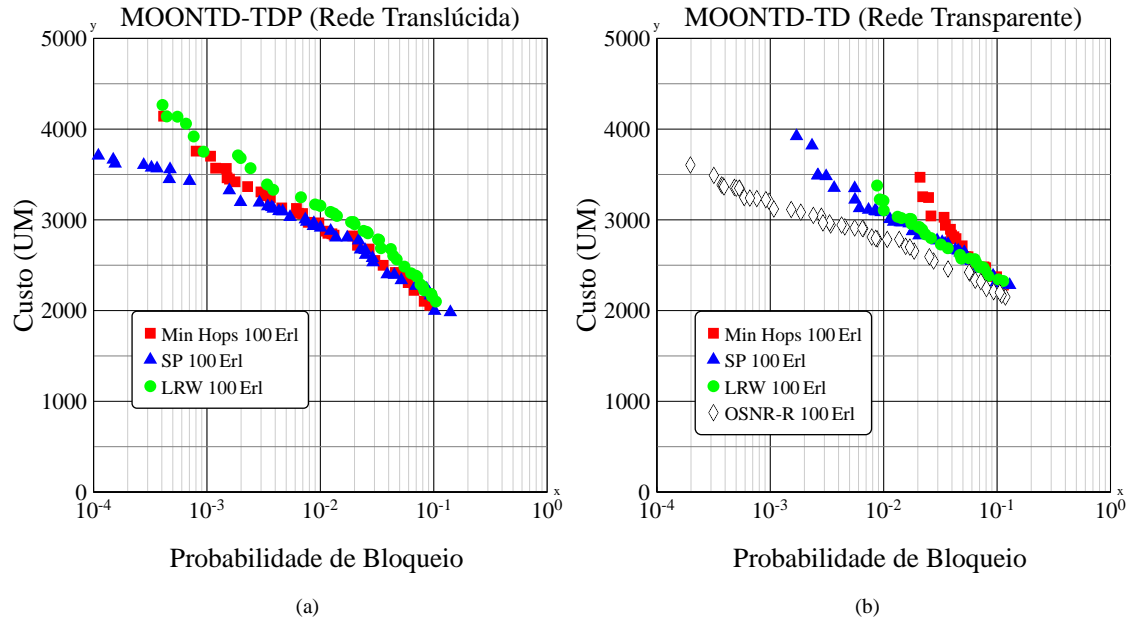


Figura 6.12: Melhores frentes de Pareto encontradas por: (a) MOONTD-TDP e (b) MOONTD-TD após 1250 iterações considerando os algoritmos de roteamento Min Hops, SP, LRW e OSNR-R. Simulações realizadas considerando tráfego uniforme, carga de 100 erlangs e $OSNR_{QoT} = 23$ dB.

6.5.3 Resultados para a convergência do algoritmo

Para verificação da convergência dos algoritmos propostos, realizou-se um estudo de convergência no algoritmo MOONTD-TD. Esse algoritmo foi escolhido para esse estudo, pois ele é de mais rápida execução.

A Figura 6.13 mostra as melhores frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TD após 1200, 1300 e 10000 iterações do algoritmo, quando são considerados tráfego uniforme, $OSNR_{QoT} = 23$ dB, carga de 100 erlangs e três inicializações independentes (Figuras 6.13(a), 6.13(b) e 6.13(c)). Note que, para cada diferente inicialização, as frentes de Pareto encontradas após 1200 e 1300 iterações são concordantes. Foi escolhido como critério de parada para as simulações o valor de $G = 1250$ iterações (valor intermediário entre 1200 e 1300 iterações) para a obtenção de todos os resultados de projeto de redes mostrados neste trabalho. Ao comparar as frentes de Pareto encontradas após 1200 e 1300 iterações entre inicializações diferentes, percebe-se que as mesmas diferem ligeiramente para probabilidades de bloqueio abaixo de 0,01.

Também estão mostradas na Figura 6.13 as frentes de Pareto obtidas por MOONTD-TD após a realização de 10000 iterações do algoritmo. Note que ao comparar essas frentes de Pareto obtidas para diferentes inicializações do algoritmo, percebe-se que as mesmas são bastante concordantes, indicando a convergência do algoritmo. Além disso, também se percebe que as frentes de Pareto en-

contradas após 1200 e 1300 iterações são ligeiramente dominadas pelas encontradas após 10000 iterações. O critério de parada de 1250 iterações foi escolhido como um bom compromisso entre um bom resultado para a frente de Pareto e o tempo de execução necessário para obtê-la. Em vários dos resultados mostrados neste trabalho a obtenção da frente de Pareto após 10000 iterações exige um tempo de simulação proibitivo.

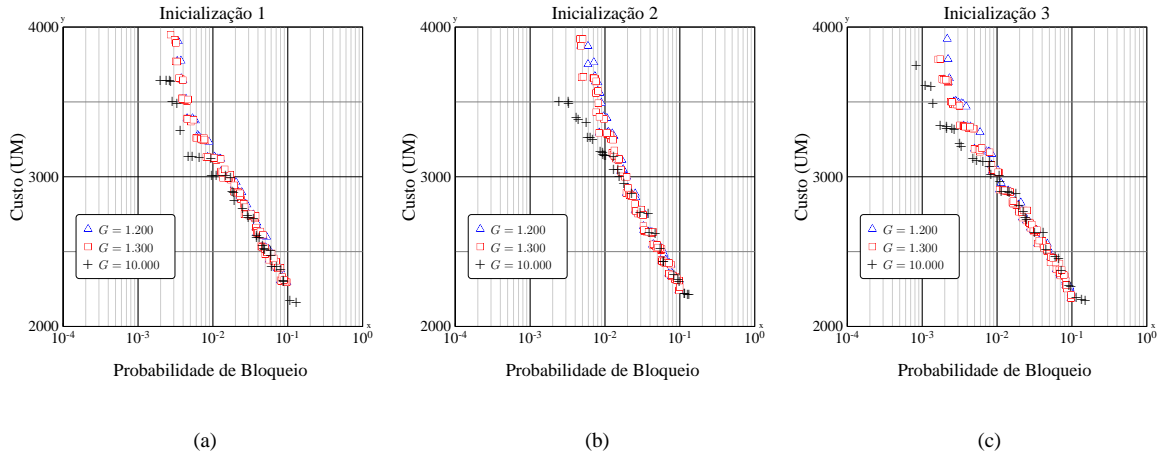


Figura 6.13: Melhor frente de Pareto encontrada por MOONTD-TD (tráfego uniforme, $OSNR_{QoT} = 23$ dB, 100 erlangs) após 1200, 1300 e 10000 iterações considerando 3 execuções com inicializações independentes: (a) inicialização 1, (b) inicialização 2 e (c) inicialização 3.

6.5.4 Resultados para a expansão de redes

Nesta seção são discutidos os resultados dos algoritmos de expansão de rede: MOONTD-uTDP e MOONTD-uTD.

Em um cenário de expansão de rede, tem-se uma topologia base já instalada e se necessita realizar uma melhoria na infraestrutura existente para essa rede. O termo topologia-legada será usado para se referir a essa topologia base. O problema de expansão é tratado com a visão de se promover uma expansão em uma topologia-legada, de tal forma que a rede possa suportar uma maior carga, mantendo seu desempenho praticamente inalterado.

Primeiramente, é tomada como topologia-legada a Nsfnet (mostrada na Figura 6.1), utilizando os amplificadores ópticos tipo 3 (ver Tabela 6.3), os comutadores ópticos tipo 5 (ver Tabela 6.4), 16 comprimentos de onda e considerando a rede sem regeneradores. A Figura 6.14 mostra as frentes de Pareto encontradas por MOONTD-uTDP e MOONTD-uTD, quando aplicados à topologia-legada Nsfnet nas condições descritas. A Figura 6.14 mostra pontos pertencentes à melhor frente de Pareto (cruzes pretas) que seria obtida conservando fixos os enlaces da topologia-legada Nsfnet mas

permitindo a variação de todos os outros parâmetros (como amplificadores, OXCs, etc) para uma carga de 200 erlangs e tráfego uniforme. Além disso, são também mostradas as melhores frentes de Pareto (notados com \times na figura) encontradas por MOONTD-TDP e MOONTD-TD (ou seja sem considerar nenhuma topologia fixa). Note que o MOONTD-uTDP, após a realização da expansão, consegue uma melhora significativa quando comparado à topologia-legada (compare os círculos com as cruzes na Figura 6.14(a)), mas não alcança a mesma relação CapEx-probabilidade de bloqueio obtida quando nenhuma restrição de topologia é imposta *a priori* (compare os círculos com os \times na Figura 6.14(a)). Os mesmos comentários podem ser feitos para o MOONTD-uTD. Assim, no cenário investigado, ao se realizar a expansão em uma topologia não otimizada (como a Nsfnet), obtém-se uma relação CapEx-probabilidade de bloqueio pior do que aquela que seria obtida se o projeto fosse feito a partir do início, considerando que não havia nenhum enlace já instalado no início do processo. Apesar de pior, o resultado obtido por MOONTD-uTDP (MOONTD-uTD) é próximo ao obtido por MOONTD-TDP (MOONTD-TD).

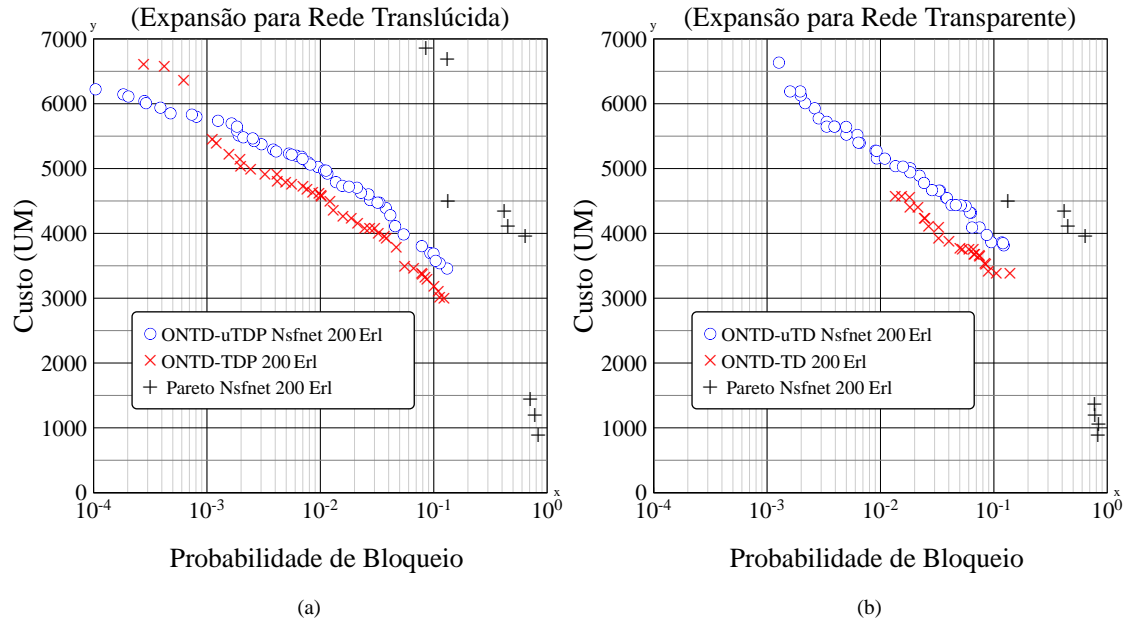


Figura 6.14: Melhores frentes de Pareto encontradas pelos algoritmos de expansão considerando como topologia-legada a Nsfnet para os casos de: (a) expansão para uma rede translúcida (b) expansão para uma rede transparente.

Outra possibilidade é a de se fazer a expansão a partir de uma topologia-legada otimizada. Para investigar esse caso, foi escolhida uma topologia-legada otimizada com probabilidade de bloqueio em torno de 10% para uma carga de 100 erlangs com tráfego uniforme encontrada por MOONTD-TD e mostrada na Figura 6.15(a). A ideia é comparar a frente de Pareto encontrada pela expansão dessa topologia para uma carga maior (200 erlangs) do que a carga para a qual ela foi otimizada (100 erlangs).

Se algoritmo de expansão for eficiente, ele deve encontrar uma frente de Pareto similar à encontrada pelo projeto total (o qual considera a localização dos nós e nenhum enlace previamente instalado). Os resultados estão mostrados na Figura 6.16.

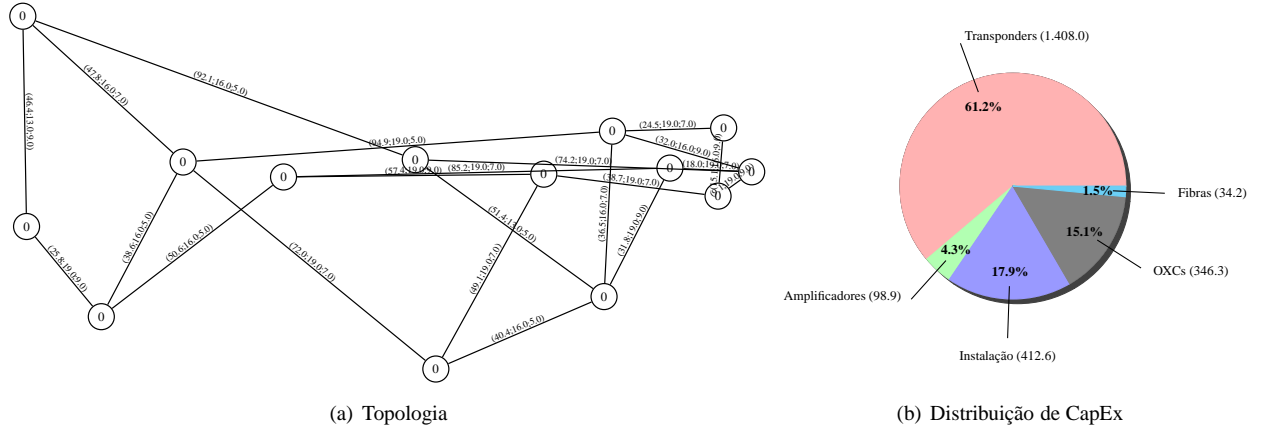


Figura 6.15: Topologia transparente otimizada encontrada por MOONTD-TD para uma carga de 100 erlangs e tráfego uniforme, com $PB = 0,107$, $COST_{Net} = 2300,12$, $W = 16$ e $\epsilon = -35$ dB e usada como topologia-legada. Os números dentro dos nós representam a quantidade de regeneradores em cada nó e os números nos enlaces representam respectivamente o comprimento do enlace, a potência de saturação e a figura de ruído do amplificador óptico.

A Figura 6.16(a) mostra as melhores frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TD (projeto transparente em 100 erlangs) e por MOONTD-TDP (projeto translúcido em 200 erlangs). Ela mostra também a frente de Pareto encontrada por MOONTD-uTDP. Note que a execução de MOONTD-uTDP a partir de uma topologia-legada transparente otimizada encontrada por MOONTD-TD resulta em uma frente de Pareto praticamente igual à encontrada por MOONTD-TDP. Isso mostra que a expansão feita a partir de uma topologia-legada transparente otimizada e que permite a inserção de regeneradores, encontra uma relação CapEx-probabilidade de bloqueio quase idêntica àquela encontrada quando se faz o projeto sem se considerar nenhuma topologia-legada.

Entretanto, o mesmo não ocorre na Figura 6.16(b). Ela mostra as melhores frentes de Pareto encontradas por MOONTD-TD (projeto transparente em 100 erlangs) e por MOONTD-TD (projeto transparente em 200 erlangs). Além disso mostra também a frente de Pareto encontrada por MOONTD-uTD. Note que a execução de MOONTD-uTD a partir de uma topologia-legada otimizada encontrada por MOONTD-TD resulta em uma frente de Pareto bem diferente da encontrada por MOONTD-TD. Isso mostra que a expansão feita a partir de uma topologia-legada otimizada, que não permite a inserção de regeneradores, encontra uma relação CapEx-probabilidade de bloqueio pior que a encontrada quando se faz o projeto sem se considerar nenhuma topologia-legada.

Note que os resultados mostrados na Figura 6.16 são obtidos para uma carga de 200 erlangs,

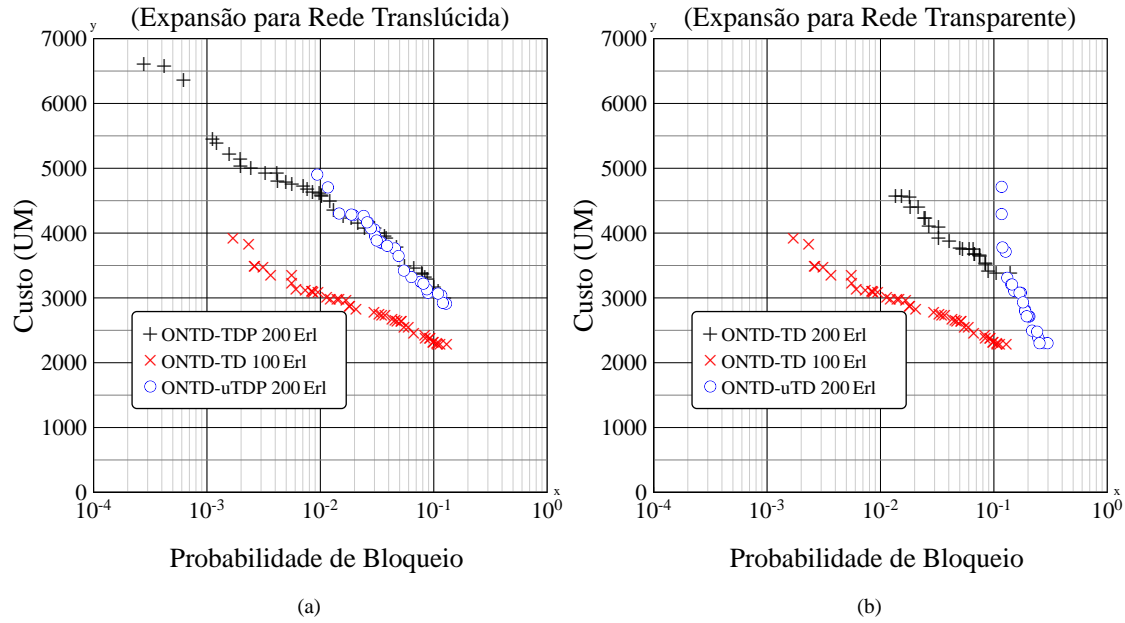


Figura 6.16: Melhores frentes de Pareto encontradas pelos algoritmos de expansão considerando como topologia-legada a topologia mostrada na Figura 6.15 para os casos de: (a) expansão para uma rede translúcida (b) expansão para uma rede transparente.

quando um processo de expansão é aplicado a uma topologia-legada transparente que apresenta uma probabilidade de bloqueio de 0,107 para uma carga de 100 erlangs. O processo de expansão pode resultar em uma rede translúcida (MOONTD-uTDP) ou transparente (MOONTD-uTDP). Se o processo translúcido (MOONTD-uTDP) for escolhido, é possível implementar redes com probabilidade de bloqueio de até 10^{-2} para a rede atualizada (vide círculos na Figura 6.16(a)). Ou seja, é possível até reduzir a probabilidade de bloqueio mesmo impondo o dobro de carga à rede, bastando para isso gastar mais dinheiro. No entanto, ao se optar por um processo transparente (MOONTD-uTD) a probabilidade de bloqueio fica limitada a cerca de 0,1, pois a frente de Pareto encontrada satura em uma linha vertical paralela à linha de probabilidade de bloqueio igual a 10^{-1} . Ou seja, ao se dobrar a carga (de 100 para 200 erlangs), é possível manter a probabilidade de bloqueio quase inalterada mas não é possível reduzi-la.

Outra comparação que pode ser feita é a comparação do efeito causado na rede pela expansão e pela colocação de regeneradores. Para isso, foram utilizadas duas topologias-legadas otimizadas, as mostradas nas Figuras 6.15 e 6.17. Ambas foram encontradas por MOONTD-TD respectivamente para os tráfegos uniforme e não-uniforme e uma carga total de 100 erlangs. Ambas as topologias-legadas têm uma probabilidade de bloqueio de 0,10. A Figura 6.18(a) mostra as mesmas curvas da Figura 6.15 com a adição de uma frente de Pareto a mais, a frente de Pareto relativa ao algoritmo

MOONTD-P. Este algoritmo é idêntico ao MORP proposto no Capítulo 6. A frente de Pareto mostrada para MOONTD-P foi a melhor encontrada por este último para uma carga de 200 erlangs. Na Figura 6.18(a) observa-se que, ao se dobrar a carga (de 100 para 200 erlangs) apenas a colocação de regeneradores na rede (como o MOONTD-P faz) não é suficiente para restabelecer o nível de probabilidade de bloqueio apresentado pela rede antes do aumento da carga. No entanto, colocando regeneradores e novos enlaces (como MOONTD-TDP faz) é possível não só restabelecer esse nível como também diminuí-lo. A Figura 6.18(b) mostra a mesma análise para o tráfego não-uniforme e para a qual se aplicam os mesmos comentários feitos para o caso uniforme.

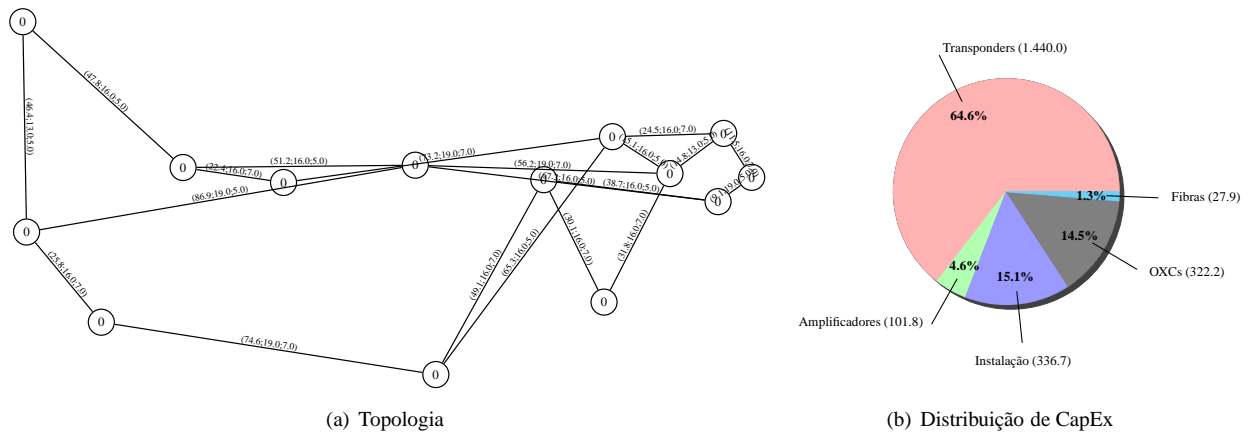


Figura 6.17: Topologia transparente otimizada encontrada por MOONTD-TD para uma carga de 100 erlangs com tráfego não-uniforme, com $PB = 0,099$, $COST_{Net} = 2228,62$, $W = 18$ e $\epsilon = -35$ dB. Números dentro dos nós representam quantidade de regeneradores em cada nó e números nos enlaces representam respectivamente comprimento do enlace, potência de saturação e figura de ruído do amplificador óptico.

6.6 Considerações sobre as propostas apresentadas

Neste capítulo foram propostas diversas estratégias para se realizar o projeto otimizado de redes ópticas WDM translúcidas e transparentes. O projeto de rede é realizado de forma mutiobjetiva considerando a minimização simultânea de dois objetivos: o custo para se instalar a rede (CapEx) e sua probabilidade de bloqueio. Tendo em vista que uma otimização mutiobjetiva é aplicada para realização do projeto da rede, as estratégias propostas apresentam diversas topologias e especificações de dispositivos que apresentam relações CapEx-probabilidade de bloqueio otimizadas. Essas diversas topologias apresentadas pelos algoritmos propostos podem ser úteis ao gestor ou projetista da rede para apoio à decisão de qual topologia e quais dispositivos de rede devem ser implantados.

Os custos envolvidos nas instalações da infraestrutura de telecomunicações necessária para a im-

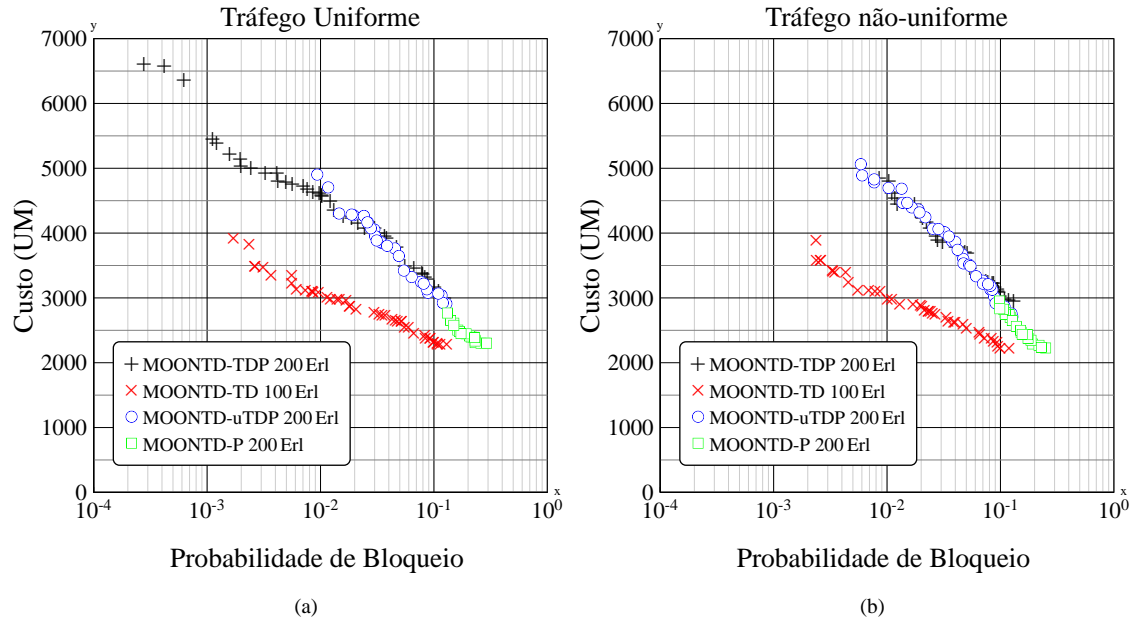


Figura 6.18: Melhores frentes de Pareto encontradas pelos algoritmos MOONTD-uTDP e MOONTD-P considerando como topologias-legadas as topologias mostradas nas Figuras 6.15 e 6.17 para os casos de: (a) tráfego uniforme (b) tráfego não-uniforme.

plantação da rede são calculados por meio de um modelo de custo proposto que avalia os custos dos dispositivos e serviços.

Os algoritmos propostos para projeto de redes foram estudados considerando como nós, os pontos geográficos referentes a importantes cidades dos EUA. Os algoritmos propõem a resolução de problemas de ordem prática que são enfrentados corriqueiramente pelas operadoras de telecomunicações: Projeto de topologia física de uma rede óptica, dimensionamento dos dispositivos ópticos que serão instalados na rede, colocação de regeneradores e expansão de uma topologia-legada já instalada. Esses problemas são tratados de forma separada e de forma conjunta e extensamente investigados por meio de simulações computacionais.

Um primeiro resultado de destaque é que a metodologia proposta foi capaz de encontrar topologias capazes de, com a mesma qualidade de serviço, suportar duas vezes mais tráfego que uma topologia real instalada entre as cidades americanas já citadas anteriormente, a um menor custo, considerando um cenário justo (mesma condição para todos os experimentos).

Os resultados apontam também no sentido de que se for permitida a inclusão de alguns regeneradores na rede, é possível obter topologias que realizam uma melhor relação CapEx-probabilidade de bloqueio mostrando a vantagem de se empregar tais redes. Essa vantagem da rede translúcida sobre a rede transparente se torna cada vez mais proeminente quanto mais restritivo for o critério de QoT im-

posto aos caminhos ópticos. Os algoritmos propostos também se mostraram eficientes para lidar com distribuições assimétricas de tráfegos ao longo da rede. As topologias e especificações de dispositivos encontradas realizaram praticamente as mesmas relações CapEx-probabilidade de bloqueio para os dois padrões de tráfego investigados.

Outro resultado importante é o relativo a como o algoritmo de RWA restringe a possibilidade de encontrar uma boa relação CapEx-probabilidade de bloqueio. Essas conclusões precisam ser mais aprofundadas (por meio da realização de mais experimentos), mas os resultados mostrados indicam que, para o projeto de uma rede translúcida feito de forma otimizada, o algoritmo de RWA influencia pouco nas melhores relações CapEx-probabilidade de bloqueio que poderiam ser obtidas. Entretanto, se a rede for transparente, o RWA adotado influencia de forma marcante nas melhores relações CapEx-probabilidade de bloqueio que podem ser obtidas.

Por fim, foi proposto e investigado, por meio de simulações, um algoritmo para realizar a expansão de rede. Os resultados mostraram que a topologia-legada sobre a qual a expansão será feita tem influência marcante nas melhores relações CapEx-probabilidade de bloqueio que podem ser obtidas. Quando a expansão é aplicada a uma topologia não otimizada, os resultados encontrados conseguiram realizar relações CapEx-probabilidade de bloqueio piores do que as que seriam conseguidas se o projeto completo fosse aplicado considerando as mesmas condições e os mesmos nós. Entretanto, verificou-se que quando a expansão foi aplicada a uma topologia otimizada, ela conseguiu obter relações CapEx-probabilidade de bloqueio idênticas às conseguidas pelo projeto total nas mesmas condições.

6.7 Lista de publicações referentes a este capítulo

- 1) D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Multiobjective physical topology design of all-optical networks considering qos and capex, In: **Optical Fiber Communication Conference (OFC)**, Março 2010, p. 1–3.
- 2) D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Up-grading the physical topology of transparent optical networks using a multiobjective evolutionary algorithm considering quality of service and capital cost, In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**, Novembro 2009, p. 51 –56.
- 3) D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Multiobjective evolutive

- nary algorithm for physical topology design and device specifications of all-optical networks, In: **XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicacoes (SBrT)**, Setembro 2009, p. 1 – 5.
- 4) C. J. A. BASTOS-FILHO, D. R. B. ARAUJO, E. A. BARBOZA, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, Design of transparent optical networks considering physical impairments, capex and energy consumption, In: **13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**, 2011, p. 1–4.
 - 5) D. R. B. ARAUJO, C. J. A. BASTOS-FILHO, E. A. BARBOZA, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, A performance comparison of multi-objective optimization evolutionary algorithms for all-optical networks design, In: **Proc. IEEE Symp. Computational Intelligence in Multicriteria Decision-Making (MDCM)**, 2011, p. 89–96.
 - 6) D. R. B. ARAUJO, E. A. BARBOZA, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, J. MARTINS-FILHO, An efficient multi-objective evolutionary optimizer to design all-optical networks considering physical impairments and capex, In: **11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)**, 2011.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Quem sabe concentrar-se numa coisa e insistir nela como único objetivo, obtém, ao cabo, a capacidade de fazer qualquer coisa.

— Gandhi

NESTA Tese são propostas diversas estratégias que podem ser aplicadas no dimensionamento e projeto de redes ópticas WDM de forma otimizada. As estratégias propostas lidam com os principais elementos que afetam a relação custo-desempenho em uma rede óptica: o algoritmo de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA), a colocação de regeneradores (RP) e atribuição de regeneradores (RA), o projeto da topologia física da rede (PTD) e o dimensionamento dos dispositivos ópticos (DDO) que serão instalados na rede. As estratégias propostas consideram as penalidades da camada física que degradam o sinal óptico que está sendo transmitido na rede.

Como todos os problemas tratados nesta Tese pertencem à classe de algoritmos NP-completo ou à classe NP-difícil, suas soluções ótimas (utilizando alguma ferramenta da pesquisa operacional) são computacionalmente inviáveis, até mesmo para redes com um pequeno número de nós. Sendo assim, todas as propostas apresentadas nesta Tese resolvem os problemas concernentes ao projeto de redes ópticas de forma heurística ou metaheurística.

A investigação das propostas apresentadas foi realizada por meio de simulações computacionais. Para tal, foi desenvolvido um simulador de redes ópticas denominado SIMTON. No Capítulo 3 são apresentados os detalhes de implementação e funcionamento do SIMTON, além da formulação ma-

temática e arquitetura de dispositivos assumidas por ele. O SIMTON foi concebido para realizar simulações em redes ópticas transparentes, translúcidas e opacas, considerando as penalidades da camada física às quais o sinal óptico está sujeito. As penalidades consideradas pelo SIMTON são: perdas nos multiplexadores, nos demultiplexadores e comutadores ópticos; ruído de emissão espontânea da fonte (SSE) no transmissor óptico; mistura de quatro ondas (FWM), dispersão por modo de polarização (PMD) e dispersão cromática residual (RD) na fibra óptica de transmissão; ruído de emissão espontânea amplificada (ASE) no amplificador EDFA; saturação de ganho no amplificador EDFA e *crosstalk* homodino no comutador óptico OXC.

No Capítulo 4 foi proposta uma nova abordagem sistemática para se construir uma função-custo de enlace denominada *Link Cost Function Design* (LCDF). A abordagem pode ser usada como uma forma sistemática para projetar um algoritmo de roteamento. Ela consiste em quatro etapas: escolha das variáveis de entrada para a função-custo, expansão da função-custo em uma série de funções, escolha de um indicador global de desempenho da rede como objetivo de otimização e determinação dos coeficientes de uma série de funções por meio de um procedimento de otimização, a fim de minimizar ou maximizar o indicador de desempenho escolhido no terceiro passo.

Um processo clássico utilizado para definição de um algoritmo de roteamento é escolher um conjunto de informações estáticas ou dinâmicas sobre o estado de um enlace, calcular um custo de enlace para esse enlace a partir dessas informações, e após isso, encontrar o caminho de menor custo que ligue dois nós da rede. O que diferencia um roteamento de outro é como calcular esse custo de enlace a partir dos parâmetros escolhidos. O procedimento largamente utilizado na literatura atual é tentar inferir a melhor função que pondera essas informações coletadas do enlace para a geração do custo do enlace. Na abordagem LCDF proposta, essa inferência não é mais necessária pois ela fornece uma função-custo otimizada para a rede considerada. Pode-se dizer que qualquer algoritmo de roteamento que utilize a abordagem clássica é um caso particular da metodologia proposta (ou seja é uma aplicação da metodologia). Uma vantagem adicional do LCDF é que, ao contrário da maior parte dos trabalhos que utilizam a metodologia clássica, ela otimiza um parâmetro alvo escolhido pelo projetista do algoritmo de roteamento. Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura utilizando essa última abordagem apenas definem uma função (heurísticamente) e a usa supondo que ela fornecerá um bom resultado. Por fim, acredita-se que a metodologia LCDF possa ser aplicada em diferentes cenários além de redes ópticas, como: roteamento em redes sem fio e escolha assistida de rotas rodoviárias por dispositivos GPS ou ferramentas de navegação.

A metodologia LCDF proposta foi aplicada para construir um algoritmo de IA-RWA adaptativo,

que foi chamado de roteamento por série de potência (PSR). O PSR utiliza a série de Taylor para realizar a expansão da função-custo de um enlace e utiliza como variáveis de entrada para composição da função-custo o comprimento e a disponibilidade de enlace normalizados. O número de saltos em uma rota também é contabilizado, de forma indireta, pela expansão considerada. A otimização dos parâmetros da função na fase de planejamento considera as penalidades da camada física, o que dá ao PSR as características de um algoritmo de IA-RWA. Para realizar a otimização do PSR foi utilizado o algoritmo de otimização baseado em enxames de partículas, denominado *Particle Swarm Optimization* (PSO). O desempenho do algoritmo PSR foi comparado, em termos de probabilidade de bloqueio, com outros quatro algoritmos de IA-RWA com diferentes características, em duas topologias diferentes de rede e em dois cenários diferentes para as penalidades da camada física. Os resultados de simulação mostraram que o algoritmo PSR superou os outros algoritmos considerados de forma consistente na maioria dos casos testados. Também foi demonstrada a consistência do PSR em obter boas soluções para o roteamento, mesmo em condições ligeiramente diferentes para as quais ele foi otimizado, como mudanças na topologia gerada por falhas ou assimetrias na distribuição de tráfego na rede (tráfego não uniforme).

Outra questão abordada neste trabalho foi o projeto de redes translúcidas. Essas redes são uma alternativa de implementação para uma rede óptica WDM, pois elas realizam um bom compromisso custo-benefício quando comparadas às redes ópticas opacas (alto custo e excelente desempenho) ou transparentes (baixo custo mas desempenho pior). No Capítulo 5 são propostas estratégias para tratar do problema de projeto de redes translúcidas. Dois aspectos são abordados: a colocação de regeneradores (RP) em uma rede óptica translúcida e a alocação de regeneradores (RA) para os caminhos ópticos.

Para a alocação de regeneradores, foi proposto um algoritmo heurístico capaz de tratar os três casos que podem ocorrer em uma rede translúcida para um dado caminho óptico: nenhuma regeneração do sinal óptico é necessária, a regeneração do sinal óptico é necessária por o caminho óptico apresentar uma QoT insuficiente ou uso do regenerador como um conversor de comprimento de onda na falta de caminho óptico disponível que atenda à restrição de continuidade de comprimentos de onda. A heurística proposta tenta manter o sinal no domínio óptico o maior trecho possível (a partir da origem de um caminho óptico), utilizando regeneradores apenas quando a sua QoT cai abaixo do limiar mínimo preestabelecido. Apesar de simples, a heurística possibilita que os regeneradores sejam utilizados em todos os casos em que esse recurso pode ser útil para melhorar o desempenho da rede. Por outro lado, como o RA é executado em tempo de operação da rede, geralmente é necessário

que ele seja simples o suficiente para se obter uma rápida resposta a todos os pedidos de conexão que chegam à rede de forma dinâmica.

A colocação de regeneradores, ao contrário, ocorre antes da operação da rede, ou seja, a decisão de onde colocar regeneradores na rede não necessita de um tempo de resposta rápida e por isso algoritmos mais sofisticados podem ser empregados para solução desse problema. No Capítulo 5 foram propostos quatro algoritmos para realizar a colocação de regeneradores em redes ópticas: dois heurísticos (MU-RP e MSU-RP) e dois metaheurísticos (MORP e MORP-3o). Durante a decisão de RP, os algoritmos MU-RP e MSU-RP assumem uma rede totalmente opaca, na qual não há limite de regeneradores por nó da rede. Uma quantidade grande de pedidos de conexão é solicitada à rede e os regeneradores são alocados sempre que necessário. Assim, MU-RP decide colocar regeneradores nos nós nos quais os regeneradores foram alocados mais vezes. Por outro lado, o MSU-RP decide colocar regeneradores proporcionalmente à quantidade máxima de regeneradores usados simultaneamente em um dado nó da rede. MU-RP e MSU-RP não efetuam a decisão de colocação de regeneradores baseada na otimização de algum parâmetro de rede. Eles baseiam sua decisão na intuição de que um bom lugar para se colocar regeneradores seria nos nós em que eles foram mais usados quando se assumiu uma rede com um número infinito de regeneradores disponíveis por nó. As propostas meta-heurísticas decidem onde colocar regeneradores baseadas na diminuição expressa de figuras de mérito da rede. O MORP decide em quais nós da rede colocar regeneradores tendo como meta a diminuição, de forma simultânea, da probabilidade de bloqueio da rede e do número total de regeneradores instalados nela. De forma semelhante, o MORP-3o decide em quais nós da rede colocar regeneradores tendo como meta a diminuição, de forma simultânea, da probabilidade de bloqueio da rede, do número total de regeneradores instalados na rede e do número de nós translúcidos nela instalados. Essas figuras de mérito foram escolhidas pois se deseja obter uma rede translúcida de baixo custo (minimize o número de regeneradores instalados), com alto desempenho (minimize a probabilidade de bloqueio) e com baixo custo de manutenção e operação (minimize o número de nós translúcidos). Otimizações desse tipo são denominadas de multiobjetiva pois múltiplas funções devem ser otimizadas de forma simultânea. Esse tipo de otimização gera um conjunto de soluções otimizadas, e por esse motivo, o resultado final obtido por MORP e MORP-3o é na verdade composto por um conjunto de soluções otimizadas. Isso é diferente da solução única fornecida por MU-RP e MSU-RP.

Os quatro algoritmos de RP foram exaustivamente examinados por meio de simulação. Também foram comparados com outros dois algoritmos propostos na literatura: NDF e SQP. Em todos os

casos analisados MORP, MORP-3o e MSU-RP superaram o NDF e o SQP enquanto que MU-RP superou esses dois últimos na maioria dos casos investigados. Entre os algoritmos de RP propostos foi concluído que MSU-RP, MORP e MORP-3o apresentaram os melhores resultados quando foram levadas em conta as figuras de mérito já citadas. Além disso, nas situações investigadas, MSU-RP, MORP e MORP-3o encontraram redes translúcidas com desempenho similar ao de uma rede opaca, utilizando no máximo 15% do número total de regeneradores que seriam necessários para a implementação desta última. Isso resulta na economia de 85% do CapEx relativo à instalação de regeneradores. Apesar de MSU-RP, MORP e MORP-3o apresentarem resultados semelhantes quando se comparam as relações CapEx-probabilidade de bloqueio por eles obtidas, o MSU-RP somente consegue isso selecionando um número excessivo de nós translúcidos, o que aumenta o orçamento de OpEx para se operar a rede. Por outro lado, o algoritmo MSU-RP é bem mais rápido de ser executado do que MORP e MORP-3o.

Um outro aspecto investigado nesta Tese foi o projeto total de redes ópticas WDM. Nelas, os elementos que influenciam de forma mais preponderante o custo e o desempenho da rede são os seguintes: o dimensionamento das características dos dispositivos ópticos empregados na rede (DDO), o projeto da topologia física da rede (PTD), o algoritmo utilizado para se fazer o roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA), o algoritmo utilizado para a colocação de regeneradores (RP) e o algoritmo de utilização desses regeneradores (RA). Sendo assim, algoritmos que levem em conta todos esses aspectos de forma simultânea e integrada são desejáveis no momento de realizar o projeto de tais redes. Este trabalho propôs e investigou, no Capítulo 6, algoritmos para a realização do projeto integrado de redes ópticas. Os algoritmos propostos realizam o projeto considerando como objetivo de otimização a diminuição simultânea da probabilidade de bloqueio e do CapEx total necessário para se realizar a instalação da rede. Portanto, o procedimento de projeto se dá de forma multiobjetiva, e assim sendo, os algoritmos propostos fornecem como resultados um conjunto de topologias (soluções) que realizam uma relação otimizada entre probabilidade de bloqueio e CapEx. O algoritmo multiobjetivo NSGA-II foi utilizado como otimizador do projeto de redes.

Para a avaliação do CapEx de uma rede foi proposto no Capítulo 6 um modelo que quantifica o custo de cada dispositivo na rede. O modelo de custo possui constantes que possibilitam sua fácil aplicação em diferentes cenários: conhecidos os custos dos dispositivos de uma aplicação particular é suficiente os ajustes dessas constantes para o modelo de custos refletir a realidade dessa situação em particular. O modelo de custo proposto leva em conta os custos dos seguintes dispositivos: *transponders* eletrônicos, fibras ópticas, instalação de fibras, regeneradores eletrônicos, comutadores ópticos

e amplificadores ópticos EDFA.

O projeto de redes foi considerado em duas vertentes: o projeto de redes transparentes e o projeto de redes translúcidas. Os algoritmos foram investigados em dois cenários de restrição de camada física (em termos de QoT), para dois perfis de tráfego: uniforme e não uniforme e para três intensidades de cargas. As simulações foram realizadas assumindo como nós, cidades dos EUA originalmente usadas como nós para a topologia Nsfnet. Em todos os casos investigados as redes translúcidas projetadas realizaram uma melhor relação CapEx-probabilidade de bloqueio do que as redes transparentes. Essa melhor relação realizada pelas redes translúcidas fica ainda mais evidente quanto mais restritivo for o critério de QoT adotado. O projeto de redes também foi investigado quando diferentes algoritmos de RWA são aplicados durante o projeto. O impacto do RWA na relação CapEx-probabilidade de bloqueio encontrada para a rede mostrou diferentes características, dependendo se a rede sob projeto é translúcida ou transparente. Para o projeto de uma rede translúcida feito de forma otimizada, os resultados mostrados indicam que o algoritmo de RWA influencia pouco nas melhores relações CapEx-probabilidade de bloqueio que podem ser obtidas. Entretanto, se a rede for transparente, o RWA adotado influencia de forma marcante as melhores relações CapEx-probabilidade de bloqueio que podem ser obtidas.

Por fim, foram propostos, também no Capítulo 6, dois algoritmos para realização da expansão da rede. A expansão consiste em adicionar novos dispositivos, como novos enlaces, novos regeneradores e novos comprimentos de onda a uma topologia-legada já existente com o objetivo de aumentar a capacidade de tráfego que essa topologia-legada pode suportar. Dos algoritmos propostos, um realiza a expansão de uma rede transparente para outra rede transparente, enquanto o outro realiza a expansão de uma rede transparente para uma rede translúcida. Os resultados mostraram que a topologia-legada sobre a qual a expansão é feita tem grande influência nas melhores relações CapEx-probabilidade de bloqueio que podem ser obtidas. Quando a expansão é aplicada a uma topologia não otimizada, os resultados encontrados conseguiram realizar relações CapEx-probabilidade de bloqueio piores que as que seriam conseguidas se o projeto completo fosse aplicado considerando as mesmas condições e os mesmos nós. Entretanto, verificou-se que quando a expansão foi aplicada a uma topologia otimizada ela conseguiu obter relações CapEx-probabilidade de bloqueio idênticas às conseguidas pelo projeto total nas mesmas condições.

7.1 Trabalhos futuros

São listadas algumas propostas de trabalhos que podem ser investigados em trabalhos futuros:

- ▷ Mecanismos para acelerar a convergência dos algoritmos de RP multiobjetivo propostos, partindo de algumas boas soluções iniciais em lugar de uma inicialização aleatória como foi feito.
- ▷ Considerar outras funções objetivo nos algoritmos de RP multiobjetivo com o intuito de refinar os resultados obtidos.
- ▷ Investigar, por meio de mais simulações, o impacto do algoritmo de RWA no projeto de redes translúcidas.
- ▷ Investigar, por meio de simulações, o projeto de redes considerando a escolha do RWA durante o processo de otimização.

7.2 Resumo quantitativo das contribuições dos trabalhos desenvolvidos para a Tese

Durante os trabalhos realizados para a Tese, foram produzidas seis publicações em periódicos (e mais quatro artigos submetidos) e 27 publicações de artigos completos em conferências, denominadas publicações geradas da Tese (PGT). Das PGTs, 14 estão listadas na base *Web of Science*, enquanto 21 estão listadas na base *Scopus*. A base *Web of Science* lista 13 citações para artigos das PGTs, enquanto a base *Scopus* lista 20 citações. As metodologias e algoritmos propostos nesta Tese estão sendo ou foram ampliadas, aplicadas ou melhoradas em outros trabalhos de pós graduandos: duas dissertações de mestrado concluídas [89] (projeto de redes) e [103] (aplicação do PSR), uma dissertação de mestrado em andamento [112] (aplicação de variações de MORP) e uma Tese de doutorado em andamento [102] (aplicação do PSR para restauração e proteção).

APÊNDICE A

SIMTON - INTERFACE GRÁFICA E CASOS DE USO

Neste apêndice são mostradas a interface gráfica do simulador SIMTON e algumas de suas características. Alguns casos de uso também são examinados.

A.1 Interface gráfica do SIMTON

A Figura A.1 ilustra a tela principal da GUI (GUI – *Graphical User Interface*) desenvolvida. Utilizando-a, pode-se desenhar uma nova topologia de rede, salvar uma rede montada pelo usuário ou editar uma topologia salva.

Pode-se escolher configurar os parâmetros de todos os nós, todos os enlaces, ou de um dispositivo específico presente na rede, selecionando o dispositivo desejado. Quanto aos enlaces, os seguintes parâmetros podem ser modificados: comprimento e coeficiente de atenuação da fibra, perdas dos multiplexadores e demultiplexadores, número de fibras (para o caso de utilização em sistemas multifibras), ganhos, potências de saturação de saída e figura de ruído dos amplificadores, conforme ilustrado na Figura A.2(a). Quanto aos nós, têm-se as seguintes opções de configuração: valor da perda dos comutadores ópticos, dos parâmetros de relação sinal ruído de saída e potência e saída dos Lasers de transmissão, conforme ilustrado na Figura A.2(b).

A Figura A.3 ilustra os parâmetros da simulação, entre eles: número de chamadas que devem ser simuladas, valor do parâmetro $OSNR_{QOT}$, penalidades consideradas, tipos de algoritmos de roteamento e de alocação de comprimentos de onda, tipos de simulações e intervalo de variação dos

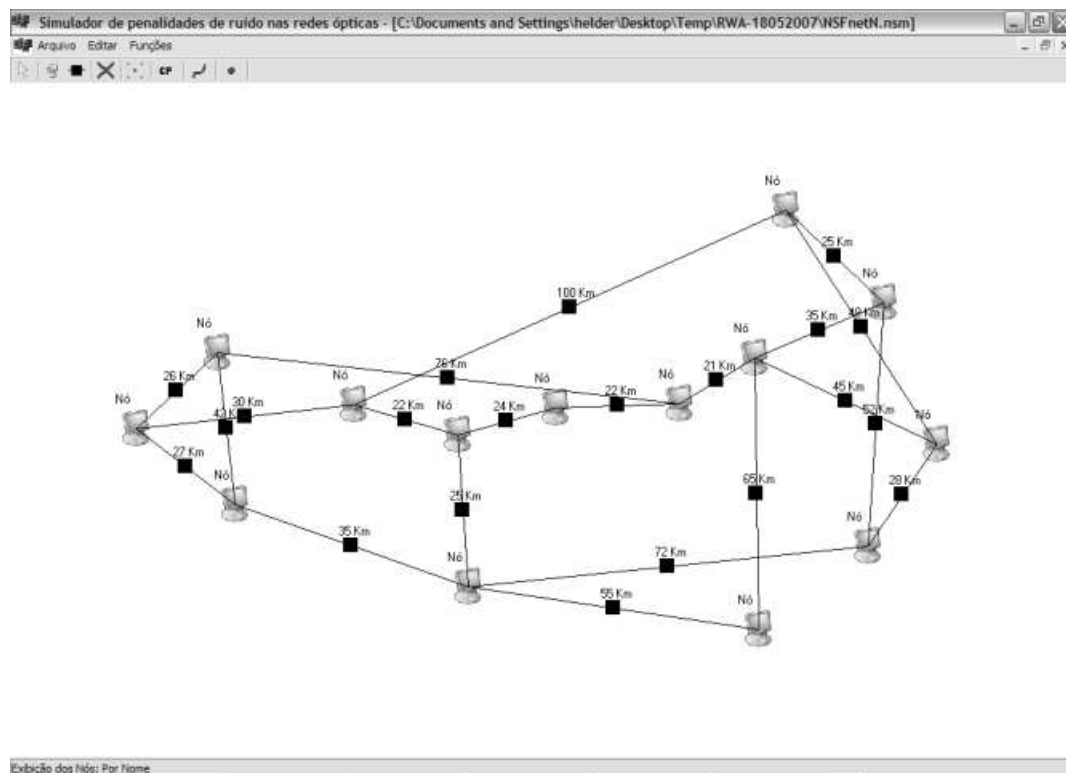


Figura A.1: Tela de apresentação com a rede a ser simulada.

(a)

(b)

Figura A.2: Telas de configuração dos parâmetros de simulação relativos aos: (a) enlaces e (b) aos nós da rede.

parâmetros considerados, além da opção de configurar todos os amplificadores da rede de modo a compensar todas as perdas, ou ainda, oferecer um ganho escolhido pelo usuário.

A Figura A.4 (a) ilustra a janela seguinte ao início da simulação. Ela informa ao usuário que a

Figura A.3: Tela de configuração dos parâmetros da simulação.

simulação está em andamento por uma barra em movimento. A janela mostrada na Figura A.4(b) fornece um gráfico com os resultados da simulação. Os gráficos são sempre mostrados em termos da probabilidade de bloqueio de chamadas na rede em função dos parâmetros dos dispositivos ópticos ou carga. Além de fornecer o resultado em forma de gráfico o *software* também fornece um registro completo, salvo em arquivo de texto, com todos os resultados obtidos durante a simulação.

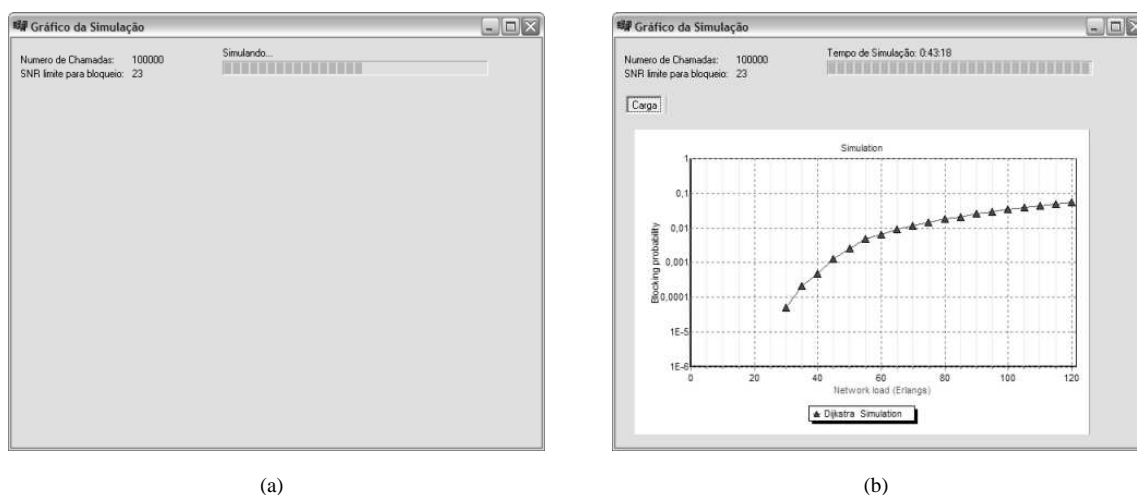


Figura A.4: Telas informativas quanto ao processo de simulação: (a) em andamento e (b) término da simulação.

A.1.1 Estudo dos casos de uso do *software* de simulação

É mostrado um estudo simplificado dos casos de uso para ilustrar o funcionamento do *software* desenvolvido. Como mencionado anteriormente, o programa desenvolvido foi dividido em dois módulos. A Figura A.5 mostra o diagrama de casos de uso do módulo de interface gráfica. A seguir é feita uma descrição simplificada de cada caso de uso mostrado no diagrama da Figura A.5.

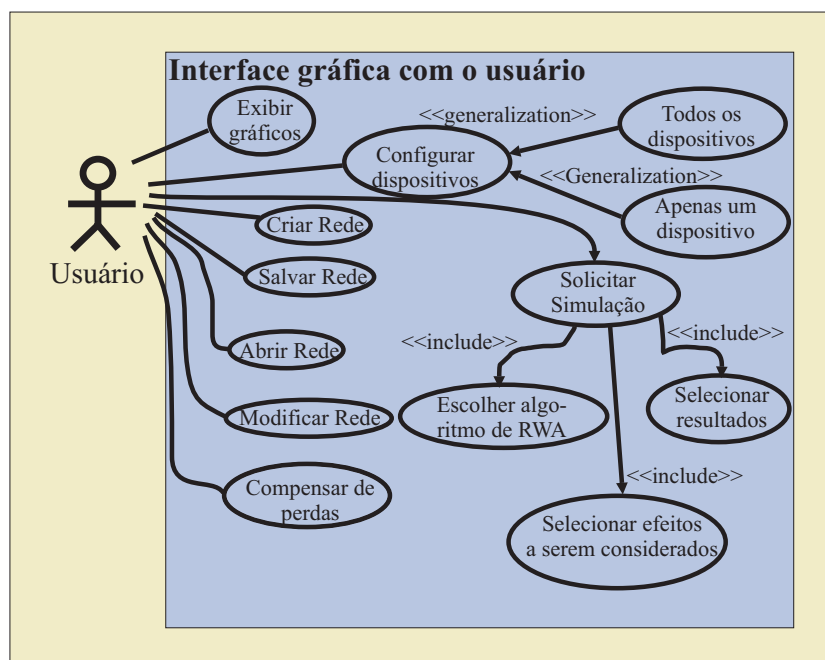


Figura A.5: Diagrama de casos de uso do módulo de interface gráfica.

Criar Rede – Permite a criação de uma nova topologia de rede, ou seja, a definição dos nós e enlaces dos quais a rede será composta.

Salvar Rede – Por meio deste caso de uso é possível ao usuário salvar uma topologia de rede previamente projetada por ele.

Abrir Rede – O usuário pode, com essa opção, abrir uma topologia de rede previamente salva.

Modificar Rede – Com esse caso de uso o usuário pode editar uma topologia de rede, adicionando ou removendo enlaces e/ou nós à topologia que está sendo modificada.

Compensar de perdas – Com essa opção, o usuário pode ajustar o ganho dos amplificadores ópticos de forma que eles compensem as perdas dos dispositivos ópticos ao longo de um enlace.

Configurar dispositivos – Permite a configuração dos parâmetros dos dispositivos ópticos utilizados na rede, como exemplo, fibras ópticas, comutadores e amplificadores. A alteração dos parâmetros pode ser feita de duas formas:

Todos os dispositivos – Alterar os parâmetros dos dispositivos empregados nos nós ou nos enlaces, simultaneamente em toda a rede (todos os nós ou enlaces componentes da rede).

Apenas um dispositivo – Alterar os parâmetros de um dispositivo específico em um único enlace ou em um único nó.

Solicitar Simulação – Solicita a execução de uma simulação.

Escolher algoritmo de RWA – Permite a escolha do algoritmo de roteamento que deverá ser utilizado durante a simulação. Três escolhas são possíveis: menor caminho (SP), OSNR-R e menor número de saltos (MH). O algoritmo de atribuição de comprimentos de onda padrão utilizado é o *first fit*.

Selecionar resultados – Com esse caso de uso é possível a seleção de parametrização de resultados. Os gráficos fornecidos como resultados são sempre da probabilidade de bloqueio da rede em função de parâmetros dos dispositivos. Os parâmetros que podem ser utilizados são: número de comprimentos de onda na fibra, potência de saturação dos amplificadores, potência dos LASERs de transmissão, coeficiente de PDM da fibra óptica, carga de rede, fator de isolamento do comutador óptico, fator de ganho do amplificador, figura de ruído do amplificador e OSNR de entrada do LASER de transmissão.

Selecionar efeitos a serem considerados – Os efeitos da camada física que podem ser considerados são: Ruído de ASE do amplificador, potência de saturação do amplificador, saturação do ganho e do ruído do amplificador e *crosstalk* homodino nos comutadores ópticos.

Exibir gráficos – Mostra graficamente, por meio de um gráfico $x \times y$, os resultados da simulação com o eixo y representando a probabilidade de bloqueio da rede, e o eixo x representando um dos seguintes parâmetros: ruído ASE do amplificador, potência de saturação do amplificador, saturação do ganho e do ruído do amplificador e *crosstalk* homodino nos comutadores ópticos.

A Figura A.6 mostra o diagrama de casos de uso do módulo de simulação. A seguir, é feita uma descrição simplificada de cada caso de uso mostrado no diagrama da Figura A.6.

Simular – Permite fazer a simulação de um rede óptica conforme os parâmetros dos dispositivos e a topologia selecionados pelo usuário no módulo de interface gráfica.

Gerador de requisição de conexões – Gera requisições de conexões entre nós da rede seguindo a descrição feita na Seção 3.2.

Calcular OSNR – Módulo que efetua o cálculo da relação sinal ruído óptica, para um dado caminho óptico fornecido como entrada.

Gerenciar chamadas – Responsável pela alocação de retirada de conexões na rede.

Estabelecer chamadas – Módulo responsável pelo estabelecimento de uma chamada na rede.

Ele reserva o recurso de rede que será utilizado na conexão, calculando e armazenando as potências do sinal óptico em cada ponto da rede.

Retirar chamadas – Após um certo tempo ativa, a chamada é liberada (vide Seção 3.2). Este módulo é responsável pela liberação dos recursos de rede utilizados pelas chamadas que já expiraram.

Algoritmo de RWA – Algoritmo responsável por encontrar rota e comprimento de onda disponíveis para atender uma requisição de conexão. Existem três diferentes tipos de RWA pré-programados que podem ser utilizados: OSNR-R, SP e MH.

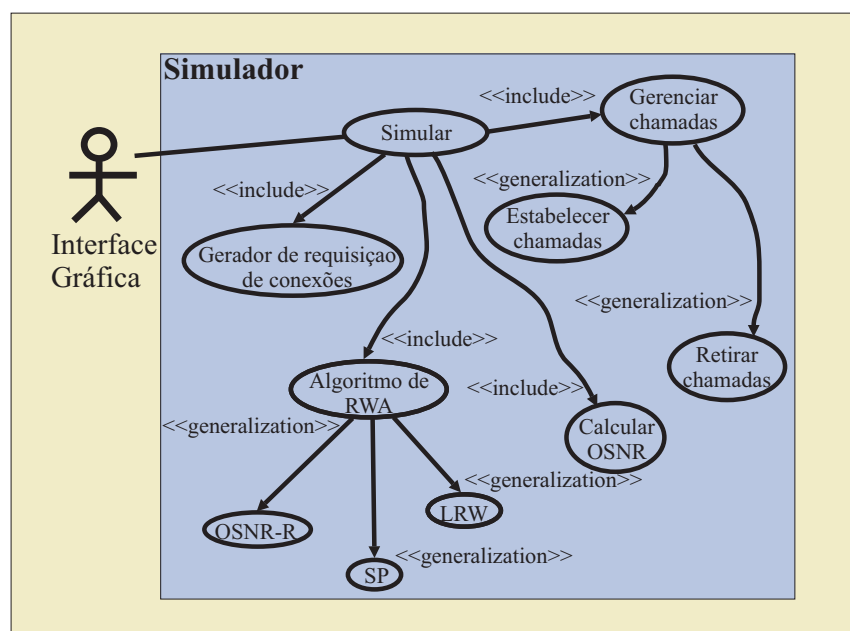


Figura A.6: Diagrama de casos de uso do módulo de simulação.

APÊNDICE B

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Nesta seção estão listados os artigos de co-autoria do autor desta Tese durante seu período de elaboração.

B.1 Artigos publicados em periódicos

- 1) D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks, *Photonic Network Communications*, v. 22, n. 2, p. 133–150, 2011.
- 2) C. J. A. BASTOS-FILHO, E. M. N. FIGUEREDO, J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, M. SEGATTO, S. CANI, M. J. PONTES, Design of distributed optical-fiber raman amplifiers using multi-objective particle swarm optimization, *Journal of Microwaves and Optoelectronics*, v. 10, n. 2, p. 323–336, 2011. [Online]. Disponível: <http://www.jmoe.org/site-number?id=32>
- 3) C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, F. S. F. E SILVA, H. A. PEREIRA, J. F. MARTINS-FILHO, Wavelength assignment for physical-layer-impaired optical networks using evolutionary computation, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 3, p. 178–188, Março 2011.
- 4) D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Fast and adaptive impairment aware routing and wavelength assignment algorithm optimized by offline simulations, *Optical Switching and Networking*, v. 7, n. 3, p. 127 – 138, 2010.

- 5) D. A. R. CHAVES, C. A. BASTOS-FILHO, H. A. PEREIRA, J. F. MARTINS-FILHO, SIMTON: A simulator for transparent optical networks, *Journal of Communication and Information Systems (JCIS)*, v. 25, n. 1, p. 1–10, 2010. [Online]. Disponível: <http://iecom.dee.ufcg.edu.br/~jcis/Abril%202010/index.html>
- 6) H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, OSNR model to consider physical layer impairments in transparent optical networks, *Photonic Network Communications*, v. 18, n. 2, p. 137–149, Setembro 2009.

B.2 Artigos submetidos a periódicos

- 1) D. A. R. CHAVES, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Multiobjective design of translucent WDM networks considering CapEx, OpEx and QoT, *a ser submetido ao IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012.
- 2) D. A. R. CHAVES, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel strategies for sparse regenerator placement and regenerator allocation in translucent optical networks, *Submetido ao Photonic Network Communications*, 2012.
- 3) C. J. A. BASTOS-FILHO, A. V. S. XAVIER, R. SILVA, J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, An adaptive-alternative routing algorithm for all-optical networks, *Submetido ao IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2012.
- 4) J. F. MARTINS-FILHO, J. L. SANTANA, H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, Assessment of the power series routing algorithm in translucent, transparent and opaque optical networks, *Submetido ao IEEE Communications Letters*, 2011.

B.3 Artigos publicados em conferências

- 1) R. V. B. CARVALHO, R. S. C. OLIVEIRA, C. J. A. BASTOS FILHO, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, Regenerator placement and link capacity optimization in translucent optical network using multi-objective evolutionary algorithm, In: **Aceito para o Optical Fiber Communication Conference (OFC)**, 2012, p. 1 – 3.
- 2) D. R. B. ARAUJO, E. A. BARBOZA, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, J. MARTINS-FILHO, An efficient multi-objective evolutionary optimizer to design all-optical

- networks considering physical impairments and capex, In: **11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)**, 2011.
- 3) R. C. FREITAS, E. S. LEITO, R. SILVA, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, Optical signal-to-noise ratio restoration algorithm applied to optical network resilience to node failures, In: **IEEE 3rd Latin-American Conference on Communications (Latincom)**, 2011.
 - 4) A. V. S. XAVIER, R. SILVA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, An adaptive-alternative routing algorithm for all-optical networks, In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011)**, n. 1 – 5, 2011.
 - 5) J. F. FREITAS, R. C. ; MARTINS-FILHO, R. C. L. SILVA, C. J. A. BASTOS-FILHO, H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, A novel double-link failure restoration algorithm based on optical signal-to-noise ratio for all-optical networks, In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IEEE IMOC)**, 2011, p. 1 – 5.
 - 6) C. J. A. BASTOS-FILHO, A. M. SANTOS, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, A model to allow remote and distributed simulation of optical networks using XML, In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IEEE IMOC)**, 2011, p. 1 – 5.
 - 7) R. C. FREITAS, R. SILVA, H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel restoration algorithm based on optical signal to noise ratio for transparent optical networks, In: **XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)**, Outubro 2011, p. 1 – 5.
 - 8) D. A. R. CHAVES, R. V. B. CARVALHO, C. F. C. L. C. AYRES, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel strategies for sparse regenerator placement and allocation in translucent optical networks, In: **XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)**, 2011, p. 1 – 5.
 - 9) C. J. A. BASTOS-FILHO, D. R. B. ARAUJO, E. A. BARBOZA, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, Design of transparent optical networks considering physical impairments, capex and energy consumption, In: **13th International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE ICTON)**, 2011, p. 1–4.

- 10) J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, H. A. PEREIRA, Applications of computational intelligence in optical networks, In: **13th International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE ICTON)**, 2011, p. 1–4.
- 11) D. R. B. ARAUJO, C. J. A. BASTOS-FILHO, E. A. BARBOZA, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, A performance comparison of multi-objective optimization evolutionary algorithms for all-optical networks design, In: **Proc. IEEE Symp. Computational Intelligence in Multicriteria Decision-Making (MDCM)**, 2011, p. 89–96.
- 12) D. A. R. CHAVES, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, SIMTON: A simulator for transparent optical networks, In: **International Telecommunications Symposium (ITS)**, 2010, p. 1–5.
- 13) R. A. SANTANA, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. R. C. SILVA, J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, Roteamento em redes ópticas transparentes utilizando redes neurais de Hopfield, In: **14° Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica (SBMO) e 9° Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag) - Momag**, 2010, p. 1–5.
- 14) C. J. A. BASTOS-FILHO, A. M. SANTOS, H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, D. O. AGUIAR, Um modelo de estrutura para software simulador de redes ópticas utilizando XML, In: **14° Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica (SBMO) e 9° Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag) - Momag**, 2010, p. 1–5.
- 15) C. J. A. BASTOS-FILHO, R. A. SANTANA, D. R. C. SILVA, J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, Hopfield neural networks for routing in all-optical networks, In: **12th International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE ICTON)**, 2010, p. 1–4.
- 16) D. A. R. CHAVES, C. F. C. L. C. AYRES, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Multiobjective sparse regeneration placement algorithm in optical networks considering network performance and capex, In: **12th International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE ICTON)**, 2010, p. 1–4.
- 17) D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Multiobjective physical topology design of all-optical networks considering QoS and Capex, In: **Optical Fiber Communication Conference (OFC)**, 2010, p. 1–3.
- 18) D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Multiobjective evoluti-

- onary algorithm for physical topology design and device specifications of all-optical networks, In: **XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)**, n. 1 – 5, 2009.
- 19) C. J. A. BASTOS-FILHO, R. M. FERNANDES, F. R. CARVALHO, G. M. CAVALCANTI JUNIOR, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, Intelligent impairment aware routing algorithm for all-optical networks based on ant colony optimization trained by particle swarm optimization, In: **XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)**, 2009, p. 1 – 5.
- 20) D. A. R. CHAVES, C. F. C. L. C. AYRES, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Sparse regeneration placement for translucent optical networks using multiobjective evolutionary algorithms considering quality of service and capital cost, In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IEEE IMOC)**, 2009, p. 417–422.
- 21) D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Up-grading the physical topology of transparent optical networks using a multiobjective evolutionary algorithm considering quality of service and capital cost, In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IEEE IMOC)**, 2009, p. 51 –56.
- 22) C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, F. S. F. E SILVA, R. V. B. CARVALHO, H. A. PEREIRA, J. F. MARTINS-FILHO, Impairment aware wavelength assignment for all-optical networks based on evolutionary computation, In: **11th International Conference on Transparent Optical Networks, 2009. (IEEE ICTON)**, 2009, p. 1–4.
- 23) C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, E SILVA F. S. F, R. V. B. CARVALHO, J. F. MARTINS-FILHO, Wavelength assignment optimization in all-optical network considering physical impairments, In: **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)**, 2009, p. 1 – 5.
- 24) D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Impairment aware routing algorithm for all-optical networks based on power series and particle swarm optimization, In: **XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)**, n. 1 – 5, 2008.
- 25) D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Ferramenta computacional para simulação de redes ópticas transparentes, In: **14º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica (SBMO) e 9º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag) - Momag**, 2008, p. 1 – 5.

- 26) J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. O. AGUIAR, Intelligent and fast IRWA algorithm based on power series and particle swarm optimization, In: **10th International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE ICTON)**, v. 3, 2008, p. 158–161.
- 27) D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel adaptive routing algorithm for all-optical networks based on power series and particle swarm optimization, In: **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)**, 2008, p. 1 – 5.

REFERÊNCIAS

- [1] E. B. DESURVIRE, Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 24, n. 12, p. 4697–4710, Dezembro 2006.
- [2] R. RAMASWAMI, K. N. SIVARAJAN, **Optical Networks: A Practical Perspective**, 2^a ed. Morgan Kaufmann, 2002.
- [3] A. S. TANENBAUM, **Computer Networks**, 4^a ed. Prentice Hall, 2003.
- [4] M. J. O'MAHONY, C. POLITI, D. KLONIDIS, R. NEJABATI, D. SIMEONIDOU, Future optical networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 24, n. 12, p. 4684–4696, Dezembro 2006.
- [5] K. SATO, H. HASEGAWA, Optical networking technologies that will create future bandwidth-abundant networks, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 1, n. 2, p. A81–A93, Julho 2009.
- [6] J. R. A. AMAZONAS, **Projeto de sistemas de comunicações ópticas**, 1^a ed. Editora Manole, 2002.
- [7] K. THYAGARAJAN, A. K. GHATAK, **An Introduction to Fiber Optics**, 1^a ed. Cambridge - EUA, 1998.
- [8] P. GRENN, Progress in optical networking, *IEEE Communications Magazine*, v. 39, n. 1, p. 54–61, Janeiro 2001.
- [9] Mapsof – world submarine cable map, último acesso em Setembro 2011. [Online]. Disponível: <http://mapsof.net/map/world-submarine-cable-map#.TmastXMronU>
- [10] L. KAZOVSKY, W.-T. SHAW, D. GUTIERREZ, N. CHENG, S.-W. WONG, Next-generation optical access networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 25, n. 11, p. 3428–3442, Novembro 2007.

- [11] B. MUKHERJEE, WDM optical communication networks: Progress and challenges, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, v. 18, n. 10, p. 1810–1824, Outubro 2000.
- [12] Z. ZHANG, J. FU, D. GUO, L. ZHANG, Lightpath routing for intelligent optical networks, *IEEE Network*, v. 15, n. 4, p. 28–35, Julho 2001.
- [13] S. RAI, B. MUKHERJEE, C. SU, T. HAMADA, Provisioning in ultra-long-haul optical networks, In: **Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)**, Março 2007, p. 1–3.
- [14] D. DAHAN, U. MAHLAB, A. TEIXEIRA, I. ZACHAROPOULOS, I. TOMKOS, Optical performance monitoring for translucent/transparent optical networks, *IET Optoelectronics*, v. 5, n. 1, p. 1–18, Fevereiro 2011.
- [15] D. KILPER, R. BACH, D. BLUMENTHAL, D. EINSTEIN, T. LANDOLSI, L. OSTAR, M. PREISS, A. WILLNER, Optical performance monitoring, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 22, n. 1, p. 294–304, Janeiro 2004.
- [16] S. SYGLETOS, I. TOMKOS, J. LEUTHOLD, Technological challenges on the road toward transparent networking, *Journal of Optical Networking*, v. 7, n. 4, p. 321–350, Abril 2008.
- [17] J. STRAND, A. CHIU, R. TKACH, Issues for routing in the optical layer, *IEEE Communications Magazine*, v. 39, n. 2, p. 81–87, Fevereiro 2001.
- [18] R. HUELSESMANN, M. GUNKEL, C. MEUSBURGER, D. A. SCHUPKE, Cost modeling and evaluation of capital expenditures in optical multilayer networks, *Journal of Optical Networking*, v. 7, n. 9, p. 814–833, Setembro 2008.
- [19] H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, OSNR model to consider physical layer impairments in transparent optical networks, *Photonic Network Communications*, v. 18, n. 2, p. 137–149, Setembro 2009.
- [20] G. SHEN, R. S. TUCKER, Translucent optical networks: the way forward, *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 2, p. 48–54, Fevereiro 2007.
- [21] B. RAMAMURTHY, H. FENG, D. DATTA, J. HERITAGE, B. MUKHERJEE, Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks, In: **Optical Fiber Communication Conference and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OFC/IOOC)**, v. 1, Fevereiro 1999, p. 59–61.

- [22] S. AZODOLMOLKY, M. KLINKOWSKI, E. MARIN, D. CAREGLIO, J. S. PARETA, I. TOMKOS, A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks, *Computer Networks*, v. 53, n. 7, p. 926 – 944, Maio 2009.
- [23] X. YANG, B. RAMAMURTHY, Sparse regeneration in translucent wavelength-routed optical networks: Architecture, network design and wavelength routing, *Photonic Network Communications*, v. 10, n. 1, p. 39–53, Julho 2005.
- [24] H. ZANG, J. P. JUE, B. MUKHERJEE, A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks, *Optical Networks Magazine*, v. 1, n. 1, p. 47–60, Janeiro 2000.
- [25] C.-S. WANG, C.-T. CHANG, Integrated genetic algorithm and goal programming for network topology design problem with multiple objectives and multiple criteria, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 16, n. 3, p. 680 –690, Junho 2008.
- [26] G. AUSIELLO, P. CRESCNZI, V. GAMBOSI, A. KANN, A. MARCHETTI-SPACCAMELA, M. PROTASI, **Complexity and Approximation, Combinatorial Optimization Problems and Their Approximability properties**. Springer-Verlag, 1999.
- [27] E. G. TALBI, **Metaheuristics: From Design to Implementation**. EUA: Wiley, 2009.
- [28] S. RUSSELL, P. NORVIG, **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. Prentice Hall, 2004.
- [29] F. DRESSLER, T. SUDA, I. CARRERAS, J. CROWCROFT, M. MURATA, Guest editorial bio-inspired networking, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 28, n. 4, p. 521 –523, Maio 2010.
- [30] P. LIO, D. VERMA, Biologically inspired networking [guest editorial], *IEEE Network*, v. 24, n. 3, p. 4, Maio-Junho 2010.
- [31] J. KENNEDY, R. EBERHART, Particle swarm optimization, In: **IEEE International Conference on Neural Networks**, v. 4, Novembro-Dezembro 1995, p. 1942 –1948.
- [32] K. DEB, A. PRATAP, S. AGARWAL, T. MEYARIVAN, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182–197, Abril 2002.
- [33] C. S. R. MURTHY, M. GURUSAMY, **WDM optical Networks - Concepts, Design, and Algorithms**, 1^a ed. Prentice Hall, 2002.

- [34] **Impairments and other constraints on optical layer routing - RFC4054**. IETF, 2005.
- [35] B. WEN, R. SHENAI, K. SIVALINGAM, Routing, wavelength and time-slot-assignment algorithms for wavelength-routed optical WDM/TDM networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 9, p. 2598–2609, Setembro 2005.
- [36] N. M. BHIDE, K. M. SIVALINGAM, T. FABRY-ASZTALOS, Routing mechanisms employing adaptive weight functions for shortest path routing in optical WDM networks, *Photonic Network Communications*, v. 3, n. 3, p. 227–236, 2001.
- [37] Y. POINTURIER, M. BRANDT-PEARCE, S. SUBRAMANIAM, B. XU, Cross-layer adaptive routing and wavelength assignment in all-optical networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 26, n. 6, p. 32–44, 2008.
- [38] J. HE, M. BRANDT-PEARCE, S. SUBRAMANIAM, QoS-aware wavelength assignment with ber and latency constraints for all-optical networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 5, p. 462–474, Março 2009.
- [39] I. TOMKOS, S. S., A. TZANAKAKI, G. MARKIDIS, Impairment constraint based routing in mesh optical networks, In: **Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)**, Março 2007, p. 1–3.
- [40] D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Fast and adaptive impairment aware routing and wavelength assignment algorithm optimized by offline simulations, *Optical Switching and Networking*, v. 7, n. 3, p. 127 – 138, 2010.
- [41] D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, A methodology to design the link cost functions for impairment aware routing algorithms in optical networks, *Photonic Network Communications*, v. 22, n. 2, p. 133–150, 2011.
- [42] C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, F. S. F. E SILVA, H. A. PEREIRA, J. F. MARTINS-FILHO, Wavelength assignment for physical-layer-impaired optical networks using evolutionary computation, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 3, p. 178–188, Março 2011.
- [43] G. S. PAVANI, H. WALDMAN, Routing and wavelength assignment with crankback re-routing extensions by means of ant colony optimization, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 28, n. 4, p. 532–541, 2010.

- [44] J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. O. AGUIAR, Intelligent and fast IRWA algorithm based on power series and particle swarm optimization, In: **10th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**, v. 3, 2008, p. 158–161.
- [45] I. TOMKOS, D. VOGIATZIS, C. MAS, I. ZACHAROPOULOS, A. TZANAKAKI, E. VARVARIGOS, Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing, *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 8, p. 40–47, Agosto 2004.
- [46] C. PINART, E. LE ROUZIC, I. MARTINEZ, Physical-layer considerations for the realistic deployment of impairment-aware connection provisioning, In: **9th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**, v. 3, Julho 2007, p. 134–137.
- [47] P. PAVON-MARINO, S. AZODOLMOLKY, R. APARICIO-PARDO, B. GARCIA-MANRUBIA, Y. POINTURIER, M. ANGELOU, J. SOLE-PARETA, J. GARCIA-HARO, I. TOMKOS, Offline impairment aware RWA algorithms for cross-layer planning of optical networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 12, p. 1763 –1775, Junho 2009.
- [48] S. AZODOLMOLKY, M. KLINKOWSKI, Y. POINTURIER, M. ANGELOU, D. CAREGLIO, J. SOLÉ AND PARETA, I. TOMKOS, A novel offline physical layer impairments aware RWA algorithm with dedicated path protection consideration, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 28, n. 20, p. 3029 –3040, Outubro 2010.
- [49] Y. HUANG, J. HERITAGE, B. MUKHERJEE, Connection provisioning with transmission impairment consideration in optical WDM networks with high-speed channels, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 23, p. 982–993, 2005.
- [50] R. CARDILLO, V. CURRI, M. MELLIA, Considering transmission impairments in wavelength routed networks, In: **Proceedings of Optical Network Design and Modeling (ONDM)**, Fevereiro 2005, p. 421–429.
- [51] S. AZODOLMOLKY, Y. POINTURIER, M. ANGELOU, D. CAREGLIO, J. SOLE-PARETA, I. TOMKOS, A novel impairment aware RWA algorithm with consideration of QoT estimation inaccuracy, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 4, p. 290 –299, Abril 2011.
- [52] S. AZODOLMOLKY, J. PERELLÓ AND, M. ANGELOU, F. AGRAZ, L. VELASCO, S. SPADARO, Y. POINTURIER, A. FRANCESCON, C. SARADHI, P. KOKKINOS, E. VARVARI-

- GOS, S. AL ZAHR, M. GAGNAIRE, M. GUNKEL, D. KLONIDIS, I. TOMKOS, Experimental demonstration of an impairment aware network planning and operation tool for transparent/translucent optical networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 4, p. 439–448, Fevereiro 2011.
- [53] Y. POINTURIER, M. BRANDT-PEARCE, Routing and wavelength assignment incorporating the effects of crosstalk enhancement by fiber nonlinearity, In: **Proceedings of the 39th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)**, Baltimore, MD, USA, 2005, p. 212–216.
- [54] V. ANAGNOSTOPOULOS, C. T. POLITI, C. MATRAKIDIS, A. STAVDAS, Physical layer impairment aware wavelength routing algorithms based on analytically calculated constraints, *Optics Communications*, v. 270, p. 247–254, 2007.
- [55] J. MARTINS-FILHO, C. BASTOS-FILHO, E. ARANTES, S. OLIVEIRA, L. COELHO, J. DE OLIVEIRA, R. DANTE, E. FONTANA, F. NUNES, Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier saturation, In: **Proceedings of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**, v. 2, Sept. 2003, p. 919–923.
- [56] P. KULKARNI, A. TZANAKAKI, C. M. MACHUKA, I. TOMKOS, Benefits of q-factor based routing in WDM metro networks, In: **Proceedings of 31st European Conference on Optical Communication (ECOC)**, v. 4, Setembro 2005, p. 981–982.
- [57] A. SALEH, Transparent optical networking in backbone networks, In: **Optical Fiber Communication Conference (OFC)**, v. 3, 2000, p. 62–64.
- [58] M. FLAMMINI, A. MARCHETTI-SPACCAMELA, G. MONACO, L. MOSCARDELLI, S. ZAKS, On the complexity of the regenerator placement problem in optical networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 19, n. 2, p. 498–511, Abril 2011.
- [59] X. YANG, B. RAMAMURTHY, Sparse regeneration in a translucent WDM optical network, In: **Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering**, Janeiro 2001, p. 61–70.
- [60] Y. YE, T. CHENG, C. LU, Novel algorithm for upgrading of translucent optical networks, *Optics Express*, v. 11, n. 23, p. 3022–3033, 2003.

- [61] N. SAMBO, N. ANDRIOLLI, A. GIORGETTI, P. CASTOLDI, G. BOTTARI, Multiple path based regenerator placement algorithm in translucent optical networks, In: **11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**, Julho 2009, p. 1 –4.
- [62] Y. PENG, W. HU, W. SUN, X. WANG, Y. JIN, Impairment constraint multicasting in translucent WDM networks: architecture, network design and multicasting routing, *Photonic Network Communications*, v. 13, p. 93–102, 2007.
- [63] N. BARAKAT, A. LEON-GARCIA, An analytical model for predicting the locations and frequencies of 3r regenerations in all-optical wavelength-routed WDM networks, In: **IEEE International Conference on Communications (ICC)**, v. 5, 2002, p. 2812–2816.
- [64] Y. YE, T. CHAI, T. CHENG, C. LU, Algorithms for the design of WDM translucent optical networks, *Optics Express*, v. 11, n. 22, p. 2917–2926, 2003.
- [65] M. YOUSSEF, S. AL ZAHR, M. GAGNAIRE, Translucent network design from a CapEx/OpEx perspective, *Photonic Network Communications*, v. 22, p. 85–97, 2011.
- [66] G. XIAO, Y.-W. LEUNG, K.-W. HUNG, Two-stage cut saturation algorithm for designing all-optical networks, *IEEE Transactions on Communications*, v. 49, n. 6, p. 1102 –1115, Junho 2001.
- [67] R. DUTTA, G. N. ROUSKAS, A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks, *Optical Networks*, v. 1, p. 73–89, 2000.
- [68] K.-T. KO, K.-S. TANG, C.-Y. CHAN, K.-F. MAN, S. KWONG, Using genetic algorithms to design mesh networks, *Computer*, v. 30, n. 8, p. 56 –61, Agosto 1997.
- [69] J. BANNISTER, L. FRATTA, M. GERLA, Topological design of the wavelength-division optical network, In: **Proceedings of the Ninth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies (INFOCOM)**, Junho 1990, p. 1005 –1013 vol.3.
- [70] W. D. GROVER, J. DOUCETTE, Topological design of survivable mesh-based transport networks, In: **Annals of Operations Research**, 2001, p. 79–125.
- [71] H. LIU, F. A. TOBAGI, Physical topology design for all-optical networks, *Optical Switching and Networking*, v. 5, n. 4, p. 219 – 231, 2008.

- [72] R. M. MORAIS, C. PAVAN, A. N. PINTO, C. REQUEJO, Genetic algorithm for the topological design of survivable optical transport networks, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 1, p. 17–26, Janeiro 2011.
- [73] M. GERLA, L. KLEINROCK, On the topological design of distributed computer networks, *IEEE Transactions on Communications*, v. 25, n. 1, p. 48 – 60, Janeiro 1977.
- [74] R. BOORSTYN, H. FRANK, Large-scale network topological optimization, *IEEE Transactions on Communications*, v. 25, n. 1, p. 29 – 47, Janeiro 1977.
- [75] F. ALTIPARMAK, B. DENGIZ, A. E. SMITH, Optimal design of reliable computer networks: A comparison of metaheuristics, *Journal of Heuristics*, v. 9, p. 471–487, 2003.
- [76] N. BANERJEE, R. KUMAR, Multiobjective network design for realistic traffic models, In: **Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO)**, 2007, p. 1904–1911.
- [77] B. DENGIZ, F. ALTIPARMAK, A. SMITH, Local search genetic algorithm for optimal design of reliable networks, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 1, n. 3, p. 179 –188, Setembro 1997.
- [78] R. ELBAUM, M. SIDI, Topological design of local-area networks using genetic algorithms, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 4, n. 5, p. 766 –778, Outubro 1996.
- [79] A. KONAK, A. SMITH, A hybrid genetic algorithm approach for backbone design of communication networks, In: **Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC)**, v. 3, 1999, p. 1 – 3.
- [80] A. KUMAR, R. PATHAK, Y. GUPTA, Genetic-algorithm-based reliability optimization for computer network expansion, *IEEE Transactions on Reliability*, v. 44, n. 1, p. 63 –72, Março 1995.
- [81] H. SAYOUD, K. TAKAHASHI, B. VAILLANT, Designing communication network topologies using steady-state genetic algorithms, *IEEE Communications Letters*, v. 5, n. 3, p. 113 –115, mar 2001.
- [82] Y. XIN, G. ROUSKAS, H. PERROS, On the physical and logical topology design of large-scale optical networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 21, n. 4, p. 904 – 915, Abril 2003.

- [83] C. GUAN, V. CHAN, Efficient physical topologies for regular WDM networks, In: **Optical Fiber Communication Conference (OFC)**, v. 1, Fevereiro 2004, p. 437.
- [84] A. SRINIVASAN, R. PARTHIBAN, A heuristic algorithm for topological optimization of all-optical networks, In: **2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering**, v. 1, Abril 2009, p. 288 –292.
- [85] D. SAHA, U. K. CHAKRABORTY, An efficient link enhancement strategy for computer networks using genetic algorithm, *Computer Communications*, v. 20, n. 9, p. 798 – 803, 1997.
- [86] D. A. R. CHAVES, C. A. BASTOS-FILHO, H. A. PEREIRA, J. F. MARTINS-FILHO, SIMTON: A simulator for transparent optical networks, *Journal of Communication and Information Systems (JCIS)*, v. 25, n. 1, p. 1–10, 2010.
- [87] D. A. R. CHAVES, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, SIMTON: A simulator for transparent optical networks, In: **International Telecommunications Symposium (ITS)**, 2010.
- [88] M. D. DEITEL, P. J. DEITEL, **C++ Como programar**, 3, Ed. Bookman, 2001.
- [89] D. R. B. ARAUJO, Comparação de algoritmos de otimização multiobjetivo aplicados a projetos de redes ópticas, Dissertação, Universidade de Pernambuco, Abril 2011.
- [90] T. S. RAPPAPORT, **Wireless Communications**, 1^a ed. Prentice Hall, 1996.
- [91] X. YANG, L. SHEN, B. RAMAMURTHY, Survivable lightpath provisioning in WDM mesh networks under shared path protection and signal quality constraints, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 4, p. 1556–1567, Abril 2005.
- [92] N. ZULKIFLI, R. C. ALMEIDA-JR, K. M. GUILD, Efficient resource allocation of heterogeneous services in transparent optical networks, *Journal of Optical Networking*, v. 6, n. 12, p. 1349–1359, Dezembro 2007.
- [93] H. PEREIRA, R. CARVALHO, C. BASTOS-FILHO, J. MARTINS-FILHO, Impact of amplifier noise figure modeling in simulations of impairment-aware all-optical networks, *Photonic Network Communications*, v. 19, p. 110–120, 2010.
- [94] G. B. ARFKEN, H. J. WEBER, **Mathematical Methods For Physicists**, 6^a ed. Elsevier Academic Press, 2005.

- [95] M. SUBRAMANIAN, **Network Management: Principles and Practice**, 1^a ed. Addison Wesley, 2000.
- [96] P. C. BECKER, N. A. OLSSON, J. R. SIMPSON, **Erbium doped fiber amplifiers**, 1^a ed. Academic Press, 1999.
- [97] A. R. RAVINDRAM, **Operations Research Methodologies**. Taylor & Francis Group, 2009.
- [98] J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, H. A. PEREIRA, Applications of computational intelligence in optical networks, In: **13th International Conference on Transparent Optical Networks (IEEE ICTON)**, 2011, p. 1 –4.
- [99] A. P. ENGELBRECHT, **Fundamentals of computational swarm intelligence**. England: John Wiley and sons, 2005.
- [100] M. CLERC, J. KENNEDY, The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 1, p. 58–73, Fevereiro 2002.
- [101] D. BRATTON, J. KENNEDY, Defining a standard for particule swarm optimization, In: **Proceedings IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS)**, v. 1, 2007, p. 120–127.
- [102] R. C. DE FREITAS, Tese em preparação sob o título provisório: Otimização de redes ópticas de comunicação de alta capacidade, Tese, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Previsão de Defesa: 2012.
- [103] A. V. S. XAVIER, Um algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo para redes ópticas, Dissertação, Universidade de Pernambuco (UPE), 2011.
- [104] A. V. S. XAVIER, R. SILVA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, An adaptive-alternative routing algorithm for all-optical networks, In: **SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**, 2011.
- [105] J. F. MARTINS-FILHO, J. L. SANTANA, H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, Assessment of the power series routing algorithm in translucent, transparent and opaque optical networks, *Submetido à IEEE Communications Letters*, 2011.
- [106] C. A. COELLO-COELLO, G. B. LAMONT, D. A. V. VELDHUIZEN, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**, 2^a ed. Springer, 2007.

- [107] K. MAN, K. TANG, S. KWONG, Genetic algorithms: concepts and applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 43, n. 5, p. 519–534, Outubro 1996.
- [108] M. R. BUSSIECK, A. PRUESSNER, Mixed-integer nonlinear programming, GAMS Development Corporation, Relatório Técnico, 2003. [Online]. Disponível: <http://www.gamsworld.eu/minlp/siagopt.pdf>
- [109] D. R. B. ARAUJO, C. J. A. BASTOS-FILHO, E. A. BARBOZA, D. A. R. CHAVES, J. F. MARTINS-FILHO, A performance comparison of multi-objective optimization evolutionary algorithms for all-optical networks design, In: **Proc. IEEE Symp. Computational Intelligence in Multicriteria Decision-Making (MDCM)**, 2011, p. 89–96.
- [110] D. R. B. ARAUJO, E. A. BARBOZA, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, J. MARTINS-FILHO, An efficient multi-objective evolutionary optimizer to design all-optical networks considering physical impairments and capex, In: **11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)**, 2011, p. 76 – 81.
- [111] F. HERRERA, M. LOZANO, A. M. SÁNCHEZ, Hybrid crossover operators for real-coded genetic algorithms: an experimental study, *Soft Comput.* 9, v. 9, p. 280–298, 2005.
- [112] R. V. B. CARVALHO, Dissertação em preparação sob o título previsto: Estratégias para inserção de regeneradores em redes ópticas, Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Previsão de Defesa: 2013.