

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

RENAN VASCONCELOS BEZERRA CARVALHO

OTIMIZAÇÃO CONJUNTA DA
CAPACIDADE DOS ENLACES E
INSERÇÃO DE REGENERADORES EM
REDES ÓPTICAS

VIRTUS IMPAVIDA

RECIFE, JULHO DE 2012.

RENAN VASCONCELOS BEZERRA CARVALHO

**OTIMIZAÇÃO CONJUNTA DA
CAPACIDADE DOS ENLACES E
INSERÇÃO DE REGENERADORES EM
REDES ÓPTICAS**

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

ORIENTADOR: PROF. JOAQUIM FERREIRA MARTINS-FILHO, PHD.

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

Recife, Julho de 2012.



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

RENAN VASCONCELOS BEZERRA CARVALHO

TÍTULO

**“OTIMIZAÇÃO CONJUNTA DA CAPACIDADE DOS
ENLACES E INSERÇÃO DE REGENERADORES EM REDES ÓPTICAS”**

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE, CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO, POLI/UPE, RAUL CAMELO DE ANDRADE ALMEIDA JÚNIOR, DES/UFPE e JÚLIO CÉSAR RODRIGUES FERNANDES DE OLIVEIRA, CPqD, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **RENAN VASCONCELOS BEZERRA CARVALHO APROVADO.**

Recife, 13 de julho de 2012.

CECÍLIO JOSÉ LINS PIMENTEL
Coordenador do PPGEE

JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Orientador e Membro Titular Interno

**RAUL CAMELO DE ANDRADE ALMEIDA
JÚNIOR**
Membro Titular Externo

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

**JÚLIO CÉSAR RODRIGUES FERNANDES
DE OLIVEIRA**
Membro Titular Externo

*Dedico este trabalho
às duas mulheres da minha vida:
minha mãe Iêda e minha namorada Vivianne.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir a realização deste trabalho.

Ao Prof. Joaquim F. Martins Filho pela orientação, dedicação e paciência nos momentos necessários.

Ao Prof. Carmelo J. A. Bastos Filho pela dedicação, orientação e otimismo constante.

Ao Prof. Daniel A. R. Chaves pelas parcerias e ricas contribuições.

Ao Prof. Rodrigo C. Freitas pela amizade e oportunidade oferecida.

Ao Prof. Helder A. Pereira pela revisão do texto.

Ao aluno de doutorado Danilo R. B. Araújo e ao aluno de iniciação científica da UPE Rodrigo F. S. C. Oliveira pela ajuda na implementação dos algoritmos.

À minha família: minha mãe Iêda, meu pai Djalma e meu irmão Ruan pelo apoio oferecido.

À minha namorada Vivianne, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

Aos meus amigos Hercílio e Cristina por torcerem pelo meu sucesso.

Ao CNPq e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE pelo suporte financeiro necessários para a minha formação.

RENAN VASCONCELOS BEZERRA CARVALHO

Universidade Federal de Pernambuco

13 de Julho de 2012

Se você quiser ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo.

— **Ayrton Senna**

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

**OTIMIZAÇÃO CONJUNTA DA CAPACIDADE DOS
ENLACES E INSERÇÃO DE REGENERADORES EM
REDES ÓPTICAS**

Renan Vasconcelos Bezerra Carvalho

Julho/2012

Orientador: Prof. Joaquim Ferreira Martins-Filho, PhD.

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

Área de Concentração: Fotônica

Palavras-chaves: Redes ópticas, Capacidade dos enlaces, Inserção de regeneradores, Otimização multiobjetiva, Custo de capital.

Número de páginas: 98

Esta dissertação propõe a solução conjunta de dois problemas de planejamento de redes ópticas levando em consideração aspectos de custo e desempenho da rede. O primeiro é a inserção de regeneradores (RP) nos nós e o segundo é o dimensionamento da capacidade dos enlaces, ou seja, a definição da quantidade de comprimento de ondas (WP) disponibilizada em cada enlace. O tratamento conjunto dos dois problemas é chamado de problema de inserção de comprimentos de onda e de regeneradores (WRP). Duas propostas são sugeridas para a solução do problema de WRP. Elas utilizam o algoritmo evolucionário multiobjetivo SPEA2, que tem como metas de otimização a diminuição da probabilidade de bloqueio da rede, e a diminuição dos custos financeiro (CapEx) e operacional (OpEx). Por se tratarem de técnicas de otimização multiobjetiva, o resultado final consiste em um conjunto de redes que apresentam soluções de compromisso entre metas de otimização. São feitas várias análises dos resultados. Uma delas refere-se à restrição de inserir o mesmo número de comprimentos de onda em todos os enlaces da rede em comparação à abordagem sem restrição. Os resultados mostram que tal imposição onera o custo das redes e o dimensionamento individual de cada enlace é o indicado. Outra análise compara a robustez das técnicas segundo variações no modelo de CapEx. Para os cenários analisados, as duas propostas apresentam resultados semelhantes. Por fim, a convergência do algoritmo é verificada para o número de gerações utilizadas nas simulações.

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

**JOINT OPTIMIZATION OF LINK CAPACITY AND
REGENERATORS PLACEMENT IN OPTICAL
NETWORKS**

Renan Vasconcelos Bezerra Carvalho

July/2012

Supervisor: Prof. Joaquim Ferreira Martins-Filho, PhD.

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

Area of Concentration: Photonics

Keywords: Optical Networks, Links capacity, Regenerators placement.

Number of pages: 98

This dissertation proposes a joint approach for the solution of two design problems in optical networks taking into account performance and cost. The first is the regenerators placement (RP) in the nodes and the second is the design of the links capacity, i. e., to set the number of wavelength available in each link. This joint problem is called wavelengths and regenerators placement (WRP) problem. Two proposals are suggested for the solution of the WRP problem. They use the evolutionary multi-objective algorithm SPEA2, which search for solutions with low blocking probability and low cost (CapEx and OpEx). Since they are multi-objective optimization techniques, the final result is a set of networks that have trade-offs between optimization goals. Several analysis are performed, one of them refers to the restriction to insert the same number of wavelengths in all links of the network, compared to the approach without this restriction. The results show that such restriction increases the cost of networks and therefore the individual dimensioning of each link is indicated. Another analysis compares the robustness of the techniques to variations in the CapEx model. For the scenarios analyzed, the two proposals show similar results. Finally, the convergence of the algorithm is verified for the number of generations used in the simulations.

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Descrição	Significado
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>	Emissão espontânea amplificada
BER	<i>Bit Error Rate</i>	Taxa de erro por bit
DLE	<i>Dynamic Lightpath Establishment</i>	Estabelecimento dinâmico de caminho óptico
CAC	–	Controle de admissão de conexões
CapEx	<i>Capital Expenditure</i>	Despesa de capital
EA	<i>Evolutionary Algorithm</i>	Algoritmo evolucionário
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>	Amplificador à fibra dopada com Érbio
EPM	<i>Electronic Processing Module</i>	Módulo de processamento eletrônico
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>	Mistura de quatro ondas
FF	<i>First Fit</i>	Atribuição por lista ordenada
IA-RWA	<i>Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment</i>	Roteamento e atribuição de comprimento de onda considerando informação da camada física
LU	<i>Least Used</i>	Menos usado
MOEA	<i>Multi-objective Evolutionary Algorithm</i>	Algoritmo evolucionário multiobjetivo
MOP	<i>Multi-objective Optimization Problem</i>	Problema de otimização multiobjetiva
MPSQP	<i>Multiple Path Signal Quality Prediction</i>	Predição de qualidade de sinal de múltiplos caminhos
MORP	<i>Multi-objective Optimization for Regenerator Placement</i>	Otimização multiobjetiva para inserção de regeneradores
MOWRP	<i>Multi-objective Optimization for Wavelength and Regenerator Placement</i>	Otimização multiobjetiva para inserção de comprimentos de onda e regeneradores
MOWRP-3o	MOWRP 3 objectives	MOWRP com três objetivos
MOWRP-4o	MOWRP 4 objectives	MOWRP com quatro objetivos

Sigla	Descrição	Significado
MU	<i>Most Used</i>	Mais usado
NC&R	<i>Node Counter and Ranking</i>	Contador do nó e ordenação
NDF	<i>Nodal Degree First</i>	Grau do nó primeiro
NSGA-II	<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>	Algoritmo genético com classificação baseada em critérios de não dominância II
NT	–	Nó translúcido
NNUR	<i>Normalized Number of Unused Regenerators</i>	Número normalizado de regeneradores não utilizados
NNUW	<i>Normalized Number of Unused Wavelengths</i>	Número normalizado de comprimentos de onda não utilizados
O/E/O	Conversão óptico-eletró-óptica	Conversão do sinal óptico em elétrico e depois em óptico
OADM	<i>Optical Add/Drop Multiplexer</i>	Multiplexador óptico de adição e remoção de comprimentos de onda
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>	Terminal de linha óptico
OpEx	<i>Operational Expenditure</i>	Custo operacional
OTDM	<i>Optical Time Division Multiplexing</i>	Multiplexação óptica por divisão de tempo
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>	Relação sinal-ruído óptica
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i>	Comutador óptico
PLI	<i>Physical Layer Impairments</i>	Penalidades na camada física
PB	–	Probabilidade de bloqueio
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>	Dispersão por modo de polarização
PSR	Power Series Routing	Roteamento por série de potência
QoT	<i>Quality of Transmission</i>	Qualidade de transmissão
RA	<i>Regenerator Allocation</i>	Atribuição de regenerador
RCD	<i>Residual Chromatic Dispersion</i>	Dispersão cromática residual
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer</i>	Multiplexador óptico de adição e remoção de comprimentos de onda reconfigurável
RP	<i>Regenerator Placement</i>	Inserção de regenerador
RW	<i>Regeneration Weight</i>	Peso de regeneração
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>	Roteamento e atribuição de comprimento de onda
SBS	<i>Scattering Brillouin Stimulated</i>	Espalhamento Brillouin estimulado
SDF	<i>Self Designation Function</i>	Função de auto-designação
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>	Hierarquia digital síncrona

Sigla	Descrição	Significado
SIMTON	<i>Simulator for Transparent Optical Networks</i>	Simulador para redes ópticas transparentes
SLE	<i>Static Lightpath Establishment</i>	Estabelecimento de caminhos ópticos estáticos
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>	Relação sinal-ruído
SONET	<i>Synchronous Optical Networking</i>	Rede óptica síncrona
SOP	<i>Single Optimization Problem</i>	Problema de otimização de um objetivo
SPEA2	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2</i>	Segunda versão do algoritmo evolucionário força do pareto
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>	Auto-modulação de fase
SQP	<i>Signal Quality Prediction</i>	Predição da qualidade do sinal
SRS	<i>Scattering Raman Stimulated</i>	Espalhamento Raman estimulado
TQoT	<i>Triggered by unacceptable signal Quality of Transmission</i>	Desencadeado por qualidade de transmissão inaceitável de transmissão
TWC	<i>Triggered by the Wavelength Contention</i>	Desencadeado pela contenção de comprimento de onda
WA	<i>Wavelength Assignment</i>	Atribuição de comprimento de onda
WDM	<i>Wavelength Division-Multiplexing</i>	Multiplexação por divisão em comprimento de onda
WRN	<i>Wavelength-Routing Network</i>	Rede roteada por comprimento de onda
WRP	<i>Wavelength and Regenerator Placement</i>	Inserção de comprimento de onda e regenerador
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>	Modulação cruzada de fase

LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia	Descrição
α	Coefficiente de atenuação da fibra óptica
β	Custo relativo do regenerador em comparação ao custo do <i>transponder</i> (τ)
γ	Coefficiente não-linear da fibra
δ	Alargamento temporal percentual do pulso óptico
δ_{QoT}	Máximo alargamento temporal percentual do pulso óptico admitido como critério de qualidade de transmissão
$\Delta\lambda_{TX}$	Largura de linha do transmissor
Δt	Alargamento temporal do pulso óptico
Δt_{PMD}	Alargamento temporal do pulso óptico devido ao efeito de dispersão por modo de polarização
Δt_{RCD}	Alargamento temporal do pulso óptico devido ao efeito de dispersão cromática residual
ε	Fator de isolamento do comutador óptico
η'	Eficiência do efeito da mistura de quatro ondas
λ	Comprimento de onda
μ	Taxa média para a geração de requisição de chamadas
σ_i^k	Distância, no espaço de objetivos, do indivíduo i ao seu k -ésimo vizinho mais próximo
τ	Custo referente a um <i>transponder</i> que opera com uma taxa de 40 Gb/s e possui um alcance máximo de 750 km
A_1	Parâmetro de ajuste da figura de ruído dinâmica
A_2	Parâmetro de ajuste da figura de ruído dinâmica
B	Taxa de transmissão
B_o	Largura de banda a 3 dB do filtro óptico
C	Carga da rede
C_R	Custo financeiro devido aos regeneradores
C_T	Custo financeiro total
C_W	Custo financeiro devido aos comprimentos de onda

Simbologia	Descrição
d	Comprimento da fibra óptica
D	Fator de degenerescência, que pode ser igual a 3 ou 6 (caso degenerado ou não-degenerado), dependendo da combinação de frequências no FWM
D_{PMD}	Coefficiente de dispersão por modo de polarização
D_{RCD}	Coefficiente de dispersão residual cromática
$D_{\text{DCF}}^{\lambda_{\text{ref}}}$	Coefficiente de dispersão cromática da fibra compensadora de dispersão
$D_{\text{TF}}^{\lambda_{\text{ref}}}$	Coefficiente de dispersão cromática do comprimento de onda do caminho óptico considerado
$D(i)$	Medida de densidade para o indivíduo i no algoritmo SPEA2
F_0	Fator de ruído do amplificador óptico para baixos valores de potência óptica na entrada do amplificador a fibra dopada com Érbio
F_{Amp}	Fator de ruído dinâmico do amplificador
$F(i)$	Função aptidão do indivíduo i no algoritmo SPEA2
G_0	Ganho não-saturado do amplificador óptico
G_{Amp}	Ganho dinâmico linear do amplificador óptico
G_n	Grau do nó n
h	Constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34}$ Js)
H	Tempo médio de duração da chamada
L_{Dx}	Perda no demultiplexador
L_{Mx}	Perda no multiplexador
LN_{MAX}	Número máximo de saltos que um caminho óptico pode percorrer sem que o valor da sua BER seja comprometida
L_S	Distância máxima que um caminho óptico pode percorrer sem que o valor da sua BER seja comprometida
L_{Sx}	Perda no comutador óptico
$N_{\text{Amp}}(\lambda)$	Potência óptica do ruído inserido pelo amplificador óptico devido ao comprimento de onda λ
$\nu(\lambda)$	Frequência do sinal no comprimento de onda λ
N_{FWM}	Potência óptica de ruído total produzida pelo efeito da mistura de quatro ondas
N_{in}	Potência óptica de ruído na entrada do sistema
N_{Sw}	Potência óptica de ruído total produzida devido ao não-isolamento ideal do comutador óptico
N_x	Potência óptica de ruído no ponto x
OSNR_{in}	Relação sinal-ruído óptica na entrada do sistema
OSNR_{QoT}	Relação sinal-ruído óptica mínima adotada como critério de qualidade de transmissão
OSNR_x	Relação sinal-ruído óptica no ponto x em dB

Simbologia	Descrição
p	Variação mínima no valor das variáveis de decisão
P	População do algoritmo SPEA2
\bar{P}	Arquivo externo do algoritmo SPEA2
P_{ASE}	Potência óptica produzida pelo efeito de emissão espontânea estimulada
P_a^*	<i>Pareto Front</i>
P_C	Probabilidade de cruzamento
$P_{FWM}(\lambda)$	Potência óptica produzida pelo efeito da mistura de quatro ondas no comprimento de onda λ
$P_{ijk}(\lambda)$	Potência óptica gerada pela combinação de 3 frequências (f_i , f_j e f_k) devido ao efeito da mistura de quatro ondas incidente no comprimento de onda λ
P_{in}	Potência óptica do sinal na entrada do sistema
P_M	Probabilidade de mutação
P_n	Número de portas do OXC do nó n
P_{out}	Potência óptica do sinal na saída do sistema
P_{sat}	Potência de saturação na saída do amplificador
P_{out}	Potência óptica do sinal na saída do sistema
P_{sat}	Potência de saturação na saída do amplificador
$P_{Sw_j}(\lambda)$	Potência do sinal óptico na j -ésima porta do comutador óptico no comprimento de onda λ
P_x	Potência óptica do sinal no ponto x
$R(i)$	Valor bruto da função aptidão do indivíduo i no algoritmo SPEA2
R_n	Número de regeneradores no nó n
$S(i)$	Força do indivíduo i no algoritmo SPEA2
S_{DCF}	Inclinação da curva de dispersão da fibra óptica compensadora de dispersão
S_{TF}	Inclinação da curva de dispersão da fibra óptica de transmissão

LISTA DE FIGURAS

2.1	Fluxograma executado pelo SIMTON para o CAC transparente.	32
2.2	Arquitetura dos nós transparentes.	32
2.3	Arquitetura dos nós translúcidos.	33
2.4	Arquitetura dos enlaces ópticos.	34
4.1	Exemplo do conceito de dominância para um problema de minimização de dois objetivos.	55
4.2	Exemplo de Pareto Front para um conjunto de soluções.	56
4.3	Duas maneiras possíveis de implementar o elitismo.	56
4.4	Exemplo de atribuição de força para as soluções no SPEA2.	58
4.5	Exemplo do cálculo do valor bruto da função de aptidão para as soluções no SPEA2.	59
4.6	Exemplo da delimitação do hypervolume, considerando um ponto de referência W	60
4.7	Exemplo do cálculo da métrica Coverage Set.	61
5.1	Exemplo de uma solução e sua representação.	63
5.2	Diagrama de blocos do funcionamento do MOWRP-3o.	66
5.3	Diagrama de blocos do funcionamento do MOWRP-4o.	68
5.4	Topologia Finlândia utilizada nas simulações com as distância dos enlaces em km.	70
5.5	Pareto Front encontrado pelo: (a) MOWRP-3o e pelo (b) MOWRP-3o-R. O número de nós translúcidos estão representados por diferentes símbolos.	72
5.6	Pareto Front do MOWRP-3o e do MOWRP-3o-R para uma probabilidade de bloqueio máxima de 6%.	73
5.7	Configuração de rede encontrada pela solução: (a) solução A (MOWRP-3o com CapEx de 4482,97 m.u. e $TN = 6$) e (b) solução B (MOWRP-3o-R com CapEx de 4459,71 m.u. e $TN = 3$).	74
5.8	Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para a solução A e para a solução B.	75
5.9	Configuração de rede encontrada pela solução: (a) solução A (MOWRP-3o com CapEx de 4482,97 m.u. e $TN = 6$) e (b) solução C (MOWRP-3o-R com CapEx de 6398,07 m.u. e $TN = 4$).	75
5.10	Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para a solução A e para a solução C.	76

5.11	Procedimento para mapear as soluções do MOWRP-4o no espaço de objetivos do MOWRP-3o.	76
5.12	Pareto Front encontrado pelo: (a) MOWRP-3o e pelo (b) MOWRP-4o. O número de nós translúcidos estão representados por diferentes símbolos. . .	77
5.13	Pareto Front do MOWRP-3o e do MOWRP-4o para uma probabilidade de bloqueio máxima de 6%.	78
5.14	Configuração de rede encontrada pela solução: (a) solução A (MOWRP-3o com CapEx de 4482,97 m.u. e $TN = 6$) e (b) solução D (MOWRP-4o com CapEx de 4423.04 m.u. e $TN = 6$).	79
5.15	Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para as soluções A e D.	79
5.16	Pareto Front do MOWRP-3o considerando β igual a: (a) 1,4; (b) 3; (c) 6; (d) 7,5 e (e) 9. Os números indicam a quantidade de nós translúcidos da solução.	81
5.17	Pareto Front do MOWRP-4o considerando β igual a: (a) 1,4; (b) 3; (c) 6; (d) 7,5 e (e) 9. Os números indicam a quantidade de nós translúcidos da solução.	82
5.18	CapEx mínimo necessário para obter o desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, da rede opaca para diferentes valores de β	83
5.19	Paretos Fronts das gerações de número 10.000 e 20.000 para o MOWRP-4o referentes ao: (a) Experimento-1, (b) Experimento-2, (c) Experimento-3, (d) Experimento-4 e (e) Experimento-5.	84
5.20	Diagrama de caixa para os hypervolumes das gerações 10.000 e 20.000 dos cinco experimentos.	85
5.21	Média do hypervolume, considerando os cinco experimentos.	85
5.22	Diagrama de caixa para a métrica Coverage Set, das gerações 10.000 e 20.000, dos cinco experimentos do MOWRP-4o.	86

LISTA DE TABELAS

5.1	Resumo das equações utilizadas pelo MOWRP.	68
5.2	Parâmetros ópticos fixos de simulação.	69
5.3	Parâmetros do SPEA2 utilizados nas simulações.	70
5.4	Limites do espaço de busca do MOWRP utilizados nas simulações.	70
5.5	Características gerais do Pareto Front do MOWRP-3o e do MOWRP-3o-R.	72
5.6	Características da solução A (MOWRP-3o), da solução B e da solução C (MOWRP-3o-R).	73
5.7	Características gerais do Pareto Front do MOWRP-3o e do MOWRP-4o.	77
5.8	Características da solução A (MOWRP-3o) e da solução D (MOWRP-4o).	78
5.9	Valor do CapEx da rede opaca para diferentes valores de β	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização do assunto	19
1.2	Motivação	21
1.3	Objetivos e metodologia	21
1.4	Organização do texto	22
2	REDES ÓPTICAS	23
2.1	Breve histórico	23
2.2	Tipos de redes ópticas	24
2.3	Degradação do sinal óptico na camada física	25
2.4	Roteamento e atribuição de comprimento de onda	26
2.4.1	Roteamento	27
2.4.2	Atribuição de comprimentos de onda	29
2.4.3	RWA considerando a camada física	29
2.5	SIMTON – O simulador para redes ópticas transparentes	30
2.5.1	Geração de Tráfego	30
2.5.2	Probabilidade de bloqueio	31
2.5.3	Controle de admissão de conexões	31
2.6	Modelagem da camada física	31
3	INSERÇÃO E ATRIBUIÇÃO DE REGENERADORES EM REDES ÓPTICAS	39
3.1	Inserção de regeneradores	39
3.2	Atribuição de regeneradores	41
3.3	Adaptação do SIMTON para redes ópticas translúcidas	43
3.4	Considerações para projeto de redes ópticas translúcidas	47
4	ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJETIVOS	50
4.1	Algoritmos evolucionários	50
4.1.1	Funcionamento de um algoritmo evolucionário	51
4.1.2	Componentes de um algoritmo evolucionário	51
4.2	Otimização multiobjetivos	53
4.2.1	Conceito de dominância	54
4.2.2	Elitismo	55
4.3	SPEA2	57

4.4 Métricas de avaliação	59
4.4.1 <i>Hypervolume</i>	60
4.4.2 <i>Coverage Set</i>	61
5 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVA DA CAPACIDADE DOS ENLACES E INSERÇÃO DE REGENERADORES	62
5.1 Descrição do problema	62
5.1.1 Representação geral da solução	63
5.1.2 Modelo de custo financeiro utilizado	64
5.2 Propostas sugeridas	65
5.3 Configurações gerais das simulações	69
5.4 Restrição no número de comprimentos de onda nos enlaces	71
5.5 Independência do modelo de custo	76
5.5.1 Mudança no custo dos regeneradores	79
5.6 Convergência do algoritmo	83
6 CONCLUSÃO	87
6.1 Contribuições da Dissertação	88
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	89
REFERÊNCIAS	90
Apêndice A LISTA DE PUBLICAÇÕES	97
A.1 Artigo publicado em periódico	97
A.2 Artigos publicados em conferências	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente, o aumento da demanda de tráfego nos sistemas de telecomunicações é devido, principalmente, às aplicações na rede mundial de computadores (*Internet*). As taxas de transmissão e o número de usuários que têm acesso à rede mundial de computadores cresce diariamente. Tráfego de dados em tempo real, vídeo-conferências, comércio eletrônico e televisão de alta definição são exemplos de aplicações que requerem de uma alta taxa de transmissão de dados dos sistemas de telecomunicações [1–3].

As redes ópticas são formadas por nós que se comunicam entre si e são conectados por meio de enlaces de fibra óptica. Elas surgem como uma solução viável para atender as necessidades das aplicações apresentadas anteriormente. Isso é devido às seguintes características apresentadas pela fibra óptica: capacidade de transmissão de cerca de 100 Tb/s ou mais atualmente [4], baixa atenuação de sinal (0,2 dB/km) e baixo custo [2].

1.1 Contextualização do assunto

As redes ópticas, quanto à utilização de regeneradores, podem ser classificadas em três categorias: redes opacas, redes translúcidas ou redes transparentes (também chamadas de totalmente ópticas) [5].

As redes opacas possuem regeneradores que têm a capacidade de re-amplificar, re-formatar e re-temporizar o pulso óptico através de dispositivos eletrônicos (3R). Eles estão presentes em todos os nós da rede e utilizam a conversão entre os domínios óptico e elétrico (O/E/O) para realizar a recuperação dos sinais transmitidos [1, 3]. Para isso, o sinal passa pela conversão óptica-elétrica, é tratado no domínio eletrônico e em seguida é convertido

para o domínio óptico novamente através da conversão eletro-óptica [3].

O uso de regeneradores eletrônicos faz com que o sinal consiga se propagar por longas distâncias, pois ao longo do caminho o sinal é regenerado, o que evita o acúmulo de ruído e distorções. Porém, os equipamentos eletrônicos oneram o custo de implantação e manutenção da rede. Além disso, eles representam um gargalo nas transmissões, pois a operação desses dispositivos é específica em relação à taxa de bits, formato de modulação e código de linha [1, 6]. A atualização da rede opaca também é onerosa. Pois, se houver a necessidade de aumentar a taxa de transmissão e/ou inserir um novo formato de modulação, faz-se obrigatória a mudança de todos os regeneradores da rede.

As redes totalmente ópticas têm sido consideradas como uma alternativa confiável e econômica para atingir altas taxas de transmissão com baixo custo. Nessas redes, o sinal permanece no domínio óptico entre os nós origem e destino, ou seja, o sinal se propaga ao longo do núcleo da rede sem qualquer conversão O/E/O [7]. Consequentemente, uma mudança na formatação utilizada não implicaria na troca de dispositivos [1, 6]. No entanto, o sinal propagado sofre acúmulo de ruídos ao longo da rota. Logo, o alcance obtido pelo sinal óptico nessa rede é inferior ao obtido na rede opaca [5].

As redes translúcidas possuem um conjunto limitado de regeneradores 3R e tentam balancear o uso desses dispositivos para obter uma melhor relação de custo empregado e desempenho dessas redes [3, 8]. Um nó da rede que possui dispositivo de regeneração é chamado de nó translúcido (NT).

A implantação de redes ópticas translúcidas é uma alternativa entre as redes opacas e totalmente ópticas quando são considerados o compromisso entre o desempenho da rede, o custo de capital (*CapEx - Capital Expenditure*) aplicado e o custo operacional (*OpEx - Operational Expenditure*) [8]. Seu desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, pode ser igual ao das redes opacas se os regeneradores forem instalados e utilizados de maneira eficiente [3, 8]. Existem duas principais estratégias para projetar redes translúcidas: ilhas de transparência e regeneração esparsa [8].

As ilhas de transparência são compostas por vários subdomínios transparentes. Os nós em uma ilha são transparentes e os recursos de regeneração são fornecidos apenas nas fronteiras que delimitam as ilhas [8]. Portanto, as conexões que ocorrem dentro de uma ilha são transparentes, enquanto que as conexões entre nós de diferentes ilhas são translúcidas [8], ou seja, utilizam regeneradores.

A regeneração esparsa distribui de forma estratégica os regeneradores ao longo dos nós da rede [3]. Ela pode alcançar um melhor desempenho com menor número de NTs na

rede, pois não tem a necessidade de delimitar ilhas de transparência. Para utilizar a estratégia de regeneração esparsa, é preciso definir quais nós devem ser equipados com capacidade de regeneração. Este problema é conhecido como inserção de regenerador (RP - *Regenerator Placement*) [3].

1.2 Motivação

A definição conjunta do número de comprimentos de onda nos enlaces e do número de regeneradores nos nós é importante para o projeto de redes ópticas translúcidas. Pois, a quantidade de comprimentos de onda presente nos enlaces conectados a um determinado nó possui uma correlação com o número de regeneradores disponíveis. Isso ocorre uma vez que a conversão de comprimento de onda pode ser realizada utilizando os regeneradores 3R [3, 8]. Logo, a restrição de continuidade de comprimento de onda é afetada pela presença de regeneradores nos nós.

Portanto, ao incluir a capacidade dos enlaces ao problema de RP, um novo problema pode ser definido. Esse é denominado de inserção de comprimento de onda e de regenerador (WRP - *Wavelength and Regenerator Placement*). Nesta dissertação são propostos algoritmos de WRP para redes ópticas. A proposta apresentada nessa dissertação não é restrita apenas às redes translúcidas. Isso se deve ao fato de o algoritmo estar apto a oferecer soluções sem regeneradores. Essas se referem aos casos de redes ópticas transparentes que podem apresentar diferentes números de comprimentos de onda em seus enlaces.

Uma técnica de inteligência computacional é utilizada no processo de otimização. Quando esse processo termina, é obtido um conjunto de soluções de compromisso entre as metas que se deseja otimizar. Resta ao projetista de rede escolher a solução de sua preferência. As metas de otimização escolhidas para essa dissertação estão relacionadas a questões de desempenho, CapEx e OpEx.

1.3 Objetivos e metodologia

Esta dissertação possui os seguintes objetivos:

- ▷ Aplicar uma técnica de otimização multiobjetivos para resolver o problema de WRP;
- ▷ Comparar diferentes variações do conjunto de objetivos (metas de otimização) e dessa forma encontrar a configuração que produza melhor resultado;
- ▷ Avaliar o impacto da restrição do número de comprimentos de onda nos enlaces da rede;

- ▷ Analisar a robustez do algoritmo quando ocorre mudança no CapEx dos dispositivos após o processo de otimização.

Para a solução do WRP, são seguidas as seguintes etapas:

- ▷ Escolha da técnica de otimização apropriada;
- ▷ Representação do problema de WRP de maneira eficiente;
- ▷ Verificação da convergência do processo evolutivo;
- ▷ Análise e discussão dos resultados.

Portanto, é pretendido verificar se considerar o mesmo número de comprimentos de onda nos enlaces impacta na qualidade das soluções. Outro objetivo consiste encontrar uma configuração de metas de otimização que demonstre ser eficiente. Como consequência, as técnicas devem propor uma, ou mais, rede translúcida que obtenha desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, equivalente ao da rede opaca e com menor custo. Uma questão importante é que a técnica deve se manter robusta às variações na função que calcula o CapEx, de tal forma que o projetista não seja forçado a realizar o processo de otimização novamente caso o modelo de custo seja alterado.

1.4 Organização do texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- ▷ Capítulo 2: apresenta conceitos fundamentais das redes ópticas, descreve a ferramenta computacional utilizada para a realização das simulações e o modelo utilizado para o cálculo das penalidades que são inseridas na camada física. O leitor experiente em redes ópticas pode dispensar a sua leitura;
- ▷ Capítulo 3: aborda o projeto de redes ópticas translúcidas, com destaque aos problemas de colocação e atribuição de regeneradores. Indicado para o leitor que não possui experiência em redes ópticas translúcidas;
- ▷ Capítulo 4: descreve o problema de otimização que envolve mais de um objetivo e a técnica utilizada nessa dissertação para a solução do problema de WRP. Esse capítulo é indicado ao leitor iniciante em otimização multiobjetivos;
- ▷ Capítulo 5: define o problema de WRP, apresenta as propostas para a solução desse, descreve e discute os resultados obtidos;
- ▷ Capítulo 6: conclui o trabalho e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REDES ÓPTICAS

O principal objetivo deste capítulo é descrever as características importantes das redes ópticas relativas ao tema desta dissertação. Para isso, um breve histórico é apresentado na seção 2.1. Os tipos de redes ópticas são apresentados na seção 2.2. As formas de degradação do sinal na camada física são descritas na seção 2.3. O problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda é discutido na seção 2.4. O simulador para redes ópticas transparentes (SIMTON - *Simulator for Transparent Optical Networks*) é descrito na seção 2.5. Por fim, a seção 2.6 explica o modelo analítico utilizado na avaliação da degradação do sinal óptico na camada física.

2.1 Breve histórico

As redes ópticas podem ser classificadas em duas gerações [1]. Na primeira, a fibra óptica substituiu os cabos de cobre por fornecer menor taxa de erro por bit (BER - *Bit Error Rate*), maior capacidade de transmissão e ser menos susceptível a ruídos eletromagnéticos. O meio óptico era utilizado apenas para a transmissão e todo o processamento do sinal era realizado por equipamentos eletrônicos presentes em todos os nós da rede. Logo, as redes ópticas da primeira geração eram opacas [1].

À medida que a taxa de transmissão aumenta, o processamento do sinal por meio de equipamentos eletrônicos torna-se mais complexo. Essa limitação foi uma das principais motivações para o surgimento das redes ópticas da segunda geração. As redes passaram a ser roteadas por comprimento de onda (WRN - *Wavelength-Routing Network*). Essas redes fornecem um caminho óptico (*lightpath*), que é uma conexão entre os nós fonte e destino

realizada por meio de um comprimento de onda disponível em cada enlace da rota. Esse pode ser o mesmo para toda a rota ou variar em determinados enlaces [1].

Nas redes ópticas de segunda geração, algumas operações de roteamento e comutação já são realizadas no domínio óptico. Os elementos que permitiram esses avanços foram os terminais de linha ópticos (OLT - *Optical Line Terminal*), os multiplexadores ópticos de adição e remoção de comprimentos de onda (OADM - *Optical Add/Drop Multiplexer*) e os comutadores ópticos (OXC - *Optical Cross-Connect*) [1].

Os multiplexadores ópticos de adição e remoção de comprimentos de onda reconfiguráveis (ROADM - *Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*) possuem a capacidade de adicionar e remover comprimentos de onda desejados de forma dinâmica sem ter que planejar anteriormente a topologia lógica da rede, o que não ocorre nos OADMs. Por esses motivos, os ROADMs se têm se tornado fundamentais para redes regionais e metropolitanas [1, 9].

Além dos dispositivos anteriormente citados, o desenvolvimento de amplificadores ópticos, principalmente do amplificador à fibra dopada com Érbio (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*), viabilizou a operação das redes totalmente ópticas. Uma grande vantagem do EDFA é a capacidade de amplificar vários comprimentos de onda simultaneamente [1, 10]. Isso possibilitou a utilização de sistemas de multiplexação por divisão em comprimento de onda (WDM - *Wavelength Division-Multiplexing*).

A multiplexação permite uma redução no número de fibras ópticas utilizadas em um sistema de comunicação, gerando, conseqüentemente, uma economia financeira na implementação de uma rede óptica [1]. O sistema WDM permite que vários canais (comprimentos de onda) trafeguem ao longo de uma única fibra óptica. Cada um deles é responsável por transmitir informação de um ponto a outro.

2.2 Tipos de redes ópticas

Três diferentes tipos de redes podem ser encontrados dentro de uma arquitetura de rede. São eles [1]: redes de longo alcance, redes metropolitanas e redes de acesso.

As redes de longo alcance são responsáveis por conectar diferentes cidades, ou regiões. As distâncias entre os clientes dessas redes são geralmente centenas de quilômetros, como na Europa, ou de milhares de quilômetros, como nos Estados Unidos, por exemplo. Geralmente apresentam nós com pouca conectividade.

As redes metropolitanas atendem a uma cidade ou região. Os enlaces dessas redes

apresentam, tipicamente, distâncias de dezenas de quilômetros. São mais densas e possuem maior conectividade do que as redes de longo alcance.

As redes de acesso alcançam os usuários localizados em escritórios ou casas. Possuem extensões de poucos quilômetros e o tráfego dessas redes são concentrados em um nó da rede metropolitana.

2.3 Degradação do sinal óptico na camada física

O sinal óptico sofre degradação ao longo de sua propagação, que pode ser imposta tanto pelo meio de transmissão, quanto pelos dispositivos pertencentes à rede [11]. As principais penalidades sofridas pelo sinal transmitido são: atenuação, ruído, interferência e dispersão. As penalidades físicas impostas ao sinal propagante devidas aos dispositivos são descritas a seguir [11]:

Transmissor óptico: gera ruído. Para um laser, o ruído se refere à potência óptica produzida devido ao decaimento espontâneo e à geração de fótons incoerentes no processo de geração dos pulsos ópticos [12].

Amplificador óptico EDFA: adiciona o ruído de emissão espontânea amplificada (ASE - *Amplified Spontaneous Emission*), onde os fótons incoerentes em relação ao sinal são amplificados no dispositivo [13, 14]. Apresenta também o efeito de saturação de ganho pelo qual o ganho diminui com o aumento da potência de entrada, a partir de um determinado valor. A saturação de ganho, que é uma característica do amplificador, depende do valor da potência óptica de bombeio e da potência de entrada no dispositivo [1, 13].

Comutador, multiplexador e demultiplexador ópticos: inserem perdas, que são inerentes aos dispositivos e, além disso, podem gerar interferências (*crossstalk*) nos sinais ópticos propagantes. Estas podem incidir no mesmo comprimento de onda do sinal (intra canal) em um comprimento de onda diferente do sinal (inter canal) [1].

Fibra óptica: os sinais sofrem penalidades devido a dois tipos de efeitos: os lineares e os não-lineares. Os efeitos lineares correspondem à atenuação e à dispersão do sinal que causam uma perda de potência e um alargamento temporal do pulso óptico, respectivamente [10]. Os efeitos não-lineares ocorrem devido à dependência não-linear do índice de refração da fibra com a intensidade do sinal propagante. Em sistemas WDM, tais efeitos podem se tornar limitantes na propagação dos sinais. Dentre estes efeitos estão: a auto-modulação de fase (SPM - *Self-Phase Modulation*), a modulação de fase cruzada (XPM - *Cross-Phase Modulation*), a mistura de quatro ondas (FWM - *Four Wave*

Mixing), o espalhamento Raman estimulado (SRS - *Scattering Raman Stimulated*) e o espalhamento Brillouin estimulado (SBS - *Scattering Brillouin Stimulated*) [10, 15, 16].

Fotodetector: durante a detecção do sinal, os ruídos balístico e térmico degradam a relação sinal-ruído do sinal (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*). O primeiro tem origem na geração aleatória dos elétrons que compõem a corrente elétrica do sinal detectado. Portanto, mesmo que uma potência óptica constante incida na entrada do fotodetector, a corrente elétrica produzida apresentará flutuações em torno de um valor constante [14]. O segundo tem origem no resistor de carga presente no circuito de detecção, de modo que é gerado um ruído devido ao movimento aleatório dos elétrons devido à temperatura [14].

2.4 Roteamento e atribuição de comprimento de onda

Nas WRNs, a comunicação entre usuários da rede (nós) é realizada através de caminhos ópticos. Cada caminho óptico formado por uma rota associada a um, ou mais, comprimentos de onda (Seção 2.1). O caminho óptico será utilizado para realizar a transferência de dados entre os usuários. Se não houver conversores na rede, a continuidade de comprimento de onda deverá ser mantida em todo o caminho óptico [1].

Dado um conjunto de conexões, o problema de estabelecimento de caminhos ópticos por roteamento e atribuição de um comprimento de onda para cada conexão é chamado de problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*) [17]. Existem algoritmos de RWA para tráfegos estático e dinâmico [18].

Com o tráfego estático, todo o conjunto de conexões é conhecido antecipadamente. Dessa forma, o problema consiste em estabelecer os caminhos ópticos para estas conexões minimizando os recursos de rede, tais como o número de comprimentos de onda ou o número de fibras na rede. Alternativamente, pode-se estabelecer o número máximo possível de conexões na rede para um determinado número fixo de comprimentos de onda [17]. Esse caso é denominado de estabelecimento de caminhos ópticos estáticos (SLE - *Static Lightpath Establishment*).

Nesta dissertação, um pedido de conexão segue um processo de Poisson: o intervalo de tempo entre os pedidos é exponencialmente distribuído. Além disso, a duração de cada conexão também segue uma distribuição exponencial. Logo, essa situação se refere a um problema de RWA dinâmico. Então, um caminho óptico é estabelecido e desconectado dinamicamente após o fim do tempo de duração da conexão. Portanto, as decisões do RWA

devem ser feitas rapidamente quando um pedido de conexão chega à rede. O principal objetivo de um problema RWA dinâmico é encontrar uma rota e escolher um comprimento de onda que maximiza a probabilidade de estabelecimento de uma solicitação de conexão. Além disso, deve-se minimizar a probabilidade de bloqueio de conexões futuras [18]. Esse problema é denominado de estabelecimento dinâmico de caminho óptico (DLE - *Dynamic Lightpath Establishment*) [17].

O RWA é normalmente separado em duas etapas: roteamento e atribuição de comprimento de onda. Isso é devido ao fato de que a solução de um problema difícil pode ser obtida de maneira mais fácil por meio da solução de dois problemas mais simples [17].

A sub-seção 2.4.1 descreve o problema de seleção de rota (roteamento). A sub-seção 2.4.2 aborda a atribuição de comprimento de onda. A sub-seção 2.4.3 descreve a solução do problema de RWA que considera alguma informação das penalidades da camada física.

2.4.1 Roteamento

A meta do algoritmo de roteamento é determinar uma rota formada por uma sequência ordenada de enlaces entre os nós da rede que desejam estabelecer uma conexão. O roteamento pode ser solucionado representando a topologia da rede por um grafo $G(V, E)$, em que V representa o conjunto de vértices (nós da rede) e E o conjunto de arestas (enlaces). A cada enlace $(s, d) \in E$, é atribuída uma função w_{sd} que indica o custo da utilização desse [19]. O algoritmo proposto por Dijkstra pode ser utilizado para encontrar o caminho de menor custo [17, 19]. Diferentes funções de custo podem ser utilizadas para ponderar os enlaces da rede. Alguns exemplos são: distância física, número de comprimentos de onda disponíveis, quantidade de saltos (todos os enlaces da rede possuem custo unitário), ou ainda funções custo que fazem combinações das anteriores [19]. Quatro diferentes abordagens de roteamento são possíveis: fixo, fixo-alternativo, adaptativo [17] e adaptativo-alternativo [20].

O **roteamento fixo** consiste em determinar para cada par de nós fonte-destino uma rota fixa [17]. Assim, antes de a rede entrar em operação uma tabela de roteamento é montada e a cada novo pedido de conexão essa é consultada. A desvantagem do roteamento fixo consiste em não utilizar de forma eficiente os recursos da rede, como os comprimentos de onda por exemplo. Em situações de DLE, pode ocorrer um elevado bloqueio devido à falta de comprimentos de onda disponíveis ao longo das rotas mais usadas. Além disso, o roteamento fixo não é capaz de tratar falhas. Isso significa que se ocorrer uma falha, um ou mais enlaces deixam de funcionar devido à inexistência de uma rota alternativa na tabela de

roteamento [17].

O **roteamento fixo-alternativo** é uma abordagem que considera uma lista ordenada de rotas na tabela de roteamento dos pares fonte-destino. A primeira rota (rota primária) da lista pode ser a de menor distância, a próxima a de segunda menor distância e assim sucessivamente. Normalmente, as rotas alternativas não compartilham um enlace sequer com a rota primária (rotas disjuntas) [17].

Quando um pedido de conexão chega, o nó fonte tenta estabelecer a conexão em cada uma das rotas da tabela de roteamento em sequência, até que uma rota com um comprimento de onda disponível seja encontrada. Se nenhuma rota disponível for encontrada a partir da lista de rotas alternativas, a solicitação de conexão é bloqueada [17]. Por possuir rotas alternativas disjuntas em relação à rota principal, o roteamento fixo alternativo possui alguma tolerância a falha. Ele também, normalmente, reduz o bloqueio em relação ao roteamento fixo, pois há mais opções de rotas quando ocorre indisponibilidade de comprimentos de onda na rota primária [17].

No **roteamento adaptativo**, a rota é escolhida de forma dinâmica, dependendo do estado da rede. Esse é determinado pelo conjunto de todas as conexões que estão ativas na rede. Quando uma conexão é solicitada, o caminho de menor custo entre o nó de origem e o nó destino é determinado. Logo, esse esquema requer que protocolos de gestão e de controle usem informação atualizada no instante de determinação das rotas da tabela de roteamento [17].

Uma vantagem do roteamento adaptativo é ter o potencial de alcançar níveis de bloqueio de solicitação de conexões inferiores aos que são obtidos pelos esquemas de roteamentos fixo e fixo-alternativo [17]. Isso depende da utilização de métricas adequadas no cálculo da função custo. Funções custo que consideram a disponibilidade atual de comprimentos de onda nos enlaces são exemplos de roteamento adaptativo [19].

No **roteamento adaptativo-alternativo**, assim como ocorre no roteamento adaptativo, as rotas são escolhidas dinamicamente, considerando o estado atual da rede. Além disso, essa abordagem possui as características dos algoritmos de roteamento fixo-alternativo ao determinar um conjunto de rotas com menor custo para atender cada requisição de conexão [20].

O algoritmo proposto por Xavier e colaboradores [21] encontra uma quantidade pré-determinada de rotas utilizando o roteamento pos série de potências (PSR - *Power Series Routing*) [22]. Em seguida, uma política que leva em consideração informações sobre a alocação dos comprimentos de onda nos enlaces da rede é utilizada para selecionar uma das

rotas encontradas [20].

2.4.2 Atribuição de comprimentos de onda

Uma vez estabelecida a rota entre o par de nós fonte-destino, que solicitaram uma conexão, é necessário atribuir um comprimento de onda entre os vários que estão presentes nos enlaces de uma rede que utiliza a tecnologia WDM.

Para solucionar a atribuição de comprimento de onda (WA - *Wavelength Assignment*) vários algoritmos foram propostos. Alguns deles são [17]: escolha aleatória, primeiro da lista (FF - *First Fit*), menos usado (LU - *Least Used*) e mais usado (MU - *Most Used*).

O algoritmo de escolha aleatória procura por todos os comprimentos de onda disponíveis na rota e escolhe um aleatoriamente. Geralmente seguem uma distribuição de probabilidade uniforme [17, 18].

No algoritmo FF, todos os comprimentos de onda são enumerados. A técnica procura por comprimentos de onda disponíveis na rota seguindo a ordem crescente de numeração. O primeiro que estiver disponível é selecionado para o estabelecimento do caminho óptico [17, 18]. O objetivo do FF é concentrar o uso dos comprimentos de onda que estão no início da lista, de modo que os caminhos mais longos possuam maior possibilidade de serem aceitos. Isso é devido ao fato de os comprimentos de onda que se encontram no final da lista tenderem a estar disponíveis. A probabilidade de bloqueio alcançada pelo FF é inferior à alcançada pelo algoritmo de escolha aleatória [17].

O algoritmo LU seleciona o comprimento de onda que é menos usado em toda a rede e está disponível ao longo da rota escolhida. Dessa forma, o LU tenta balancear a carga entre os comprimentos de onda. Assim, as conexões que possuem rotas mais longas ficam comprometidas. A reserva que é conseguida com o FF não ocorre no LU. Seu desempenho é inferior ao de escolha aleatória [17].

O algoritmo MU é o oposto do LU. Ou seja, ele busca atribuir o comprimento de onda que é o mais utilizado na rede e está disponível ao longo da rota selecionada, no momento em que o pedido de conexão tenta ser estabelecido. Seu desempenho é superior ao do algoritmo FF, pois consegue realizar melhor a reserva de comprimentos de onda [17].

2.4.3 RWA considerando a camada física

Algoritmos que consideram alguma informação da camada física na solução do problema de RWA (IA-RWA - *Impairment Aware RWA*) também foram propostos na literatura [22–26]. O principal objetivo deles é minimizar a probabilidade de bloqueio total da

rede encontrando rotas que reduzam o impacto do acúmulo de penalidades na camada física (PLI - *Physical Layer Impairments*) [26,27].

Apesar dos algoritmos de IA-RWA superarem os algoritmos de RWA que não consideram PLI, o uso destes normalmente implica em uma maior complexidade computacional [26,27]. Isso se deve ao fato de o algoritmo de IA-RWA avaliar em tempo real a degradação gerada por PLI e essas avaliações envolverem formulações relativamente complexas [22]. Portanto, em troca de um melhor desempenho é necessário empregar mais esforço computacional [27].

2.5 SIMTON – O simulador para redes ópticas transparentes

A ferramenta utilizada para obter o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio das redes ópticas é descrita nesta seção. Trata-se do simulador para redes ópticas transparentes (SIMTON - *Simulator for Transparent Optical Networks*) [28], o qual foi escrito em linguagem C++ e desenvolvido no Laboratório de Redes Ópticas, em colaboração entre a UFPE e a UPE. O SIMTON permite que o usuário ajuste parâmetros de dispositivos ópticos, bem como selecione algoritmos de RWA.

2.5.1 Geração de Tráfego

O SIMTON utiliza a abordagem DLE [17] para a geração de requisições. Para cada simulação de conexão, dois nós da rede são sorteados seguindo uma função densidade de probabilidade uniforme. Logo, todos os nós da rede são equiprováveis de serem selecionados. Os dois nós sorteados são designados como nós de origem e de destino da conexão solicitada [28].

O processo de geração de pedidos de conexão segue um processo de Poisson: os intervalos de tempo entre elas são exponencialmente distribuídos com média $1/\mu$. A duração de cada conexão também segue uma distribuição exponencial com valor médio igual a H . Com esses dois parâmetros, a carga da rede (C) pode ser calculada como [29]:

$$C = \mu H, \quad (2.1)$$

em que μ é a taxa média para a geração de requisição de conexão e H é o tempo médio de duração da conexão. A carga da rede (C) é dada em Erlang.

2.5.2 Probabilidade de bloqueio

A probabilidade de bloqueio (PB) estima a quantidade relativa de conexões que não foram aceitas pela rede. Uma conexão pode ser bloqueada pela falta de recursos para estabelecê-la ou pela qualidade insatisfatória do sinal para o caminho óptico encontrado [28]. A probabilidade de bloqueio é estimada usando a seguinte Expressão:

$$PB = \frac{C_{\text{Bloqueadas}}}{C_{\text{Bloqueadas}} + C_{\text{Aceitas}}}, \quad (2.2)$$

onde PB é a probabilidade de bloqueio total das conexões, $C_{\text{Bloqueadas}}$ é o número de conexões bloqueadas e C_{Aceitas} é o número total de conexões aceitas.

O SIMTON oferece ao final da simulação um arquivo de texto que informa a distância média percorrida das conexões e a probabilidade de bloqueio total das conexões. Essa é composta por três parcelas que são os valores referentes aos bloqueios por falta de comprimento de onda na rota selecionada, alargamento temporal do pulso óptico acima do limiar de aceitação e OSNR inferior ao nível mínimo requerido.

2.5.3 Controle de admissão de conexões

Quando uma solicitação de conexão chega ao plano de controle da rede, esse deve decidir se essa pode ser estabelecida ou não. O primeiro passo é solucionar o problema de RWA, conforme descrito na seção 2.4. A resposta enviada pelo módulo de RWA é enviada ao controle de admissão de conexões (CAC), que decide se a requisição de chamada atende aos requisitos mínimos de QoT para ser atendida ou não [28].

A figura 2.1 [28] ilustra o fluxograma realizado pelo SIMTON para controlar a simulação de uma rede transparente. A primeira fase consiste em o módulo de RWA encontrar um caminho óptico candidato para a conexão. Se não houver, a chamada é bloqueada. Senão, o CAC avalia a qualidade da transmissão através do modelo descrito na seção 2.6. Se o sinal atender às exigências mínimas de qualidade, a conexão é estabelecida. Senão, a chamada é bloqueada. O processo se repete até que o número desejado de conexões seja alcançado. Uma conexão aceita resulta no estabelecimento de uma conexão bidirecional comutada por circuito em duas fibras diferentes entre o par fonte-destino selecionado [28].

2.6 Modelagem da camada física

A figura 2.2 ilustra a configuração de um nó transparente utilizado em uma rede óptica e é similar à utilizada em [5]. Nela são mostrados: multiplexadores (Mux), demulti-

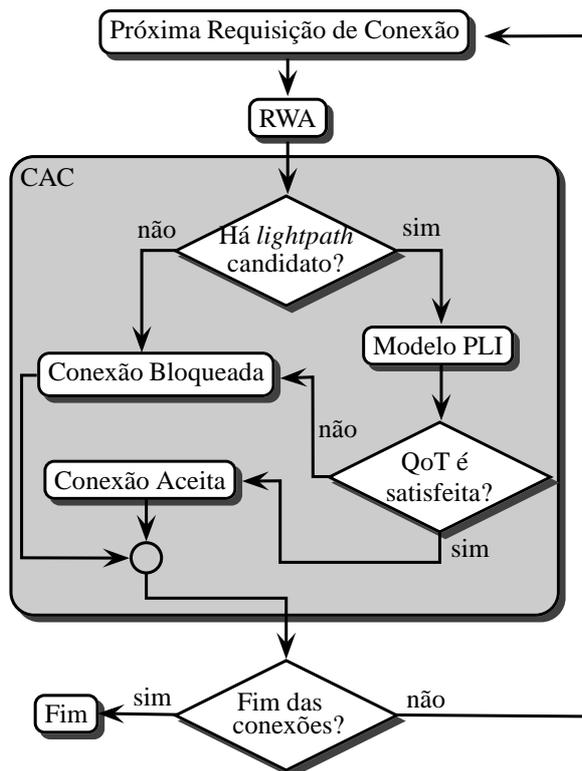


Figura 2.1: Fluxograma executado pelo SIMTON para o CAC transparente.

plexadores (Demux), comutadores ópticos, transmissores ópticos (Tx) e receptores ópticos (Rx). Nesta arquitetura, um sinal que chega ao comutador por uma fibra de entrada, em um comprimento de onda λ_i , só pode sair por uma fibra de saída no mesmo comprimento de onda λ_i . Assim, existe um comutador óptico separado para cada comprimento de onda.

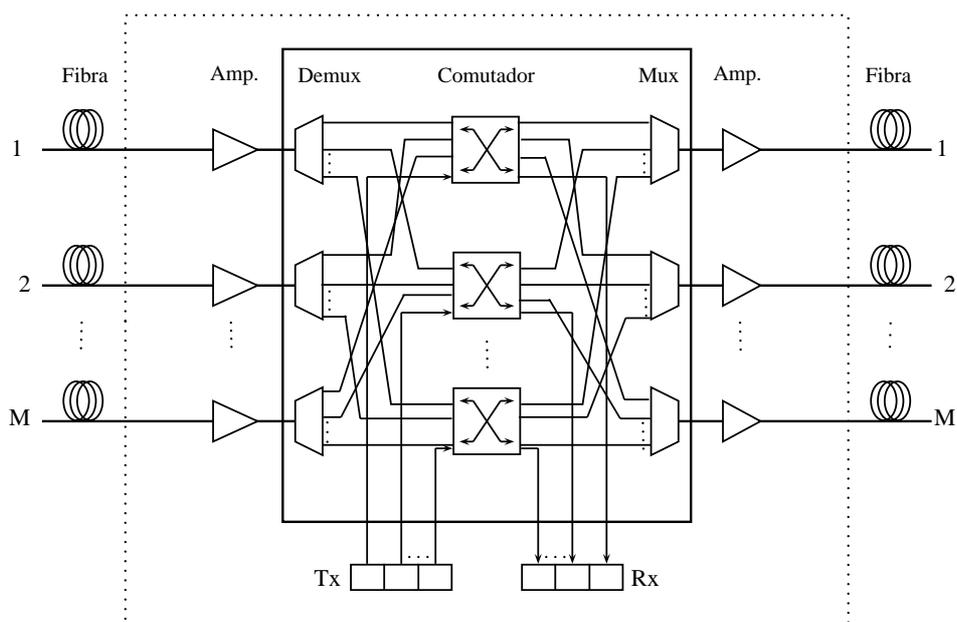


Figura 2.2: Arquitetura dos nós transparentes.

Se o nó possuir capacidade de regeneração eletrônica, sua configuração pode ser representada de acordo com a figura 2.3. Essa configuração é semelhante à apresentada em [3]. Nela há regeneradores 3R capazes de realizar a regeneração do sinal com conversão de comprimento de onda, se assim for possível e desejado. O regenerador consiste em um par transmissor e receptor, referentes a T_r e R_r na figura 2.3, e um módulo de processamento eletrônico (EPM - *Electronic Processing Module*). Se o caminho óptico estiver no nó origem, o sinal entra na fibra utilizando o sentido ilustrado por T_a . Se estiver no nó destino o sinal segue o sentido ilustrado por R_a [3].

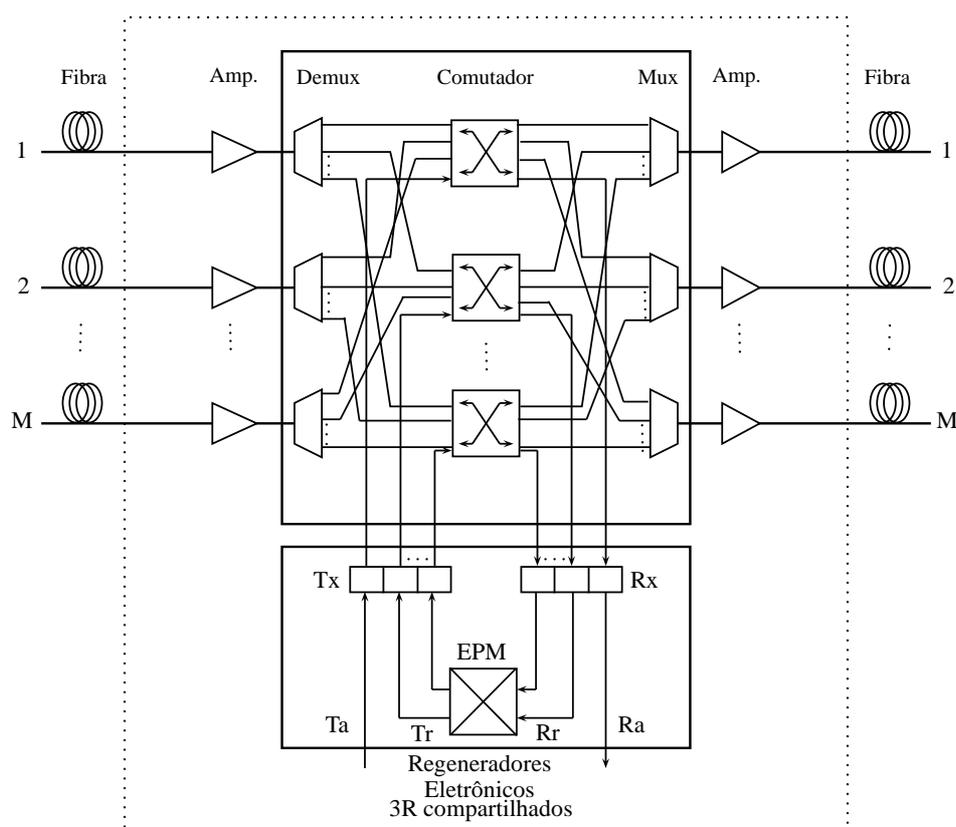


Figura 2.3: Arquitetura dos nós translúcidos.

A arquitetura do enlace considerado neste trabalho é mostrada na figura 2.4. Os dispositivos que compõem o enlace são os seguintes: laser transmissor, comutador óptico, multiplexador, amplificador óptico de potência (*booster*), fibra óptica, pré-amplificador óptico, demultiplexador e receptor.

A relação sinal-ruído óptica (OSNR - *Optical Signal to Noise Ratio*) em um ponto x de um determinado sistema, em decibéis (dB), é definida de acordo com a equação 2.3:

$$\text{OSNR}_x = 10 \log \left(\frac{P_x}{N_x} \right), \quad (2.3)$$

em que P_x é a potência óptica do sinal e N_x é a potência óptica do ruído medidas no ponto x

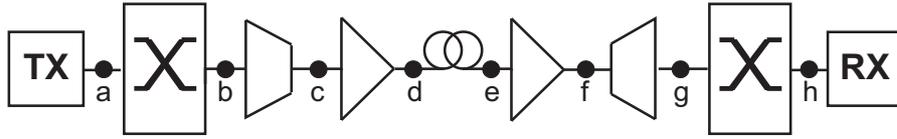


Figura 2.4: Arquitetura dos enlaces ópticos.

em Watts (W).

O modelo analítico utilizado pelo SIMTON para quantificar a degradação do sinal óptico causada pelas PLI foi proposto inicialmente por Pereira e colaboradores em [7] para avaliar a OSNR do sinal. O modelo considera também os efeitos de dispersão do modo de polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*) e a dispersão cromática residual (RCD - *Residual Chromatic Dispersion*) [7, 28].

Na figura 2.4, de **a** até **h** estão os pontos de avaliação nos quais tanto a potência do sinal quanto a potência do ruído podem ser determinadas no domínio óptico. No ponto **a**, estão 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 a OSNR do transmissor (vide equação 2.3) ou OSNR da entrada do sistema ($OSNR_{in}$). Considerando uma rota composta de i enlaces, os dispositivos entre os pontos **b** e **h** são repetidos $i - 1$ vezes antes de o sinal óptico alcançar o receptor no nó destino.

Nos pontos **b** e **h**, é considerada a diafonia dentro do mesmo comprimento de onda (*crosstalk*) adicionada na saída do comutador óptico. Isso ocorre porque uma pequena quantidade da potência de outros canais, no mesmo comprimento de onda do canal de interesse, é adicionada pelo comutador óptico devido ao não-isolamento ideal desse dispositivo. A potência de ruído gerada por esse efeito, em cada dispositivo, é dada por [1]:

$$N_{Sw}(\lambda) = \varepsilon \sum_{j=1}^n P_{Sw_j}(\lambda), \quad (2.4)$$

em que $P_{Sw_j}(\lambda)$ é a potência óptica do sinal presente na j -ésima porta de entrada no comprimento de onda λ , ε representa o fator de isolamento e n o número total de sinais presentes nas portas de entrada do comutador óptico no mesmo comprimento de onda do sinal propagante. Por simplicidade, é considerado que ε não varia com o comprimento de onda nem com qual das portas do comutador o sinal é aplicado, ou seja, não depende do canal.

Nos pontos **c** e **g**, é considerado 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 ópti-

cos, como o efeito de saturação do ganho. O batimento entre o sinal óptico e o ruído ASE representa a principal fonte de ruído, de forma que o ruído pode ser quantificado como [30]:

$$N_{\text{Amp}}(\lambda) = P_{\text{ASE}} = \frac{h\nu(\lambda)B_oG_{\text{Amp}}F_{\text{Amp}}}{2}, \quad (2.5)$$

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

O efeito de saturação do ganho é calculado pela seguinte expressão [31, 32]:

$$G_{\text{Amp}} = \frac{G_0}{1 + \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{sat}}}}, \quad (2.6)$$

em que G_0 representa o ganho não-saturado do amplificador, P_{out} a potência óptica na saída do amplificador e P_{sat} a potência de saturação na saída do amplificador. O fator de ruído do amplificador (F_{Amp}) é calculado da seguinte forma [33]:

$$F_{\text{Amp}} = F_0 \left(1 + A_1 - \frac{A_1}{1 + \frac{P_{\text{in}}}{A_2}} \right), \quad (2.7)$$

em que F_0 representa o fator de ruído do amplificador quando potências baixas são consideradas, A_1 e A_2 são parâmetros obtidos por meio de ajuste na curva experimental.

No ponto e da figura 2.4 é considerado o ruído gerado pelo efeito de FWM [10]. Este efeito não-linear depende do espaçamento entre canais, da potência do sinal óptico, do número de comprimentos de onda propagando, do coeficiente de dispersão e do comprimento de onda de zero dispersão da fibra de transmissão.

Cada componente de potência gerada pelo efeito de FWM pode ser calculada pela seguinte expressão proposta por Song e colaboradores [34]:

$$P_{\text{FWM}}(\lambda) = P_{ijk}(\lambda) = \frac{\eta'}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha d} \left[\frac{(1 - e^{-\alpha d})^2}{\alpha^2} \right], \quad (2.8)$$

em que η' é a eficiência do efeito de FWM, D é o fator de degenerescência, que pode ser igual a 3, para o caso degenerado ($i = j$), ou igual a 6 para o caso não-degenerado e γ é o coeficiente não-linear. P_i , P_j e P_k são as potências de entrada dos sinais nas frequências f_i , f_j e f_k , respectivamente, α é o coeficiente de atenuação e d é o comprimento da fibra. As frequências dos sinais produzidos pelo efeito de FWM podem ser calculadas por [10]:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \quad (2.9)$$

em que os índices i e j são diferentes de k .

Considerando as potências produzidas pelo efeito de FWM incidentes em um determinado comprimento de onda, tem-se:

$$N_{\text{FWM}} = \sum_{j=1}^m P_{\text{FWM}_j}(\lambda), \quad (2.10)$$

em que N_{FWM} é a potência total do ruído devido ao efeito de FWM e $P_{\text{FWM}_j}(\lambda)$ é uma das m potências ópticas produzidas por esse efeito que incide no comprimento de onda do sinal propagante.

Finalmente, no ponto **h** da figura 2.4, pode ser calculada a potência óptica do sinal (P_{out}) e a potência óptica do ruído (N_{out}) no final do enlace. O termo P_{out} é calculado de acordo com os ganhos e as perdas do sinal ao longo de sua propagação e é dado por:

$$P_{\text{out}} = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Sw}}^2 L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}}} P_{\text{in}}, \quad (2.11)$$

em que G_{Amp_1} e G_{Amp_2} são os ganhos dinâmicos lineares do *booster* e do pré-amplificador, α é o coeficiente de atenuação da fibra e d é o comprimento da fibra, L_{Sw} , L_{Mx} e L_{Dx} são as perdas do comutador, multiplexador e demultiplexador óptico, respectivamente.

O termo (N_{out}) é calculado no nó destino e inclui todas as potências de ruído que são adicionadas em cada ponto do enlace representado na figura 2.4, como visto anteriormente. Seu valor é obtido através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} N_{\text{out}}(\lambda) = & \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}^2} N_{\text{in}} \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \varepsilon \sum_{j=1}^n P_{\text{Sw}_{1,j}}(\lambda) + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \frac{h f B_o}{2} \left(F_{\text{Amp}_1} + \frac{F_{\text{Amp}_2}}{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_1}} \right) + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \sum_{j=1}^m P_{\text{FWM}_j}(\lambda) + \varepsilon \sum_{j=1}^s P_{\text{Sw}_{2,j}}(\lambda). \end{aligned} \quad (2.12)$$

O valor da OSNR no nó destino (OSNR_{out}) é obtida por intermédio de P_{out} e N_{out} , conforme a equação 2.3. Um valor mínimo da OSNR pode ser estabelecido de modo a garantir a qualidade de transmissão (QoT - *Quality of Transmission*) das conexões estabelecidas na rede (OSNR_{QoT}).

Considerando um caminho óptico composto por i enlaces, tem-se que:

$$P_{\text{out}_i} = \left(\frac{G_{\text{Amp}_{i,1}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{i,2}}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \right) P_{\text{out}_{i-1}} \quad (2.13)$$

e

$$\begin{aligned} N_{\text{out}_i}(\lambda) = & \frac{G_{\text{Amp}_{1,i}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{2,i}}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{out}_{i-1}} + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_{1,i}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{2,i}}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \frac{hf B_0}{2} \left(F_{\text{Amp}_{1,i}} + \frac{F_{\text{Amp}_{2,i}}}{e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{1,i}}} \right) + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_{2,i}}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \sum_{j=1}^m P_{\text{FWM}_{i,j}}(\lambda) + \varepsilon \sum_{j=1}^s P_{\text{Sw}_{i+1,j}}(\lambda), \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\text{em que } P_{\text{out}_0} = \frac{P_{\text{in}}}{L_{\text{Sw}}} \text{ e } N_{\text{out}_0} = \frac{N_{\text{in}}}{L_{\text{Sw}}} + \varepsilon \sum_{j=1}^n P_{\text{Sw}_{1,j}}(\lambda).$$

Os efeitos dispersivos de PMD e RCD são calculados separadamente. Portanto, há duas parcelas para o cálculo total do alargamento temporal. Essas são somadas e é obtido o resultado final.

O alargamento temporal do pulso óptico causado pelo efeito da PMD em uma rota pode ser calculado usando a seguinte expressão [35]:

$$\Delta t_{\text{PMD}} = B \sqrt{\sum_{j=1}^i D_{\text{PMD}}^2(j) d(j)}, \quad (2.15)$$

em que B é a taxa de transmissão, D_{PMD} é o coeficiente de PMD e $d(j)$ é o comprimento do j -ésimo enlace pertencente à rota.

A contribuição da dispersão residual é calculada da seguinte forma [36]:

$$\Delta t_{\text{RCD}} = \Delta \lambda_{\text{TX}} \sum_{j=1}^i \{ [D_{\text{TF}_j}^{\lambda_{\text{ref}}} + (\Delta \lambda S_{\text{TF}_j})] L_{\text{TF}_j} + [D_{\text{DCF}_j}^{\lambda_{\text{ref}}} + (\Delta \lambda S_{\text{DCF}_j})] L_{\text{DCF}_j} \}, \quad (2.16)$$

em que $\Delta \lambda_{\text{TX}}$ representa a largura de linha do transmissor, $D_{\text{TF}_j}^{\lambda_{\text{ref}}}$ é o coeficiente de dispersão cromática do comprimento de onda no enlace j , $\Delta \lambda$ é a diferença entre o comprimento de onda de transmissão e o comprimento de onda para o qual a dispersão cromática é igual a zero. S_{TF_j} é a inclinação da curva de dispersão, L_{TF_j} é o comprimento da fibra óptica, $D_{\text{DCF}_j}^{\lambda_{\text{ref}}}$ é o coeficiente de dispersão cromática da fibra compensadora de dispersão, S_{DCF_j} é a inclinação da curva de dispersão da fibra compensadora de dispersão e L_{DCF_j} é o comprimento da fibra compensadora de dispersão no enlace j . L_{DCF_j} é dado por [28]:

$$L_{\text{DCF}_j} = \left| \frac{L_{\text{TF}_j} D_{\text{TF}_j}^{\lambda_{\text{ref}}}}{D_{\text{DCF}_j}^{\lambda_{\text{ref}}}} \right|. \quad (2.17)$$

O alargamento temporal total Δ_t do pulso em um caminho óptico é calculado da seguinte forma [28]:

$$\Delta_t = (\Delta t_{\text{RCD}} + \Delta t_{\text{PMD}}). \quad (2.18)$$

Esse alargamento pode ser calculado de forma percentual em relação à duração inicial do pulso. Assim, o alargamento temporal percentual do pulso óptico (δ_t) ao longo de um caminho óptico é dado por [7, 28]:

$$\delta_t = 100B\Delta_t, \quad (2.19)$$

O alargamento percentual do pulso (δ_t) deve ser menor que o alargamento percentual máximo permitido (δ_{QoT}). Esse valor depende das características do receptor óptico.

De posse dos valores de OSNR_{out} e (δ_t), é possível definir se um caminho óptico possui ou não QoT suficiente para ser realizado.

CAPÍTULO 3

INSERÇÃO E ATRIBUIÇÃO DE REGENERADORES EM REDES ÓPTICAS

Este capítulo aborda as características das redes ópticas translúcidas e as questões pertinentes ao projeto dessas redes. A seção 3.1 descreve o problema de inserção de regeneradores (RP - *Regenerator Placement*) e como este pode ser resolvido, enquanto que o problema de atribuição de regeneradores é descrito na seção 3.2. O algoritmo de atribuição de regeneradores (RA - *Regenerator Allocation*), implementado no SIMTON, é descrito na seção 3.3. Na seção 3.4 o capítulo se encerra com uma discussão sobre questões relevantes no projeto de redes ópticas translúcidas.

3.1 Inserção de regeneradores

As redes ópticas translúcidas são uma solução interessante para lidar com o compromisso entre o desempenho da rede, CapEx e OpEx [8]. Elas são planejadas para ter apenas alguns de seus nós com a capacidade de regeneração que podem ser determinados utilizando duas estratégias distintas [8]: ilhas de transparência e regeneração esparsa. Essas estratégias são utilizadas para solucionar o problema de RP.

Na estratégia de ilhas de transparência, todos os nós dentro de uma ilha são transparentes e não apresentam qualquer capacidade de regeneração [8, 37, 38]. OXCs com capacidade de regeneração são colocados apenas nos nós localizados nos limites (ou fronteiras) da ilha. Nessa abordagem, o principal problema do projetista da rede é definir corretamente os

aglomerados de nós transparentes [37].

A regeneração esparsa distribui estrategicamente os recursos de regeneração, selecionando um conjunto de nós ao longo da rede para inserir estes dispositivos [3, 8]. Esses regeneradores são usados para executar a regeneração 3R no sinal óptico de acordo com uma política de RA predefinida. Nessa dissertação é usada a regeneração esparsa.

É preciso definir um algoritmo de RP na abordagem de regeneração esparsa. Esse decide quais nós devem ser translúcidos e define o número de regeneradores que deve ser instalado em cada um desses nós. O algoritmo de RP é uma parte da concepção de uma rede translúcida e é solicitado durante a fase de planejamento da rede. O problema RP é classificado como um problema NP-completo [8]. Como consequência, a maioria dos algoritmos de RP propostos na literatura faz uso de algum tipo de heurística ou meta-heurística para inserir os regeneradores [3, 39–41].

A maioria das abordagens anteriores para resolver o problema RP combina as estratégias contador do nó e ordenamento (NC&R - *Node Counter and Ranking*) e política- NX [3]. Nessa política, o algoritmo de RP insere X regeneradores em N nós da rede em que os valores de N e de X são parâmetros de entrada. Isso significa que cada nó da rede tem um contador que é incrementado de acordo com uma regra pré-definida. Em seguida, os nós são classificados de acordo com seus contadores e em seguida a política- NX é aplicada com base nessa classificação.

Na política- NX , os N nós com os maiores valores de contagem recebem X regeneradores. Embora seja bastante simples e fácil de implementar, apresenta muitas desvantagens. A primeira é que ela não considera que em um determinado nó podem ser necessários mais regeneradores do que em outros nós (todos nós selecionados são equipados com o mesmo número de regeneradores). O segundo aspecto está relacionado com a ausência de um mecanismo de re-alimentação entre o desempenho da rede e da inserção em si. Na maioria dos casos, uma vez que a estratégia heurística para incrementar o contador do nó esteja definida, o RP é determinado e as informações sobre o desempenho da rede não têm influência direta na decisão do algoritmo de RP [3, 37, 42].

Além disso, as abordagens para projeto de rede translúcida, por intermédio de contador de nó e política- NX , não podem oferecer múltiplas soluções, mesmo para iguais valores de N e de X . Como consequência, essas abordagens anteriores negligenciam a natureza multiobjetiva do problema de RP. É importante observar que o conflito entre custo e desempenho está relacionado com o número de regeneradores. Por exemplo, uma rede com um maior número de regeneradores geralmente apresenta maior CapEx e OpEx, mas pode

conseguir um desempenho melhor se comparada com uma rede de menor custo.

Yang e Ramamurthy propuseram algoritmos de RP que utilizam a política-*NX* [3]. Entre as propostas, os autores destacam o algoritmo grau do nó primeiro (NDF - *Nodal Degree First*) e o algoritmo predição da qualidade do sinal (SQP - *Signal Quality Prediction*). Peng e colaboradores propuseram o algoritmo peso de regeneração (RW - *Regeneration Weight*) [39] e Sambo e colaboradores propuseram o algoritmo de predição de qualidade de sinal de múltiplos caminhos (MPSQP - *Multiple Path Signal Quality Prediction*) [43].

Chaves e colaboradores [44] propuseram uma estratégia de RP meta-heurístico baseado em um algoritmo multiobjetivo evolucionário que considera tanto o custo da rede e número de regeneradores como alvos de otimização, chamado de otimização multiobjetiva para inserção de regeneradores (MORP - *Multi-objective Optimization for Regenerator Placement*). Assim, ao final do processo de otimização, o algoritmo de RP oferece um conjunto de soluções que apresentam um compromisso entre custo e desempenho da rede. A técnica de otimização utilizada foi o NSGA-II (NSGA-II- *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) [45].

3.2 Atribuição de regeneradores

Em cenários nos quais as conexões são solicitadas dinamicamente pela rede (DLE), que são considerados nesta dissertação, o plano de controle deve decidir quando e em qual nó um sinal deve ser regenerado. Isso deve ser feito durante o processo de estabelecimento do pedido de conexão. Esse problema é conhecido como atribuição de regenerador (RA - *Regenerator Allocation*) [3].

É importante observar que pode haver vários nós com capacidade de regeneração ao longo do caminho óptico. O algoritmo de RA deve decidir em que nó (ou nós) do percurso o sinal óptico deve ser regenerado. Um RA eficiente minimiza o uso de regeneradores o quanto for possível, deixando esses dispositivos livres para atender futuras necessidades de regeneração. Isto pode reduzir o número de regeneradores necessários para manter o desempenho, conduzindo assim a um menor CapEx da rede.

O algoritmo de RA pode dividir uma determinada rota em vários segmentos transparentes. Cada um desses segmentos transparentes pode não ter o mesmo comprimento de onda, o que caracteriza uma conversão de comprimento de onda [3]. Essa opção pode ser utilizada para lidar com a falta de recursos. Por exemplo, quando o mesmo comprimento de onda não está disponível em todas as enlaces que pertencem a um caminho óptico. Esse caso

de regeneração é desencadeado pela contenção de comprimento de onda (TWC - *Triggered by the Wavelength Contention*) [46].

O algoritmo de RA pode também ser solicitado para encontrar um regenerador disponível no trajeto quando a qualidade do sinal está abaixo de um limiar predefinido. Esse caso é desencadeado por qualidade de sinal inaceitável de transmissão (TQoT - *Triggered by unacceptable signal Quality of Transmission*) [46].

Ye e colaboradores propuseram um algoritmo que considera o número de regeneradores livres e total nos nós além da distância de cada um até o nó destino [41]. Yang e Ramamurthy propuseram dois algoritmos de RA: o Fragmentação (*Fragmentation*) e o Rastreamento (*Trace-back*) [3]. Sambo e colaboradores propuseram a função de auto-designação (SDF - *Self Designation Function*) [43] que divide a rota em um número mínimo de segmentos transparentes, utilizando o número mínimo de regeneradores necessários.

O algoritmo proposto por Ye e colaboradores [41] utiliza o alcance máximo transparente, L_S . Esse indica a distância máxima de transmissão no domínio óptico, ou seja, sem regeneração do sinal. Se o comprimento da rota em análise for maior que L_S , o algoritmo de RA é acionado.

Para cada comprimento de onda λ_i , o nó escolhido como local de regeneração será aquele que possuir maior número de dispositivos disponíveis para o comprimento de onda λ_i e que a distância do nó origem até ele seja menor que L_S . Em caso de empate, o nó selecionado será aquele que possuir maior número de regeneradores. Se o empate persistir, será escolhido aquele que estiver mais distante do nó origem. O nó selecionado é considerado como nó origem e o processo é repetido até que a distância da atual origem até o nó destino seja menor que L_S [41]. Se o processo não obtiver sucesso para o comprimento de onda λ_i , será testado o comprimento de onda seguinte. A requisição será bloqueada se o processo falhar para todos os comprimentos de onda [41].

O algoritmo de fragmentação utiliza uma estimativa do número máximo de saltos (LN_{MAX}) que um caminho óptico pode percorrer sem que o valor da sua BER seja comprometida. Dessa forma, essa proposta prioriza satisfazer a restrição da BER em oposição ao problema de continuidade de comprimento de onda [3].

O processo de fragmentação é iniciado a partir do nó que corresponde ao LN_{MAX} e percorre a rota no sentido contrário até encontrar um nó que possua regeneradores disponíveis e que a BER esteja dentro de um valor aceitável. Logo após, o algoritmo de WA pré-definido é acionado para procurar por um comprimento de onda disponível. Se o algoritmo de WA encontrar um comprimento de onda disponível, o nó será utilizado como nó de

regeneração para esse caminho óptico. Se não, a busca continua. Se não for possível regenerar na rota em análise, os recursos que foram reservados durante a execução do algoritmo são liberados [3].

O algoritmo de rastreamento, ao contrário do de fragmentação, prioriza a continuidade de comprimento de onda em oposição à BER. Quando a continuidade de comprimento de onda não pode ser atendida ao longo da rota, uma busca é iniciada a partir do nó destino na direção contrária dessa rota para encontrar um nó que possua regeneradores disponíveis e que garanta um mesmo comprimento de onda do nó origem até este nó [3].

A BER é verificada em cada segmento transparente. Se o seu valor não for satisfatório, a busca continua. Após determinar um segmento transparente que atenda às duas restrições, BER e continuidade de comprimento de onda, o nó onde a regeneração é realizada é tratado como o novo nó origem. O rastreamento é realizado de forma iterativa até que os nós origem e destino da rota completa sejam conectados pelos segmentos transparentes ou se não houver possibilidade de atender às restrições simultaneamente. Nesse caso, os recursos que foram reservados são liberados [3].

3.3 Adaptação do SIMTON para redes ópticas translúcidas

O algoritmo de RA utilizado nesta dissertação foi proposto por Chaves e colaboradores em [46]. Ele consiste em pequenas modificações dos algoritmos propostos na literatura [3,41]. Ele difere dos algoritmos citados porque atribui um comprimento de onda antes da segmentação da rota e o processo de RA é acionado tanto pela restrição da continuidade de comprimento de onda quanto pela qualidade inaceitável do sinal óptico.

O algoritmo de RA é capaz de tratar três casos possíveis para uma determinada rota:

1. o caminho óptico pode ser estabelecido de maneira transparente, ou seja, sem regeneração;
2. uma, ou mais, conversões de comprimento de onda é necessária para estabelecer o caminho óptico. Isso significa que a regeneração ocorre devido à restrição de continuidade de comprimento de onda na rota;
3. uma regeneração eletrônica é necessária para estabelecer um caminho óptico por conta da qualidade de transmissão ser inferior ao limiar pré-estabelecido, seja por penalidades na OSNR ou por penalidades temporais.

O CAC translúcido identifica qual caso ocorreu e assim aciona a estratégia de RA adequada. O pseudocódigo do CAC translúcido é mostrado no algoritmo 3.1. Após a so-

licitação da conexão, o CAC executa o algoritmo de roteamento, que para essa dissertação é o de menor distância. Ele 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). É importante salientar que é considerada apenas uma fibra para cada sentido da comunicação. t_i é o índice do nó na rede, ou seja o número que o identifica. Quanto ao subscrito i , ele representa a posição do nó na rota π , ou seja, a sua posição nessa rota. Então, o algoritmo de WA é aplicado a rota π com o objetivo de encontrar um comprimento de onda disponível. Nesta dissertação, é utilizado o algoritmo de FF para a atribuição de comprimento de onda.

O algoritmo de WA pode ter sucesso ou não, dependendo da disponibilidade de comprimentos de onda na rede. Se ele encontrar um comprimento de onda disponível para toda a rota π , então a QoT do caminho óptico é testada. Isso é feito no algoritmo 3.1 pela função QoT , que é definida de seguinte forma:

$$QoT(t_x, t_y, \lambda_i, \pi) = \begin{cases} 1, & \text{se } (OSNR_{\pi-\lambda_i} > OSNR_{QoT}) \text{ e } (\delta_{\pi-\lambda_i} < \delta_{QoT}) \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (3.1)$$

em que t_x e t_y são os índices identificadores dos nós fonte e destino do trecho analisado, respectivamente. λ_i é o comprimento de onda utilizado e π é a rota que conecta os nós t_x e t_y . $OSNR_{\pi-\lambda_i}$ é a OSNR do caminho óptico formado pela associação da rota π com o comprimento de onda λ_i , $OSNR_{QoT}$ é a OSNR mínima estabelecida com critério de QoT e δ_{QoT} é o máximo alargamento temporal percentual estabelecido como critério de QoT.

Para a situação $QoT(t_x, t_y, \lambda_i, \pi) = 1$, o caminho óptico é estabelecido de maneira totalmente óptica. Porém, se $QoT(t_x, t_y, \lambda_i, \pi) = 0$, o algoritmo de RA é acionado pela qualidade de sinal inaceitável. Esse é realizado pela função RA_tQoT a qual decide em que nó pertencente à rota π o sinal deve ser regenerado.

Se o algoritmo de WA não encontrar um comprimento de onda disponível em toda a rota π , a qual conecta os nós fonte e destino, isso significa que será necessário realizar conversão de comprimento de onda para poder estabelecer a conexão. Dessa forma, o algoritmo de RA será acionado pela restrição de continuidade de comprimento de onda. A função responsável por isso é a RA_tWC . Ela tenta utilizar os regeneradores disponíveis na rota para realizar a conversão de comprimento de onda.

É importante observar que as funções $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$ e $RA_tWC(x, y, \pi)$, aplicadas a rota π , são recursivas. Uma conexão com $x = 1$ (nó fonte) e $y = 2$ (nó mais próximo do nó fonte) é utilizada para recomençar o processo.

O pseudocódigo da função $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$ está apresentado no algoritmo 3.2. Ela possui quatro parâmetros: uma determinada rota π , os índices x e y de dois nós que

Algoritmo 3.1: Pseudocódigo do CAC Translúcido.

```

1 Chegada de solicitação de conexão;
2 Execute um algoritmo de roteamento o qual resulta em uma rota  $\pi$ 
   ( $\pi = \{t_1, t_2, \dots, t_Z\}$ ) composta por  $Z$  nós ligando o nó fonte ( $t_1$ ) ao nó destino ( $t_Z$ );
3 Execute um algoritmo de WA na rota  $\pi$ ;
4 se Existe um comprimento de onda disponível  $\lambda_i$  do nó fonte ao nó destino na rota  $\pi$ 
   então
5   se  $QoT(t_1, t_Z, \lambda_i, \pi) = 1$  então // Regeneração não é solicitada
6     // Conexão totalmente óptica
7     Estabeleça a solicitação de conexão na rota  $\pi$  e no comprimento de onda  $\lambda_i$ ;
8   senão // Regeneração é solicitada
9     // Regeneração acionada pela QoT
10     $RA\_tQoT(1, 2, \lambda_i, \pi)$ ;
11  fim se
12 senão // Regeneração é solicitada
13   // Regeneração acionada pela restrição de comprimento de onda
14    $RA\_tWC(1, 2, \pi)$ ;
15 fim se

```

pertencem à rota π e um comprimento de onda λ_i encontrado pelo algoritmo de WA. No algoritmo 3.2, f_i representa o número de regeneradores disponíveis no nó i . Quando a função $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$ é acionada, significa que há um caminho óptico formado pela associação da rota π com o comprimento de onda λ_i , porém com uma OSNR abaixo do limiar de qualidade aceitável.

Como a continuidade de comprimento de onda é atendida pelo canal λ_i , a função $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$ tenta estabelecer o caminho óptico já encontrado, realizando apenas regeneração sem conversão de comprimento de onda. Além disso, ela tenta usar regeneradores no nó mais distante possível do nó origem, partindo o caminho óptico em vários segmentos transparentes (totalmente ópticos) conectados por regeneradores nas bordas desses segmentos. A QoT (OSNR e δ_t) de cada segmento transparente é testada antes do estabelecimento do caminho óptico.

Algoritmo 3.2: Pseudocódigo da função $RA_tQoT(x, y, \lambda_i, \pi)$.

```

1 se  $y = Z$  então
2   | Fim do Algoritmo;
3 fim se
4 se  $f_y = 0$  então // Não há regenerador disponível no nó  $t_y$ 
5   | // Tente alcançar o próximo nó
6   |  $RA\_tQoT(x, y + 1, \lambda_i, \pi)$ ;
7 fim se
8 se  $QoT(t_x, t_y, \lambda_i, \pi) = 1$  então // QoT é aceitável
9   | // Tente alcançar o próximo nó
10  |  $RA\_tQoT(x, y + 1, \lambda_i, \pi)$ ;
11 senão // Regeneração é solicitada
12  | se  $\exists k$  tal que  $f_k \neq 0$  e  $x < k < y$  então
13  |   | Regenere o sinal no nó  $t_k$  mais próximo do nó  $t_y$  ao longo da rota  $\pi$  tal que
14  |   |  $f_k \neq 0$ ;
15  |   | // Continua a busca a partir do nó  $k$ 
16  |   |  $RA\_tQoT(k, k + 1, \lambda_i, \pi)$ ;
17  | senão
18  |   | O sinal não pode ser regenerado, logo a conexão é bloqueada;
19  |   | Pare;
20  | fim se
21 fim se

```

Por outro lado, se a função $RA_tWC(x, y, \pi)$ é acionada, não há um comprimento de onda disponível por toda a rota π . $RA_tWC(x, y, \pi)$ possui três parâmetros de entrada: os índices x e y de dois nós da rota π (os quais determinam a sub-rota atualmente em análise) e a rota π . Como um comprimento de onda diferente pode ser atribuído a cada segmento transparente, nenhum comprimento de onda é dado como parâmetro de entrada.

O pseudocódigo da função $RA_tWC(x, y, \pi)$ está ilustrado no algoritmo 3.3. Ela tenta usar os regeneradores no nó mais distante possível do nó origem, dividindo o caminho óptico em vários segmentos totalmente ópticos conectados por regeneradores eletrônicos nos nós de borda. Além disso, pelo menos uma conversão de comprimento de onda é realizada ao longo da rota entre os segmentos transparentes. A QoT de cada segmento transparente é testada antes desse ser estabelecido.

A função $QoTW(t_x, t_y, \lambda, \pi)$, utilizada no algoritmo 3.3, retorna o valor “1” se houver um comprimento de onda disponível entre os nós t_x e t_y ao longo da rota π nos dois

sentidos de transmissão. Se houver comprimento de onda disponível e a QoT do caminho óptico não for satisfeita ou se não houver comprimento de onda disponível entre os nós t_x e t_y , $QoTW(t_x, t_y, \lambda, \pi)$ retorna o valor “0”. W é o número máximo de comprimentos de onda presentes em um enlace da rede e i é o índice do comprimento de onda.

Algoritmo 3.3: Pseudocódigo da função $RA_tWC(x, y, \pi)$.

```

1 se  $y = Z$  então
2   | Fim do Algoritmo;
3 fim se
4 se  $f_y = 0$  então // Não há regenerador disponível no nó  $t_y$ 
5   | // Tente alcançar o próximo nó
6   |  $RA\_tWC(x, y + 1, \pi)$ ;
7 fim se
8 se  $\exists \lambda_i$  tal que  $QoTW(t_x, t_y, \lambda_i, \pi) = 1$  então
9   | // Tente alcançar o próximo nó
10  |  $RA\_tWC(x, y + 1, \pi)$ ;
11 senão // Regeneração é solicitada
12  | se  $\exists k$  tal que  $f_k \neq 0$  e  $x < k < y$  então
13  |   | Regenere o sinal no nó  $t_k$  mais próximo do nó  $t_y$  ao longo da rota  $\pi$  tal que
14  |   |  $f_k \neq 0$ ;
15  |   | Atribua o comprimento de onda  $\lambda_i, i < W$ , tal que  $QoTW(t_x, t_y, \lambda_i, \pi) = 1$ ;
16  |   |  $RA\_tWC(k, k + 1, \pi)$ ;
17  |   | senão
18  |   | O sinal não pode ser regenerado, logo a conexão é bloqueada;
19  |   | Pare;
20  |   | fim se
21  |   | fim se

```

3.4 Considerações para projeto de redes ópticas translúcidas

Para o projeto de redes ópticas translúcidas, Saradhi e colaboradores [47] apresentam importantes considerações. Algumas delas são:

- ▷ Locais de regeneradores;
- ▷ Número de locais de regeneradores;
- ▷ Restrições de energia e/ou espaço em um sítio de regenerador;

- ▷ Custo de abertura de um sítio de regenerador e custo da adição de um regenerador;
- ▷ Matriz de demanda ou de tráfego dinâmico;
- ▷ Evolução ou alteração na matriz de demanda;
- ▷ Inserção de regeneradores junto com inserção de amplificadores.

Sobre os locais de regeneração, devido à configuração do nó e às restrições que possam ocorrer, tal como espaço reduzido, apenas certos nós podem ser utilizados como sítios de regenerador. Um problema possível é encontrar, para uma determinada topologia, o melhor conjunto de sítios e inserir um certo número de regeneradores nesses para satisfazer a demanda de uma determinada matriz de tráfego já determinada ou qualquer outro tipo de tráfego [47].

A abertura de um sítio de regenerador implica em custo: CapEx mais OpEx. O primeiro corresponde às despesas de aquisição de regeneradores, sistemas de refrigeração e mão-de-obra de montagem, por exemplo. Enquanto que o OpEx está relacionado ao consumo de energia, mão-de-obra de manutenção e atualizações dos dispositivos. Então, projetistas de redes ópticas translúcidas buscam utilizar um menor número possível de sítios de regeneradores [47, 48].

Restrições de energia e/ou espaço podem limitar o número máximo de regeneradores que um determinado nó pode suportar. Logo, o algoritmo de RP deve considerar tal informação [47, 48].

O projetista de rede deve investigar se a inserção de mais regeneradores em um determinado nó ou a abertura de um novo sítio de regeneradores atende ao desempenho de rede desejado. Se isso ocorrer para as duas opções, o projetista deve investigar qual delas oferecerá um menor impacto no custo total, incluído o CapEx e o OpEx [47].

O operador geralmente projeta a rede com base na matriz de tráfego prevista. No entanto, é difícil prever com exatidão mudanças nessa matriz ao longo do tempo. Por isso, é importante para os operadores projetarem a rede que pode ser útil para qualquer configuração de tráfego dinâmico. Assim, a inserção de regeneradores, quando a matriz de tráfego não é dada torna-se importante, pois solução tem de garantir pelo menos um caminho óptico viável entre qualquer par de nós [47]. O projetista pode também promover pequenas mudanças na disposição dos regeneradores, de forma que essa nova configuração atenda às mudanças na matriz de tráfego [47].

Na literatura, a inserção de regenerador é feita para uma determinada configuração de enlaces. No entanto, a introdução de regeneradores pode eliminar a necessidade de certos

amplificadores e/ou implicar em ajustes na localização desses [47].

As questões apresentadas nessa seção influenciam a escolha dos objetivos que são otimizados na proposta no Capítulo 5 sugerida para a solução do problema de WRP. Para isso, o Capítulo 4 descreve a técnica computacional utilizada para o projeto de redes ópticas translúcidas em conjunto com a capacidade dos enlaces.

CAPÍTULO 4

ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS MULTIOBJETIVOS

Os problemas que surgem no cotidiano de um profissional de tecnologia podem envolver mais de um critério de otimização. Este capítulo trata de definir um problema multiobjetivo e apresentar uma técnica evolucionária para a solução desse tipo de problema. As características dos algoritmos evolucionários são apresentadas na seção 4.1 para em seguida ser discutida a otimização multiobjetiva na seção 4.2. O otimizador utilizado nessa dissertação, o SPEA2, é descrito na seção 4.3. As métricas utilizadas para a avaliação das soluções encontradas nesse trabalho são descritas na seção 4.4.

4.1 Algoritmos evolucionários

O termo algoritmo evolucionário (EA - *Evolutionary Algorithm*) refere-se a uma classe de técnicas de otimização estocásticas que simulam o processo de evolução natural [49]. Esse permite que as espécies habitantes de um determinado ambiente se desenvolvam ao longo do tempo. A evolução possibilita que os indivíduos se adaptem às condições que são impostas pelo meio e possam produzir descendentes mais aptos à sobrevivência.

Os EAs apresentam a capacidade de evolução, assim como acontece na natureza. Por isso, são utilizados como ferramentas para solução de problemas de otimização [50]. Um problema de otimização é aquele cuja solução é definida em termos de uma função, a função objetivo, que deve ser minimizada ou maximizada dependendo da característica que

se pretende otimizar [51].

A sub-seção 4.1.1 descreve o funcionamento de um EA e a sub-seção 4.1.2 descreve os componentes pertencentes à técnica.

4.1.1 Funcionamento de um algoritmo evolucionário

O algoritmo 4.1 descreve o pseudocódigo para um EA genérico [52]. O ciclo (linhas 3–8), também chamado de geração de um EA, é composto por seleção, cruzamento, mutação, avaliação dos novos indivíduos que são gerados e seleção para a próxima geração [49,51,53]. A nova população será formada pelos melhores indivíduos entre a união da população atual e os descendentes gerados.

Algoritmo 4.1: Pseudocódigo para um EA.

- 1 Inicialize a população com soluções geradas aleatoriamente;
 - 2 Avalie cada solução candidata;
 - 3 **repita**
 - 4 Selecione pais para reprodução;
 - 5 Execute cruzamento entre os pais selecionados;
 - 6 Execute mutação entre os descendentes produzidos;
 - 7 Avalie os descendentes gerados;
 - 8 Selecione indivíduos para a próxima geração;
 - 9 **até alcançar condição de parada;**
-

A seleção ocorre na escolha dos indivíduos que serão usados na reprodução (linha 4) e na atualização da população (linha 8). A determinação dos pais pode ser realizada através de um torneio binário, onde são pré-selecionados dois candidatos a pai e é escolhido aquele que possui melhor função de aptidão (*fitness*).

Um EA possui um conjunto de componentes e procedimentos que devem ser especificados. Entre eles, os mais importantes são [52]: a representação, a função de aptidão, a população, o mecanismo de seleção de pais, os operadores de variação e o mecanismo de seleção de sobreviventes.

4.1.2 Componentes de um algoritmo evolucionário

Após identificar a natureza do problema, minimização ou maximização, é necessário representá-lo de forma adequada para que seja solucionado. As possíveis soluções no contexto de um problema se referem ao espaço de decisão. Enquanto que a representação

codificada se refere ao espaço de objetivos. A fase de representação consiste, portanto, em mapear o espaço de decisão para o espaço de objetivos [52].

Cada um dos indivíduos possui um valor que indica sua qualidade, a função de aptidão. As soluções que apresentam melhores valores de função de aptidão são mais fortes, consequentemente possuem maiores possibilidades de participar de um processo reprodutivo [51].

Os EAs possuem um conjunto, a população, que é formado por indivíduos que representam possíveis soluções para o problema [49]. Após estabelecer a representação do problema, definir a população consiste em simplesmente determinar a quantidade de soluções candidatas presentes nela. O tamanho da população geralmente é um parâmetro do EA, mas algumas abordagens admitem população de tamanho variável [52].

A função do mecanismo de seleção de pais é selecionar os indivíduos de acordo com a sua qualidade, a função de aptidão. Dessa forma, os bons pais tendem a gerar bons descendentes e elevar a qualidade da população. A seleção dos pais geralmente é probabilística e os indivíduos de melhor função de aptidão possuem uma chance maior de gerar descendentes [52].

Os operadores de variação da população têm a função de gerar novos indivíduos a partir dos já existentes. Podem envolver um indivíduo apenas, como o operador de mutação, ou mais de um indivíduo como o cruzamento (recombinação). A mutação é aplicada em cada gene do indivíduo [52]. Esse gene possui uma probabilidade (P_M) de sofrer mutação, a qual é parâmetro de entrada do EA. O procedimento de mutação está descrito no algoritmo 4.2 [54].

Algoritmo 4.2: Procedimento de mutação.

```

1  $i = 0$ ; // Inicializa o índice do gene
2 repita
3   Gere um número aleatório  $n$  no intervalo  $[0, 1]$ ;
4   se  $n < P_M$  então
5     Gere um novo valor para o gene  $S[i]$ , considerando as condições de contorno do
     problema;
6   fim se
7    $i = i + 1$ ; // Atualiza o índice do gene
8 até avaliar todos os genes do indivíduo;

```

A operação de cruzamento realiza a troca de genes entre os pais envolvidos, gerando novos filhos. A probabilidade de cruzamento (P_C) também é um parâmetro de entrada do

EA. Um exemplo de operador de cruzamento consiste em utilizar alternadamente os valores dos genes do primeiro pai ou segundo pai, com igual probabilidade de escolha entre ambos [55]. Essa abordagem é utilizada nesta dissertação e é conhecida como cruzamento uniforme. O procedimento de cruzamento está ilustrado no algoritmo 4.3 [54].

Algoritmo 4.3: Procedimento de cruzamento uniforme.

```

1 Crie uma cópia do indivíduo pai  $S_1$  e chame de  $C_1$ ;
2 Crie uma cópia do indivíduo pai  $S_2$  e chame de  $C_2$ ;
3 Gere um número aleatório  $n$  no intervalo  $[0, 1]$ ;
4 se  $n < P_C$  então
5    $i = 0$ ; // Inicializa o índice do gene
6   repita
7     Gere um número aleatório  $r$  no intervalo  $[0, 1]$ ;
8     se  $r < 0,5$  então
9        $C_1[i] = S_2[i]$ ;
10       $C_2[i] = S_1[i]$ ;
11     fim se
12     $i = i + 1$ ; // Atualiza o índice do gene
13 até avaliar todos os genes dos indivíduos;
14 fim se
15 Retorne  $C_1$  e  $C_2$ ;

```

O mecanismo de seleção de sobreviventes classifica os indivíduos de acordo com a função de aptidão. Porém, diferentemente da seleção de pais, a seleção de sobreviventes é determinística. Ou seja, o conjunto formado pelos novos indivíduos é unido à população atual, formando um novo conjunto. Ele dará origem à nova população que será formada pelos melhores indivíduos da união [52].

4.2 Otimização multiobjetivos

Problemas que envolvem mais de um critério de decisão são comuns na engenharia. Além disso, os objetivos buscados são geralmente antagônicos. Projetos que envolvam critérios de minimização tais como custo financeiro, desempenho obtido e consumo de energia são, frequentemente, de natureza conflitantes [49]. Por exemplo, um projeto de redes ópticas que atenda a pelo menos 99 % das solicitações de chamadas com uma BER inferior a 10^{-12} . Atingir a meta de desempenho e minimizar custos de implantação e manutenção da rede são

objetivos conflitantes.

Uma abordagem inicial seria inserir vários objetivos em uma única função. A primeira dificuldade que pode surgir se refere às unidades de medida, pois os objetivos a serem minimizados podem ser de natureza distinta [51]. Por exemplo, o preço de um computador e a capacidade de armazenamento de informação no disco rígido. Segundo, ainda que os objetivos possam ser mensurados em uma mesma unidade, a ponderação ideal de cada um pode ser desconhecida. E, terceiro, reduzir um problema de várias dimensões em uma única dimensão pode ocultar informações de compromisso entre as funções objetivos que podem ser extraídas em uma análise multiobjetiva nas dimensões originais [51].

Um problema de otimização multiobjetivos (MOP - *Multi-objective Optimization Problem*) possui um conjunto de n parâmetros (variáveis de decisão), um conjunto de k funções objetivos e um conjunto de m restrições. As funções objetivo e as restrições são funções das variáveis de decisão [49]. A descrição matemática está na equação (4.1) a seguir:

$$\begin{aligned} \text{otimize } \vec{y} = \vec{f}(\vec{x}) &= \{f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_n(\vec{x})\}, \\ \text{sujeito a } \vec{e}(\vec{x}) &= \{e_1(\vec{x}), e_2(\vec{x}), \dots, e_n(\vec{x})\} \leq 0, \\ \text{onde } \vec{x} &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \\ \vec{y} &= (y_1, y_2, \dots, y_k) \in Y. \end{aligned} \tag{4.1}$$

em que \vec{x} é o vetor decisão, \vec{y} é o vetor objetivo, X é o espaço de decisão e Y é o espaço de objetivo. Por fim, $\vec{e} \leq 0$ determina o conjunto de soluções factíveis [49]. É importante salientar que o conjunto de soluções factíveis é determinado por cada problema.

4.2.1 Conceito de dominância

Em um problema de otimização de um objetivo (SOP - *Single Optimization Problem*), uma solução \vec{a} é melhor do que uma solução diferente \vec{b} se $f(\vec{a}) < f(\vec{b})$, quando se deseja minimizar $f(\vec{x})$. Para o caso multiobjetivo, a comparação entre soluções não é tão simples. Existe um conjunto denominado de **Pareto ótimo** que é formado por soluções que apresentam um bom compromisso entre os objetivos conflitantes. Estas soluções são ótimas no sentido que nenhuma outra solução no espaço de busca é superior a elas quando todos os objetivos são considerados [49].

Para um MOP de minimização, diz-se que a solução \vec{a} é melhor do que uma solução \vec{b} se o vetor objetivo $\vec{f}(\vec{a})$ possuir pelo menos uma componente menor que $\vec{f}(\vec{b})$ e que não seja superior nas demais. Então, é afirmado que $\vec{a} \preceq \vec{b}$ (lê-se \vec{a} **domina** \vec{b}). Porém, se $\vec{f}(\vec{a})$ possuir pelo menos um objetivo menor e pelo menos um objetivo maior que $\vec{f}(\vec{b})$, diz-se que \vec{a} e \vec{b}

são incomparáveis [51]. A figura 4.1 ilustra o conceito de dominância para um problema de minimização de duas funções objetivo.

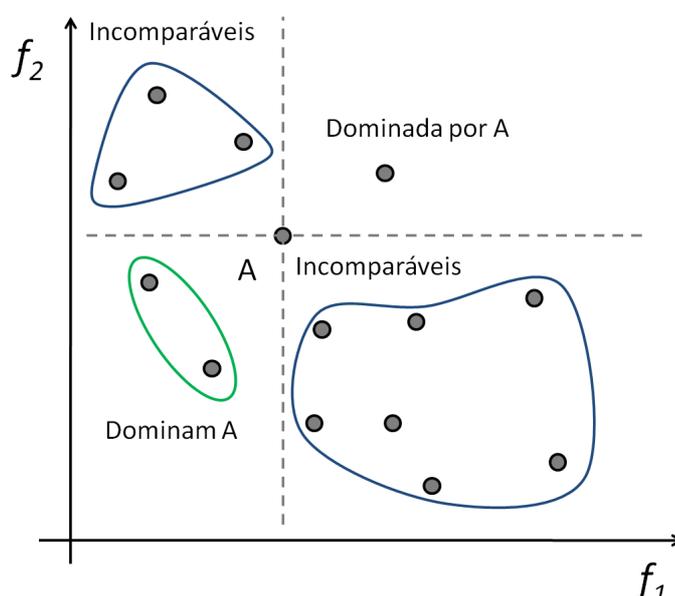


Figura 4.1: Exemplo do conceito de dominância para um problema de minimização de dois objetivos.

Para determinar as relações de dominância das soluções referentes à solução A na figura 4.1 basta traçar retas paralelas aos eixos do gráfico que passem por A. As soluções que se localizam na região delimitada acima da reta horizontal e à direita da reta vertical são dominadas pela solução A, pois apresentam valores superiores nos dois objetivos. As soluções que estão abaixo da reta horizontal e à esquerda da reta vertical dominam a solução A. As demais soluções são incomparáveis, pois se vencem em um objetivo, mas perdem no outro.

A definição formal de dominância por Pareto é [53]: um vetor $\vec{a} = (a_1, \dots, a_k)$ domina um vetor $\vec{b} = (b_1, \dots, b_k)$, $\vec{a} \preceq \vec{b}$, se e somente se, $\forall i \in \{1, \dots, k\}$, $a_i \leq b_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, k\} : a_i < b_i$.

O conjunto correspondente ao **Pareto ótimo** no espaço de objetivos é denominado frente de Pareto (*Pareto Front*). Dentro do *Pareto Front*, pode haver mais de uma solução, as quais apresentam uma relação de equilíbrio entre as funções objetivo [51, 53]. O *Pareto Front*, para o exemplo da figura 4.1, é mostrado na figura 4.2. Esse conjunto é formado apenas por soluções não dominadas.

4.2.2 Elitismo

O elitismo trata de evitar a perda de boas soluções durante o processo de otimização que pode ser causada pela escolha aleatória dos pais que geram a população atual. Uma

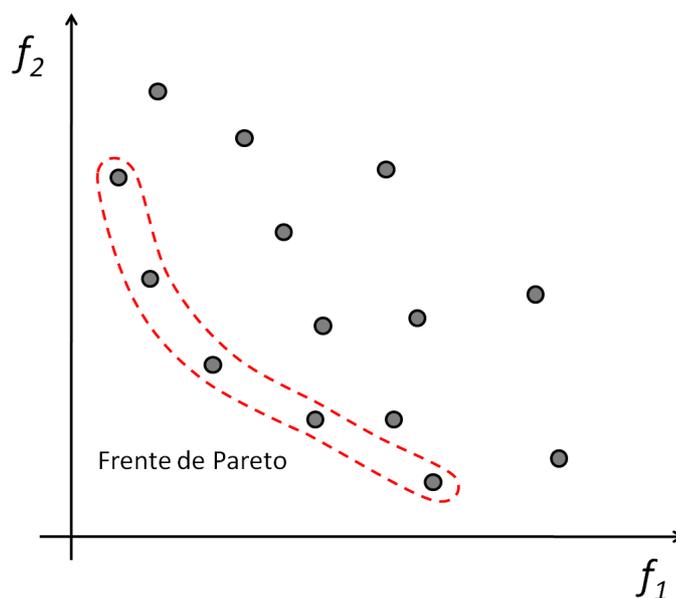


Figura 4.2: Exemplo de Pareto Front para um conjunto de soluções.

forma de impedir que isso aconteça é utilizar um critério de seleção determinística, após a união das populações antiga e nova, em oposição à substituição direta da população anterior pela atual [51, 56].

Outra opção é manter uma população alternativa, também chamada de arquivo, para onde as melhores soluções da população são copiadas a cada geração. O arquivo pode ser usado apenas como uma memória externa separada do mecanismo de otimização, ou ser integrado com o EA pela inclusão dos membros do arquivo no processo de seleção [56]. A figura 4.3 ilustra as duas formas de implementar o elitismo.

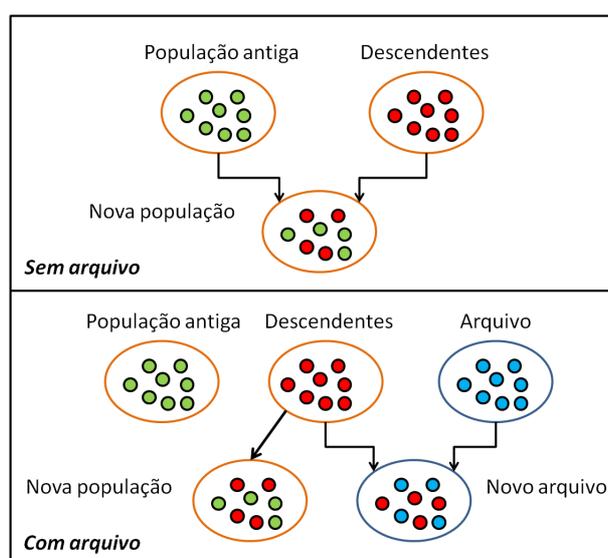


Figura 4.3: Duas maneiras possíveis de implementar o elitismo.

A maioria dos EAs multiobjetivos utilizam critérios de dominância e de densidade das soluções para escolher as soluções que serão mantidas no arquivo. A técnica utilizada nesta dissertação, a qual é descrita na Seção 4.3, faz uso do arquivo externo que é mantido de acordo com os critérios citados anteriormente.

4.3 SPEA2

O SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2*) foi proposto por Zitzler e colaboradores em [57]. O trabalho realizado por Araújo e colaboradores [58] indica que tanto o NSGA-II [45], usado na abordagem proposta por Chaves e colaboradores [44], quanto o SPEA2 se mostram apropriados para a otimização de redes ópticas para dois objetivos. Como nessa dissertação são utilizadas duas configurações de objetivos: uma com três e outra com quatro, a técnica SPEA2 foi escolhida por se apresentar mais adequada para problemas que possuem mais objetivos [57].

O pseudocódigo do SPEA2 está ilustrado no algoritmo 4.4. Trata-se de uma técnica elitista e suas principais características são [57]: um esquema de atribuição de função de aptidão que considera, para cada indivíduo, quantas soluções ele domina e por quantas é dominado; uma técnica de vizinho mais próximo para a estimativa de densidade; e um método de truncamento de arquivo que preserva as soluções presentes nas fronteiras.

Algoritmo 4.4: Pseudocódigo do SPEA2.

- 1 Gere uma população P com N_P soluções;
 - 2 Crie um arquivo externo A vazio com capacidade N_A ;
 - 3 **repita**
 - 4 Avalie a função de aptidão de cada indivíduo em P e em A ;
 - 5 Copie todos os indivíduos não-dominados em P para A ;
 - 6 Remova os indivíduos dominados de A ;
 - 7 **se** *O número de soluções em $A < N_A$* **então**
 - 8 Preencha A com indivíduos dominados de acordo com o menor valor de função de aptidão;
 - 9 Selecione pais usando torneio binário e reposição em A ;
 - 10 Crie um novo indivíduo usando cruzamento e mutação;
 - 11 Acrescente o indivíduo à população P ;
 - 12 **fim se**
 - 13 **até** alcançar o número máximo de gerações;
-

O cálculo da função de aptidão do SPEA2 é realizado em várias etapas. A primeira consiste em calcular a força (*strength*) S de cada solução presente na população e no arquivo. O valor de $S(i)$ corresponde ao número de soluções que o indivíduo i domina [57]. Sua representação matemática está descrita na equação (4.2):

$$S(i) = |\{j : j \in (P + A) \wedge i \succ j\}|, \quad (4.2)$$

na qual $|\cdot|$ denota a cardinalidade do conjunto, $+$ significa a união entre os conjuntos e o símbolo \succ corresponde à relação de dominância. A figura 4.4 mostra como é atribuída a força para as soluções no SPEA2 e destaca o cálculo para a solução A. É observado que a solução A domina apenas uma outra solução, portanto $S(A) = 1$.

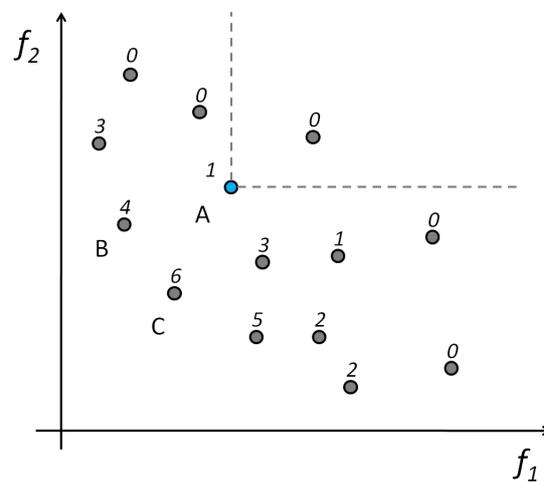


Figura 4.4: Exemplo de atribuição de força para as soluções no SPEA2.

A próxima etapa consiste no cálculo do valor bruto da função de aptidão (*raw fitness*) R . Seu valor é calculado de acordo com a equação (4.3) [57]:

$$R(i) = \sum_{\substack{j \in (P+A), \\ j \succ i}} S(j). \quad (4.3)$$

Um valor $R(i) = 0$ significa que o indivíduo i é não-dominado. Conforme descrito no algoritmo 4.4, o objetivo é minimizar a função de aptidão do SPEA2. A figura 4.5 mostra o valor bruto da função de aptidão para as soluções no SPEA2 e destaca o cálculo para a solução A. É observado que a solução A é dominada pelas soluções B e C. É visto na figura 4.4 que $S(B) = 4$ e $S(C) = 6$, portanto $R(A) = S(B) + S(C) = 4 + 6 = 10$.

Para diferenciar as soluções que possuem o mesmo valor de R , o SPEA2 utiliza informação sobre a densidade de cada solução. A técnica utilizada para estimar a densidade é uma adaptação do método do k -ésimo vizinho mais próximo [59], onde a densidade em um

4.4.1 Hypervolume

O *Hypervolume* é definido pelo volume n -dimensional no espaço de objetivos formado pelo *Pareto Front*, ou o volume entre o *Pareto Front* e um ponto de referência. A definição matemática para o *Hypervolume* é a seguinte [53]:

$$HV \triangleq \left\{ \bigcup_i vol_i \mid \vec{x}_i \in P_a^* \right\}, \quad (4.6)$$

em que \vec{x}_i é uma solução não-dominada no *Pareto Front* P_a^* e vol_i é o volume compreendido pelos componentes de \vec{x}_i e um ponto de referência.

A figura 4.6 mostra a delimitação para o cálculo do *hypervolume* para as soluções presentes no *Pareto Front*, considerando um ponto de referência W . Por se tratar de um problema de dois objetivos, o *hypervolume* será dado pela área em destaque.

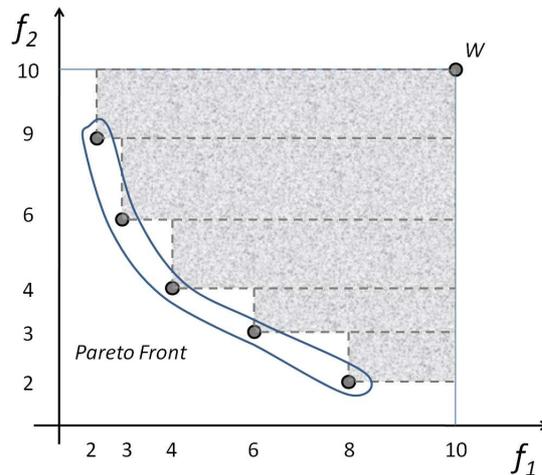


Figura 4.6: Exemplo da delimitação do *hypervolume*, considerando um ponto de referência W .

Por intermédio da figura 4.6, o *hypervolume* é dado por:

$$\begin{aligned} HV = & (10 - 2) \times (10 - 9) + (10 - 3) \times (9 - 6) + (10 - 4) \times (6 - 4) + \\ & + (10 - 6) \times (4 - 3) + (10 - 8) \times (3 - 2) = 47. \end{aligned}$$

O *Hypervolume* é um indicador que avalia simultaneamente a convergência e a diversidade do algoritmo que gerou o *Pareto Front* correspondente. Portanto, ele é um indicador híbrido.

4.4.2 Coverage Set

O *Coverage Set* é uma métrica que compara dois *Pareto Fronts*. Sejam dois *Pareto Fronts* A e B . O *Coverage Set* de A em relação a B é calculado da seguinte forma [49]:

$$C(A, B) = \frac{|\{b \in B; \exists a \in A : a \preceq b\}|}{|B|}, \quad (4.7)$$

O valor de $C(A, B)$ está dentro do intervalo $[0,1]$. Se $C(A, B) = 1$ significa que cada solução de B é dominada por pelo menos uma solução de A . Por outro lado, se $C(A, B) = 0$ significa que nenhuma das soluções em B são dominadas por A . É importante salientar que $C(B, A)$ não é necessariamente igual a $1 - C(A, B)$ [49].

A figura 4.7 mostra dois *Pareto Fronts* para o cálculo do *Coverage Set*. O *Pareto Front* F_A possui cinco soluções e *Pareto Front* F_B possui seis soluções.

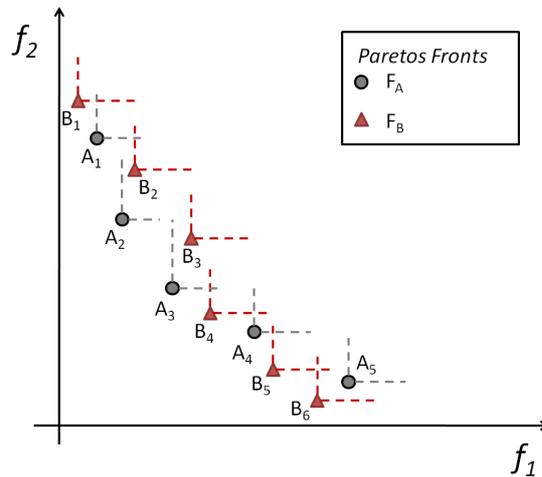


Figura 4.7: Exemplo do cálculo da métrica Coverage Set.

É observado na figura 4.7 que $A_2 \prec B_2$, $A_3 \prec B_3$ e $B_6 \prec A_5$. Logo, os valores de $C(F_A, F_B)$ e $C(F_B, F_A)$ para os conjuntos da figura 4.7 são dados por:

$$C(F_A, F_B) = \frac{2}{6} = \frac{1}{3} \text{ e}$$

$$C(F_B, F_A) = \frac{1}{5}.$$

Portanto, o *Pareto Front* F_A é melhor que o *Pareto Front* F_B .

A aplicação do SPEA2 para a solução do WRP, denominado de MOWRP, é apresentado no capítulo a seguir.

CAPÍTULO 5

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVA DA CAPACIDADE DOS ENLACES E INSERÇÃO DE REGENERADORES

Este capítulo apresenta as contribuições da dissertação. A Seção 5.1 define o problema, explica como são representadas as informações de entrada para o processo de otimização e descreve o modelo de custo utilizado. A Seção 5.2 apresenta as propostas sugeridas para a solução do problema de WRP utilizando otimização multiobjetiva. A Seção 5.3 descreve parâmetros e considerações importantes pertinentes às simulações. A Seção 5.4 analisa o impacto de impor, ou não, a restrição de disponibilizar a mesma quantidade de comprimentos de onda em todos os enlaces. A Seção 5.5 analisa a dependência das propostas em relação ao modelo de custo. Por fim, a Seção 5.6 analisa a convergência e robustez da técnica utilizada.

5.1 Descrição do problema

O problema abordado consiste em realizar a inserção de regeneradores nos nós e determinar a quantidade de comprimentos de onda que deve ser disponibilizada nos enlaces, com o menor custo e maior desempenho possível. Assim, considera-se uma topologia fixa com a arquitetura dos enlaces também previamente determinada (Figura 2.4 na Seção 2.6). Dessa forma, o custo financeiro considerado para o projeto será composto apenas das va-

riáveis pertencentes ao processo de otimização, sendo desconsiderados os custos relativos à topologia física e à arquitetura dos enlaces. O algoritmo de otimização multiobjetivos utilizado no processo de otimização é o SPEA2 [57] (Seção 4.3). A Subseção 5.1.1 descreve como são representadas as informações de entrada para o SPEA2 e a Subseção 5.1.2 descreve o modelo de avaliação do custo financeiro utilizado.

5.1.1 Representação geral da solução

Conforme é descrito no capítulo 4, após a identificação do problema, a próxima etapa consiste em gerar uma representação adequada do problema para o processo de otimização. Uma rede óptica é formada por nós que são conectados por meio de enlaces de fibra óptica. Sejam N o número de nós e L o número de enlaces bidirecionais que compõem a rede. Então, é definido um vetor solução, $\vec{V} = v_i$, o qual possui uma dimensão igual a $N + L$. É importante enfatizar que \vec{V} é configurado de forma ordenada, segundo a ordem crescente dos identificadores dos nós e dos enlaces.

As componentes de \vec{V} são números naturais. Assim, para cada índice $1 \leq i \leq N$, v_i indica o número de regeneradores inseridos no i -ésimo nó. Se $N + 1 \leq i \leq N + L$, então v_i informa o número de pares de comprimentos de onda inseridos no $(i - N)$ -ésimo enlace. Um par de comprimento de onda significa um comprimento de onda para um sentido da conexão entre dois nós e o mesmo comprimento de onda para o sentido inverso, pois as conexões são bidirecionais em duas fibras.

Por exemplo, seja a rede óptica mostrada na figura 5.1. A topologia, ilustrada à esquerda, informa os rótulos, ou identificadores, dos nós e dos enlaces. Enquanto que no lado direito estão informados a quantidade de regeneradores inseridos nos nós e o número de pares de comprimentos de onda nos enlaces.

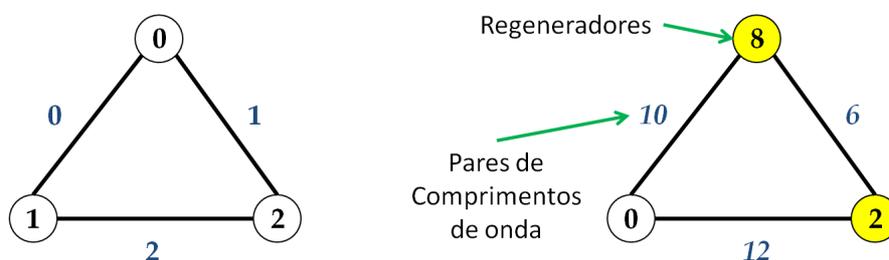


Figura 5.1: Exemplo de uma solução e sua representação.

O vetor solução referente à rede em destaque na figura 5.1 tem a seguinte configuração:

$$\vec{V} = \left\{ \underbrace{8, 0, 2}_{\text{nós}}, \overbrace{10, 6, 12}^{\text{enlaces}} \right\}.$$

5.1.2 Modelo de custo financeiro utilizado

O modelo de CapEx utilizado nesta dissertação é composto por duas parcelas: o custo devido aos regeneradores (C_R) e o custo devido aos comprimentos de onda (C_W). É considerado o modelo proposto por Huelsermann e colaboradores [61] com uma adaptação proposta por Chaves e colaboradores [62].

O modelo apresentado por Huelsermann e colaboradores [61] utiliza valores de custo normalizados para os enlaces WDM, equipamentos e OXCs. Nesse modelo, um *transponder*, equipamento responsável pela transmissão dos sinais ópticos, que opera com uma taxa de 10 Gb/s e possui um alcance máximo sem regeneração de 750 km tem um custo normalizado de uma unidade monetária (m.u. - *Monetary Unit*), ou seja, 1 m.u.. Nesta dissertação, é considerado um *transponder* que opera com uma taxa de 40 Gb/s e possui um alcance máximo sem regeneração de 750 km. O seu custo normalizado é igual a 3,75 m.u. [61].

Chaves e colaboradores propuseram em [62] uma adaptação referente ao custo dos OXCs antes definido no modelo sugerido por Huelsermann e colaboradores [61]. Esta inclui o número de portas dos OXCs no cálculo do CapEx. Assim, C_W é definido por:

$$C_W = 2\tau \sum_{l=1}^L W_l + \sum_{n=1}^N [(0,05225P_n + 6,24)G_n + 2,5], \quad (5.1)$$

na qual τ é o custo referente ao *transponder* considerado. O valor de τ é igual a 3,75 m.u. [61]. W_l é o número de pares de comprimentos de onda (*transponders*) colocados no l -ésimo enlace e L é o número de enlaces bidirecionais na rede. P_n é o número de portas do OXC (determinado pelo maior número de pares de comprimentos de onda presentes no enlace com mais canais e que está conectado ao nó em análise), G_n é o grau do n -ésimo nó e N é o número de nós na rede.

O custo devido aos regeneradores é calculado por:

$$C_R = \beta\tau \sum_{n=1}^N R_n, \quad (5.2)$$

na qual R_n é o número de regeneradores no nó n e β é o custo relativo do regenerador em comparação ao custo do *transponder* (τ). Huelsermann e colaboradores propõem que β seja igual a 1,4 [61]. Isso significa que um regenerador é 40% mais caro que um *transponder*. Por fim, o custo total (C_T) de uma determinada rede é dado pela equação (5.3):

$$C_T = C_R + C_W. \quad (5.3)$$

Como exemplo, considere o custo, ou CapEx, da rede óptica mostrada na figura 5.1. O vetor solução, $\vec{V} = \{8, 0, 2, 10, 6, 12\}$, foi obtido no exemplo anterior. Primeiro, é calculado o valor de C_R :

$$C_R = 1,4 \times 3,75 \times (8 + 0 + 2) = 52,5 \text{ m. u..}$$

Pela figura 5.1, é possível verificar que $P_0 = 10$, $P_1 = 12$ e $P_2 = 12$. Além disso, todos os nós possuem grau dois, ou seja, $G_0 = G_1 = G_2 = 2$. Dessa forma, o valor de C_W é dado por:

$$\begin{aligned} C_W &= 2 \times 3,75 \times (10 + 6 + 12) + [(0,05225 \times 10 + 6,24) \times 2 + 2,5] + \\ &\quad + [(0,05225 \times 12 + 6,24) \times 2 + 2,5] + [(0,05225 \times 12 + 6,24) \times 2 + 2,5] \\ &= 210 + 16,025 + 16,234 + 16,234 = 258,493 \text{ m. u..} \end{aligned}$$

O custo total da rede é:

$$C_T = 52,5 + 258,493 = 310,993 \text{ m. u..}$$

5.2 Propostas sugeridas

Esta dissertação propõe uma metodologia para a solução de problema do WRP, que é descrita nesta seção e é chamada de otimização multiobjetiva para inserção de comprimentos de onda e regeneradores (MOWRP - *Multi-objective Optimization for Wavelength and Regenerator Placement*). O algoritmo multiobjetivo utilizado é o SPEA2 [57], descrito na Seção 4.3. No entanto, a metodologia sugerida pode ser aplicada utilizando outros algoritmos, como por exemplo o NSGA-II [45].

O MOWRP possui duas variações: a primeira é denominada MOWRP-3o e possui três objetivos e a segunda é denominada MOWRP-4o e possui quatro objetivos. Os objetivos do MOWRP foram escolhidos de tal forma que as duas variações, MOWRP-3o e MOWRP-4o, correspondessem a problemas de minimização.

O MOWRP-3o considera a otimização simultânea dos seguintes objetivos:

1. Probabilidade de bloqueio;
2. Número de nós translúcidos (relativo ao OpEx);
3. CapEx.

A probabilidade de bloqueio, obtida a partir da simulação da rede utilizando a ferramenta computacional SIMTON (Na Seção 2.5, há um indicativo de como obter o de-

sempenho da rede). Já o número de nós translúcidos é um valor que possui influência no OpEx [47,48] (Seção 3.4), que não é avaliado diretamente, em termos de m.u..

O CapEx, dado pela equação (5.3), informa o investimento de capital necessário para a aquisição dos equipamentos (regeneradores e *transponders*). A figura 5.2 mostra o diagrama de blocos do funcionamento do MOWRP-3o. Se o projetista desejar utilizar outro algoritmo de otimização multiobjetivos, é suficiente apenas trocar o bloco do SPEA2 por outro bloco que utilize a técnica pretendida.

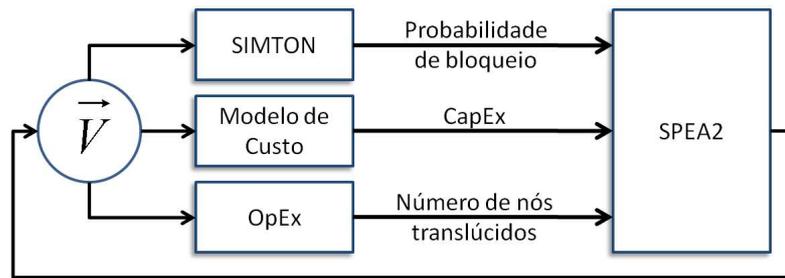


Figura 5.2: Diagrama de blocos do funcionamento do MOWRP-3o.

O MOWRP-4o considera a otimização simultânea dos seguintes objetivos:

1. Probabilidade de bloqueio;
2. Número de nós translúcidos (relativo ao OpEx);
3. Número normalizado de regeneradores não utilizados (NNUR - *Normalized Number of Unused Regenerators*);
4. Número normalizado de comprimentos de onda não utilizados (NNUW - *Normalized Number of Unused Wavelengths*).

O NNUR é calculado por:

$$NNUR = \begin{cases} \frac{\sum_{n=1}^N (R_n - R'_n)}{\sum_{n=1}^N R_n}, & \text{se } \exists i \mid R_i \neq 0 \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (5.4)$$

em que R'_n é o número máximo de regeneradores ativos simultaneamente no nó n .

É considerado que cada nó possui um registrador que armazena o número de regeneradores ativos simultaneamente durante o processo de simulação. Durante a operação da rede, o R'_n de cada nó é verificado para cada nova chamada estabelecida. Por exemplo, é visto na figura 5.1 que $R_0 = 8$. Considere que em um determinado momento da simulação o valor de R'_0 seja igual a 4. Se uma nova chamada estabelecida utilizar esse nó (de índice

0) como local de regeneração e nenhuma outra chamada ativa que passe por ele e utilize regeneradores seja retirada, o valor de R'_0 será atualizado para 6. Pois, serão ativados dois novos regeneradores: um para o sinal de transmissão e outro para o sinal de recepção.

É importante fazer algumas observações sobre $NNUR$. Primeiro, o seu valor é um número que pertence ao intervalo $[0,1]$. Segundo, se $NNUR = 0$ há duas opções: a rede em análise é transparente ($R_n = 0$), conforme a equação (5.4), ou é translúcida e todos os regeneradores de cada nó foram utilizados simultaneamente durante sua operação ($R'_n = R_n \neq 0 \forall n$). Terceiro, se $NNUR = 1$, a rede é translúcida e os regeneradores não foram utilizados ($R'_n = 0$ e $R_n \neq 0 \forall n$).

O $NNUW$ é calculado por:

$$NNUW = \frac{\sum_{l=1}^L (W_l - W'_l)}{\sum_{l=1}^L W_l}, \quad (5.5)$$

em que W'_l é o número máximo de pares de comprimentos de onda ativos simultaneamente no enlace l . Cada enlace da rede possui um registrador que armazena o número de pares de comprimentos de onda ativos simultaneamente durante o processo de simulação. Eles são atualizados de maneira análoga aos registradores dedicados aos regeneradores.

Assim como $NNUR$, o valor de $NNUW$ pertence ao intervalo $[0,1]$. Se $NNUW = 0$, todos os comprimentos de onda disponíveis em cada enlace foram utilizados simultaneamente durante sua operação ($W'_l = W_l \forall l$). Por outro lado, se $NNUW = 1$, nenhuma conexão foi estabelecida na rede ($W'_l = 0 \forall l$).

O propósito do MOWRP-4o é minimizar a probabilidade de bloqueio, o número de nós translúcidos (relacionado ao OpEx) e otimizar o CapEx pela minimização de $NNUR$ e $NNUW$.

A minimização de $NNUR$ implica em maximizar a eficiência da utilização dos regeneradores. De maneira similar, a minimização de $NNUW$ conduz a uma melhora na eficiência da utilização dos comprimentos de onda. A figura 5.3 mostra o diagrama de blocos do funcionamento do MOWRP-4o.

Note-se que $NNUW$ e $NNUR$ se relacionam com variáveis (W_l e R_n) da função que calcula o CapEx. Se as variáveis que afetam o CapEx são otimizadas, ele também será. As definições das eficiências dos regeneradores e dos comprimentos de onda, descritas nas equações (5.4) e (5.5), usadas como metas de otimização permitem que o MOWRP-4o projete redes com melhor compromisso entre CapEx e eficiência de uso dos dispositivos, em vez de apenas CapEx. Assim, tanto o CapEx quanto OpEx podem ser otimizados indepen-

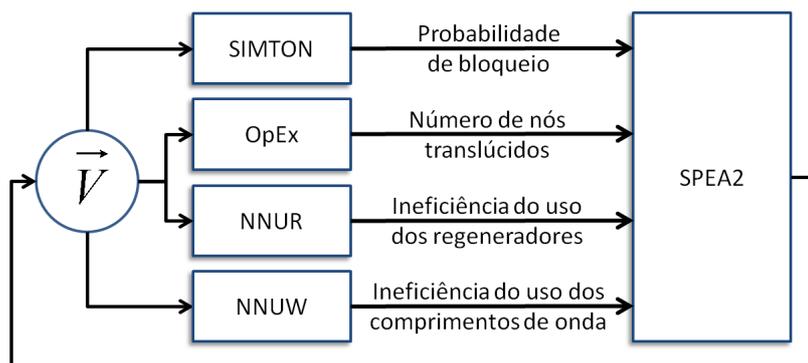


Figura 5.3: Diagrama de blocos do funcionamento do MOWRP-4o.

dentemente da definição do modelo de custo. As equações utilizadas pelo MOWRP estão resumidas na tabela.

Tabela 5.1: Resumo das equações utilizadas pelo MOWRP.

Descrição	Equação
Custo relativo aos comprimentos de onda (C_W)	$C_W = 2\tau \sum_{l=1}^L W_l + \sum_{n=1}^N [(0,05225P_n + 6,24)G_n + 2,5]$
Custo relativo aos regeneradores (C_R)	$C_R = \beta\tau \sum_{n=1}^N R_n$
Número normalizado de comprimentos de onda não utilizados	$NNUW = \frac{\sum_{l=1}^L (W_l - W'_l)}{\sum_{l=1}^L W_l}$
Número normalizado de regeneradores não utilizados	$NNUR = \begin{cases} \frac{\sum_{n=1}^N (R_n - R'_n)}{\sum_{n=1}^N R_n}, & \text{se } \exists i \mid R_i \neq 0 \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases}$

5.3 Configurações gerais das simulações

Os efeitos considerados são os seguintes: ruído ASE e saturação do ganho referentes aos EDFAs; perda de potência e interferência intracanal nos comutadores ópticos; atenuação, RCD e PMD nas fibras ópticas e as perdas de potência nos multiplexadores e demultiplexadores. Os parâmetros ópticos fixos utilizados nas simulações são mostrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros ópticos fixos de simulação.

Parâmetro	Valor	Definição
δ_{QoT}	10 %	Máximo alargamento temporal percentual para critério de QoT.
$OSNR_{QoT}$	20 dB	Relação sinal-ruído para critério de QoT.
$OSNR_{in}$	40 dB	Relação sinal-ruído óptica do transmissor.
α	0.2 dB	Coefficiente de atenuação da fibra óptica.
$\Delta\lambda_{TX}$	0.013 nm	Largura de linha do transmissor.
λ_i	1528.77 nm	Primeiro comprimento de onda da grade.
λ_0	1450 nm	Comprimento de onda de dispersão igual a zero para a fibra de transmissão.
λ_{0RD}	1528.77 nm	Comprimento de onda de dispersão residual igual a zero.
ε	-38 dB	Fator de isolamento do comutador óptico.
B_o	100 GHz	Largura de banda a 3 dB do filtro óptico.
B	40 Gb/s	Taxa de transmissão.
D_{PMD}	0.04 ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Coefficiente de PMD da fibra de transmissão.
$D_{DCF}(@ 1550 \text{ nm})$	-110 ps/km.nm	Coefficiente de dispersão da fibra compensadora.
$D_{TF}(@ 1550 \text{ nm})$	4.5 ps/km.nm	Coefficiente de dispersão da fibra transmissora.
$S_{DCF} (@ 1550 \text{ nm})$	-1.87 ps/km.nm ²	Inclinação da curva de dispersão da fibra compensadora.
$S_{TF} (@ 1550 \text{ nm})$	0.045 ps/km.nm ²	Inclinação da curva de dispersão da fibra de transmissão.
NF	6 dB	Figura de ruído do amplificador (constante para qualquer valor de potência de entrada).
$OSNR_{in}$	40 dB	Relação sinal-ruído do transmissor.
L_{Dx}	3 dB	Perda no demultiplexador.
L_{Mx}	3 dB	Perda no multiplexador.
L_{Sx}	3 dB	Perda no comutador óptico.
P_{sat}	20 dBm	Potência de saturação na saída do amplificador.
P_{in}	3 dBm	Potência óptica do sinal na entrada do sistema.
C	100 Erl	Carga da rede.

Os parâmetros do SPEA2 utilizados nas simulações estão descritos na tabela 5.3. Já os limites do espaço de busca do MOWRP são informados na tabela 5.4. A figura 5.4 mostra

a topologia Finlândia, utilizada nas simulações. Ela possui 12 nós e 19 enlaces. Portanto, o vetor \vec{V} possui 31 elementos.

Tabela 5.3: Parâmetros do SPEA2 utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor	Definição
N	100	Tamanho da população.
\bar{N}	200	Tamanho do arquivo externo.
P_C	0,9	Probabilidade de cruzamento.
P_M	0,1	Probabilidade de mutação.
G	10.000	Número de gerações.

Tabela 5.4: Limites do espaço de busca do MOWRP utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor	Definição
R_{min}	0	Limite inferior do número de regeneradores nos nós.
R_{max}	$2 \sum_{l=1}^G W_l$	Limite superior do número de regeneradores nos nós, no qual G é o grau do nó.
W_{min}	2	Limite inferior do número de pares de comprimentos de onda nos enlaces.
W_{max}	40	Limite superior do número de pares de comprimentos de onda nos enlaces.
p	2	Variação mínima no valor das variáveis de decisão.

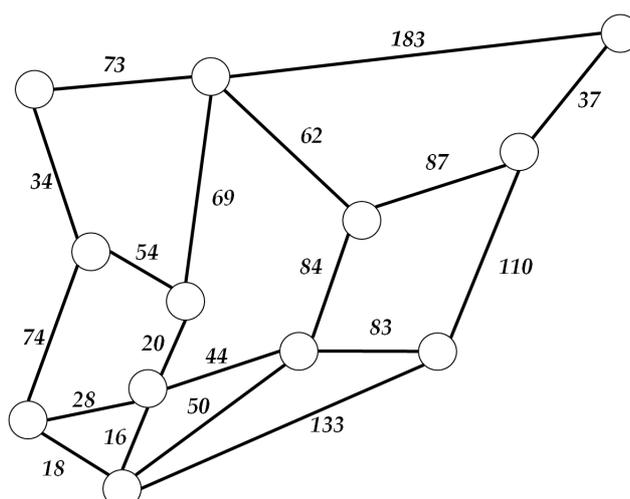


Figura 5.4: Topologia Finlândia utilizada nas simulações com as distâncias dos enlaces em km.

Durante o processo de simulação, para cada solução é gerado um conjunto mínimo de 1.000 chamadas. A avaliação de uma determinada solução é encerrada quando o número

de chamadas bloqueadas for igual a 200, ou quando o conjunto de chamadas geradas atingir o seu valor máximo estabelecido em 5.000.000.

O número de chamadas bloqueadas é aumentado para 1.000 quando restam apenas 10 gerações para o término do processo de otimização. Os números mínimos e máximos do conjunto de chamadas geradas permanecem os mesmos. Além disso, todas as soluções que estão presentes no arquivo externo, neste exato momento, são reavaliadas com esse novo valor de chamadas bloqueadas.

O objetivo dessa mudança e reavaliação das soluções é diminuir o efeito de flutuações estatísticas que ocorrem durante a otimização. Pois, os únicos objetivos que possuem natureza determinísticas são o CapEx e o número de nós translúcidos. A probabilidade de bloqueio, NNUR e NNUW dependem do processo estocástico das simulações.

O algoritmo de roteamento utilizado é o de menor distância física, enquanto que o algoritmo de WA usado é o FF.

5.4 Restrição no número de comprimentos de onda nos enlaces

Como a conversão de comprimento de onda pode ser realizada utilizando os regeneradores, então há uma relação entre quantidade de comprimentos de onda nos enlaces e o número de regeneradores nos nós. Assim, é proposto o dimensionamento da capacidade de tráfego dos enlaces em conjunto com o problema de RP (WRP).

Esta seção analisa o impacto de solucionar o problema de WRP com o mesmo número de comprimentos de onda nos enlaces. A primeira proposta é atribuir a mesma capacidade de tráfego para todos os enlaces. Isso significa uma restrição no número de comprimentos de onda. A segunda consiste em dimensionar os enlaces individualmente e assim permitir que esses possam ter diferentes quantidades de comprimentos de onda.

Para a análise da restrição de inserir o mesmo número de comprimentos de onda nos enlaces, é utilizada a proposta com três objetivos. O MOWRP-3o, como descrito na Seção 5.2, não possui a limitação de dimensionar os enlaces com a mesma capacidade de tráfego. Essa restrição é inserida posteriormente.

Para fazer a distinção entre as duas propostas, a versão do MOWRP-3o que possui a restrição é denominada de MOWRP-3o restrito (MOWRP-3o-R). Logo, o vetor solução do MOWRP-3o-R possui $N + 1$ elementos, em que N é o número de nós da rede e último elemento informa o número de comprimento de ondas em todos os enlaces. O MOWRO-3o, sem o sufixo R , possui $N + L$ elementos, conforme descrito na Subseção 5.1.1 e L é o

número de enlaces na rede.

Uma vez que o processo de otimização possui três objetivos, então as soluções do *Pareto Front* formam uma superfície tridimensional. Com o intuito de facilitar a visualização, as soluções são representadas como curvas de nível em um espaço bidimensional em função do número de nós translúcidos. A figura 5.5(a) mostra o *Pareto Front* para o MOWRP-3o e a figura 5.5(b) mostra a do MOWRO-3o-R. Os níveis de probabilidade de bloqueio para a rede transparente com a quantidade máxima de comprimentos de onda e da rede opaca estão indicados. Os valores são, aproximadamente, 5,6% para a rede transparente e 1,5% para rede opaca.

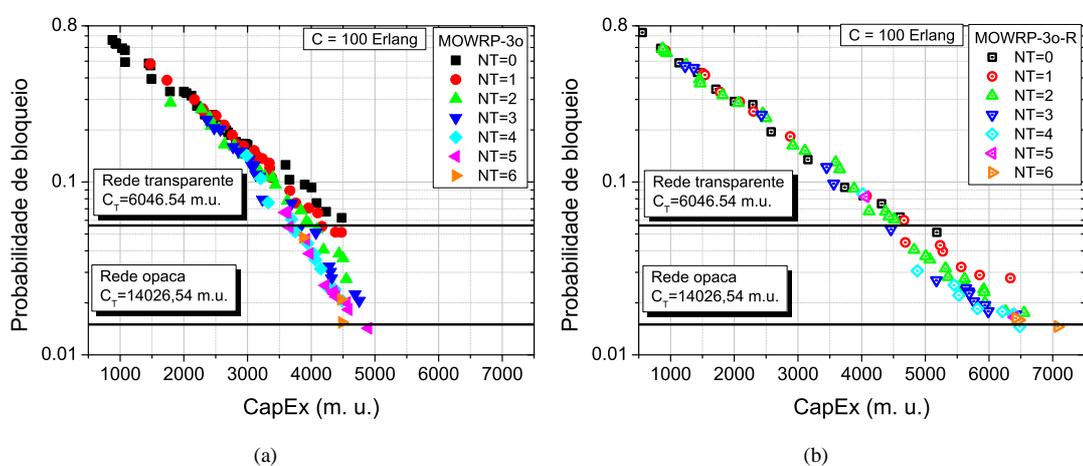


Figura 5.5: *Pareto Front* encontrado pelo: (a) MOWRP-3o e pelo (b) MOWRP-3o-R. O número de nós translúcidos estão representados por diferentes símbolos.

A tabela 5.5 informa as características gerais do *Pareto Front* do MOWRP-3o e do MOWRP-3o-R.

Tabela 5.5: Características gerais do *Pareto Front* do MOWRP-3o e do MOWRP-3o-R.

Técnica	Soluções	PB (%)	CapEx (m. u.)	NT
MOWRO-3o	72	1,42 – 66,29	878,46 – 4894,8	0 – 6
MOWRO-3o-R	89	1,46 – 73,26	556,091 – 7080,57	0 – 6

A tabela 5.5 mostra que o MOWRP-3o-R possui mais soluções no *Pareto Front*, cobre intervalos maiores de probabilidade de bloqueio e CapEx. No entanto, essas soluções apresentam maiores probabilidade de bloqueio e valores de CapEx comparados aos obtidos pelas soluções do MOWRP-3o. O intervalo de número de nós translúcidos (NT) é o mesmo e além disso, as duas técnicas obtém o desempenho de probabilidade de bloqueio da rede

opaca (1,5%).

A figura 5.6 mostra as soluções obtidas pelo MOWRP-3o e pelo MORWP-3o-R com valores de probabilidade de bloqueio iguais ou inferiores a 6%. Para as comparações são escolhidas três soluções: solução A, do MOWRP-3o; solução B e solução C do MOWRP-3o-R. Elas estão destacadas na figura 5.6.

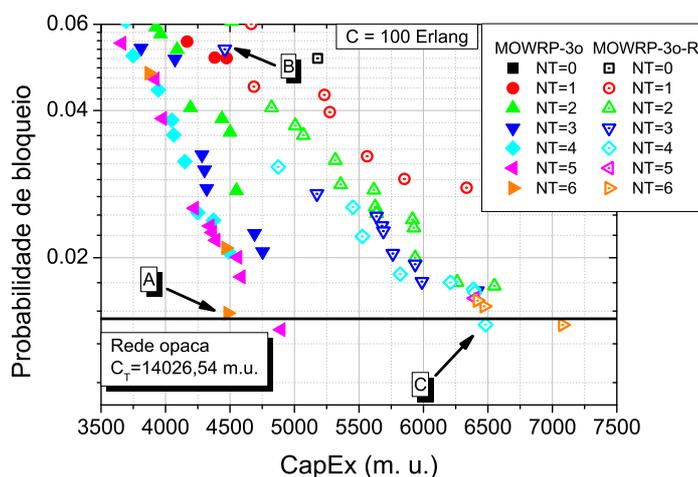


Figura 5.6: Pareto Front do MOWRP-3o e do MOWRP-3o-R para uma probabilidade de bloqueio máxima de 6%.

A solução A, proposta pelo MOWRP-3o, é selecionada porque representa a rede translúcida de menor CapEx que obtém o desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, semelhante ao da rede opaca. A mesma justificativa se aplica à solução C, do MOWRP-3o-R. A solução B, referente ao MOWRP-3o-R, é escolhida porque representa uma rede com um CapEx semelhante ao da solução A. A tabela 5.6 informa as características da solução A, da solução B e da solução C.

Tabela 5.6: Características da solução A (MOWRP-3o), da solução B e da solução C (MOWRP-3o-R).

Solução	PB (%)	CapEx (m. u.)	NT	Regeneradores	Pares de Comprimentos de onda
A	1,54	4482,97	6	108	478
B	5,34	4459,71	3	28	532
C	1,70	6398,07	4	122	722

A primeira análise compara as soluções que possuam valores semelhantes de CapEx, ou seja, a solução A, referente ao MORWP-3o e a solução B, referente ao MOWRP-3o-R. É observado na tabela 5.6 que a solução A possui um valor de probabilidade de bloqueio 3,76 vezes menor que o da solução B, para custos equivalentes. Por outro lado, a solução A distribui seus 108 regeneradores em 6 nós, enquanto que a solução B utiliza 28 regeneradores

distribuídos em 3 nós. Portanto, o OpEx da solução A é maior que o OpEx da solução B. A figura 5.7(a) ilustra a configuração de rede para a solução A e a figura 5.7(b) ilustra a configuração de rede para a solução B.

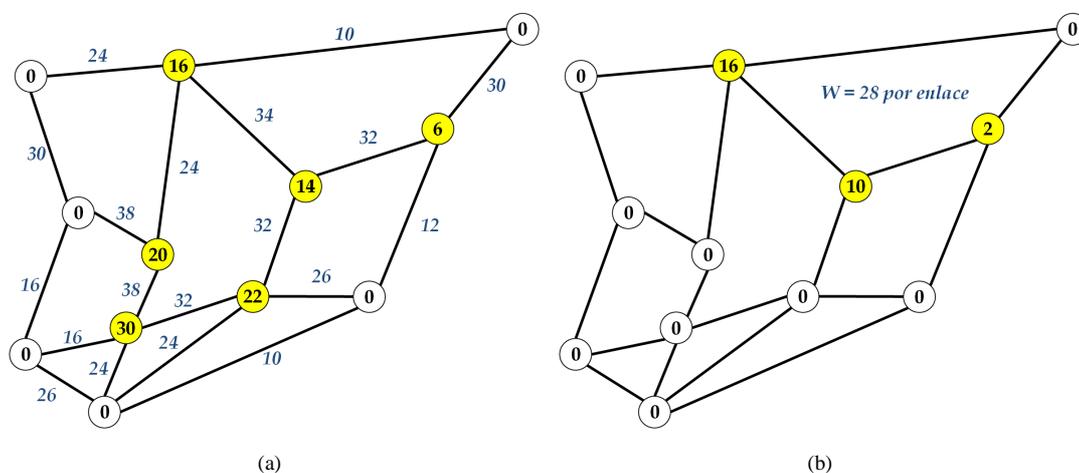


Figura 5.7: Configuração de rede encontrada pela solução: (a) solução A (MOWRP-3o com CapEx de 4482,97 m.u. e $TN = 6$) e (b) solução B (MOWRP-3o-R com CapEx de 4459,71 m.u. e $TN = 3$).

A figura 5.7(a) mostra que a solução A possui 11 enlaces, de um total de 19, que apresentam menos de 28 pares de comprimentos de onda. A solução A insere 80 regeneradores a mais que a solução B e 54 pares a menos de comprimentos de onda que a solução B. Isso implica que aumentar o número de comprimentos de onda resulta em uma redução no número de regeneradores para obter um desempenho otimizado para um determinado valor de CapEx. Isso ocorre porque é necessário utilizar os regeneradores como conversores de comprimento de onda.

A figura 5.8 mostra a probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para a solução A e para a solução B.

É observado na figura 5.8 que para um valor de carga até 60 Erlang, o desempenho da solução A e da solução B são equivalentes. A partir desse valor, o desempenho da solução A é superior ao da solução B. É importante ressaltar que o processo de otimização foi realizado considerando uma carga de 100 Erlang.

A segunda análise consiste em comparar as soluções de menor custo que alcançam o desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, da rede opaca. Essas são rotuladas como solução A, para o MOWRP-3o, e a solução C, para o MOWRP-3o-R, na figura 5.6.

Observando a tabela 5.6 é verificado que a solução A apresenta uma redução de 11,47% no número de regeneradores e 33,79% no número de comprimentos de onda, em relação aos valores da solução C. Isso resulta em um CapEx 29,93% menor que o da solução

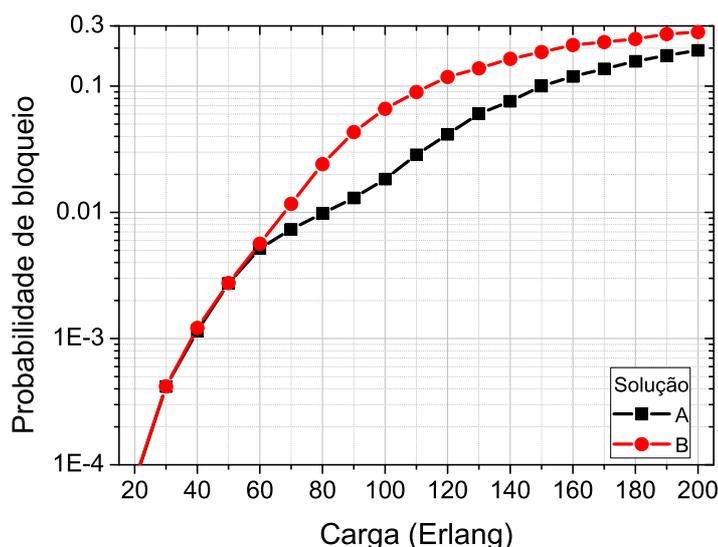


Figura 5.8: Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para a solução A e para a solução B.

C. A figura 5.9(a) ilustra a configuração de rede para a solução A e a figura 5.9(b) ilustra a configuração de rede para a solução C.

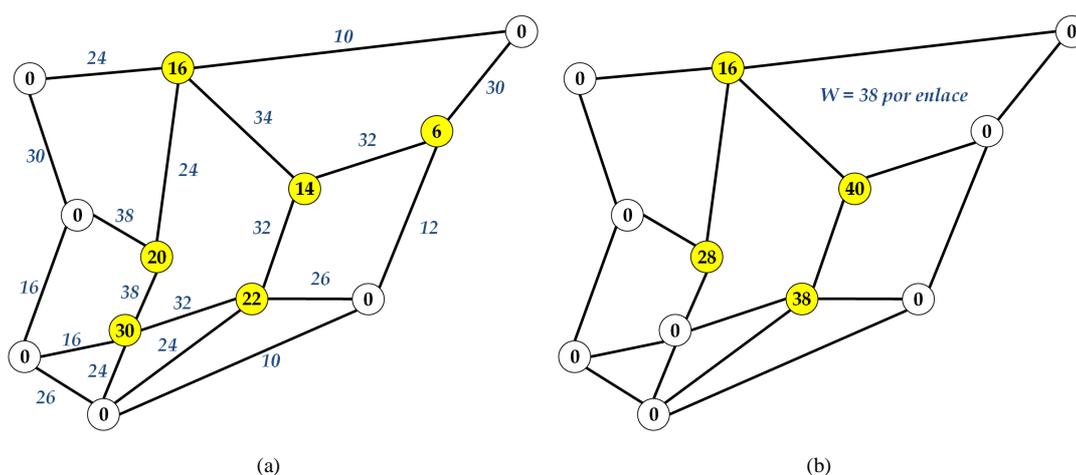


Figura 5.9: Configuração de rede encontrada pela solução: (a) solução A (MOWRP-3o com CapEx de 4482,97 m.u. e $TN = 6$) e (b) solução C (MOWRP-3o-R com CapEx de 6398,07 m.u. e $TN = 4$).

As figuras 5.9(a) e 5.9(b) mostram que a solução A possui apenas 2 enlaces com 38 pares de comprimentos de onda, que é o valor inserido em todos os enlaces da solução C. A redução no número de comprimentos de onda na rede obtida pela solução A em relação à rede obtida pela solução C é devida ao fato de o MOWRP-3o otimizar a capacidade de cada enlace. Por outro lado, o MOWRP-3o-R é forçado a inserir o mesmo número de comprimentos de onda em todos os enlaces de acordo com o valor necessário para suprir os enlaces que recebem mais tráfego.

A figura 5.10 mostra a probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para a

solução A e para a solução C.

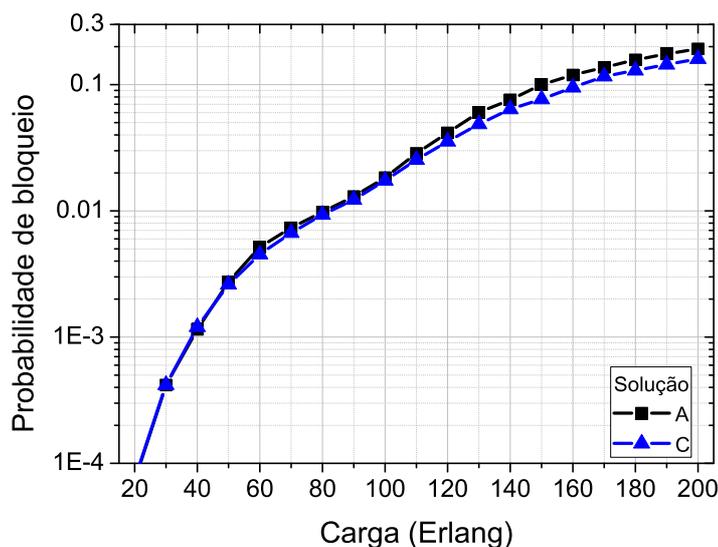


Figura 5.10: Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para a solução A e para a solução C.

É observado na figura 5.10 que para um valor de carga até 100 Erlang, que é o valor da carga de treinamento, o desempenho da solução A e da solução C são equivalentes. A partir desse valor, o desempenho da solução A é ligeiramente superior ao da solução C.

5.5 Independência do modelo de custo

Esta seção compara o MOWRP-3o com o MOWRP-4o. O primeiro utiliza o modelo de custo como uma das metas de otimização, enquanto que o segundo otimiza a utilização dos dispositivos que influenciam no custo (Ver Seção 5.2). Para comparar as propostas, os resultados obtidos pelo MOWRP-4o foram mapeados nos mesmos objetivos do MOWRP-3o. A figura 5.11 ilustra como isso é feito. Este mapeamento ocorre somente com os resultados finais (*Pareto Front*) obtidos pelo MOWRP-4o.

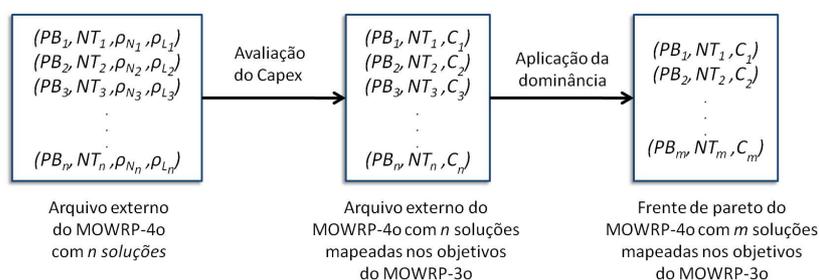


Figura 5.11: Procedimento para mapear as soluções do MOWRP-4o no espaço de objetivos do MOWRP-3o.

A figura 5.11 mostra que o CapEx das soluções do arquivo externo do MOWRP-4o é avaliado e logo após são retirados os objetivos NNUR e NNUW. Em seguida, o CapEx é

inserido como objetivo. Assim, são obtidos os mesmos objetivos utilizados pelo MOWRP-3o. Em seguida, é aplicado o critério de dominância para eliminar as soluções dominadas, após a mudança do conjunto de objetivos, obtidas pelo MOWRP-4o. Assim, o MOWRP-3o e o MOWRP-4o podem ser comparados. A figura 5.12(a) mostra o *Pareto Front* para o MOWRP-3o e a figura 5.12(b) mostra a do MOWRO-4o.

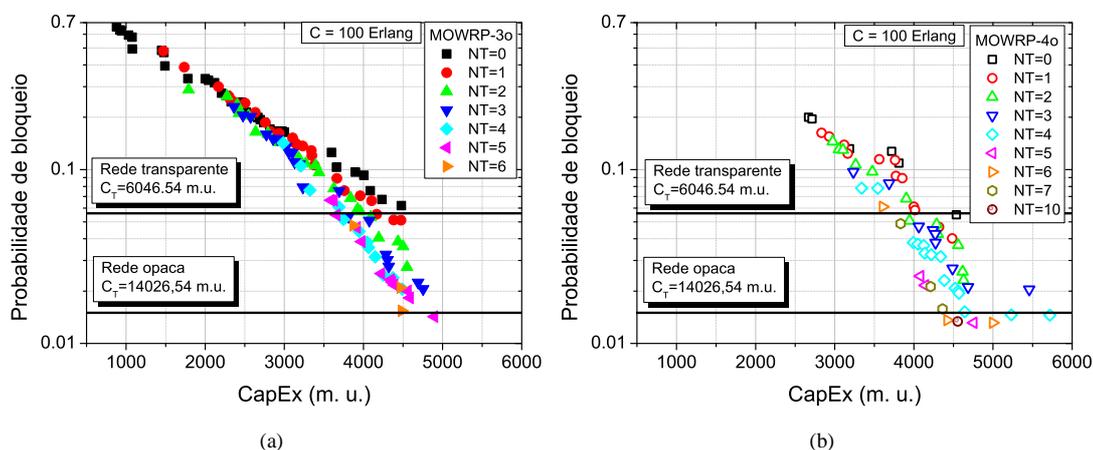


Figura 5.12: *Pareto Front* encontrado pelo: (a) MOWRP-3o e pelo (b) MOWRP-4o. O número de nós translúcidos estão representados por diferentes símbolos.

A tabela 5.7 informa as características gerais do *Pareto Front* do MOWRP-3o e do MOWRP-4o. É observado que o MOWRP-3o possui mais soluções no *Pareto Front*, porém o MOWRP-4o possui soluções com valores de probabilidade de bloqueio máximo de 20%. O intervalo de número de nós translúcidos é maior no MOWRP-4o. Esses fatos ocorrem devido ao MOWRP-4o otimizar a utilização dos regeneradores e dos comprimentos de onda em lugar do CapEx. Quanto maior o número de nós translúcidos, maior a possibilidade de realizar conversões de comprimento de onda ao longo de um caminho óptico. Logo, há uma maior utilização dos regeneradores e compactação dos comprimentos de onda e soluções com maior CapEx.

Tabela 5.7: Características gerais do *Pareto Front* do MOWRP-3o e do MOWRP-4o.

Técnica	Soluções	PB (%)	CapEx (m. u.)	NT
MOWRO-3o	72	1,42 – 66,29	878,46 – 4894,8	0 – 6
MOWRO-4o	64	1,31 – 20	2668,73 – 5718,26	0 – 7 e 10

A figura 5.13 mostra as soluções obtidas pelo MOWRP-3o e pelo MORWP-4o com valores de probabilidade de bloqueio iguais ou inferiores a 6% e destaca as solução A e D. A solução A, proposta pelo MOWRP-3o, é a mesma utilizada na Seção 5.4. Ela representa

a rede translúcida de menor CapEx que obtém o desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, semelhante ao da rede opaca. A solução *D* também representa a rede de menor CapEx e desempenho de probabilidade de bloqueio similar à rede opaca. Ela foi proposta pelo MOWRP-4o.

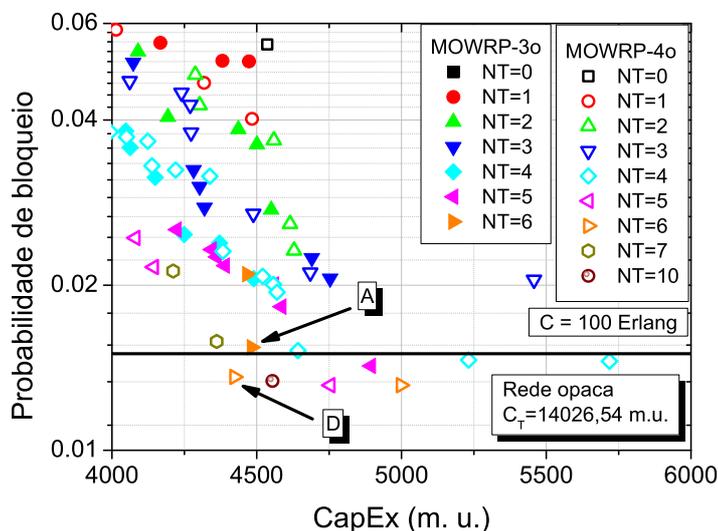


Figura 5.13: Pareto Front do MOWRP-3o e do MOWRP-4o para uma probabilidade de bloqueio máxima de 6%.

A tabela 5.8 informa as características da solução *A* e da solução *D*. É observado que a solução *A* e a solução *D* possuem desempenho em termos de probabilidade de bloqueio e CapEx semelhantes, com seis nós translúcidos cada. A solução *A* insere 32 regeneradores a menos que a solução *B* (108 contra 140), o que resulta em uma redução de 22,86% no número desses dispositivos.

Tabela 5.8: Características da solução *A* (MOWRP-3o) e da solução *D* (MOWRP-4o).

Solução	PB (%)	CapEx (m. u.)	NT	Regeneradores	Pares de Comprimentos de onda
<i>A</i>	1,54	4482,97	6	108	478
<i>D</i>	1,36	4423,04	6	140	448

Em relação ao número de pares de comprimentos de onda, a solução *D* insere menos *transponders*. Ela dispõe de 30 pares de comprimentos de onda a menos que a solução *A* (448 contra 478). Esse valor representa uma redução de 6,28%. Isso significa que embora as soluções *A* (MOWRP-3o) e *D* (MOWRP-4o) possuam configurações diferentes, elas são equivalentes nos seguintes critérios analisados: probabilidade de bloqueio, NT e CapEx.

A figura 5.14(a) ilustra a configuração de rede para a solução *A* e a figura 5.14(b) ilustra a configuração de rede para a solução *D*. É possível observar nas figuras 5.14(a) e

5.14(b) que as soluções compartilham 5 dos 6 nós translúcidos.

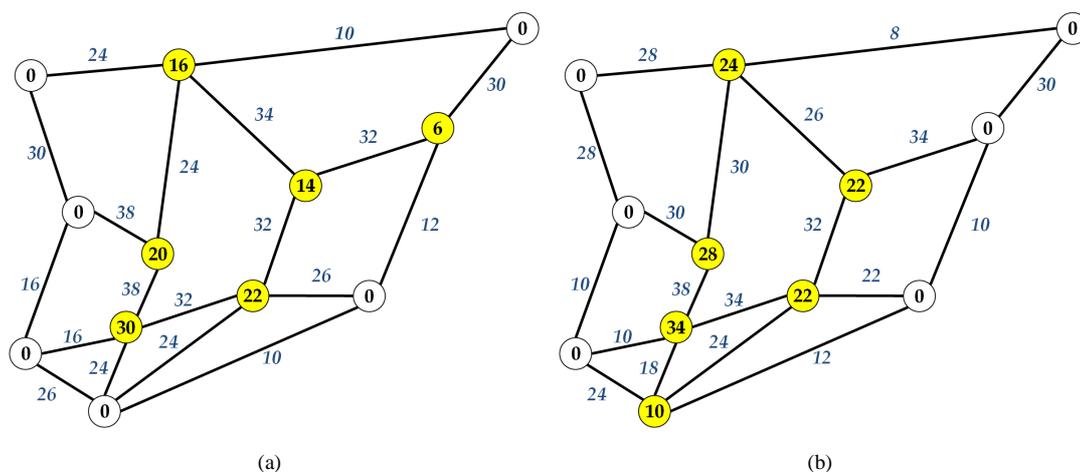


Figura 5.14: Configuração de rede encontrada pela solução: (a) solução A (MOWRP-3o com CapEx de 4482,97 m.u. e $TN = 6$) e (b) solução D (MOWRP-4o com CapEx de 4423.04 m.u. e $TN = 6$).

A figura 5.15 mostra a probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para a solução A e para a solução D. É observado, pela figura 5.15, que a solução A e a solução D apresentam desempenho semelhantes, em termos de probabilidade de bloqueio, para valores de carga de 20 a 200 Erlangs.

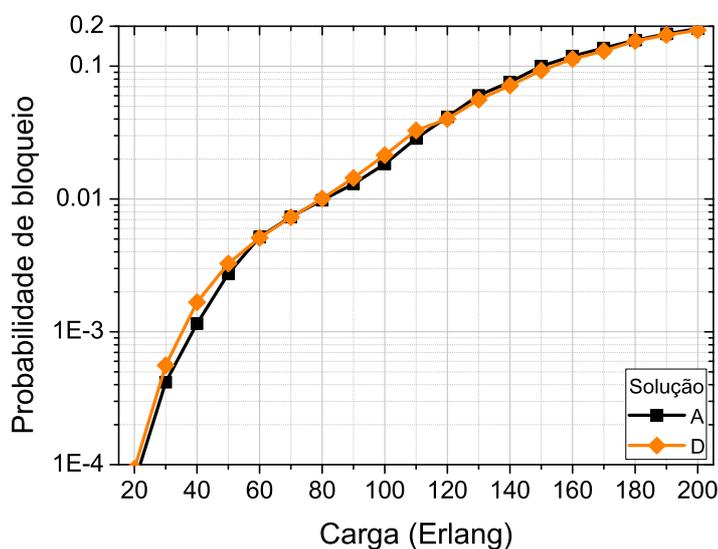


Figura 5.15: Probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para as soluções A e D.

5.5.1 Mudança no custo dos regeneradores

O objetivo desta seção é analisar o comportamento do *Pareto Front* do MOWRP-3o e do MOWRP-4o à mudança nos CapEx dos regeneradores. Para isso, cinco diferentes valores de β são utilizados: 1,4 (valor proposto por Huelsermann e colaboradores [61]); 3; 6; 7,5 e

9. Vale lembrar que esse parâmetro pondera o custo dos regeneradores em relação ao custo do *transponder* (Ver Subseção 5.1.2).

A rede opaca é a solução com maior CapEx possível. Ela possui enlaces com 40 pares de comprimentos de onda, que é o número máximo permitido, determinado antes do processo de otimização conforme a tabela 5.4. Além disso, cada nó n da rede tem $40 \times G_n$ regeneradores, sendo G_n o grau desse nó. Isso significa um dispositivo para cada comprimento de onda que entra ou sai do nó. A tabela 5.9 informa o CapEx da rede opaca para cada valor de β considerado.

Tabela 5.9: Valor do CapEx da rede opaca para diferentes valores de β .

β	1,4	3	6	7,5	9
C (m.u.)	14026,54	23146,54	40246,54	48796,54	57346,54

As figuras 5.16(a), 5.16(b), 5.16(c), 5.16(d) e 5.16(e) ilustram os *Pareto Fronts* obtidos pelo MOWRP-3o para os diferentes valores de β . Os números indicam a quantidade de nós translúcidos da solução. O CapEx está expresso em porcentagem e é utilizado, para cada valor de β , o valor da rede opaca como referência, os quais são indicados na tabela 5.9.

O processo de otimização é realizado considerando o valor de $\beta = 1,4$. Como a intenção é observar o comportamento do algoritmo quando ocorre variação na configuração do custo, o CapEx das soluções do arquivo externo são calculados novamente e, em seguida, a dominância é avaliada considerando o novo valor do CapEx. As soluções que apresentam o desempenho semelhante, em termos de probabilidade de bloqueio, da rede opaca são destacadas.

É observado nas figuras 5.16(a), 5.16(b), 5.16(c), 5.16(d) e 5.16(e) que a solução de menor CapEx não muda com o valor de β , para esse caso. Ocorre, também, uma redução no valor percentual das redes à medida que o valor de β aumenta. Ou seja, à medida que o custo dos regeneradores aumenta, em relação ao custo dos *transponders*, o custo relativo da rede translúcida diminui.

As figuras 5.17(a), 5.17(b), 5.17(c), 5.17(d) e 5.17(e) ilustram as frentes obtidas pelo MOWRP-4o para diferentes valores de β . O MOWRP-4o não considera o modelo de CapEx durante a otimização, conforme descrito na Seção 5.2. O processo de mapeamento para os três objetivos do MOWRP-3o ilustrado na figura 5.11 é realizado considerando o valor de β correspondente. As soluções em destaque são as de menor CapEx que possuem o desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, da rede opaca.

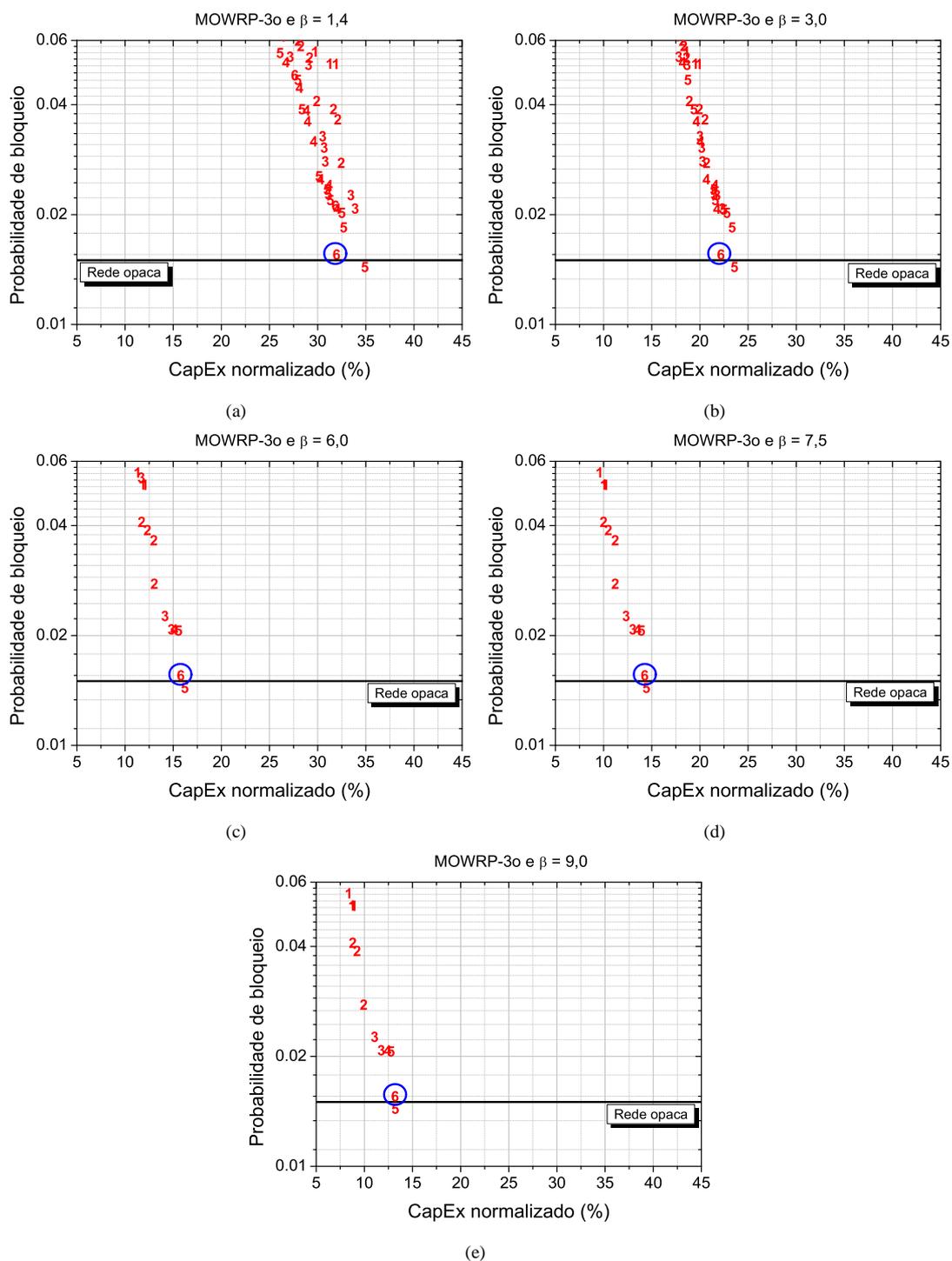


Figura 5.16: Pareto Front do MOWRP-3o considerando β igual a: (a) 1,4; (b) 3; (c) 6; (d) 7,5 e (e) 9. Os números indicam a quantidade de nós translúcidos da solução.

Assim como ocorre no MOWRP-3o, as soluções apresentadas pelo MOWRP-4o também diminuem seu custo relativo, em relação à rede opaca, à medida que o preço dos regeneradores aumenta. Para β igual a 1,4 e a 3, a solução em destaque (solução escolhida como ideal) é a mesma. Porém, para os demais valores (6; 7,5 e 9), a solução em destaque é outra.

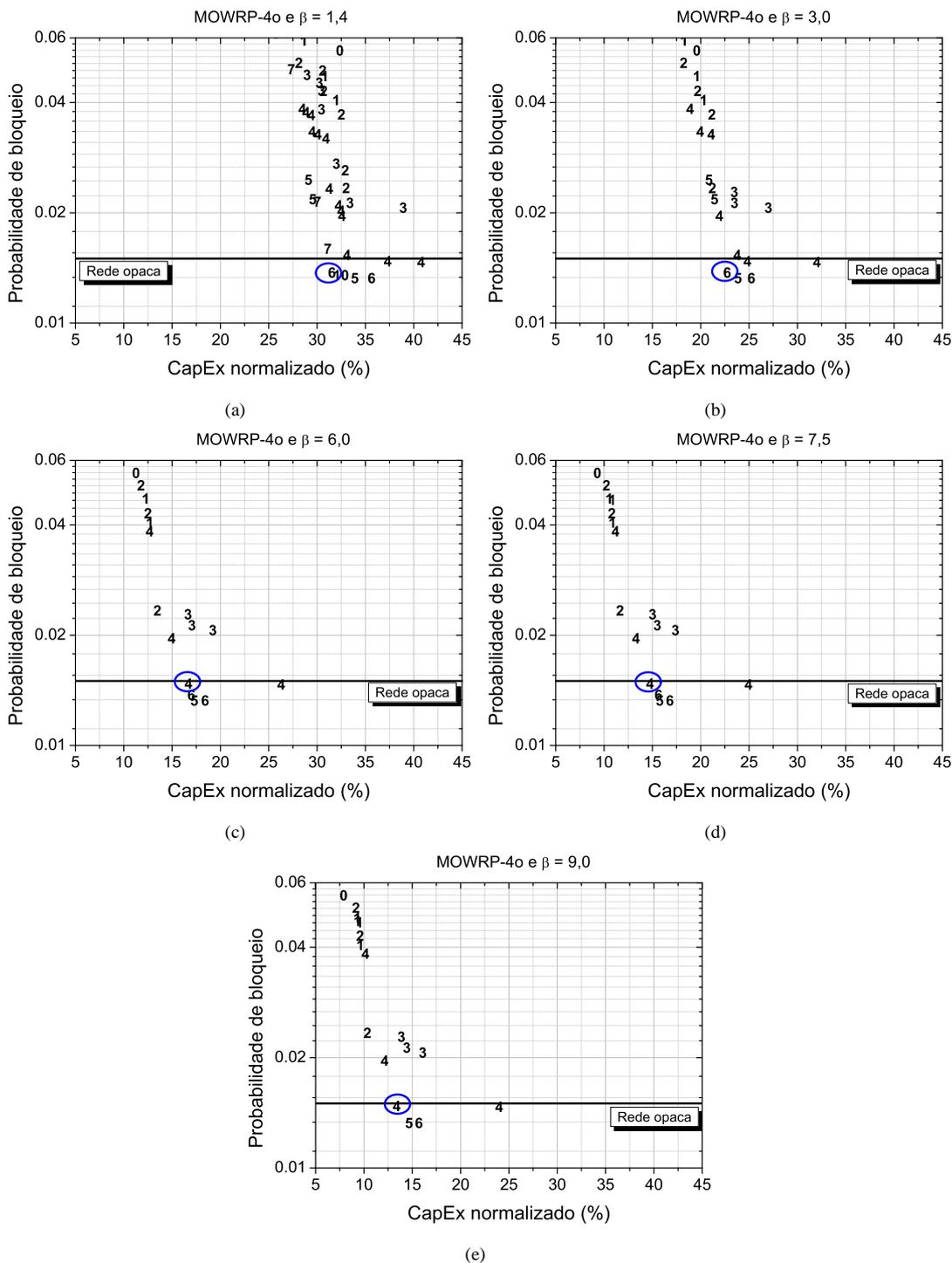


Figura 5.17: Pareto Front do MOWRP-4o considerando β igual a: (a) 1,4; (b) 3; (c) 6; (d) 7,5 e (e) 9. Os números indicam a quantidade de nós translúcidos da solução.

A figura 5.18 mostra o CapEx mínimo necessário para se obter a probabilidade de bloqueio da rede opaca em função de β . Esses valores são referentes às soluções em destaque nas figuras 5.16(a), 5.16(b), 5.16(c), 5.16(d) e 5.16(e), para o MOWRP-3o, e nas figuras 5.17(a), 5.17(b), 5.17(c), 5.17(d) e 5.17(e), para o MOWRP-4o.

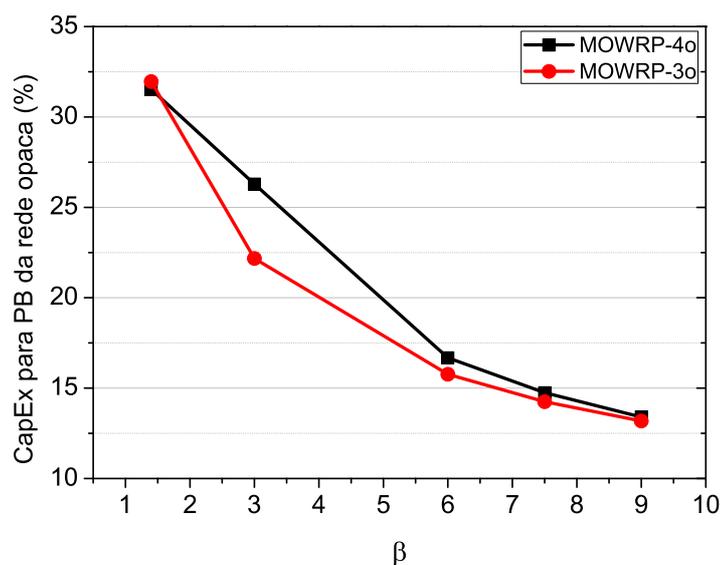


Figura 5.18: CapEx mínimo necessário para obter o desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio, da rede opaca para diferentes valores de β .

É visto na figura 5.18 que, exceto para β igual a 3, o desempenho dos algoritmos são semelhantes. Assim, o MOWRP-3o se mostra robusto às variações aplicadas no modelo de CapEx, mesmo utilizando esse valor como meta de otimização. O MOWRP-4o também é robusto, porém requer maior esforço computacional, pois possui uma meta de otimização a mais. Portanto, MOWRP-3o é indicado para o cenário investigado.

5.6 Convergência do algoritmo

Esta seção analisa a convergência do MOWRP-4o. Cinco experimentos independentes são realizados, cada um com 20.000 gerações. Os *Pareto Fronts* das gerações 10.000 e 20.000 estão indicados nas figuras 5.19(a), 5.19(b), 5.19(c), 5.19(d) e 5.19(e). É importante lembrar que, após o processo de otimização do MOWRP-4o, as soluções presentes no arquivo externo, em cada experimento, são mapeadas para o conjunto de três objetivos (probabilidade de bloqueio, CapEx e número de nós translúcidos) do MOWRP-3o, conforme é descrito na figura 5.11 (Seção 5.5).

É observado nas figuras 5.19(a), 5.19(b), 5.19(c), 5.19(d) e 5.19(e) que a nuvem de pontos das gerações de número 10.000 e 20.000 possuem regiões semelhantes no gráfico. Porém, isso não é o suficiente, pois o número de nós translúcidos não é informado. Portanto, as métricas *hypervolume* e *coverage set*, descritas na Seção 4.4 são calculadas para cada um dos cinco experimentos. O diagrama de caixa (*box plot*), ilustrado na figura 5.20, destaca o valor do *hypervolume* do MOWRP-4o para as gerações 10.000 e 20.000.

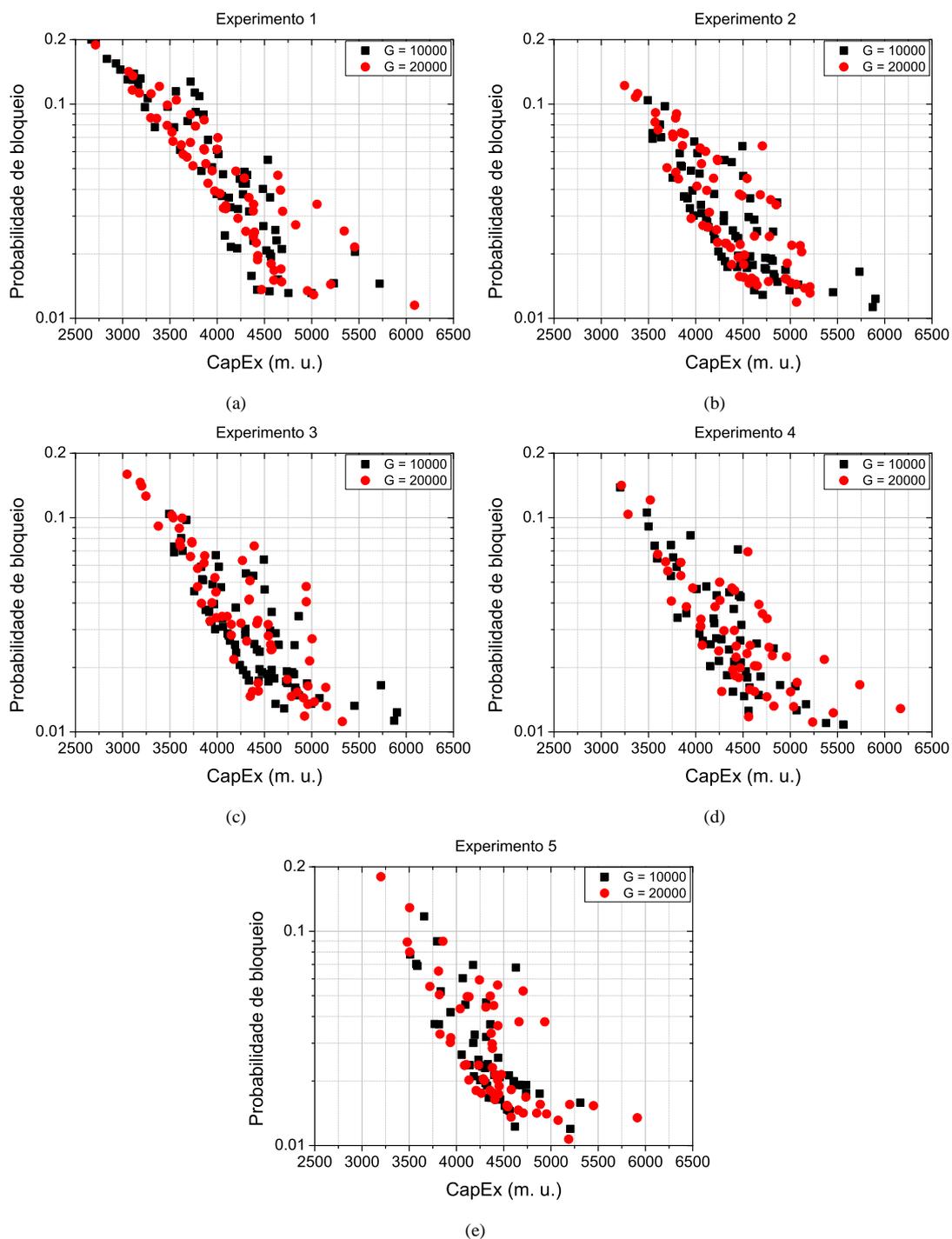


Figura 5.19: *Pareto Fronts das gerações de número 10.000 e 20.000 para o MOWRP-4o referentes ao: (a) Experimento-1, (b) Experimento-2, (c) Experimento-3, (d) Experimento-4 e (e) Experimento-5.*

Pela figura 5.20, é visto que as caixas estão localizadas logo acima do valor 92,5%. Para verificar se esse valor representa um bom indicativo de convergência, a figura 5.21 ilustra a evolução da média dessa métrica.

Os resultados mostrados na figura 5.21 indicam que um valor de *hypervolume* superior a 92,5% é um bom indicativo de convergência para o MOWRP-4o. Para confirmar a

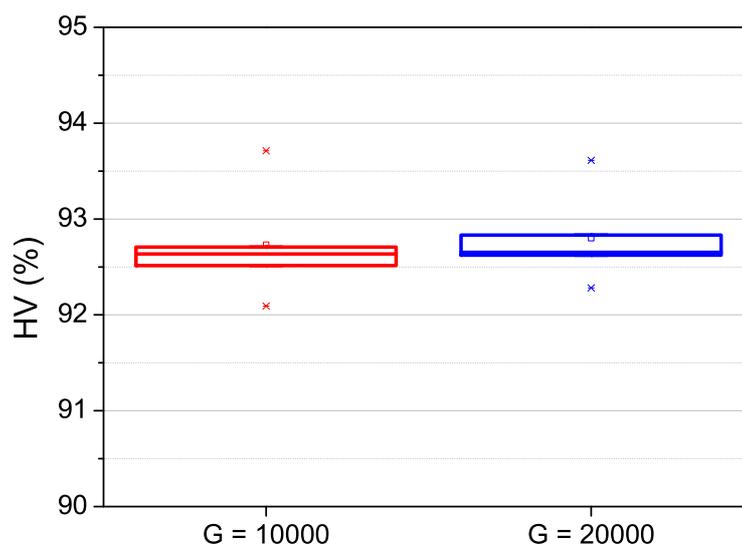


Figura 5.20: Diagrama de caixa para os hypervolumes das gerações 10.000 e 20.000 dos cinco experimentos.

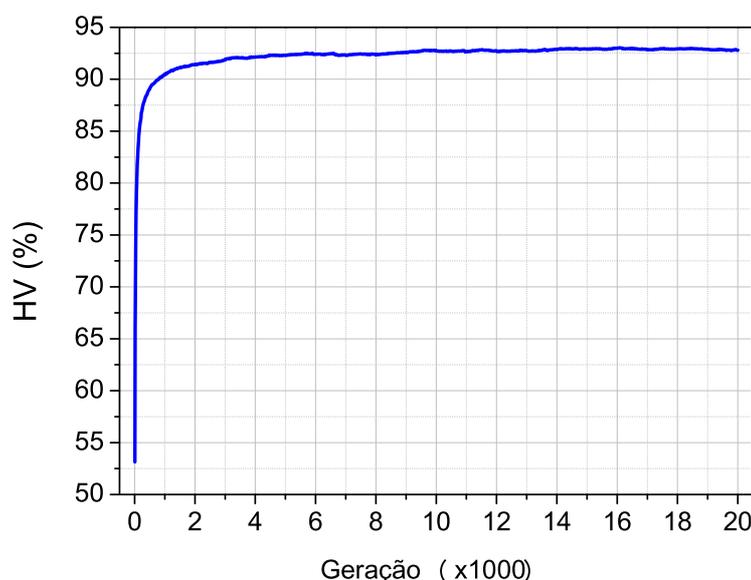


Figura 5.21: Média do hypervolume, considerando os cinco experimentos.

convergência na geração 10.000, a figura 5.22 ilustra o diagrama de caixa obtido para a métrica *coverage set* aplicada aos *Pareto Fronts* já mapeados em três objetivos. Novamente, as gerações comparadas são a 10.000 e a 20.000.

A figura 5.22 mostra que as caixas estão situadas uma ao lado da outra. Portanto, não é possível concluir se os resultados obtidos na geração 20.000 é melhor que os da geração 10.000. Logo, o processo de otimização realizado com 10.000 é suficiente para o MOWRP-4o convergir, uma vez que os resultados das gerações 10.000 e 20.000 são equivalentes. É considerado que o MOWRP-3o também converge com 10.000 gerações, pois esse possui uma meta de otimização a menos que o MOWRP-4o. Sendo assim, um problema de menor

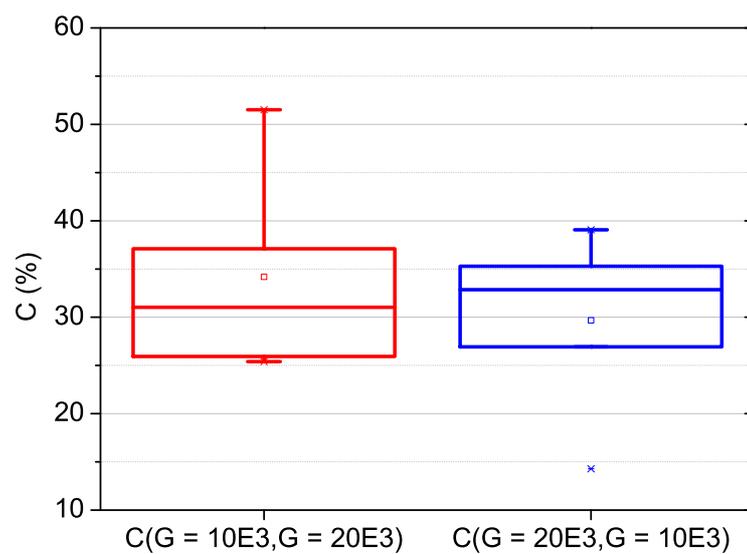


Figura 5.22: Diagrama de caixa para a métrica Coverage Set, das gerações 10.000 e 20.000, dos cinco experimentos do MOWRP-4o.

complexidade.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Esta dissertação apresenta propostas para projeto de redes ópticas translúcidas. O problema de inserção de regeneradores (RP) é tratado em conjunto com o dimensionamento da capacidade dos enlaces. Essa abordagem é chamada de problema de inserção de comprimentos de onda e regeneradores (WRP). Até o presente momento, não é conhecido tratamento semelhante presente na literatura.

O algoritmo multiobjetivo SPEA2 é utilizado para solucionar o problema de WRP, embora a metodologia desenvolvida permita que outras técnicas possam ser utilizadas, como por exemplo o NSGA-II. O algoritmo recebe o nome de MOWRP e possui duas variações: MOWRP-3o e MOWRP-4o. O MOWRP-3o considera a otimização simultânea de três objetivos: probabilidade de bloqueio, número de nós translúcidos e custo financeiro (CapEx). Já o MOWRP-4o considera a otimização simultânea de quatro objetivos: probabilidade de bloqueio, número de nós translúcidos, número normalizado de regeneradores não utilizados (NNUR) e número normalizado de comprimentos de onda não utilizados (NNUW).

Em uma primeira análise, o MOWRP-3o é utilizado para avaliar o impacto de dimensionar os enlaces da rede com a mesma capacidade de tráfego. Isso significa inserir o mesmo número de comprimentos de onda em todos os enlaces da rede. O MOWRP-3o-R trata de realizar a otimização inserido o mesmo número de comprimentos de onda em todos os enlaces, enquanto que o MOWRP-3o não possui tal restrição. Esse obtém uma rede translúcida, com nível de probabilidade de bloqueio da rede opaca, com um CapEx aproximadamente 30% menor do que a solução encontrada pelo MOWRP-3o-R, o que claramente indica que o número de comprimentos de onda deve, pelas questões analisadas, ser otimizado para cada enlace individualmente.

O segundo estudo é a comparação do MOWRP-3o com o MOWRP-4o. O primeiro utiliza o CapEx como meta de otimização e o MOWRP-4o otimiza variáveis que impactam no CapEx por intermédio do NNUR e do NNUW. Assim, é pretendido otimizar o CapEx de forma indireta. As soluções de rede translúcida de menor CapEx e com desempenho de rede opaca, em termos de probabilidade de bloqueio, obtidas pelos dois algoritmos, apresentam resultados semelhantes.

O MOWRP-3o e o MOWRP-4o são submetidos a alterações no custo dos regeneradores em relação ao custo dos *transponders*. É observado que, embora o CapEx das soluções que possuem regeneradores aumente, o seu valor percentual em relação ao CapEx da rede opaca é reduzido para as duas propostas. O MOWRP-3o e o MOWRP-4o apresentam soluções de redes translúcidas com CapEx semelhantes para se obter o nível de probabilidade de bloqueio da rede opaca. Assim, o MOWRP-3o se mostra robusto para a topologia e valores investigados. E por possuir menor complexidade (menor número de objetivos de otimização) e desempenho semelhante ao MOWRP-4o, o MOWRP-3o é indicado para o cenário investigado.

O MOWRP-4o é escolhido para investigar a convergência do algoritmo. Os resultados mostram que 10.000 gerações garantem a convergência do MOWRP-4o. Para isso, cinco experimentos independentes são realizados. As métricas utilizadas são o *hypervolume* e o *coverage set*. Como o MOWRP-3o tem menor complexidade, pode-se assumir que se 10.000 gerações são suficientes para a convergência do MOWRP-4o, também serão suficientes para a convergência do MOWRP-3o.

6.1 Contribuições da Dissertação

Esta dissertação contribui com os seguintes aspectos:

- ▷ Uma metodologia, que utiliza otimização multiobjetivos, para o projeto de redes ópticas. Esse se refere à inserção de regeneradores nos nós e dimensionamento da capacidade dos enlaces feitos conjuntamente, o que representa uma inovação relevante;
- ▷ Estudo do impacto de dimensionar todos os enlaces da rede com a mesma capacidade, em comparação com o dimensionamento individual individual. Os resultados mostram que o dimensionamento do número de comprimentos de onda em cada enlace individualmente leva à obtenção de uma rede com CapEx 30% menor do que se o número de comprimentos de onda for o mesmo para todos os enlaces;
- ▷ Análise do comportamento do CapEx das soluções quando ocorre mudança no custo dos

regeneradores.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuação desse trabalho, as seguintes investigações são sugeridas:

- ▷ Realizar o projeto com novas restrições tais como: nós que não podem ser translúcidos e enlaces que possuem um número máximo, ou fixo, de pares de comprimentos de onda que podem ser inseridos diferente do restante da rede;
- ▷ Realizar o projeto em conjunto com o algoritmo de roteamento e/ou com o algoritmo de atribuição de comprimento de onda;
- ▷ Investigar a robustez do MOWRP quando são utilizados outros modelos de custo, não se restringir apenas ao custo dos regeneradores em relação ao número de *transponders*.

REFERÊNCIAS

- [1] R. RAMASWAMI, K. N. SIVARAJAN, G. H. SASAKI, **Optical Networks: A Practical Perspective**, 3^a ed. Morgan Kaufmann, 2010.
- [2] B. MUKHERJEE, WDM optical communication networks: Progress and challenges, *Journal of Selected Areas in Communications*, v. 18, n. 10, p. 1810–1824, Outubro 2000.
- [3] 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.
- [4] B. ZHU, D. PECKHAM, M. YAN, T. TAUNAY, J. FINI, Recent progress in transmission fibers for capacity beyond 100-tbit/s, In: **Optical Fiber Communication Conference – OFC**, v. 1, 2012, p. 1–3.
- [5] B. RAMAMURTHY, H. FENG, D. DATTA, J. HERITAGE, B. MUKHERJEE, Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks, In: **Optical Fiber Communication Conference – OFC**, v. 1, 1999, p. 59–61.
- [6] C. J. A. BASTOS-FILHO, Amplificadores ópticos para sistemas de comunicação multicanais de alta capacidade, Tese, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Setembro 2005.
- [7] H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. 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, Outubro 2009.
- [8] G. SHEN, R. S. TUCKER, Translucent optical networks: the way forward, *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 2, p. 48–54, Fevereiro 2007.
- [9] B. MUKHERJEE, **Optical WDM Networks**, 1^a ed. Springer, 2006.

- [10] G. P. AGRAWAL, **Fiber-optic communication systems**, 3^a ed. Wiley-Interscience, 2002.
- [11] H. A. PEREIRA, Análise sistêmica das penalidades de ruído na redes ópticas transparentes, Tese, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Novembro 2007.
- [12] A. YARIV, P. YEH, **Photonics: Optical Electronics in Modern Communications**, 6^a ed. New York: Oxford University Press, 2007.
- [13] P. C. BECKER, N. A. OLSSON, J. R. SIMPSON, **Erbium doped fiber amplifiers**, 1^a ed. Academic Press, 1999.
- [14] K. THYAGARAJAN, A. K. GHATAK, **An Introduction to Fiber Optics**, 1^a ed. Cambridge - EUA, 1998.
- [15] G. P. AGRAWAL, **Nonlinear fiber optics**, 3^a ed. Academic Press, 2001.
- [16] J. TOULOUSE, Optical nonlinearities in fibers: Review, recent examples, and systems applications, *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 11, p. 3625–3541, Novembro 2005.
- [17] 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.
- [18] A. RAHBAR, Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks, *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, v. PP, n. 99, p. 1–25, 2011.
- [19] N. M. BHIDE, K. M. SIVALINGAM, T. FABRY-ASZTALOS, Routing mechanisms employing adaptive weight functions for shortest path routing in multi-wavelength optical wdm networks, *Journal of Photonic Network Communications*, v. 3, p. 227–236, Julho 2001.
- [20] A. V. S. XAVIER, Um algoritmo de roteamento adaptativo-alternativo para redes Ópticas, Dissertação, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas, Universidade de Pernambuco, Novembro 2011.
- [21] A. V. S. XAVIER, R. C. L. SILVA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, D. A. R. CHAVES, An adaptive-alternative routing algorithm for all-optical networks,

- In: **Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2011**, v. 1, 2011, p. 719–723.
- [22] 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.
- [23] I. TOMKOS, SYGLETOS, G. S.; TZANAKAKI, A.; MARKIDIS, Impairment constraint based routing in mesh optical networks, In: **Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007 - OFC/NFOEC 2007**, Março 2007, p. 1–3.
- [24] 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, Agosto 2008.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] T. S. RAPPAPORT, **Wireless Communications - Principles and Practice**, 2^a ed. Prentice Hall, 2002.
- [30] D. M. BANEY, P. GALLION, R. S. TUCKER, Theory and measurement techniques for the noise figure of optical amplifiers, *Optical Fiber Technology*, v. 6, p. 122–154, Abril 2000.

- [31] J. F. MARTINS-FILHO, C. J. A. BASTOS-FILHO, E. A. J. ARANTES, S. C. OLIVEIRA, L. D. COELHO, J. P. G. DE OLIVEIRA, R. G. DANTE, E. FONTANA, F. D. NUNES, Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier saturation, In: **Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC**, v. 2, Setembro 2003, p. 919–923.
- [32] J. F. MARTINS-FILHO, C. J. A. BASTOS-FILHO, E. A. J. ARANTES, S. C. OLIVEIRA, F. D. NUNES, R. G. DANTE, E. FONTANA, Impact of device characteristics on network performance from a physical-impairment-based routing algorithm, In: **Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, 2004 – OFC 2004**, v. 1, Fevereiro 2004, p. 278–280.
- [33] H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Physical impairments modeling for the performance evaluation of transparent optical networks, In: **Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT**, v. 1, 2007, p. 1–6.
- [34] S. SONG, C. ALLEN, K. DEMAREST, R. HUI, Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers, *Journal of Lightwave Technology*, v. 17, n. 11, p. 2285–2290, Novembro 1999.
- [35] J. STRAND, A. L. CHIU, R. TKACH, Issues for routing in the optical layer, *Communications Magazine*, v. 39, n. 2, p. 81–87, Fevereiro 2001.
- [36] 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.
- [37] E. KARASAN, M. ARISOYLU, Design of translucent optical networks: Partitioning and restoration, *Photonic Network Communications*, v. 8, n. 2, p. 209–221, 2004.
- [38] G. SHEN, W. V. SORIN, R. S. TUCKER, Cross-layer design of ase-noise-limited island-based translucent optical networks, *Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 11, p. 1434–1442, Junho 2009.
- [39] 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, n. 1, p. 93–102, 2007.

- [40] N. SAMBO, N. ANDRIOLLI, A. GIORGETTI, P. CASTOLDI, G. BOTTARI, Multiple path based regenerator placement algorithm in translucent optical networks, In: **International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**, Julho 2009, p. 1–4.
- [41] Y. YE, T. CHENG, C. LU, Novel algorithm for upgrading of translucent optical networks, *Optics Express*, v. 11, n. 23, p. 3022–3033, 2003.
- [42] 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.
- [43] N. SAMBO, N. ANDRIOLLI, A. GIORGETTI, L. VALCARENGHI, F. CUGINI, P. CASTOLDI, Accounting for shared regenerators in gmpls-controlled translucent optical networks, *Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 19, p. 4338–4347, Outubro 2009.
- [44] 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: **International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**, v. 1, 2010, p. 1–4.
- [45] 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.
- [46] 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 in translucent optical networks, *Photonic Network Communications*, p. 1–15, 10.1007/s11107-012-0384-9. [Online]. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s11107-012-0384-9>
- [47] C. V. SARADHI, S. ZAKS, R. FESRIZZI, A. ZANARDI, E. SALVADORI, Practical and deployment issues to be considered in regenerator placement and operation of translucent optical networks, In: **International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**, v. 1, 2010, p. 1–4.
- [48] M. YOUSEFF, S. A. ZHAR, M. GAGNAIRE, Translucent network design from a capex/opex perspective, *Photonic Network Communications*, v. 22, n. 1, p. 85–97, Maio 2011.

- [49] E. ZITZLER, *Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications*, Tese, ETH Zurich, Switzerland, 1999.
- [50] X. YU, M. GEN, **Introduction to Evolutionary Algorithms**, 1^a ed. Springer, 2010.
- [51] J. KNOWLES, D. CORNE, K. E. DEB, **Multiobjective Problem Solving from Nature**, 1^a ed. Springer, 2008.
- [52] A. E. EIBEN, J. E. SMITH, **Introduction to Evolutionary Computing**, 1^a ed. Springer, 2003.
- [53] C. A. COELLO COELLO, G. B. LAMONT, D. A. VAN VELDHUIZEN, **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-objective Problems**, 2^a ed. Springer, 2007.
- [54] D. R. B. ARAUJO, Comparação de algoritmos de otimização multiobjetivos aplicados a projeto de redes opticas, Dissertação, Programa de Pós-graduação em Engenharia da Computação, Universidade de Pernambuco, Junho 2011.
- [55] K. F. MAN, K. S. TANG, S. KWONG, Genetic algorithms: Concepts and applications, *Transactions on Industrial Electronics*, v. 43, n. 5, p. 519–534, Outubro 1996.
- [56] E. ZITZLER, M. LAUMANN, S. BLEULER, A Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization, In: **Metaheuristics for Multiobjective Optimisation**, ser. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, X. GANDIBLEUX, *et al.*, Eds. Springer, 2004.
- [57] E. ZITZLER, M. LAUMANN, L. THIELE, SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization, In: **Evolutionary Methods for Design, Optimisation and Control with Application to Industrial Problems (EUROGEN 2001)**, K. GIANNAKOGLU, *et al.*, Eds. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2002, p. 95–100.
- [58] 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: **Proceedings of IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision-Making (MDCM), 2011**, Abril 2011, p. 89–96.
- [59] B. W. SILVERMAN, **Density Estimation for Statistics and Data Analysis**. Chapman and Hall, 1986.

- [60] A. ABRAHAM, L. JAIN, R. E. GOLDBERG, **Evolutionary Multiobjective Optimization - Theoretical Advances and Applications**, 2^a ed. Springer, 2005.
- [61] 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.
- [62] 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.

APÊNDICE **A**

LISTA DE PUBLICAÇÕES

A.1 Artigo publicado em periódico

1. 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 in Translucent Optical Networks. *Photonic Network Communications*, p. 1-15, 2012. DOI: 10.1007/s11107-012-0384-9.

A.2 Artigos publicados em conferências

1. R. V. B. Carvalho, R. F. 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 Networks Using a Multi-Objective Evolutionary Algorithm. In: Optical Fiber Conference (OFC) 2012. Los Angeles. v. 1. p. 1-3.
2. 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, Curitiba. v.1 p.1-5.
3. R. V. B. Carvalho, J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, D. A. R. Chaves. Many-objective Optimization to Overcome the Dependency on the Cost Model in the Design of Optical Networks. In: MOMAG 2012. Aceito, aguardando publicação.
4. R. V. B. Carvalho, C. J. A. Bastos-Filho, D. A. R. Chaves, J. F. Martins-Filho. Algorithms for Joint Optimization of Link Capacity and Regenerators Placement in Optical Networks.

Artigo submetido ao XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT 2012, Brasília. v.1 p.1-5.