

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



DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES



ALGORITMOS RÁPIDOS DE IRWA
PARA REDES TOTALMENTE ÓPTICAS

VIRTUS IMPAVIDA

RECIFE, FEVEREIRO DE 2008.

DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES

**ALGORITMOS RÁPIDOS DE IRWA
PARA REDES TOTALMENTE 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, DOUTOR.

Recife, Fevereiro de 2008.

C512a

Chaves, Daniel Augusto Ribeiro.

Algoritmos rápidos de IRVA para redes totalmente ópticas / Daniel Augusto Ribeiro Chaves. - Recife: O Autor, 2008.
103 folhas, il : figs., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2008.

Inclui Bibliografia e Apêndices.

1. Engenharia Elétrica. 2. Comunicações ópticas. 3. RWA. 4. Redes Ópticas. 5. Computação inteligente. 6. Ruído. I. Título.

UFPE

621.3

CDD (22. ed.)

BCTG/2008-053



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

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

DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES

TÍTULO

**“ALGORITMOS RÁPIDOS DE IRWA PARA
REDES TOTALMENTE ÓPTICAS”**

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE, CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO, DSC/UPE, MOISÉS RENATO NUNES RIBEIRO, DEE/UFES e FERNANDO BUARQUE DE LIMA NETO, DSC/UPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES APROVADO.**

Recife, 28 de fevereiro de 2008

EDUARDO FONTANA
Coordenador do PPGEE

JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Orientador e Membro Titular Interno

MOISÉS RENATO NUNES RIBEIRO
Membro Titular Externo

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

FERNANDO BUARQUE DE LIMA NETO
Membro Titular Externo

*Dedico este trabalho
aos meus pais,
à minha família
e a Máira Pitta.*

AGRADECIMENTOS

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

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

Ao colega de trabalho e agora Prof. Helder Alves Pereira pela cooperação no processo de depuração do software de simulação.

Aos alunos de iniciação científica Thiago Fragoso e Júlio Dantas pela cooperação no desenvolvimento do software de simulação.

Ao aluno de iniciação científica Douglas de Oliveira Aguiar pela cooperação na realização das simulações computacionais feitas neste trabalho.

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

Finalmente, gostaria de agradecer a CAPES pelo suporte financeiro e ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica da UFPE.

DANIEL AUGUSTO RIBEIRO CHAVES

Universidade Federal de Pernambuco

28 de Fevereiro de 2008

Onde há verdade há verdadeiro conhecimento.

Onde há conhecimento verdadeiro há sempre alegria.

— **Gandhi**

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

ALGORITMOS RÁPIDOS DE IRWA PARA REDES TOTALMENTE ÓPTICAS

Daniel Augusto Ribeiro Chaves

Fevereiro/2008

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

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

Área de Concentração: Fotônica

Palavras-chaves: Comunicações ópticas, RWA, Redes Ópticas, Computação inteligente, Ruído.

Número de páginas: 103

Nesta dissertação é estudado um importante tópico concernente às redes totalmente ópticas: algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA). Nas redes totalmente ópticas, o sinal óptico não é regenerado a cada nó. Por isso, é muito importante o desenvolvimento de algoritmos de RWA capazes de encontrar rotas levando em consideração a degradação do sinal óptico, ou seja, algoritmos de IRWA (*Impairment Aware Routing and Wavelength Assignment*). Neste trabalho são propostas duas novas abordagens para solução do RWA em redes totalmente ópticas. Ambas utilizam parâmetros de redes simples, como comprimento e ocupação de enlace, para montagem de algoritmos de roteamento adaptativos de alto desempenho em ambientes de rede ópticas limitadas pelas penalidades da camada física. Por essa razão, os algoritmos aqui propostos conseguem resolver o problema de IRWA de forma rápida. Na primeira abordagem, denominada PIAWF (*Physical Impairment Aware Weight Function*), é definida uma nova função custo adaptativa para enlaces que possui dois parâmetros livres, nos quais são armazenados, de forma indireta, informações sobre as penalidades da camada física. Na segunda abordagem, denominada roteamento por série de potência, é elaborada uma forma sistemática de se construir funções de custo adaptativas a partir de parâmetros pré-estabelecidos por um especialista em redes. Estes parâmetros são as variáveis da função custo, a qual é expandida em uma série de potências multivariável. Os coeficientes desconhecidos da série devem ser otimizados com o objetivo de melhorar o desempenho de rede. A técnica *Particle Swarm Optimization* é utilizada para encontrar os coeficientes da série.

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

FAST IRWA ALGORITHMS FOR ALL-OPTICAL NETWORKS

Daniel Augusto Ribeiro Chaves

February/2008

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

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

Area of Concentration: Photonics

Keywords: Optical communications, Intelligent computation, Noise.

Number of pages: 103

In this dissertation it is studied an important topic regarding all-optical networks: the routing and wavelength assignment (RWA) algorithms. In these networks, the optical signal is not regenerated at intermediate nodes. Therefore, it is important the development of RWA algorithms capable of finding routes taking into account the degradation of the optical signal, in other words, impairment aware routing and wavelength assignment (IRWA) algorithms. In this dissertation two new approaches to solve RWA in all-optical networks are proposed. The proposed schemes use simple network parameters as link length and link availability in order to build high performance adaptive routing algorithms for optical networks constrained by physical impairments. Since simple network parameters are used, the proposed algorithms are able to solve the problem of IRWA in a fast way. In the first approach, called PIAWF, a new adaptive cost function for a link is defined. It has two free parameters, which are able to store, in an indirect manner, information about the impairments of the physical layer. In the second approach, named Power Series Routing, a systematic form to build the link cost function, based on a set of relevant network parameters is proposed. These parameters, which can be defined by a network specialist, are the input variables of the cost function, and this function is expanded in a multivariable power series. The unknown coefficients of the series are optimized with the objective of improving the network performance. The Particle Swarm Optimization technique was used to find the series coefficients.

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Descrição	Significado
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Emissão espontânea amplificada
AR	Adaptive Routing	Roteamento Adaptativo.
BER	Bit Error Rate.	Taxa de erro por bit
DLE	Dynamic Lightpath Establishment	Estabelecimento dinâmico das rotas
E/O	Conversão eletro-óptica	Conversão do sinal elétrico em óptico
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Amplificador à fibra dopada com Érbio
FAR	Fixed Alternate Routing	Roteamento com rota fixa alternativa
FF	First Fit	Atribuição de comprimento de onda por primeiro ajuste.
FR	Fixed Routing	roteamento fixo
FWM	Four Wave Mixing	Mistura de quatro ondas
GUI	Graphic User Interface	Interface Gráfica de Usuário
GVD	Group Velocity Dispersion	Dispersão por velocidade de grupo
ICBR	Impairment Constraint Based Routing	vide IRWA
IRWA	Impairment aware Routing and wavelength assignment	Roteamento e atribuição de comprimento de onda que levam em consideração a camada física
ISI	Intersymbol Interference	Interferência intersimbólica
ISO	International Standards Organization	Organização internacional de padrões
ITU-T	International Telecommunication Union	União internacional de telecomunicações
JRW	Joint-Routing Wavelength	Roteamento e atribuição de comprimento de onda solucionados de forma conjunta.
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	Amplificação de luz por emissão estimulada de radiação
LRW	Least Resistance Weight	Roteamento por menor resistência
LU	Least Used	Atribuição de comprimento de onda do menos usado.
MU	Most Used	Atribuição de comprimento de onda do mais usado.
NF	Noise Figure	Figura de ruído

Sigla	Descrição	Significado
O/E/O	Conversão eletro-óptica-elétrica	Conversão do sinal óptico em elétrico e depois em óptico
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer	Multiplexador óptico de adição e remoção de comprimentos de onda
OSI	Open Systems Interconnected	Conexão entre sistemas que estão abertos à comunicação com outros sistemas
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio	Relação sinal-ruído óptica
OSNR-R	Optical Signal-to-Noise Ratio Routing	Roteamento baseado na degradação da relação sinal-ruído óptica
OXC	Optical Cross-Connect	Roteador óptico
PIAWF	Physical Impairment Aware Weight Function	Função de custo que leva em consideração as penalidades físicas.
PMD	Polarization Mode Dispersion	Dispersão do modo de polarização
PSO	Particle Swarm Optimization	Algoritmo de otimização.
PSR	Power Series Routing	Roteamento utilizando séries de potência.
QoS	Quality of Service	Qualidade de serviço
R	Random Wavelength assignment	Atribuição de comprimento de onda aleatória.
RF	Rádio Frequência	Frequência usada em comunicações via ondas eletromagnéticas
RWA	Routing and Wavelength Assignment	Roteamento e atribuição de comprimento de onda
SLE	Static Lightpath Establishment	Estabelecimento estático das rotas
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Relação sinal-ruído
SP	Shortest Path.	Menor caminho
SPM	Self-Phase Modulation	Auto-modulação de fase
SSE	Source Spontaneous Emission	Emissão Espontânea da Fonte
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexação por divisão em comprimento de onda
XPM	Cross-Phase Modulation	Modulação cruzada de fase

LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia	Descrição
α	Coefficiente de atenuação da fibra óptica
$\Delta\nu$	Largura de banda óptica do canal sendo amplificado
γ	Fator de ponderação relativa de $g_{i,j}$ e $(f_{i,j})^n$ no custo total $w_{i,j}$ do enlace
λ	Comprimento de onda
$\lambda_{i,j}^a$	Número de canais não ativos no enlace entre nós i e j .
$\lambda_{i,j}^T$	Números de comprimentos de onda disponíveis entre os nós i e j
$\lambda_{i,j}^U$	Números de comprimentos de onda ativos entre os nós i e j
$\min_i(\vec{P}_{vizinho})$	Posição da partícula vizinha a i mais apta (com maior força)
μ	Taxa, em média, com que as chamadas chegam à rede
ν	Frequência do sinal considerado
$\pi(i, j)$	Representa todas as rotas possíveis entre os nós i e j
ε	Fator de isolamento do <i>switch</i>
ε_1	Número aleatório uniformemente distribuído
ε_2	Número aleatório uniformemente distribuído
A_1	Parâmetro de ajuste da figura de ruído dinâmica
A_2	Parâmetro de ajuste da figura de ruído dinâmica
a_n	Coefficientes da série de potências
B_0	Largura de banda a 3 dB do filtro óptico
b_{n_0, n_1, \dots, n_k}	Coefficientes da série de potências
c_1	Constante de ajuste de velocidade no PSO
c_2	Constante de ajuste de velocidade no PSO
$C_{aceitas}$	Número de chamadas aceitas pela rede
$C_{bloqueadas}$	Número de chamadas bloqueadas pela rede
C_{total}	Número total de chamadas solicitadas pela rede
$C_{i,j}^A$	Número de comprimentos de onda disponíveis no enlace que interliga os nós i e j
$C_{i,j}^T$	Número total de comprimentos de onda no enlace que interliga os nós i e j
C_{max}^T	Número máximo de comprimentos de onda
d	Comprimento da fibra óptica
$d_{i,j}$	Comprimento do enlace que interliga os nós i e j
F	Fator de Ruído
$f(x)$	Função de x

Simbologia	Descrição
F_{Amp}^0	Fator de ruído do amplificador óptico para baixos valores de potência óptica na entrada do EDFA
F_{Amp}	Fator de ruído dinâmico do amplificador
$f_{i,j}$	Função custo relacionada a ocupação do enlace q interliga os nós i e j em PIAWF
$f_{OSNR}[\pi(i,j), \lambda]$	Representa a $OSNR_{out}$ calculada para a rota $\pi(i,j)$ no comprimento de onda λ
G	Ganho do amplificador óptico
$g()$	Função de aptidão ou força calculada para as partículas do PSO
G_{Amp}^0	Ganho não-saturado do amplificador óptico
h	Constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34}$ Js)
G_{Amp}	Ganho dinâmico linear do amplificador óptico
$g_{i,j}$	Função de custo relacionada com o comprimento do enlace entre os nós i e j em PIAWF
H	Tempo, em média, que a chamada fica ativa
I_{PSO}	Número máximo de iterações executado pelo PSO
L	Comprimento da fibra óptica
L_{Dx}	Perda do demultiplexador
L_{Em}	Perda da emenda em dB
L_{Mx}	Perda do multiplexador
L_{Sw}	Perda do <i>switch</i>
L_{rede}	Carga da rede
M	Número de fibras de entrada que chegam a um nó da rede óptica
N	Número de termos da série de potência utilizada em PSR
n	Parâmetro que introduz um comportamento não linear em relação ao custo associado à ocupação do enlace em PIAWF
$N_{out}(\lambda)$	Potência de ruído óptica na saída do sistema no comp de onda lambda
N_{out_i}	Potência óptica de ruído ao final de uma cascata de i enlaces
N_{Sw}	Potência óptica de ruído total produzida devido ao não-isolamento ideal do <i>switch</i>
n_{sp}	Fator de inversão de população do amplificador
NF	Figura de ruído
$OSNR$	Relação sinal ruído óptica
$osnr_{in}$	Relação sinal ruído na entrada de um dispositivo em escala linear
$OSNR_{in}$	Relação sinal ruído na entrada de um dispositivo em escala de dB
$OSNR_{laser}$	Relação sinal ruído especificada pelo fabricante do LASER
$osnr_{out}$	Relação sinal ruído na saída do dispositivo em escala linear
$OSNR_{out}$	Relação sinal ruído na saída do dispositivo em escala de dB
$OSNR_{QoS}$	Nível mínimo aceitável para relação sinal ruído utilizado como critério de qualidade de serviço
p_i	Vetor que armazena a melhor posição encontra pela partícula i

Simbologia	Descrição
P_{in}	Potência óptica do sinal na entrada do sistema
P_{sat}	Potência de saturação na saída do amplificador
$P_{Sw_j}(\lambda)$	Potência do sinal óptico na j -ésima porta do <i>switch</i> no comprimento de onda λ
$P_{Sw_{i,j}}(\lambda)$	Potência do sinal óptico na j -ésima porta do <i>switch</i> no i -ésimo enlace no comprimento de onda λ
P_{laser}	Potência do sinal do LASER
P_{out_i}	Potência óptica de sinal ao final de uma cascata de i enlaces
$P_{ruído}$	Potência de ruído óptico
P_{sinal}	Potência do sinal óptico
P_{SSE}	Potência de ruído SSE na saída do LASER
PB	Probabilidade de bloqueio
$PERDA_{fibra}$	Perda total de uma fibra óptica
p_{gd}	d -ésima componente do vetor de melhor posição encontrado pela melhor partícula na vizinhança (PSO)
$\vec{p}_{vizinho}$	Posição de uma partícula vizinha
$R_{i,j}^\lambda$	Rota determinada pelo algoritmo OSNR-R, entre os nós i e j , que maximiza o valor da $OSNR_{out}$
T	Duração do tempo de bit do sinal
\vec{v}_i	Velocidade da i -ésima partícula no enxame (PSO)
v_{id}	d -ésima componente do vetor \vec{v}_i
v_{max}	Velocidade máxima permitida por dimensão no PSO
v_{min}	Velocidade mínima permitida por dimensão no PSO
W	Número de comprimentos de onda em cada enlace da rede
$w_{i,j}$	Função custo do enlace correspondente ao enlace que interliga os nós i e j
\vec{x}_i	Posição atual da partícula i
$x_{i,j}$	Ocupação do enlace
x_k	Variável de função $f(\vec{x}_k)$
$y_{i,j}$	Comprimento normalizado do enlace (PSR)

LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação em camadas de uma rede de computadores.	24
2.2	Representação gráfica da topologia de uma rede óptica. A rede mostrada é composta por oito nós, numerados de 1 a 8, e de 12 enlaces, os quais são as ligações entre os nós.	25
2.3	Configuração do nó de uma rede óptica utilizando a arquitetura de planos de comprimentos de onda, com os dispositivos empregados: amplificadores ópticos, multiplexadores, demultiplexadores, comutadores, transmissores ópticos (Tx) e receptores ópticos (Rx) [1].	26
2.4	Diagrama de olho para um sinal: (a) completamente limpo, (b) um sinal degradado em fase (com dispersão) e (c) um sinal degradado em amplitude.	30
2.5	Coefficiente de atenuação da fibra em função do comprimento de onda (Adaptado de [2]).	32
2.6	Arquitetura básica de um WRN.	36
2.7	Configuração do enlace contendo os dispositivos considerados na modelagem apresentada.	38
2.8	Ganho e figura de ruído do amplificador em função da potência de entrada por canal, ambos obtidos de resultados experimentais (pontos) e modelo empírico (curvas sólidas).	40
2.9	Tela de apresentação com a rede a ser simulada.	42
2.10	Telas de configuração dos parâmetros de simulação relativos aos: (a) enlaces e (b) aos nós da rede.	42
2.11	Tela de configuração dos parâmetros da simulação.	43
2.12	Telas informativas quanto ao processo de simulação: (a) em andamento e (b) término da simulação.	43
2.13	Diagrama de casos de uso do módulo de interface gráfica.	44
2.14	Diagrama de casos de uso do módulo de simulação.	46
3.1	Fluxograma utilizado para solução do problema de roteamento e atribuição de comprimentos tipo 1.	57
3.2	Fluxograma utilizado para solução do problema de roteamento e atribuição de comprimentos tipo 2.	58
3.3	Fluxograma utilizado para solução do problema de roteamento e atribuição de comprimentos de onda usado para simulação.	59

4.1	Fluxograma utilizado para solução do problema de roteamento e atribuição de comprimentos de onda usado para simulação.	66
4.2	Topologia 1 - topologia de rede nas simulações.	69
4.3	Topologia 2 - topologia de rede nas simulações.	69
4.4	Topologia 2 - topologia de rede nas simulações.	70
4.5	Probabilidade de bloqueio em função dos parâmetros γ e n para a topologia 1 no cenário C_2	72
4.6	Probabilidade de bloqueio em função dos parâmetros γ e n para a topologia 2 no cenário C_2	73
4.7	Probabilidade de bloqueio em função dos parâmetros γ e n para a topologia 3 no cenário C_2	73
4.8	Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 1 no cenário C_1	75
4.9	Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 2 no cenário C_1	75
4.10	Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 3 no cenário C_1	76
4.11	Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 1 no cenário C_2	76
4.12	Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 2 no cenário C_2	77
4.13	Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 3 no cenário C_2	77
5.1	Convergência do PSO.	85
5.2	Melhor função custo encontrada pelo PSO.	86
5.3	Probabilidade de bloqueio da rede em função da carga total da mesma para os algoritmos: LRW, SP, OSNR-R e PSR.	87
A.1	Topologias de comunicação das partículas no PSO (a) Topologia $gBest$ (b) Topologia $lBest$	94

LISTA DE TABELAS

4.1	Parâmetros utilizados nas simulações.	68
4.2	Comprimentos de onda por enlace para os diferentes cenários de simulação.	71
4.3	Parâmetros ótimos para diferentes cenários de simulação.	72
4.4	Tempo médio gasto por chamada para se resolver o RWA.	77
4.5	Tempo médio gasto por chamada para se resolver o RWA normalizado pelo tempo gasto pelo PIAWF.	78
5.1	Passos para a construção do PSR.	80
5.2	Aplicação de PSR em redes ópticas.	83
5.3	Parâmetros de simulação usados para o PSO.	84
5.4	Tempo médio para a solução do RWA por chamada para a topologia 2 com carga de 100 Erlangs	88
A.1	Algoritmo PSO.	95
A.2	Algoritmo PSO.	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Redes ópticas	19
1.2	Algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda - RWA	21
1.3	Motivação e escopo deste trabalho	22
1.4	Organização da dissertação	22
2	REDES ÓPTICAS: MODELAGEM DA CAMADA FÍSICA	23
2.1	Redes ópticas	23
2.2	Camada física da rede	24
2.3	Principais formas de degradação do sinal na camada física	26
2.3.1	Atenuação	26
2.3.2	Dispersão	27
2.3.3	Ruído	27
2.3.4	Interferência	28
2.4	Medições quantitativas de degradação do sinal	28
2.4.1	Relação sinal ruído	28
2.4.2	Fator de ruído e figura de ruído	28
2.4.3	Taxa de erro de bit	29
2.4.4	Interferência intersimbólica	29
2.4.5	Diagrama de olho	29
2.5	Dispositivos da camada óptica	31
2.5.1	Transmissores ópticos	31
2.5.2	Fibras ópticas	31
2.5.3	Amplificadores ópticos	33
2.5.4	Comutadores/ <i>switchs</i>	35
2.5.5	Multiplexadores	36
2.6	Modelagem das penalidades físicas para uma rota	37
2.7	Software de simulação	41
2.7.1	Estudo dos casos de uso do software de simulação	44

3	ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA	47
3.1	Roteamento e atribuição de comprimento de onda - RWA	48
3.2	Roteamento	50
3.2.1	Roteamento com rota fixa - (FR)	51
3.2.2	Roteamento com rota fixa alternativa - (FAR)	51
3.2.3	Roteamento adaptativo - (AR)	52
3.3	Atribuição de comprimento de onda	52
3.3.1	Atribuição aleatória (R)	53
3.3.2	Atribuição <i>first fit</i> (FF)	53
3.3.3	Atribuição menos usado (LU - <i>Least Used</i>)	54
3.3.4	Atribuição mais usado (MU - <i>Most Used</i>)	54
3.4	RWA conjunto (JWR)	54
3.5	RWA levando em conta a camada física	55
3.6	Algoritmos de RWA utilizados nesta dissertação	59
3.7	Novas propostas de RWA	61
4	FUNÇÃO DE CUSTO ADAPTATIVA - PIAWF	63
4.1	Características de Simulação	65
4.1.1	Geração de Chamadas e carga da rede	65
4.1.2	Cálculo da probabilidade de bloqueio	67
4.1.3	Camada óptica	67
4.2	Resultados	68
4.2.1	Otimização dos parâmetros γ e n	71
4.2.2	Avaliação do desempenho de PIAWF na rede	73
5	ROTEAMENTO POR SÉRIE DE POTÊNCIAS - PSR	79
5.1	Roteamento por séries de potência	80
5.2	Aplicação de PSR em redes ópticas	81
5.3	Particle Swarm Optimization	83
5.4	Características de Simulação	84
5.5	Resultados	84
6	CONCLUSÃO	89
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	91
Apêndice A PARTICLE SWARM OPTIMIZATION		92
Apêndice B LISTA DE PUBLICAÇÕES		97
B.1	Artigos publicados	97
B.2	Artigo Aceito	98
B.3	Artigos submetidos	98
REFERÊNCIAS		99

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

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

— Galileu Galilei

O ser humano sempre teve a necessidade de se comunicar, seja nas longínquas épocas pré-históricas ou nos dias atuais. E, além de se comunicar, ele quer que essa comunicação seja a mais rápida possível e que atinja as maiores distâncias possíveis. Esse sempre foi um desejo que permeou os seres humanos. Entretanto, apenas nas últimas décadas de nossa história a tecnologia desenvolvida pela humanidade tem começado a atender a estes anseios de comunicação das pessoas. Por isso, cada vez que a engenharia de telecomunicações consegue oferecer novos recursos para a comunicação, recursos mais avançados são requisitados. Isso explica o forte crescimento da demanda por largura de banda que vem se verificando nos últimos anos. O principal combustível para esse crescimento, além dos anseios das pessoas por comunicação, é a descoberta do estrondoso potencial oferecido pela rede mundial de computadores, a Internet [1; 3]. A Internet oferece possibilidades de comunicação quase ilimitadas às pessoas, e por isso, surgem a todo instante novas aplicações e serviços que podem ser executados por meio dela. Essas aplicações são cada vez mais complexas, com cada vez mais possibilidades, resultando assim, em um aumento na quantidade de informação que precisa ser transportada pela rede de comunicações. Além do aumento no tráfego de informações, há ainda uma necessidade de que estas percorram distâncias maiores. Como exemplo, uma empresa

situada nos EUA pode necessitar de uma comunicação em tempo real com sua filial na Europa ou ainda um investidor europeu certamente vai necessitar de uma comunicação em tempo real com a Bovespa se ele tenciona investir na bolsa de valores de São Paulo.

Nos dias atuais, a tecnologia que se mostra capaz de atender à essa crescente demanda por largura de banda são os sistemas de comunicação óptica [1; 2; 4]. Os sistemas ópticos usam como meio de transmissão a fibra óptica. Esta última apresenta enormes vantagens em relação aos seus predecessores: os sistemas baseados em fios de Cobre ou em rádio frequência (**RF** - Rádio Frequência). A primeira delas é o próprio material de que é feita a fibra. A fibra óptica é feita com sílica. A sílica é um material extremamente abundante no meio ambiente, enormemente mais abundante que o Cobre. Por isso o custo agregado à matéria prima usada na fibra é muito menor [5]. Uma segunda vantagem da fibra sobre os sistemas de fios de Cobre e de RF é a enorme largura de banda que esta pode oferecer [1; 5; 6]. Para se ter uma idéia, a banda disponível na fibra óptica é de aproximadamente 25.000 GHz cerca de 1.000 vezes maior do que todo o espectro de rádio frequência utilizável no planeta Terra [7]. Outras vantagens são a imunidade a interferências eletromagnéticas, isolamento elétrica, baixa interferência entre canais (diafonia ou *crosstalk*), maior segurança da informação que trafega na fibra [1; 5; 6].

Tendo em vista todas essas vantagens, ao longo dos últimos 10 anos, vem ocorrendo uma maciça instalação de cabos ópticos. Cada vez mais, as grandes operadoras de telecomunicações vêm migrando seus sistemas para sistemas ópticos. Em 2006 havia cerca de 583 milhões de fibras-km instaladas em todo mundo, isso equivale a 15.000 voltas no planeta terra. A previsão de alguns especialistas para 2026, é de que se tenha um total de aproximadamente 3000 milhões de fibras-km instaladas, o que equivale a um crescimento de aproximadamente 500% na quantidade de fibras instaladas [2]. Esses números sinalizam uma tendência mundial para o emprego dos sistemas ópticos, além de apontar que estes sistemas continuarão sendo uma das principais tecnologias empregada em telecomunicações por, pelo menos, mais 20 anos.

Portanto, para afrontar esses desafios de atender a demanda explosiva por capacidade de transmissão e a melhora de desempenho dos sistemas ópticos deve-se empregar esforços sempre crescentes na pesquisa que envolve este campo do conhecimento.

1.1 Redes ópticas

Na seção anterior observou-se que, diante do cenário atual das telecomunicações, existe uma forte tendência para emprego das comunicações ópticas. Seguindo essa tendência, as redes de co-

municações e de computadores também vêm progressivamente empregando a tecnologia óptica [8]. A maior parte das informações de longa distância que trafegam no mundo atual, seja tráfego de redes de computadores (principalmente Internet), seja dos serviços de telefonia, passam pelos grandes *backbones* (enlaces de telecomunicações de alta capacidade usados para interligar países e continentes) ópticos instalados ao redor do mundo [8]. Como resultado, cada vez mais vem crescendo o interesse no desenvolvimento das redes ópticas.

Uma rede óptica constitui-se de um conjunto de nós, os quais são os usuários que necessitam comunicar-se, e um certo conjunto de ligações entre estes nós, os enlaces. O meio utilizado para essa interligação é o meio óptico. As redes ópticas podem ser divididas em duas gerações. Na primeira, a camada óptica da rede era utilizada apenas para a transmissão, ou seja, apenas fornecia um canal de comunicação de alto desempenho. As redes ópticas de primeira geração são conhecidas como redes opacas, e nelas todas as operações inteligentes como a comutação ou a gerência eram feitos por circuitos eletrônicos. Isso significa que sempre que alguma decisão precisava ser tomada sobre o sinal que está sendo transmitido este deveria ser convertido para o domínio eletrônico. Essa conversão é conhecida na literatura como conversão eletro-óptica (E/O), e os dispositivos de rede que realizam essa operação são os *transponders*. Nas redes de primeira geração, cada enlace é opticamente isolado por *transponders* fazendo conversões O/E/O. Além da conversão (E/O) eles são capazes de realizar a regeneração, a reformatação e o reajuste temporal do pulso, também chamada regeneração 3R [9]. Essa regeneração traz a vantagem de que, a cada nó da rede, o sinal óptico é regenerado resultando em uma elevada relação sinal ruído entregue no destino [8]. Além disso, a regeneração feita em cada nó apresenta outras vantagens como: a fácil conversão de comprimentos de onda nos nós e a fácil obtenção de parâmetros para gerência de redes, dois aspectos extremamente desejáveis num cenário de redes [8]. Por outro lado, a necessidade de se utilizar *transponders* também gera alguns prejuízos [9]. O primeiro deles é que a rede não fica transparente à modulação, à taxa de bits ou aos protocolos utilizados [8–10]. Isso significa que sempre que uma mudança de alguns desses itens precisa ser feita todos os regeneradores da rede precisam ser alterados [10]. A segunda desvantagem vem associada ao uso da tecnologia WDM (**WDM** - *Wavelength Division Multiplexing*) ou multiplexação por divisão em comprimento de onda. Com o uso dessa tecnologia vários comprimentos de onda podem trafegar simultaneamente na fibra óptica, cada um carregando uma informação diferente. Ou seja, para cada comprimento de onda um *transponder* é necessário, isso aumenta muito o número de *transponders* utilizados na rede aumentando assim o custo pecuniário associado para instalação da rede. [8; 10].

O elevado custo para se empregar as redes de primeira geração associado às grandes vantagens

oferecidas pelos sistemas ópticos, forçou uma intensa pesquisa por novas formas de implementação para as redes ópticas. Diante deste contexto, não demorou muito para surgirem as redes ópticas de segunda geração [1]. Nestas redes, também chamadas redes totalmente ópticas (*all-optical networks*) as operações de chaveamento e roteamento são realizadas na camada óptica, ou seja, a comunicação ocorre desde o nó de origem até o nó de destino em meio óptico sem sofrer conversão E/O. O impulso para estas redes surgiu principalmente como o aparecimento de dispositivos como amplificadores ópticos EDFA (**EDFA** - *Erbium Doped Fiber Amplifier*), multiplexadores de inserção/remoção óptica OADM (**OADM** - *Optical Add Drop Multiplexers*) e comutadores ópticos OXC (**OXC** - *Optical crossconnect*). Estes dispositivos proporcionaram controle e amplificação dos sinais no domínio óptico podendo os mesmos trafegarem desde o nó de origem até o nó de destino sem sofrer conversão (E/O). Um exemplo de como estes novos dispositivos reduzem o custo da rede são os amplificadores EDFA. Com eles, pode-se amplificar dezenas de comprimentos de onda em uma mesma fibra, simultaneamente, o que significa que um único amplificador pode substituir dezenas de caríssimos *transponders* [1]. No entanto, as redes totalmente ópticas também têm seus inconvenientes. Uma vez que não existe mais regeneradores, o acúmulo de penalidades geradas na camada óptica pode degradar a comunicação tornando a qualidade do sinal recebido inaceitável para uma comunicação satisfatória. Para solucionar esse problema existem basicamente três caminhos, a utilização de dispositivos ópticos menos ruidosos, a utilização de regeneradores 3R em alguns nós da rede [11] e/ou o desenvolvimento de algoritmos de roteamento de alto desempenho, capazes de encontrar rotas que minimizem o impacto das penalidades da camada óptica [12]. Este trabalho, concentrar-se-á na última forma.

1.2 Algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda - RWA

RWA é a sigla para *Routing and Wavelength Assignment* ou roteamento e atribuição de comprimento de onda. O problema de RWA é clássico em redes ópticas [1; 13]. O algoritmo de RWA tem como objetivo selecionar uma rota e um comprimento de onda, através dos nós de uma rede óptica, com o intuito de estabelecer um caminho de comunicação entre dois nós da rede. Em sua primeira definição, o problema de RWA era aplicado às redes ópticas opacas e portanto estava preocupado apenas em encontrar um caminho fonte-destino considerando apenas a disponibilidade de comprimentos de ondas e rotas [13; 14]. Entretanto, como visto anteriormente, com o aparecimento das redes transparentes, nas quais há acúmulo de ruído na rota fonte-destino, coube a esse algoritmo

a tarefa adicional de encontrar rotas que apresentassem menor acúmulo de penalidades na camada física. A literatura refere-se a tais algoritmos como IRWA (**IRWA** - *Impairments Aware Routing and Wavelength Assignment*) ou ICBR (**ICBR** - *Impairment Constraint Based Routing*) [15; 16]. O sucesso definitivo das redes totalmente ópticas está fortemente ligado ao desenvolvimento de algoritmos de IRWA capazes de fornecer, para estas redes, o desempenho que as mesmas requerem [16].

1.3 Motivação e escopo deste trabalho

Devido ao cenário visto nas seções anteriores, a tecnologia WDM continuará sendo utilizada para as próximas gerações de *backbones* ópticos [17]. Além disso, o baixo custo das redes totalmente ópticas em relação às redes opacas as torna comercialmente atrativas. Portanto, verifica-se um crescente esforço da comunidade científica da área de comunicações ópticas para o desenvolvimento de tais redes. Neste cenário, torna-se importante também o desenvolvimento de algoritmos de IRWA capazes de lidar com grande problema de acúmulo de penalidades na camada óptica que estas redes apresentam. Neste trabalho, propõe-se contribuir para o desenvolvimento destes algoritmos, em redes totalmente ópticas, pela apresentação de duas novas abordagens para solução do problema de RWA, as quais serão estudadas no capítulos seguintes. Além da apresentação de novas formas de solucionar o problema de RWA, também se investiga o impacto destes novos algoritmos no desempenho das redes ópticas bem como se comparam os algoritmos propostos com alguns dos algoritmos consagrados na literatura.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma: no capítulo 2 serão discutidos os principais pontos sobre a camada óptica, a saber, dispositivos utilizados, modelagem de ruído óptico, além do software implementado para a simulação das redes ópticas. No capítulo 3 serão discutidos os tópicos mais importantes sobre algoritmos de RWA e uma revisão das principais abordagens utilizadas para a solução deste problema. Em seguida, nos capítulos 4 e 5 são apresentadas essas duas novas propostas: duas novas funções de custo para serem utilizadas juntamente com o algoritmo de roteamento de menor custo. Além disso, o desempenho das novas propostas são comparados com outros algoritmos e funções custo propostas na literatura. No capítulo 6 finaliza-se a dissertação com as conclusões bem como os planos para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REDES ÓPTICAS: MODELAGEM DA CAMADA FÍSICA

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

— Isaac Newton

Neste capítulo serão examinadas as principais características das redes ópticas com enfoque na camada física. Como se verá, esta camada é responsável pela transmissão, em si, dos bits de um ponto a outro da rede óptica. Serão analisados os principais efeitos que degradam o sinal de comunicação durante a transmissão. Discutir-se-ão os dispositivos empregados na camada física das redes ópticas bem como a maneira como cada dispositivo degrada o sinal de comunicação quando este o atravessa. Além disso, é apresentado um modelo quantitativo para cálculo do acúmulo de ruídos ao longo de um caminho de comunicação, o qual será utilizado mais à frente neste trabalho. Por fim, apresenta-se o software de simulação, desenvolvido durante este trabalho, o qual é capaz de simular as redes totalmente ópticas baseando-se na modelagem de ruído previamente citada.

2.1 Redes ópticas

Para reduzir a complexidade de projeto, a maioria das redes são organizadas em camadas colocadas umas sobre as outras. A mesma abordagem pode ser usada em redes ópticas. Nesta organi-

zação, cada camada tem um conjunto de serviços chamados primitivas de serviços e os oferece a camada imediatamente superior. Além disso, uma camada utiliza os serviços fornecidos pela camada imediatamente abaixo a ela. Essa abordagem em camadas é interessante pois além de se reduzir a complexidade do projeto da rede também são diminuídos os custos no desenvolvimento de equipamentos e manutenção [3]. O primeiro esquema de redes em camada foi proposto pela organização internacional de padronização (**ISO** - *International Standards Organization*), no início da década de 80 do século XX, e é chamado de modelo de referência ISO-OSI, referindo-se à conexão entre sistemas (OSI - Open Systems Interconnection), e está ilustrado na figura 2.1 [3]. Este modelo estratifica a rede em sete camadas, a saber, camadas de aplicação, apresentação, sessão, transporte, rede, enlace de dados e física [3].



Figura 2.1: Representação em camadas de uma rede de computadores.

A camada de interesse para este capítulo é a camada localizada na extremidade inferior da pilha: a camada física. No modelo ISO-OSI, e em muitos outros modelos de rede em camadas, a camada física tem como principal função o transporte de *bits* através de uma infra-estrutura de telecomunicações [3]. Em uma rede óptica, esta infra-estrutura nada mais é do que um sistema de comunicação óptica.

Uma rede óptica é, geralmente, representada por um grafo colorido que esquematiza a topologia da mesma. Neste grafo são representados os nós da rede e os enlaces que interligam estes nós. Os nós representam os usuários que estão sendo servidos pela rede enquanto os enlaces são as ligações entre estes usuários. A figura 2.2 mostra um exemplo de uma rede com seus nós e enlaces.

2.2 Camada física da rede

Olhando para a camada física, também chamada camada óptica neste trabalho, pode-se discutir as principais tecnologias e dispositivos empregados na infra-estrutura da rede. Como visto na intro-

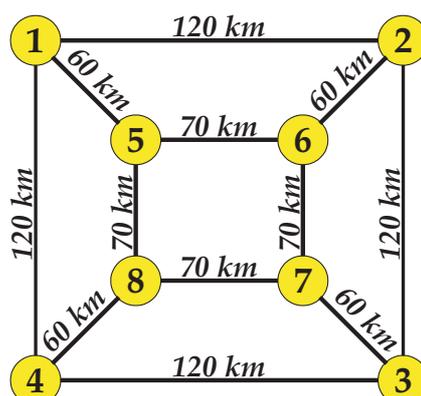


Figura 2.2: Representação gráfica da topologia de uma rede óptica. A rede mostrada é composta por oito nós, numerados de 1 a 8, e de 12 enlaces, os quais são as ligações entre os nós.

dução da dissertação, a tecnologia que possibilitou um grande avanço nas comunicações ópticas e a multiplicação da largura de banda oferecida pela fibra foi a tecnologia WDM (**WDM - Wavelength Division Multiplexing**) [1]. WDM é uma técnica de multiplexação de possibilita que várias informações distintas possam trafegar na fibra óptica de forma simultânea, cada uma em um comprimento de onda distinto. Uma analogia para se entender a multiplexação WDM pode ser feita. Se cada cor do espectro visível representar um canal WDM, cada informação seria transportada por uma cor diferente. Ao se combinar estas diferentes cores para se formar a luz branca ter-se-ia o sinal multiplexado que poderia ser transmitido em um único meio, por exemplo, uma fibra óptica.

Em conjunto com a tecnologia WDM alguns dispositivos são empregados ao longo da rede para tornar a comunicação entre nós possível. Estes dispositivos podem ser usados nos nós ou nos enlaces da rede. Alguns dos dispositivos mais comuns empregados nos nós de uma rede óptica são mostrados na figura 2.3 [1; 12]. Nela, são vistos: amplificadores ópticos, multiplexadores, demultiplexadores, comutadores, transmissores ópticos (Tx) e receptores ópticos (Rx). Nesta dissertação foi adotada essa arquitetura de nó nas simulações de rede [12]. Para os enlaces, são empregadas fibras ópticas para interconexão entre os nós. Além disso, amplificadores devem ser colocados ao longo dos enlaces para amplificar o sinal a cada trecho de 80 a 100 km de fibra [1]. Apesar dessa regra não ser absoluta, serve como guia de projeto. Estes amplificadores são chamados amplificadores de linha. Em todos os resultados nesta dissertação não foram utilizados amplificadores de linha, uma vez que as redes de interesse tinham enlaces de comprimentos máximo de 120 km, bem próximo dos valores 80 a 100 km citados anteriormente.

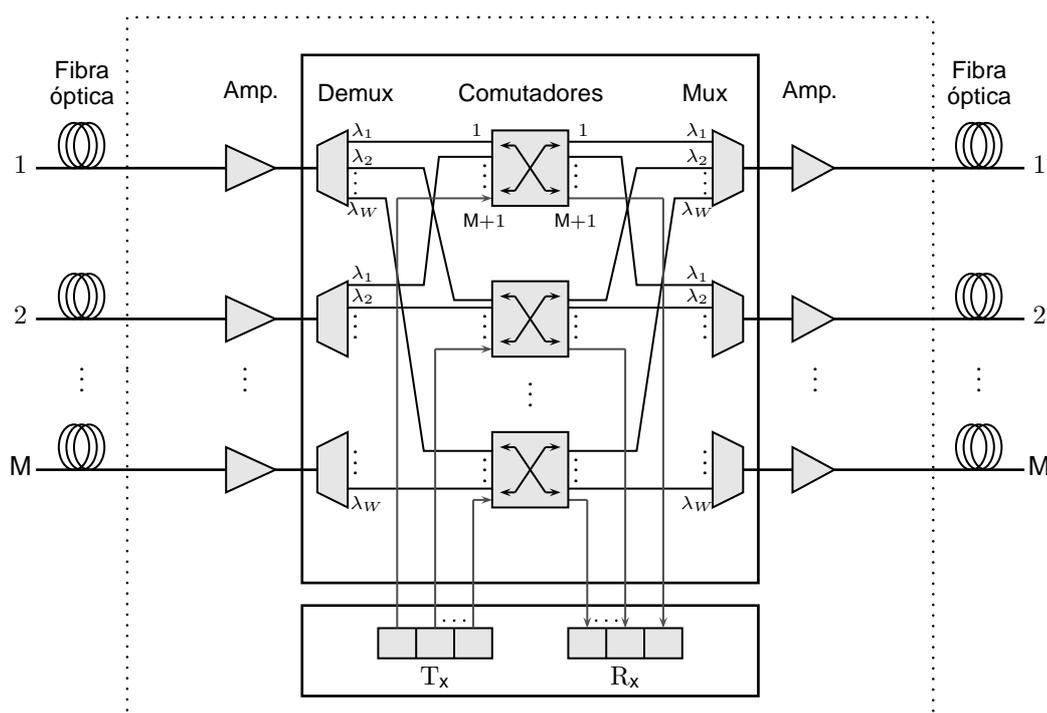


Figura 2.3: Configuração do nó de uma rede óptica utilizando a arquitetura de planos de comprimentos de onda, com os dispositivos empregados: amplificadores ópticos, multiplexadores, demultiplexadores, comutadores, transmissores ópticos (T_x) e receptores ópticos (R_x) [1].

2.3 Principais formas de degradação do sinal na camada física

Um sinal digital ao trafegar em um canal de comunicação é degradado de diversas formas, as mais importantes são: atenuação, dispersão, desvanecimento, ruído e interferência [18; 19].

2.3.1 Atenuação

A atenuação é a diminuição do sinal ao longo da transmissão, ou seja é um efeito que atua na amplitude do sinal transmitido [1; 5]. Isso significa que, se um sinal sofre atenuação num determinado meio de transmissão, o mesmo sofre uma diminuição em sua amplitude ao longo do seu percurso por este meio. Dado um sistema em que a potência na entrada do mesmo é $P_{entrada}$ e a potência em sua saída é P_{saida} a perda imposta pelo meio de transmissão, em decibéis, pode ser quantificada por:

$$PERDA = 10 \log \left(\frac{P_{entrada}}{P_{saida}} \right). \quad (2.1)$$

Em geral, quanto maior é a distância de transmissão, maior é a atenuação que o meio lhe impõe. Por isso, é interessante se definir a atenuação em um determinado meio em termos de quanto a amplitude do sinal é diminuída por unidade de comprimento. Em telecomunicações, essa unidade

de medida é chamada de coeficiente de atenuação (α) do meio e é usualmente expressa em dB/km (decibéis por km). Por exemplo, se um sinal precisa percorrer uma distância de 10 km em um meio que apresenta $\alpha = 3 \text{ dB/km}$, então a diminuição da amplitude do sinal ao longo deste percurso será de 30 dB.

2.3.2 Dispersão

A dispersão é um efeito que um sinal de comunicação sofre ao ser transmitido em um meio não ideal. Ela provoca um alargamento do pulso que está sendo transmitido [1; 20]. Isso acontece porque o meio de transmissão responde de forma diferente para frequências diferentes, com diferentes frequências viajando com diferentes velocidades. Como um sinal de comunicação sempre é composto por um certo número de frequências diferentes, estas viajam ao longo do meio com velocidades distintas resultando que as componentes de frequências cheguem ao destino com atrasos diferentes [1]. Isso gera um alargamento temporal do pulso. Em fibras ópticas monomodo este tipo de dispersão é chamado de dispersão cromática.

Entretanto, existem outras formas de dispersão do sinal de comunicação. Sempre que o meio de transmissão responder de forma diferente a cada componente do sinal, ocorrerá dispersão do mesmo. Por exemplo, uma fibra óptica pode apresentar comportamento diferente para diferentes polarizações de luz, fazendo com que a polarização vertical viaje ao longo da fibra numa velocidade diferente da polarização horizontal, resultando assim numa dispersão do sinal óptico conhecida como PMD (**PMD** - *Polarization Mode Dispersion*) [1].

2.3.3 Ruído

O ruído é um sinal cujo valor instantâneo é imprevisível [21]. O ruído é um sinal aleatório que tem origem em um fenômeno ou propriedade intrínseca da natureza e, geralmente, atrapalha a comunicação digital fazendo aumentar o número de bits incorretamente recebidos. Existem vários tipos de ruído. Alguns dos mais importantes para as comunicações ópticas são: o ruído de emissão espontânea que ocorre em LASERS e amplificadores ópticos, os quais serão vistos na seção 2.5; o ruído balístico que ocorre nos receptores ópticos devido a natureza quântica da luz [1]; e o ruído térmico que também ocorre nos receptores ópticos devido a agitação térmica dos átomos constituintes do dispositivos.

2.3.4 Interferência

A interferência é um processo diferente do ruído. Na interferência, o sinal de interesse sofre a influência indesejada de outros sinais ou sistemas, os quais podem não ser imprevisíveis. Além disso, o sinal de interesse pode sofrer a influência indesejada do próprio sinal ou de um sinal que está no mesmo sistema do sinal de interesse. Em sistemas ópticos, existem várias formas de interferência, algumas das mais importantes são: o *crosstalk*, que é a interferência entre dois canais WDM que ocorre nos comutadores e multiplexadores, a modulação de fase cruzada (**XPM** - *Cross phase modulation*), a auto modulação de fase (**SPM** - *Self phase modulation*) e a mistura de quatro ondas (**FWM** - *Four Wave Mixing*). Os três últimos são efeitos não lineares que ocorrem nas fibras ópticas e em outros dispositivos ópticos [1].

2.4 Medições quantitativas de degradação do sinal

Existem várias formas de se mensurar a degradação causada em um sinal por um canal de comunicação. As mais importantes medidas utilizadas são descritas a seguir.

2.4.1 Relação sinal ruído

Em um sistema de comunicação é importante monitorar a quantidade de ruído adicionada pelo canal de comunicação, principalmente se deseja-se prover uma certa qualidade de sinal pré-estabelecida. Como nesta dissertação trabalha-se com comunicações ópticas, define-se aqui a relação sinal ruído óptica ou OSNR (**OSNR** - *Optical Signal to Noise Ratio*). A OSNR representa a razão entre a potência do sinal óptico (P_{sinal}) e a potência de ruído óptico ($P_{ruído}$) em um determinado ponto de medida. A OSNR pode ser calculada, em unidades de dB, por [1]:

$$OSNR = 10 \log \left(\frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \right), \quad (2.2)$$

Quanto maior a OSNR melhor a qualidade do sinal entregue pelo canal de comunicação.

2.4.2 Fator de ruído e figura de ruído

O fator de ruído F e a figura de ruído NF (**NF** - *Noise Figure*) são parâmetros usados para se medir a quantidade de ruído inserida por um dispositivo [1]. O fator de ruído mede o quanto um determinado dispositivo degrada a relação sinal ruído quando um sinal o atravessa. Em termos quantitativos, se $osnr_{in}$ é a relação sinal ruído na entrada do dispositivo e $osnr_{out}$ e a relação sinal

ruído na saída do dispositivo, ambas em escala linear, o fator de ruído do mesmo pode ser calculado por [1]:

$$F = \frac{osnr_{in}}{osnr_{out}}. \quad (2.3)$$

A figura de ruído nada mais é do que o fator de ruído expresso em decibéis (dB), ou seja [1]:

$$NF = 10 \log F. \quad (2.4)$$

2.4.3 Taxa de erro de bit

Em sistemas de comunicações digitais as informações são codificadas em um conjunto de símbolos, e estes são transmitidos através do canal de comunicação. Em geral é utilizado um conjunto binário símbolos(*bits*): 0 ou 1. É esperado que, ao ser transmitido um *bit* 1 no lado do transmissor o *bit* 1 seja recebido do lado de receptor. Mas como foi visto na seção 2.3, o canal de comunicação degrada o sinal de diversas formas de tal sorte que um *bit* 1 transmitido pode ser entendido como 0 no receptor, ou ainda um *bit* 0 ser entendido como 1. A forma de medir a quantidade de *bits* invertidos pelo canal durante a comunicação é a taxa de erro de *bit* ou BER (**BER** - *Bit Error Rate*). A BER é uma medida estatística da razão entre o número de *bits* incorretamente recebidos e o número de *bits* totais transmitidos. Por exemplo, se um sistema tem uma BER de 10^{-9} significa que a cada um bilhão de *bits* transmitidos um é recebido incorretamente. Nos sistemas de comunicações ópticas se trabalha com uma BER entre 10^{-12} e 10^{-9} [1].

2.4.4 Interferência intersimbólica

Como foi visto na seção 2.3.2 quando um sinal de duração T é transmitido através de um canal que sofre de efeitos de dispersão, na saída do canal o sinal tem duração maior que T [19]. A transmissão seqüencial desses sinais à taxa de $1/T$ resulta em um tipo de superposição entre sinais adjacentes, na saída do canal, conhecida como interferência intersimbólica (**ISI** - *intersymbol interference*). Esse efeito limita a taxa de *bits* que pode ser transmitida pelo canal de comunicação, pois aumentando demais esta taxa a superposição entre os sinais adjacentes pode ser tão grande que não seja mais possível distingui-los no receptor.

2.4.5 Diagrama de olho

Em comunicações digitais, os sinais são degradados basicamente de duas maneiras: na amplitude e na fase. A forma mais comum para se visualizar o efeito em conjunto gerado por ambas é o

diagrama de olho [19]. Este diagrama serve para monitorar a qualidade do sinal de comunicação em um determinado ponto do sistema, e é obtido seccionando-se o sinal medido neste ponto em segmentos de T segundos e superpondo cada segmento no intervalo $[0, T]$. Através do diagrama de olho pode se estimar: o nível de dispersão, o impacto do ruído, a relação sinal ruído e a ISI num dado sistema de comunicações.

É comum se usar os termos fechamento ou abertura do olho para classificar a degradação do sinal pelo sistema. Um "olho aberto" significa pouca degradação e um sinal limpo enquanto se utiliza o termo "olho fechado" para um sinal degradado. Um fechamento do olho na vertical significa que o sistema está sob influência de penalidades na amplitude enquanto um fechamento horizontal significa que o sinal foi degradado a partir de ruídos na sua fase. Como exemplo deste diagrama, a figura 2.4 mostra o diagrama de olho para sinal: (a) completamente limpo, (b) um sinal degradado pelo efeito de dispersão e (c) um sinal degradado em amplitude.

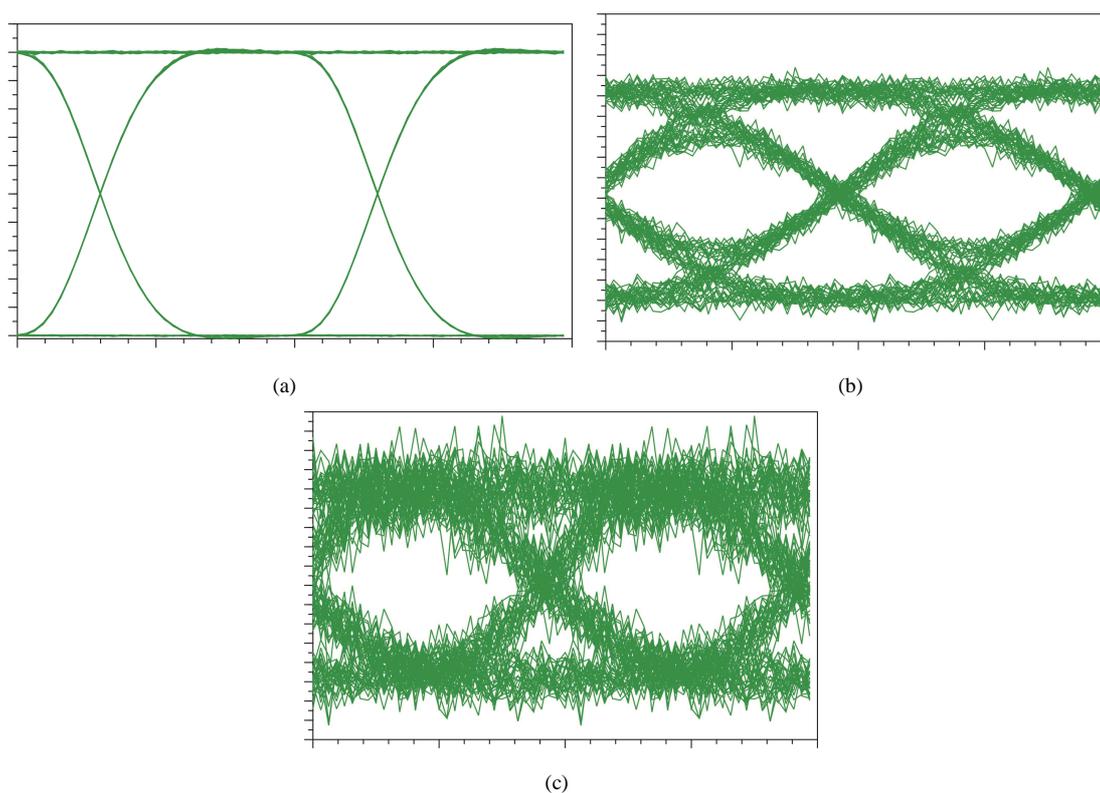


Figura 2.4: Diagrama de olho para um sinal: (a) completamente limpo, (b) um sinal degradado em fase (com dispersão) e (c) um sinal degradado em amplitude.

2.5 Dispositivos da camada óptica

Apesar do emprego de dispositivos ópticos ser essencial para se realizar a comunicação, sempre que o sinal óptico atravessa um dispositivo, este degrada a relação sinal ruído óptica do sinal. Nesta seção serão examinados os principais dispositivos empregados nas redes totalmente ópticas com uma breve descrição de suas funções e como esses dispositivos adicionam ruído ao sinal.

2.5.1 Transmissores ópticos

Os transmissores ópticos geralmente empregados em comunicações ópticas são os LASERs (**LASER** - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) [1; 5; 22]. O LASER é uma fonte óptica capaz de emitir luz coerente, monocromática, colimada e de alta potência. O princípio de funcionamento do LASER se baseia em uma cavidade óptica dentro da qual existe um meio ativo que proporciona ganho em uma faixa de comprimentos de onda [21]. Dentro desse meio ativo ocorrem dois processos: a emissão estimulada e a emissão espontânea. Na emissão estimulada um fóton no interior da cavidade, gerado por emissão espontânea, pode gerar outro idêntico a ele, isto é, mesmo comprimento de onda e mesma polarização. Este processo contribui para dar ganho ao sinal óptico e possibilitar a emissão do LASER. No outro processo, conhecido como emissão espontânea, um fóton na cavidade pode gerar um fóton distinto dele, não contribuindo assim para o processo de amplificação. Esta última quantidade aparece no sinal de saída do LASER como ruído. Este é denominado ruído de emissão espontânea da fonte SSE (**SSE** - *Source Spontaneous Emission*). Para modelagem desse efeito, pode-se usar como parâmetro a relação sinal ruído especificada pelo fabricante do LASER $OSNR_{laser}$. Considerando P_{laser} como a potência óptica do sinal e P_{SSE} a potência de ruído SSE na saída do LASER, esta última pode ser calculada por [1]:

$$OSNR_{laser} = 10 \log \left(\frac{P_{laser}}{P_{SSE}} \right). \quad (2.5)$$

2.5.2 Fibras ópticas

Como visto no capítulo 1, a fibra óptica tem uma largura de banda disponível muito maior que os meios de comunicação tradicionais baseados em fios de cobre ou rádio frequência. Entretanto, também existem alguns problemas associados ao emprego das fibras. O primeiro deles é a atenuação. A figura 2.5 mostra a perda na fibra óptica em função do comprimento de onda para fibras de sílica. Pode-se notar que, dentro da faixa de 1500 nm à 1600 nm a fibra apresenta o menor coeficiente de atenuação. Isso significa que, nesta faixa, os sinais ópticos podem trafegar na fibra com a menor perda

possível. Por esse motivo, esta faixa foi escolhida para ser utilizada nos sistemas de comunicações ópticas. Tipicamente, o coeficiente de atenuação (α) da fibra é de 0,2 dB/km dentro da faixa de 1500 nm à 1600 nm. Quantitativamente, a perda total de uma fibra de comprimento L é dada, em dB, por [5]:

$$PERDA_{fibra} = L\alpha. \quad (2.6)$$

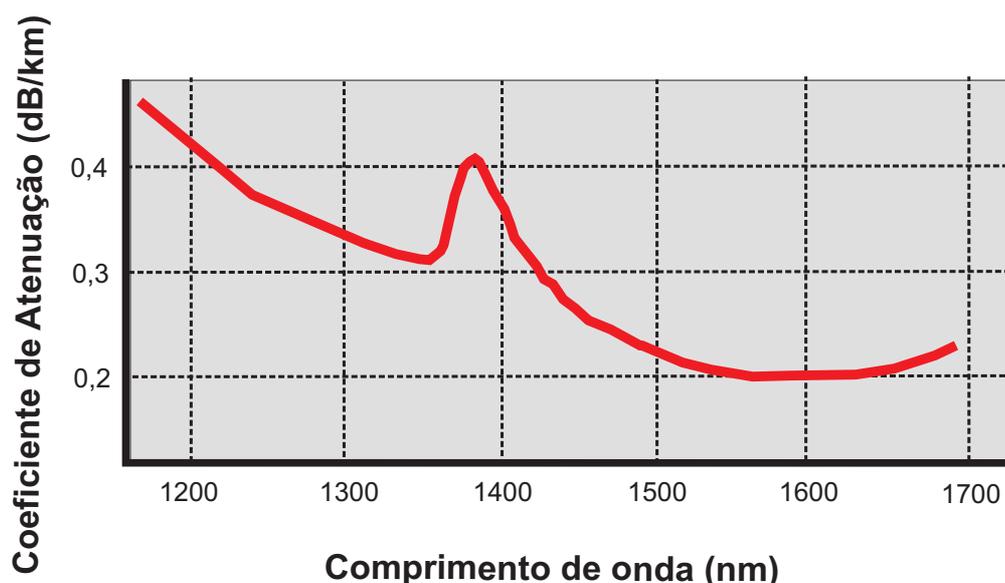


Figura 2.5: Coeficiente de atenuação da fibra em função do comprimento de onda (Adaptado de [2]).

Além de atenuar o sinal óptico que transporta, a fibra o penaliza de diversas outras maneiras. Uma delas, conhecida como dispersão cromática, é um alargamento do pulso óptico devido à diferentes comprimentos de onda atravessam a fibra com diferentes velocidades. Este efeito pode ser compensado usando dispositivos chamados compensadores de dispersão [1]. Entretanto, estes compensadores não eliminam de forma perfeita a dispersão cromática na fibra, gerando uma dispersão residual que depende do comprimento de onda. Neste trabalho, desprezar-se-á esse efeito de dispersão residual uma vez que esse efeito é muito menor que os outros efeitos considerados. Esse procedimento foi adotado também por outros autores [9].

Os efeitos de atenuação e dispersão cromática são os mais impactantes nas fibras ópticas empregadas em sistemas de alta capacidade [1]. No entanto, com o uso de amplificadores ópticos e técnicas de compensação de dispersão, esses efeitos podem ser devidamente compensados ou minimizados. Existem ainda outros efeitos que ocorrem nas fibras que degradam o sinal, que são: espalhamento Raman (SRS), dispersão por modo de polarização (PMD), mistura de quatro ondas (FWM), auto

modulação de fase (SPM) e modulação de fase cruzada (XPM) [1]. Estes efeitos, contudo, não serão tratados nesse trabalho.

2.5.3 Amplificadores ópticos

Em um sistema de comunicações ópticas, o sinal proveniente do transmissor sofre atenuação devido à passagem por diversos elementos ao longo do trajeto óptico até alcançar o receptor. Para longas distâncias, o dispositivo que mais contribui para esta atenuação é a fibra óptica. Devido à inserção dessas perdas pela fibra, após trafegar por uma longa distância o sinal pode sofrer uma atenuação que o torna tão fraco que o receptor pode não mais ser capaz de detectá-lo. É necessário, portanto, amplificar este sinal. Para isso, os amplificadores ópticos são empregados, tornando possível aumentar a distância dos enlaces ópticos. Os parágrafos a seguir descreverão os amplificadores a fibra dopada com Érbio ou, simplesmente EDFA (**EDFA** - *Erbium Doped Fiber Amplifier*). Eles são os amplificadores mais comumente instalados nos sistemas de comunicações ópticas [1; 23].

Apesar de solucionarem o problema da atenuação imposta pela fibra óptica e por outros elementos de rede, os amplificadores ópticos apresentam algumas desvantagens. Eles degradam o sinal óptico de várias formas [1; 6; 22; 23]. Os efeitos mais nocivos de degradação dos sinais ópticos nos EDFA são: o ruído de emissão espontânea amplificada, ou ASE (**ASE** - *Amplified Spontaneous Emission*), a saturação de ganho e a saturação do ruído ASE [1; 23]. Os três são considerados na modelagem de ruídos utilizada nesta dissertação. O primeiro deles é devido ao decaimento espontâneo dos íons de Érbio no meio ativo do amplificador num processo semelhante a geração de SSE em um LASER [23]. O processo de emissão espontânea emite fótons de mesma frequência do sinal óptico de interesse (sinal de comunicação) porém, estes são emitidos com direção, polarização e fase aleatórias, ou seja, são adicionados ao sistema como ruído [1; 23]. A quantidade de ruído ASE adicionada pelo amplificador EDFA pode ser medida em termos de potência óptica de ruído ASE P_{ASE} que é dada por [22; 23]:

$$P_{ASE} = 2h\nu\Delta\nu n_{sp}(G - 1), \quad (2.7)$$

onde h é a constante de Planck, ν é a frequência do sinal considerado, $\Delta\nu$ é a largura de banda óptica do canal sendo amplificado, n_{sp} o fator de inversão de população do amplificador e G o ganho do mesmo. A potência de ruído ASE também pode ser expressa em termos da figura de ruído do amplificador. Assumindo que na entrada do EDFA existe um ruído balístico e que o batimento entre o sinal óptico e o ruído ASE representa a principal fonte de ruído [24], potência óptica de ruído ASE

P_{ASE} também pode ser dada por:

$$P_{ASE} = \frac{h\nu B_o G_{Amp} F_{Amp}}{2}, \quad (2.8)$$

onde B_o a largura de banda do filtro óptico, G_{Amp} o ganho dinâmico linear e F_{Amp} o fator de ruído do amplificador.

Do ponto de vista sistêmico a equação 2.8 é mais interessante que a equação 2.7 pois é possível calcular a potência de ruído gerada pelo amplificador apenas com os parâmetros do mesmo fornecido pelo fabricante (F_{amp} na equação 2.8) sem se preocupar com parâmetros físicos internos do amplificador (n_{sp} na equação 2.7). O ganho G do amplificador também varia com a potência do sinal óptico e pode ser calculado, aproximadamente por [20]:

$$G_{Amp} = \frac{G_{Amp}^0}{1 + \frac{G_{Amp} P_{in}}{P_{sat}}}, \quad (2.9)$$

onde P_{sat} é a potência de saturação na saída, P_{in} é a potência de entrada e G_{amp}^0 é o ganho do amplificador para potências ópticas muito baixas na entrada. Ao se analisar a equação 2.9 vê-se que o ganho depende da potência na entrada. Quanto mais potência em sua entrada, menor é o ganho do amplificador. Esse efeito faz com que a potência do canal sendo amplificado dependa da quantidade de canais ativos, o que torna a decisão no receptor se o *bit* enviado foi 1 ou 0 bem mais complexa [1; 19].

Finalmente, o último efeito que será considerado é o efeito da dependência da potência de ASE gerada no amplificador com a potência na entrada do mesmo. Nesta dissertação esse efeito será denominado de saturação do ruído ASE. Pela equação 2.7 vê-se que P_{ase} depende de dois fatores, a saber, n_{sp} e G . G , como já foi visto, depende de P_{in} (equação 2.9). n_{sp} também varia com P_{in} uma vez que o nível de inversão de população é fortemente dependente de P_{in} [23]. Portanto, P_{ase} depende de P_{in} o que faz com que a medida que os canais WDM vão sendo ligados e desligados ocorre variação na potência de ruído ASE gerada no amplificador. Isto é, o EDFA se torna mais ruidoso ou menos ruidoso dinamicamente ao longo do tempo de acordo com o número de canais ativos.

Além destes efeitos principais, existem outros efeitos degradantes para a qualidade do sinal que ocorrem nos EDFA. O ganho de um amplificador pode ser dependente do comprimento de onda do sinal. Isso significa que canais WDM diferentes podem ter diferentes ganhos, ou seja, chegam ao receptor com níveis de potência diferentes, dificultando a decisão do receptor, se o *bit* recebido é

um 0 ou um 1. Nos resultados desta dissertação esse efeito será desprezado considerando que o amplificador fornece o mesmo ganho para todos os comprimentos de onda. Outro efeito que será desprezado é o efeito de transitório ganho, que ocorre no amplificador sempre que são adicionados ou removidos canais WDM [1].

A forma com que cada efeito foi levado em conta na modelagem é mostrada em detalhes na seção 2.6.

2.5.4 Comutadores/*switchs*

Os comutadores ópticos, ou *switchs* ópticos, são elementos de fundamental importância na redes totalmente ópticas, uma vez que eles tornam possível o chaveamento de uma sinal no domínio óptico. Isso possibilita o estabelecimento de um circuito óptico, ou *lightpath* (rota e um comprimento de onda específicos), desde um nó origem até um nó destino sem a necessidade de conversões E/O para se atender uma requisição de conexão solicitada à rede. O dispositivo usado para fazer o chaveamento em um nó de uma rede óptica é o OXC (**OXC** - *Optical cross connects*). O OXC é um elemento que interliga um conjunto de M fibras de entrada a outro conjunto de M fibras de saída, cada fibra podendo transmitir W comprimentos de onda. A arquitetura básica de um OXC é mostrada na figura 2.6. A figura mostra um OXC, fibras de chegada e saída, multiplexadores e demultiplexadores amplificadores tipo *booster* e pré-amplificadores, e o comutador óptico. Olhando para a figura 2.6 percebe-se que o *switch* não precisa chavear os sinais provenientes de qualquer porta de entrada para qualquer porta de saída. Por exemplo, não é necessário chavear um sinal que chega ao *switch* em λ_1 para uma porta de saída em λ_2 [1]. Isso possibilita uma simplificação na arquitetura do *switch*, a arquitetura denominada planos de comprimentos de onda, a qual é muito utilizada em redes totalmente ópticas. Neste esquema, ilustrado na figura 2.3, um sinal que chega ao OXC por uma fibra de entrada, num comprimento de onda λ , só pode sair por uma fibra de saída no mesmo comprimento de onda λ . Assim, existe um *switch* óptico separado para cada comprimento de onda diferente.

Contudo, assim como os EDFAs, os *switchs* também degradam o sinal óptico. Os principais efeitos são: atenuação e a diafonia ou *crosstalk*. A atenuação é uma diminuição na potência do sinal óptico devida às perdas de inserção. O *crosstalk* é um tipo de interferência entre canais no qual dois sinais sendo transmitidos interferem um no outro mutuamente [1]. No interior do *switch*, durante o processo de chaveamento, uma certa quantidade de potência de um canal WDM é transferida para outro canal atuando neste segundo como ruído. Em termos sistêmicos, pode-se definir um parâmetro que mede quantitativamente a potência que vaza de um canal para outro [1]. Este parâmetro é conhe-

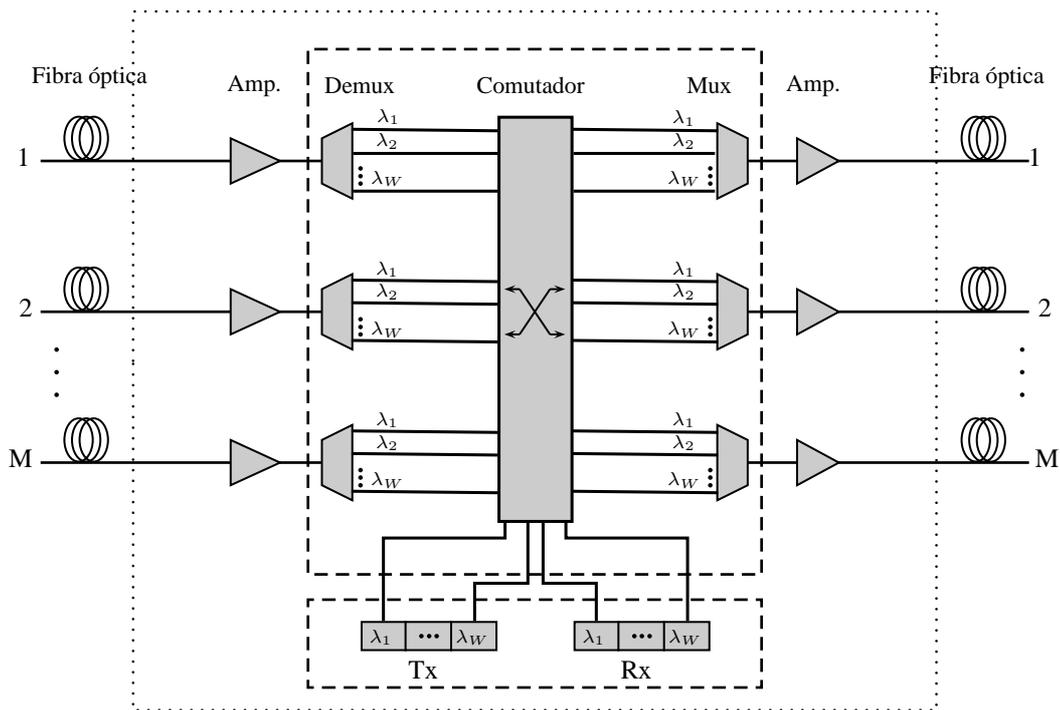


Figura 2.6: Arquitetura básica de um WRN.

cido como fator de isolamento do *switch* e é geralmente medido em dB. Seus valores típicos variam em torno de 35 a 45 dB [1; 25].

Empregando a arquitetura que utiliza planos de comprimentos de onda, em cada *switch* só há interferência de um canal óptico com outro no mesmo comprimento de onda. Portanto, a potência total de ruído devida ao efeito de *crossstalk* adicionada pelo *switch*, no comprimento de onda λ , é dada por:

$$N_{Sw}(\lambda) = \varepsilon \sum_{j=1}^{M+1} P_{Sw_j}(\lambda), \quad (2.10)$$

onde $P_{Sw_j}(\lambda)$ é a potência óptica do sinal presente na j -ésima porta de entrada no comprimento de onda λ , ε representa o fator de isolamento do *switch* $M + 1$ o número total de sinais presentes nas portas de entrada do *switch* no mesmo comprimento de onda do sinal propagante.

2.5.5 Multiplexadores

Para tornar a tecnologia WDM possível são necessários componentes que combinem sinais de várias fontes, com comprimentos de onda diferentes, em uma única fibra. Além disso o processo inverso também é necessário ser implementado, ou seja, a partir de um sinal combinado dividi-lo nos vários comprimentos de onda que estão multiplexados na fibra. O dispositivo que desempenha

o primeiro papel são os multiplexadores e os que desempenham o segundo são os demultiplexadores. Existem diversas maneiras de se implementar estes dispositivos, elas têm como objetivo minimizar as perdas de inserção e o *crosstalk* entre os canais [1]. Neste trabalho foi considerado que os multiplexadores e demultiplexadores apenas atenuam por um valor fixo o sinal que o atravessa, desprezando-se assim, o efeito de *crosstalk* entre canais que neles ocorre.

2.6 Modelagem das penalidades físicas para uma rota

Como este trabalho preocupa-se com as redes totalmente ópticas, é extremamente importante a monitoração das penalidades sofridas pelo sinal ao longo do caminho de comunicação uma vez que, nestas redes, o sinal óptico é propagado ao longo de todo o caminho desde a fonte até o destino no domínio óptico, sem regeneração. Por isso, pode haver um acúmulo muito grande de penalidades na camada óptica. Estas penalidades limitam a taxa de transmissão que pode ser transportada pela rede, e conseqüentemente taxa de erro de *bit*. A primeira está relacionada à velocidade com que a rede pode transportar informação e a segunda à qualidade de serviço (**QoS**- *quality of service*) que pode ser entregue pela rede. Como foi visto na seção 2.4, existem, basicamente, dois domínios nos quais pode ocorrer degradação do sinal durante a comunicação: na fase e na amplitude. Neste trabalho, utilizou-se uma modelagem que é capaz de quantificar as mais importantes penalidades de amplitude num sistema de comunicação óptica: o ruído ASE e a saturação de ganho e a saturação do ruído ASE no EDFA, a atenuação na fibra óptica, a interferência coerente nos comutadores ópticos e a atenuação nos multiplexadores. Como o modelo trata de ruídos de amplitude, o parâmetro mais adequado para se avaliar é a OSNR. A OSNR tem relação direta com a taxa de erro de bit e pode ser usada como critério de QoS de um *lightpath* [1; 26].

O modelo analítico para o cálculo do acúmulo de ruídos na camada óptica utilizado neste trabalho é descrito a seguir e foi estabelecido em [25; 27–30]. É importante ficar claro que este modelo é um modelo aproximado. Entretanto, fazendo uso do mesmo, pode-se ter uma modelagem quantitativa com uma boa aproximação para ser usado em redes ópticas evitar o alto custo computacional da forma exata, a qual se dá através da solução da equação não-linear de Schödinger [31]. A idéia por trás de se utilizar uma modelagem aproximada é possibilitar que os cálculos dos ruídos possam ser feitos num tempo suficientemente pequeno viabilizando seu uso tanto em um software de simulação como numa rede real. A utilização do modelo exato tornaria inviável a simulação ser feita em um tempo razoável.

Os dispositivos que compõem o enlace óptico, e são considerados na formulação, são os seguintes:

transmissor, *switch*, multiplexador, amplificador óptico de potência (*booster*), fibra óptica, pré-amplificador óptico, demultiplexador e receptor. Todos estão ilustrados na figura 2.7.

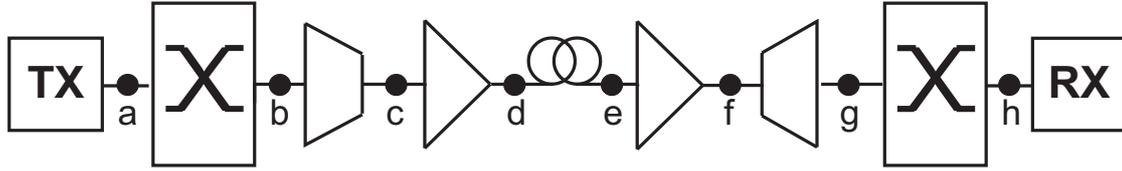


Figura 2.7: Configuração do enlace contendo os dispositivos considerados na modelagem apresentada.

Na figura 2.7, de **a** até **h** têm-se pontos de avaliação nos quais tanto a potência do sinal quanto a do ruído podem ser determinadas no domínio óptico. No ponto **a**, tem-se as potências ópticas de sinal (P_{in}) e de ruído (N_{in}) na entrada do sistema. A relação entre P_{in} e N_{in} define a OSNR (equação 2.5) do transmissor ou OSNR da entrada do sistema ($OSNR_{in}$). Considerando uma rota composta de i enlaces, os dispositivos entre **b** e **h** são repetidos $i - 1$ vezes antes do sinal óptico alcançar o receptor no nó destino.

Nos pontos **b** e **h**, considera-se o *crossstalk* adicionado na saída do *switch*. Isso ocorre porque, como viu-se na seção 2.5.4, uma pequena quantidade da potência proveniente de outros canais no mesmo comprimento de onda do canal de interesse é adicionada pelo *switch* devido ao não-isolamento ideal do dispositivo. A potência de ruído produzida por esse efeito, em cada comprimento de onda λ , é dada por [1]:

$$N_{Sw}(\lambda) = \varepsilon \sum_{j=1}^{M+1} P_{Sw_j}(\lambda), \quad (2.11)$$

onde $P_{Sw_j}(\lambda)$ 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 $M + 1$ o número total de sinais presentes nas portas de entrada do *switch* no mesmo comprimento de onda do sinal propagante.

Nos pontos **c** e **g**, considera-se que os multiplexadores e demultiplexadores apenas atenuam os sinais propagantes no domínio óptico.

Nos pontos **d** e **f**, tanto se considera o ruído adicionado pelos amplificadores ópticos, 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 [24]:

$$N_{Amp}(\lambda) = P_{ASE} = \frac{h\nu(\lambda)B_oG_{Amp}F_{Amp}}{2}, \quad (2.12)$$

onde 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 considerado por meio da seguinte expressão [32; 33]:

$$G_{Amp} = \frac{G_{Amp}^0}{1 + \frac{P_{out}}{P_{sat}}}, \quad (2.13)$$

onde G_{Amp}^0 representa o ganho não-saturado do amplificador, P_{out} a potência óptica e P_{sat} a potência de saturação, ambas consideradas na saída do amplificador.

Pode-se perceber por meio da equação (2.13), que o ganho do amplificador depende da potência óptica na entrada do mesmo. Uma vez que F_{Amp} também depende da potência de sinal [23], a seguinte expressão, obtida empiricamente, ajusta o comportamento real de F_{Amp} como função da potência óptica de entrada [28]:

$$F_{Amp} = F_{Amp}^0 \left(1 + A_1 - \frac{A_1}{1 + \frac{P_{in}}{A_2}} \right), \quad (2.14)$$

onde F_{Amp}^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.

A figura 2.8 ilustra o ganho e a figura de ruído do amplificador em função da potência óptica de entrada por canal ($P_{\lambda-in}$), considerando-se um EDFA montado em laboratório. Os resultados experimentais são típicos dos EDFAs e estão representados por pontos, enquanto que as curvas obtidas utilizando-se as equações (2.13) e (2.14) estão representados por curvas sólidas na figura 2.8. Os parâmetros utilizados, que ajustam as curvas aos resultados experimentais, são os seguintes: $G_0 = 1000$ (30 dB), $F_{Amp}^0 = 3$ (4,77 dB), $P_{sat} = 15$ dBm, $A_1 = 500$ e $A_2 = 2$ W.

Nos amplificadores ópticos tanto o ruído ASE quanto o ganho diminuem com o aumento da potência de entrada [23]. É interessante perceber que apesar da potência de ASE adicionada pelo EDFA se tornar menor com o aumento da potência de entrada, sua figura de ruído aumenta. Isso ocorre porque, com o aumento da potência de entrada, o ganho do amplificador diminui a uma taxa maior do que a diminuição da potência de ASE, ou seja, a potência de sinal amplificado diminui mais rapidamente do que a diminuição da potência de ruído ASE, resultando assim, em um ruído relativamente maior na saída do amplificador e, conseqüentemente, numa figura de ruído maior.

Finalmente, no ponto h, pode-se calcular as potências ópticas do sinal (P_{out}) e do ruído (N_{out}) na saída do enlace. O termo P_{out} depende dos ganhos e das perdas presentes ao longo da propagação do sinal e pode ser calculado da seguinte forma [30]:

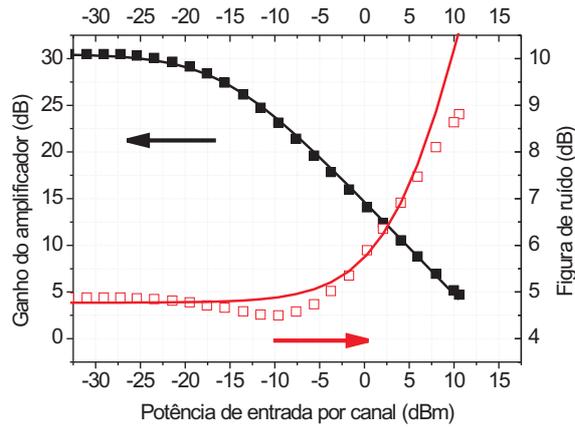


Figura 2.8: Ganho e figura de ruído do amplificador em função da potência de entrada por canal, ambos obtidos de resultados experimentais (pontos) e modelo empírico (curvas sólidas).

$$P_{\text{out}} = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}^2} P_{\text{in}}, \quad (2.15)$$

onde G_{Amp_1} e G_{Amp_2} representam os ganhos dinâmicos lineares do *booster* e do pré-amplificador, L_{Sw} , L_{Mx} e L_{Dx} as perdas do *switch* (ambos os *switches* do enlace considerados com as mesmas perdas), multiplexador e demultiplexador, respectivamente.

O termo N_{out} é calculado no nó destino e inclui as potências de ruído adicionadas em cada ponto, vistos anteriormente, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} N_{\text{out}}(\lambda) = & \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}^2} N_{\text{in}} + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \varepsilon \sum_{j=1}^{M+1} P_{\text{Sw}_{1,j}}(\lambda) + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \frac{h\nu(\lambda) B_o}{2} \left(F_{\text{Amp}_1} + \frac{F_{\text{Amp}_2}}{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_1}} \right) + \\ & + \varepsilon \sum_{j=1}^{M+1} P_{\text{Sw}_{2,j}}(\lambda). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Dividindo P_{out} por N_{out} , pode-se obter o valor da OSNR no nó destino ($OSNR_{\text{out}}$). Um limiar da OSNR pode ser estabelecido de modo a garantir a QoS das chamadas estabelecidas na rede ($OSNR_{\text{QoS}}$).

Considerando uma rota com i enlaces, tem-se que:

$$P_{\text{out}_i} = \left(\frac{G_{\text{Amp}_{i,1}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{i,2}}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \right) P_{\text{out}_{i-1}} \quad (2.17)$$

e

$$\begin{aligned}
N_{\text{out}_i}(\lambda) = & \frac{G_{\text{Amp}_{1,i}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{2,i}}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{out}_{i-1}} + \\
& + \frac{G_{\text{Amp}_{1,i}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{2,i}} h\nu(\lambda) B_0}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}} 2} \left(F_{\text{Amp}_{1,i}} + \frac{F_{\text{Amp}_{2,i}}}{e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{1,i}}} \right) + \\
& + \varepsilon \sum_{j=1}^{M+1} P_{\text{Sw}_{i+1,j}}(\lambda),
\end{aligned} \tag{2.18}$$

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

2.7 Software de simulação

Uma das tarefas mais importantes realizada durante os trabalhos para esta dissertação foi o desenvolvimento de um software capaz de simular uma rede totalmente óptica. Esse software foi escrito em linguagem C++. Ele foi dividido em dois módulos, a saber, simulador de redes ópticas e interface gráfica com o usuário GUI (**GUI - Graphic User Interface**). O módulo de simulação de redes utiliza a modelagem da camada óptica descrita na seção 2.6. O módulo de interface gráfica oferece uma interface amigável para o usuário do software aos recursos do módulo de simulação.

A figura 2.9 ilustra a tela principal da GUI desenvolvida. Utilizando-a, pode-se desenhar uma nova topologia de rede, salvar uma rede montada pelo usuário ou editar uma topologia salva.

Pode-se escolher configurar os parâmetros de todos os nós, todos os enlaces, ou de um dispositivo específico presente na rede, selecionando o dispositivo desejado. Quanto aos enlaces, os seguintes parâmetros podem ser modificados: comprimento e coeficiente de atenuação da fibra, perdas dos multiplexadores e demultiplexadores, número de fibras (para o caso de utilização em sistemas multifibras), ganhos, potências de saturação de saída e figura de ruído dos amplificadores, conforme ilustrado na figura 2.10(a). Quanto aos nós, têm-se as seguintes opções de configuração: valor da perda dos *switchs*, dos parâmetros $OSNR_{\text{in}}$ dos LASERS e $P_{\lambda\text{-in}}$, conforme ilustrado na figura 2.10(b).

A figura 2.11 ilustra os parâmetros da simulação, entre eles: número de chamadas que devem ser simuladas, valor do parâmetro $OSNR_{\text{Th}}$, penalidades consideradas, tipos de algoritmos de roteamento e de alocação de comprimentos de onda, tipos de simulações e intervalo de variação dos parâmetros considerados, além da opção de configurar todos os amplificadores da rede de modo a compensar todas as perdas, ou ainda, oferecer um ganho escolhido pelo usuário.

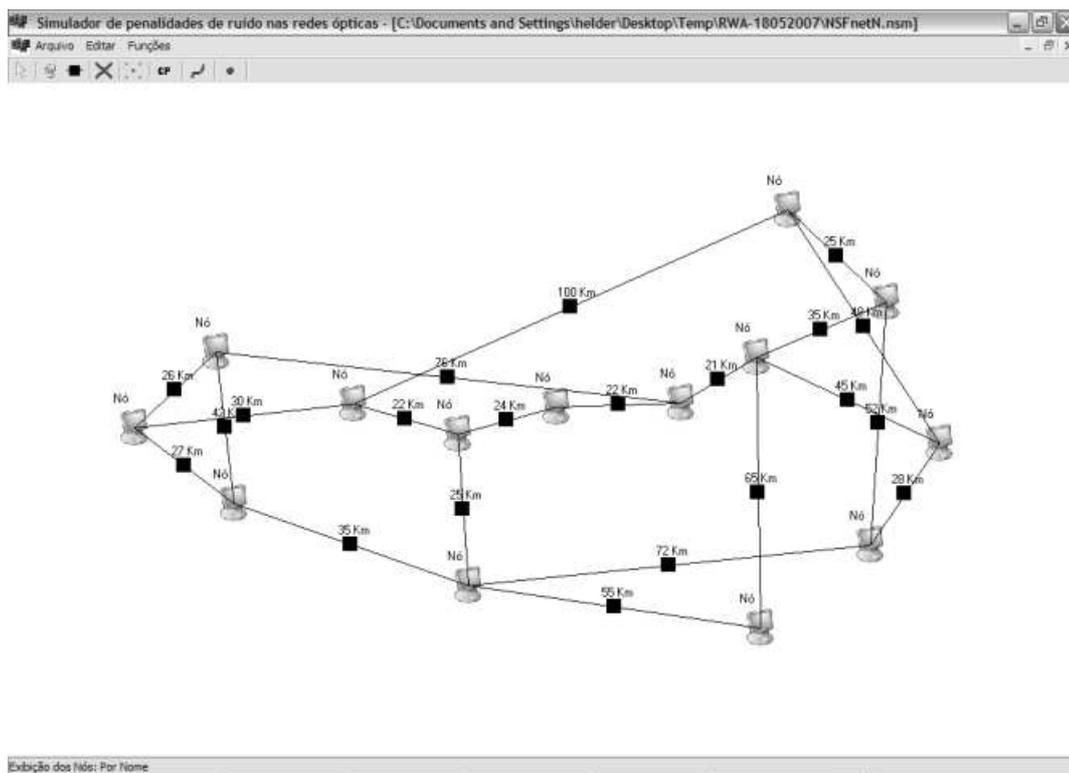


Figura 2.9: Tela de apresentação com a rede a ser simulada.



(a)

(b)

Figura 2.10: Telas de configuração dos parâmetros de simulação relativos aos: (a) enlaces e (b) aos nós da rede.

A figura 2.12 (a) ilustra a janela seguinte ao início da simulação. A mesma informa ao usuário que a simulação está em andamento através de uma barra em movimento. A janela mostrada na

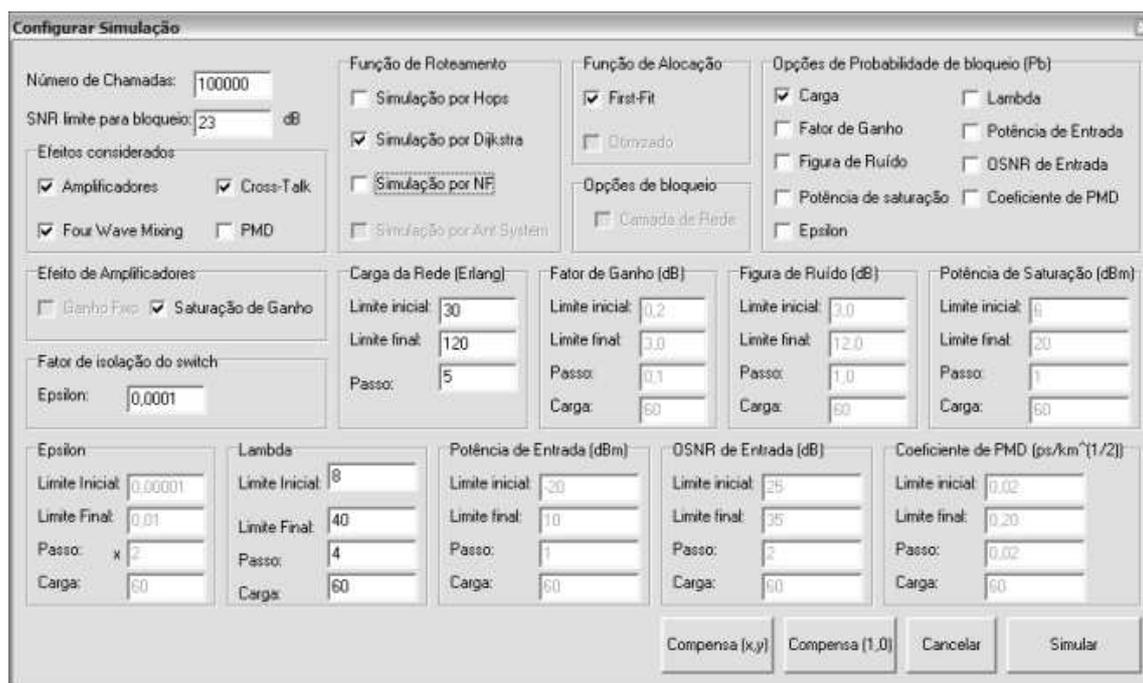


Figura 2.11: Tela de configuração dos parâmetros da simulação.

figura 2.12(b) fornece um gráfico com os resultados da simulação. Estes gráficos são sempre mostrados em termos da probabilidade de bloqueio de chamadas na rede em função dos parâmetros dos dispositivos ópticos ou carga. Além de fornecer o resultado em forma de gráfico o software também fornece um registro completo, salvo em arquivo de texto, com todos os resultados obtidos durante a simulação.

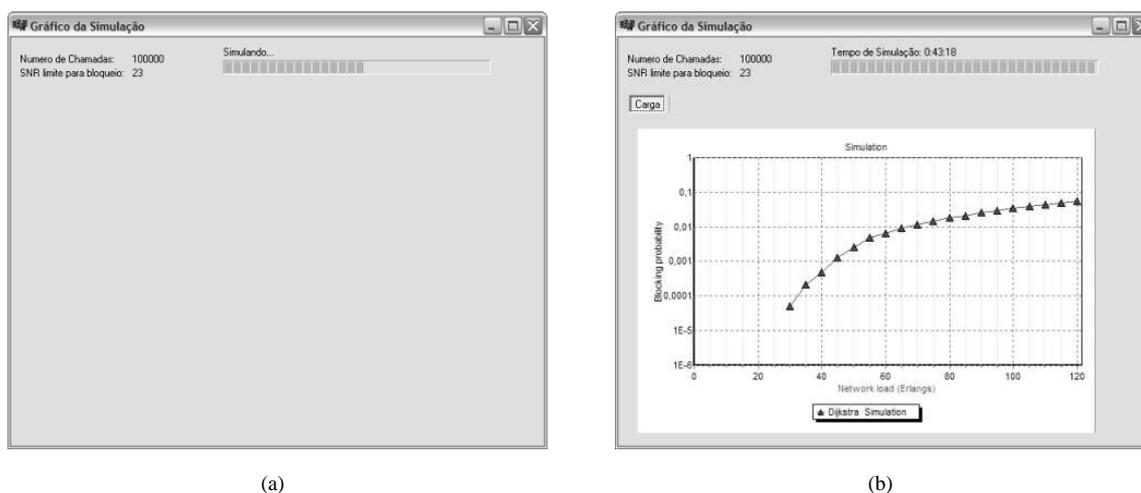


Figura 2.12: Telas informativas quanto ao processo de simulação: (a) em andamento e (b) término da simulação.

2.7.1 Estudo dos casos de uso do software de simulação

Para ilustrar o funcionamento do *software* desenvolvido é mostrado um estudo simplificado dos casos de uso do mesmo. Como foi dito anteriormente o programa desenvolvido foi dividido em dois módulos. A figura 2.13 mostra o diagrama de casos de uso do módulo de interface gráfica. A seguir é feita uma descrição simplificada de cada caso de uso mostrado no diagrama da figura 2.13.

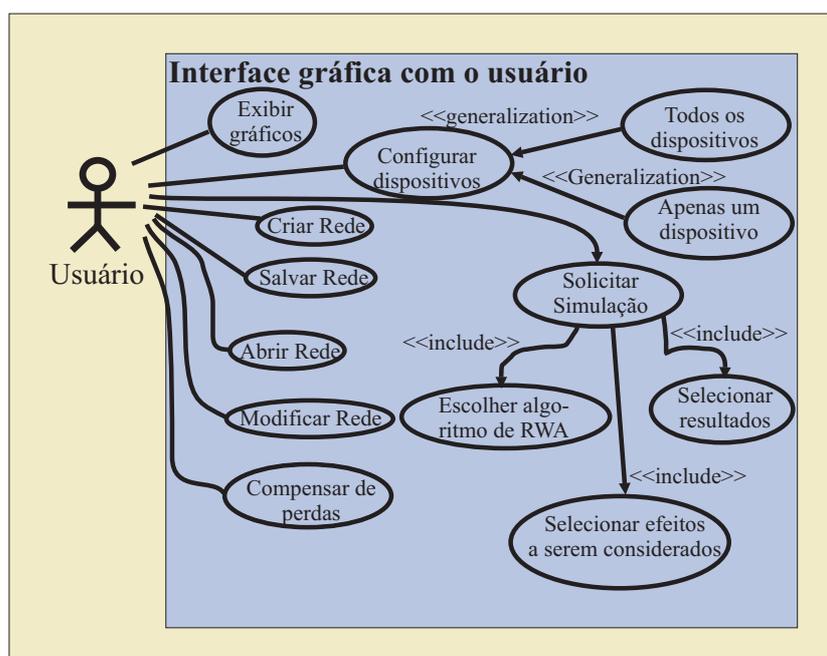


Figura 2.13: Diagrama de casos de uso do módulo de interface gráfica.

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

Salvar Rede – Através deste caso de uso é possível o usuário salvar uma topologia de rede previamente projetada por ele.

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

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

Compensar de perdas – Através desta opção, o usuário pode ajustar o ganho dos amplificadores ópticos de tal forma que os mesmos compensem as perdas dos dispositivos ópticos ao longo de um enlace.

Configurar dispositivos – Permite a configuração dos parâmetros dos dispositivos ópticos utiliza-

dos na rede, como exemplo, fibras ópticas, comutadores e amplificadores. A alteração dos parâmetros pode ser feita de duas formas:

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

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

Solicitar Simulação – Solicita a execução de uma simulação.

Escolher algoritmo de RWA – Permite a escolha do algoritmo de roteamento que deverá ser utilizado durante a simulação. Três escolhas são possíveis: menor caminho(SP), OSNR-R e menor número de saltos. O algoritmo de Atribuição de comprimentos de onda padrão utilizado é o *first fit*. Estes algoritmos são examinados no capítulo 3.

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

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

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

A figura 2.14 mostra o diagrama de casos de uso do módulo de simulação. A seguir é feita uma descrição simplificada de cada caso de uso mostrado no diagrama da figura 2.14.

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

Gerador de requisição de conexões – Gera requisições de conexões entre nós da rede seguindo a descrição feita na seção 4.1.1.

Calcular OSNR – Módulo que efetua o cálculo da relação sinal ruído óptica, para um dado *lightpath* fornecido como entrada, seguindo as equações 2.18 e 2.17

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

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

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

Retirar chamadas – Após um certo tempo ativa, a chamada é liberada (vide seção 4.1.1). Este módulo é responsável pela liberação dos recursos de rede utilizados pelas chamadas que já expiraram.

Algoritmo de RWA – Algoritmo responsável por encontrar rota e comprimento de onda disponíveis para atender uma requisição de conexão. Existem três diferentes tipos de RWA pré-programados que podem ser utilizados: OSNR-R, SP e mínimo número de saltos. A descrição mais detalhada dos algoritmo de RWA é feita no capítulo 3.

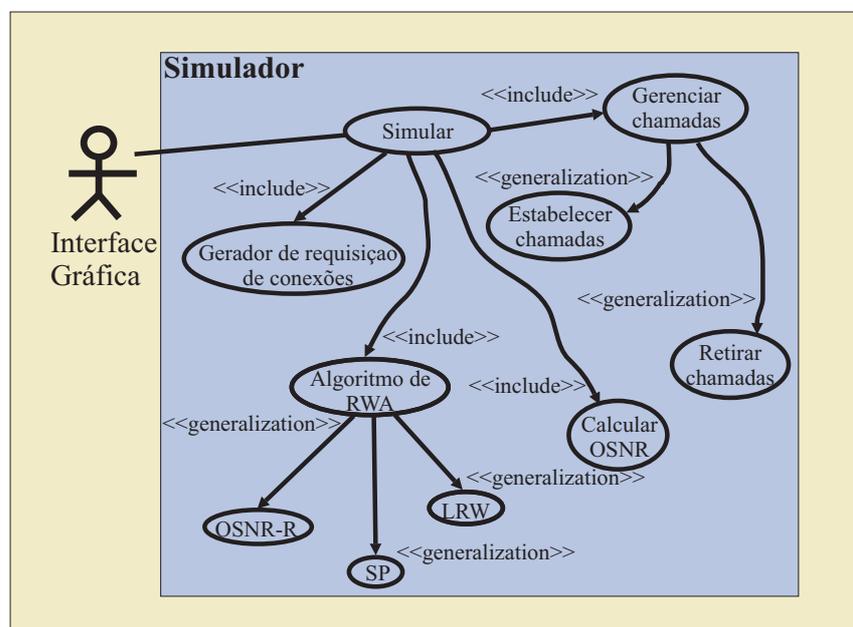


Figura 2.14: Diagrama de casos de uso do módulo de simulação.

CAPÍTULO 3

ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA

*Você me pergunta
Aonde eu quero chegar
Se há tantos caminhos na vida
E pouca esperança no ar
E até a gaivota que voa
Já tem seu caminho no ar.*

— **Raul Seixas**

As redes totalmente ópticas são consideradas como a solução mais segura e econômica para alcançar altas capacidades de transmissão com qualidade de serviço. Há dois desafios principais para administrar estas redes: definir um algoritmo apropriado para resolver o problema de roteamento e atribuição de comprimentos de onda RWA (**RWA** - *Routing and Wavelength Assignment*) e obter uma OSNR óptica aceitável para todos os canais. Tendo em vista o estudo de um destes aspectos, neste capítulo, se faz uma revisão dos principais métodos usados na solução do RWA tanto em redes ópticas limitadas por penalidades da camada física (redes totalmente ópticas) quanto para as redes que não apresentam essas limitações. (redes ópticas opacas).

3.1 Roteamento e atribuição de comprimento de onda - RWA

Como foi visto no capítulo 2 uma rede óptica é composta por nós e por enlaces, os quais interligam os nós da rede. Em cada enlace, são utilizados vários comprimentos de onda distintos multiplexados (WDM). O estabelecimento de uma conexão entre dois nós da rede só é possível mediante seleção de uma rota (composta por um ou mais enlaces que interligam estes nós), e de um comprimento de onda disponível em cada um dos enlaces componentes da rota escolhida. Esse par rota-comprimento de onda é denominado *lightpath*. Dada uma rede óptica e um conjunto de conexões que a mesma deve atender, o problema de encontrar um *lightpath*, ou seja, uma rota e um comprimento de onda para atender cada conexão é conhecido como roteamento e atribuição de comprimentos de onda ou RWA [13].

O RWA é um problema de resolução complexa em uma rede óptica e, por isso, não existe uma forma fechada única e ótima para resolvê-lo. Por isso, existem inúmeras maneiras diferentes para solucionar o RWA. Cada maneira tem sua peculiaridade, e muitas delas, tentam solucionar o RWA para um cenário de rede específico. No tocante ao RWA existem várias classificações possíveis. A primeira delas, é a forma como os usuários da rede solicitam conexões. O RWA trata, basicamente, com três tipos de solicitações de chamadas: estática, incremental e dinâmica [1; 13; 34]. No caso estático todo o conjunto de conexões é conhecido *a priori*. Neste caso, o objetivo do algoritmo de RWA é encontrar *lightpaths* de forma a minimizar a utilização de recursos de rede, como o número de comprimentos de onda ou o número de fibras em cada enlace. Outra abordagem é tentar estabelecer o máximo número de conexões possíveis na rede para um determinado número fixo de comprimentos de onda [13; 34]. O problema de RWA para tráfego estático é conhecido como estabelecimento estático de *lightpath* ou SLE (**SLE** - *Static Lightpath Establishment*) [13]. No caso incremental, pedidos de conexão chegam sucessivamente à rede, e, uma vez que um *lightpath* é estabelecido para uma conexão, este permanece ativo indefinidamente na rede [13; 34]. No caso dinâmico, os pedidos de conexão chegam sucessivamente à rede, mas diferentemente do caso incremental o *lightpath* é liberado após permanecer ativo por um certo tempo [13; 34]. O objetivo dessas duas últimas abordagens é encontrar uma rota e atribuir um comprimento de onda a cada pedido de conexão de forma a minimizar a quantidade de conexões bloqueadas, ou seja, maximizar o número de conexões aceitas pela rede. Uma conexão é bloqueada quando os recursos necessários para atendê-la não estão disponíveis, ou seja, estão ocupados por outros usuários, de forma que a rede não pode estabelecer essa nova requisição. Os casos dinâmico e incremental são conhecidos como estabelecimento dinâmico de *Lightpath* DLE (**DLE** - *Dynamic Lightpath Establishment*) [13]. O SLE tem solução bem mais sim-

ples que o DLE e pode ser tratado, em alguns casos, através de programação linear. Por outro lado, por ser um problema mais complexo, o DLE é geralmente tratado através de métodos heurísticos. Neste trabalho, são investigados os algoritmos DLE com requisição dinâmica de conexões.

Os algoritmos empregados para solução de RWA DLE são resolvidos utilizando principalmente duas abordagens. A mais comum delas é dividir o problema de RWA em dois problemas separados: o problema de roteamento e o problema de atribuição de comprimento de onda, os quais são resolvidos de forma independente [13; 34]. Outra abordagem possível é se resolver o RWA de forma conjunta, ou seja, resolver roteamento e atribuição sem separá-los em dois problemas independentes [13; 34]. Em geral, o primeiro método é preferido, pois o mesmo reduz a complexidade do algoritmo de roteamento e facilita o projeto do mesmo. Entretanto, a segunda abordagem é capaz de proporcionar um melhor desempenho de rede, principalmente em redes grandes e em malha [9; 10; 34].

O RWA é um problema clássico em redes ópticas. Nas primeiras proposições para resolvê-lo, o projetista apenas preocupava-se em desenvolver um algoritmo capaz de distribuir carga na rede e gerenciar melhor os comprimentos de onda na mesma [35; 36]. Esta é uma abordagem satisfatória para as redes ópticas opacas, nas quais o sinal é regenerado a cada nó, ficando assim o sinal com um nível desprezível de degradação. Entretanto, com o avanço das redes totalmente ópticas, essa regeneração a cada nó não é mais realizada, surgindo um outro fator limitante com o qual o RWA precisa lidar: o ruído óptico acumulado ao longo da rota [9]. Por isso, recentemente vem aumentando o interesse em se desenvolver algoritmos de RWA que são considerados os ruídos acumulados na camada óptica da rede [8–10; 15]. Os algoritmos de RWA que levam em consideração esses ruídos são conhecidos como IRWA (**IRWA** - *Impairment aware routing and wavelength assignment*) ou como ICBR (**ICBR** - *Impairment Constraint Based Routing*) [15; 16].

O avanço nas redes ópticas também traz outras funções para o algoritmo de RWA. São disponíveis para serem empregados nas redes dispositivos como regeneradores e conversores de comprimentos de onda [1]. Apesar de tais dispositivos aumentarem o desempenho da rede, eles são de alto custo financeiro e, por isso, muitas vezes são empregados apenas em alguns nós. Entretanto, para se aproveitar ao máximo o desempenho que estes dispositivos podem oferecer, algoritmos de RWA devem ser desenvolvidos especialmente para as redes que empregam estes dispositivos [37; 38]. Além disso, para atender à crescente demanda por largura de banda podem ser empregadas mais de uma fibra óptica para interligar um dado par de nós da rede. Estas redes são denominadas redes multifibras [1]. A literatura tem mostrado que algoritmos de RWA devem ser especialmente projetados para estas redes, para que elas forneçam seu máximo desempenho [34; 39].

Nesta dissertação, investigam-se os algoritmos de RWA baseados em requisições dinâmicas de chamadas em redes sem conversão de comprimento de onda e com duas fibras ópticas interligando quaisquer dois nós da rede (uma fibra para cada direção de comunicação). Nas próximas seções são examinados os algoritmos de roteamento, seguidos pelo algoritmo de atribuição de comprimentos de onda (para o caso do RWA resolvido de forma separada,) e em seguida, são examinados os algoritmos que resolvem o RWA conjuntamente, e por fim, os algoritmos de IRWA.

3.2 Roteamento

O roteamento, em uma rede, consiste em encontrar um conjunto de enlaces pertencentes à mesma, os quais formem uma rota que interligue dois nós que necessitam estabelecer uma conexão. Seria bem plausível se pensar que, além de se encontrar uma rota, seria desejável se encontrar a melhor rota para atender um determinado par de usuários que desejam se comunicar.

Por exemplo, se alguém desejasse viajar de carro entre as cidades de Recife e Salvador, provavelmente, a melhor rota seria o conjunto de rodovias que interligasse as duas cidades com a menor distância possível. Para encontrar essa melhor rota poderia ser associada, a cada rodovia, um custo que, neste caso, seria o comprimento da rodovia. Somando-se o custo de todas as rodovias utilizadas na viagem, o custo total de um determinado caminho seria obtido. A tarefa agora seria encontrar um caminho que fosse o mais curto possível, ou seja, de menor custo. Fazendo-se um paralelo com este exemplo, uma rede óptica é representada por um grafo a cujas arestas é associado algum custo. Existem vários custos possíveis que podem ser utilizados, entre eles: retardo, distância, número de *hops*, entre outros [3]. Resumindo-se, o problema de roteamento é, normalmente, resolvido da seguinte maneira: 1) representa-se a topologia da rede por um grafo, 2) calcula-se o custo de cada enlace (braço do grafo) utilizando-se alguma métrica (custo) pré-estabelecida e, 3) utiliza-se um algoritmo que encontra a rota de menor custo total entre os nós que desejam realizar uma conexão [13; 14]. Como numa rede WDM cada enlace pode ter um certo número de comprimentos de onda, pode-se também representar um rede óptica por um conjunto de grafos todos com a mesma topologia, um para cada comprimento de onda. Com relação às métricas para se calcular o custo relativo a cada enlace, diversas medidas podem ser usadas e várias delas já foram propostas na literatura [35; 36; 40]. Com respeito ao algoritmo que encontra a rota de menor custo os mais comuns são o algoritmo de menor caminho de Dijkstra e de Bellman-Ford [3]. O algoritmo de menor caminho, proposto por Dijkstra em sua tese de doutorado, é capaz de encontrar a rota de menor caminho sem ter de investigar todas as rotas possíveis que interligam dois nós [3]. A forma com que o custo do enlace é

calculado e os parâmetros que são levados em conta durante este cálculo, dá origem a três classificações para os algoritmos de roteamento: roteamento fixo, roteamento fixo alternativo e roteamento adaptativo [13]. A seguir, cada um deles é descrito em detalhes.

3.2.1 Roteamento com rota fixa - (FR)

A forma mais simples de se rotear uma conexão é sempre escolher a mesma rota para um dado par de nós fonte-destino. Neste caso, o custo relativo a cada enlace independe do estado atual da rede, ou seja, é fixo. Este depende de algum parâmetro pertinente ao dado enlace (*e.g.* tamanho físico do enlace) [13; 34]. Por isso, a rota para cada par fonte-destino deve ser escolhida antes da rede entrar em operação num processo *offline*. Uma vez escolhido o custo do enlace, o algoritmo de Dijkstra ou de Bellman-Ford pode ser usado para a determinação *offline* de rotas. Isso significa que um esquema de roteamento fixo precisa ter uma tabela de roteamento carregada antes da operação da rede [3; 13; 34]. Cada vez que uma conexão é requisitada, a rede consulta a tabela de roteamento e determina a rota que deve ser usada para atender esta requisição [3; 13; 34]. Apesar de ser de simples implementação este algoritmo tem a desvantagem de utilizar mal os recursos de rede o que pode acarretar em uma alta probabilidade de bloqueio de requisições de conexões por falta destes recursos. Aliado a esta desvantagem existe outro problema: algoritmos de roteamento fixo são incapazes de contornar situações de falta, nas quais, um ou mais enlaces deixam de operar por algum motivo [13]. Para o esquema de roteamento lidar com falhas na rede ele deve ser capaz de encontrar rotas alternativas ou ainda realizar um roteamento dinâmico no qual uma rota é calculada para cada chamada de forma dinâmica, dependendo do estado atual da rede.

3.2.2 Roteamento com rota fixa alternativa - (FAR)

Este é um esquema de roteamento que considera rotas múltiplas. No roteamento fixo-alternativo, cada nó da rede mantém uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada de várias possíveis rotas para cada nó destino [13; 34]. Por exemplo, estas rotas poderiam incluir a rota mais curta, a segunda rota mais curta, a terceira rota mais curta, etc [13]. A rota primária entre o nó fonte s e o nó destino d é definida como a primeira na lista de rotas armazenada no nó s [13]. O conjunto das possíveis rotas ligando um par fonte-destino, como no roteamento FR, também é calculado *offline* antes da operação da rede. Uma rota alternativa entre origem e destino é qualquer rota que não compartilhe nenhum enlace com a rota primária (rotas disjuntas) [13]. Quando um pedido de conexão chega, o nó fonte tenta estabelecer a conexão em cada uma das rotas presentes em sua tabela de roteamento

do nó fonte, em seqüência, até que uma rota seja encontrada. Se não há nenhuma rota disponível na lista de rotas, então o pedido de conexão é bloqueado e a conexão é perdida. O roteamento fixo alternativo provê simplicidade de controle para admissão e retirada de chamadas e também alguma tolerância à falha em enlaces se rotas alternativas (rotas disjuntas) forem utilizadas nas tabelas de roteamento. Outra vantagem do roteamento fixo alternativo é que ele pode reduzir significativamente a probabilidade de bloqueio de chamadas quando comparado com o esquema de roteamento fixo, pois existem várias opções de rotas possíveis para uma determinada requisição [13].

3.2.3 Roteamento adaptativo - (AR)

No esquema de roteamento adaptativo, a rota escolhida para atender uma requisição de conexão entre um par fonte-destino é determinada dinamicamente, dependendo do estado atual da rede [13; 34]. Este estado é determinado pelo conjunto de todas as conexões em progresso no momento. Quando uma requisição de conexão chega, o caminho de menor custo entre o nó de fonte e o nó de destino é determinado. Para cada nova chamada, um novo caminho é encontrado. Se há caminhos múltiplos de mesmo custo, um deles é aleatoriamente escolhido. Um possível custo adaptativo para um enlace seria o número de canais ativos no enlace, de forma que um algoritmo que utilizasse esta métrica encontraria rotas passando por enlaces pouco carregados, distribuindo assim, a carga na rede. Ele seria adaptativo pois o número de canais em um enlace varia com o tempo se o perfil de requisição de chamadas for dinâmico. Entretanto, uma dificuldade é que o roteamento adaptativo requer extenso apoio dos protocolos de gerência e controle para continuamente ser atualizado com o estado atual da rede. Uma vantagem do esquema adaptativo é que o mesmo é capaz de fornecer uma baixa probabilidade de bloqueio de chamadas pela rede quando comparado com os roteamentos de rota fixa e o roteamento com rota fixa alternativa, pois a cada requisição a melhor rota é encontrada, seguindo uma métrica pré-estabelecida. Como a rota é calculada a cada nova chamada, o AR apresenta outra vantagem: é altamente resistente a falhas nos enlaces.

3.3 Atribuição de comprimento de onda

Como foi visto na seção anterior, quando uma conexão é requisitada à rede óptica, é necessário encontrar uma rota para atender a este pedido. Entretanto, como numa rede óptica WDM em cada enlace existem diversos comprimentos de onda, cada um podendo transportar uma informação diferente, é necessário, além de se encontrar uma rota, definir também qual comprimento de onda será utilizado para se estabelecer a chamada. O algoritmo que estabelece qual comprimento de onda será

utilizado é chamado de algoritmo de atribuição de comprimento de onda. Muitos algoritmos de atribuição de comprimentos de onda foram propostos na literatura. Os mais importantes são: atribuição aleatória (R), *first fit* (FF), menos usado (LU) e mais usado (MU) [13; 34]. Estes algoritmos são descritos detalhadamente a seguir.

3.3.1 Atribuição aleatória (R)

Neste esquema, primeiro procura-se o conjunto de todos os comprimentos de onda que estão disponíveis para a rota encontrada, *i.e.* os comprimentos de onda que não estão ativos no momento. Entre os comprimentos de onda disponíveis, um é escolhido, aleatoriamente, seguindo uma distribuição de probabilidade uniforme. Ou seja, todos os comprimentos de onda têm a mesma probabilidade de serem escolhidos, cada vez que o algoritmo é executado. A idéia deste algoritmo é distribuir de forma uniforme o uso dos comprimentos de onda na rede óptica.

3.3.2 Atribuição *first fit* (FF)

Neste esquema todos os comprimentos de onda são numerados e dispostos numa lista. Ao ser requisitado um comprimento de onda o algoritmo fornece o primeiro comprimento de onda da lista. Se este não puder ser usado, o segundo comprimento de onda da lista é tentado e assim sucessivamente. O primeiro comprimento de onda disponível, seguindo a ordem predefinida pela lista, é então selecionado [13; 34]. Este esquema não requer nenhuma informação global sobre o estado atual da rede. Comparado como o algoritmo de atribuição aleatório (R) o esquema de *first fit* é menos custoso computacionalmente, pois não é necessário a chamada de uma sub-rotina de geração de números aleatórios cada vez que o algoritmo é executado. Por outro lado, na maioria dos casos o desempenho do FF supera o desempenho do esquema de atribuição aleatória [13]. A idéia do *first fit* é empacotar todos os comprimentos de onda em uso na rede nos menores índices da lista de comprimentos de onda, de forma que os comprimentos de onda com maiores índices fiquem livres. Uma vez que os comprimentos de onda de maiores índices têm alta probabilidade de estarem liberados em toda a rede, é mais fácil o estabelecimento de uma rota longa em redes sem conversão de comprimentos de onda. Este algoritmo tem bom desempenho em termos de probabilidade de bloqueio, e é preferido na prática por possuir baixa complexidade computacional e requerer um baixo esforço computacional.

3.3.3 Atribuição menos usado (LU - *Least Used*)

LU é um algoritmo de atribuição de comprimento de onda que seleciona o comprimento de onda menos utilizado na rede, tentando assim, equilibrar a carga entre todos os comprimentos de onda. Este esquema espalha o uso de comprimento de onda fazendo com que a disponibilidade da rede em aceitar rotas longas seja rapidamente diminuída. Conseqüentemente, pedidos de conexão que atravessam um pequeno número de *hops* têm alta probabilidade de serem atendidos [13]. O desempenho de LU é pior que a atribuição aleatória (R) e ainda introduz um custo computacional adicional uma vez que LU requisita informação global da rede sobre o número de usos de cada comprimento de onda. Por esse motivo o LU não é usado na prática.

3.3.4 Atribuição mais usado (MU - *Most Used*)

MU é o oposto do LU, ou seja, tenta selecionar o comprimento de onda mais usado na rede. Entretanto, o MU tem um desempenho em termos de probabilidade de bloqueio melhor que o LU [13]. A filosofia do MU é semelhante à do *first fit*: tentar compactar o uso dos comprimentos de onda. Entretanto, como o MU sempre tenta atribuir o comprimento de onda mais usado ele consegue uma compactação melhor que o FF. Por isso, o MU é ligeiramente superior ao FF em termos de desempenho. O MU tem a necessidade de informação global da rede para saber qual o comprimento de onda mais usado na mesma.

3.4 RWA conjunto (JWR)

Os algoritmos descritos na seção anterior resolvem o RWA em duas etapas independentes e sucessivas: o roteamento e a atribuição de comprimentos de onda. Apesar destes últimos serem algoritmos mais simples de projetar e de mais fácil entendimento, a solução para o roteamento e a atribuição de comprimentos de onda feita de forma conjunta, em geral, resulta em um desempenho de rede superior [10; 34]. Seguindo a nomenclatura de [34] estes algoritmos são conhecidos por JWR (**JWR** - *Joint Wavelength-Route*). Neles, o custo para o estabelecimento de conexão por um determinado *lightpath* é calculado *lightpath* por *lightpath*, ou seja, para cada par rota comprimento de onda. Por exemplo, se existem 5 rotas entre os nós *a* e *b*, numa rede com 5 comprimentos de onda por enlace, existem 25 possíveis *lightpaths* para o atendimento de uma chamada entre *a* e *b*. O custo associado a cada um destes 25 *lightpath* pode ser calculado e se escolhe, por exemplo, o *lightpath* de menor custo dentre os 25. Ainda utilizando este exemplo, em um esquema que separe o RWA em duas etapas

independentes seria necessário calcular o custo para apenas 5 rotas além é claro, da determinação do comprimento de onda. Pelo exemplo, vê-se que numa rede com W comprimentos de onda por enlace, o número de cálculos de custo de rota é multiplicado por W para o RWA-JRW em relação a RWA com etapas independentes. Apesar deste último ter de determinar o comprimento de onda que será utilizado após a determinação da rota, ainda assim, em geral, ele é bem mais rápido que o RWA-JRW.

3.5 RWA levando em conta a camada física

Até aqui, apresentaram-se os algoritmos clássicos para se resolver o problema de RWA. Nenhuma consideração a respeito da degradação do sinal óptico na camada física foi feita. Com a evolução das redes ópticas e dos dispositivos disponíveis para as mesmas, cada vez mais as redes totalmente ópticas vêm ganhando espaço, conforme discutido no capítulo 1. Nelas, não há nenhuma regeneração do sinal óptico, nos nós intermediários ao longo de um *lightpath* e por isso, devido ao emprego destes dispositivos não ideais ao longo do enlace óptico os sinais são degradados (por efeitos como, dispersão cromática, dispersão de modo de polarização, emissão espontânea do amplificador, crosstalk, não linearidades). Os algoritmos tradicionais não se preocupam com este fato, e portanto, tornam-se inadequados para serem usados nessas redes [8–10; 15]. Neste cenário de redes totalmente ópticas, o RWA ganhou uma nova função: encontrar *lightpaths* através dos quais o sinal óptico sofre a menor degradação possível [9; 10; 15]. Recentemente muitos esforços têm sido empregados para o desenvolvimento destes algoritmos [8–10; 15; 17; 26; 29; 33]. Estes algoritmos são conhecidos na literatura como IRWA ou ICBR e sua meta principal é maximizar o desempenho de rede encontrando rotas que consideram o estado da camada física.

Como foi visto, os algoritmos de roteamento encontram caminhos para uma requisição de conexão tentando minimizar uma certa função custo. Esta pode ser a distância, o número de *hops*, ou qualquer outra métrica. Os vários efeitos da camada física da rede que degradam o sinal óptico podem ser associados, cada um, a uma determinada função custo. O custo mais alto para uma ligação significa que, a mesma foi mais degradada por um determinado efeito, enquanto que um custo mais baixo significa que o enlace sob análise é mais imune a este efeito. Idealmente, os algoritmos de IRWA devem se preocupar em encontrar *lightpaths* nos quais os sinais ópticos sejam menos degradados pela camada física. Mas só isso não é suficiente. Além disso, devem encontrar rotas que atendam aos requisitos de desempenho de rede como uma utilização otimizada de comprimentos de onda e distribuição de carga nos enlaces [15]. Todos estes parâmetros heterogêneos devem ser modelados de um modo unificado,

atendendo a estes dois critérios simultaneamente. Isso é particularmente difícil, uma vez que, muitas vezes, um caminho que é selecionado por ter a melhor qualidade de sinal pode ser um caminho que prejudique o desempenho de rede, congestionando em demasia um determinado enlace. Por outro, pode ser encontrado um outro caminho, que ainda atenda aos critérios de qualidade de serviço e seja muito mais adequado para o desempenho da rede [15].

Além disso, existem outros aspectos relevantes. Como existem muitos tipos de penalidades na camada física, a decisão de quais delas devem ser levadas em conta no processo de IRWA vai variar consideravelmente dependendo de algumas variáveis como:

- ▷ Detalhes de projeto de equipamento de cada fornecedor;
- ▷ Características da fibra óptica utilizada;
- ▷ Características de serviço (por exemplo, taxa de transmissão requerida);
- ▷ Tamanho e topologia da rede;

Por exemplo, uma rede metropolitana que não pretende utilizar taxas maiores de que 2.5 Gb/s pode não ser limitada por nenhuma penalidade da camada física, ou seja, o algoritmo de RWA não precisaria levar em conta estas penalidades. Por outro lado, uma rede continental ou internacional que deseja minimizar a quantidade de regeneração O/E/O e suportar conexões com taxas de 40 Gb/s deveria considerar muitas das penalidades explicitamente [9].

Toda essa pesquisa em torno do desenvolvimento de IRWA leva a algoritmos cada vez mais elaborados e com desempenho de rede muito superior aos conseguidos pelas aproximações mais comuns. Embora esquemas IRWA tenham desempenho de rede melhor, o uso destes algoritmos leva a uma complexidade computacional mais alta. Existe também uma dificuldade adicional no desenvolvimento destes algoritmos de IRWA. A falta de regeneração elétrica na redes totalmente ópticas torna difícil a obtenção dos parâmetros necessários para se implementá-los [16]. Dispositivos adicionais têm que ser implantados para se obter os parâmetros da camada óptica necessários. Para evitar esse custo adicional na implantação de novos equipamentos, outra possibilidade é a utilização de modelos analíticos capazes de estimar o impacto de cada penalidades em cada rota. O problema desta abordagem é a dificuldade de desenvolvimento de tais modelos (principalmente quando efeitos não lineares são incluídos) e o tempo de resposta destes algoritmos, uma vez que as modelagens das penalidades físicas são muito complexas e quando implementadas costumam ser lentas.

A maioria dos trabalhos descritos na literatura para o desenvolvimento de IRWA em redes ópticas limitadas pela degradação da camada física podem ser classificados em três grandes grupos.

Na primeira categoria (tipo 1), o algoritmo de RWA é tratado em dois passos: primeiro é feita uma computação de *lightpath* em um módulo de camada de rede. Isso significa que um algoritmo que não leva em conta a degradação da OSNR na camada óptica é executado, fornecendo uma rota e um comprimento de onda (se houver alguma disponível). Em seguida, uma verificação de *lightpath* é executada pelo módulo da camada física, ou seja, é calculado o total de degradação do sinal ao longo do *lightpath* encontrado, e este valor é comparado com um limiar de qualidade de serviço pré-estabelecido. A figura 3.1 mostra um fluxograma típico para esta primeira categoria. Foram propostos na literatura vários esquemas de RWA diferentes usando esta idéia. Ramamurthy e colaboradores modelaram o algoritmo de IRWA levando em conta o ruído de ASE gerado no EDFA e o *crosstalk* adicionado pelo *switch* óptico, comparando a BER calculada com um determinado limiar de qualidade de serviço [12]. Huang e colaboradores modelaram o algoritmo de IRWA levando em conta a penalidade devido a PMD e a OSNR comparando-os, separadamente, em relação a dois limiares distintos, um para a penalidade de OSNR e outro para a penalidade de PMD [40].

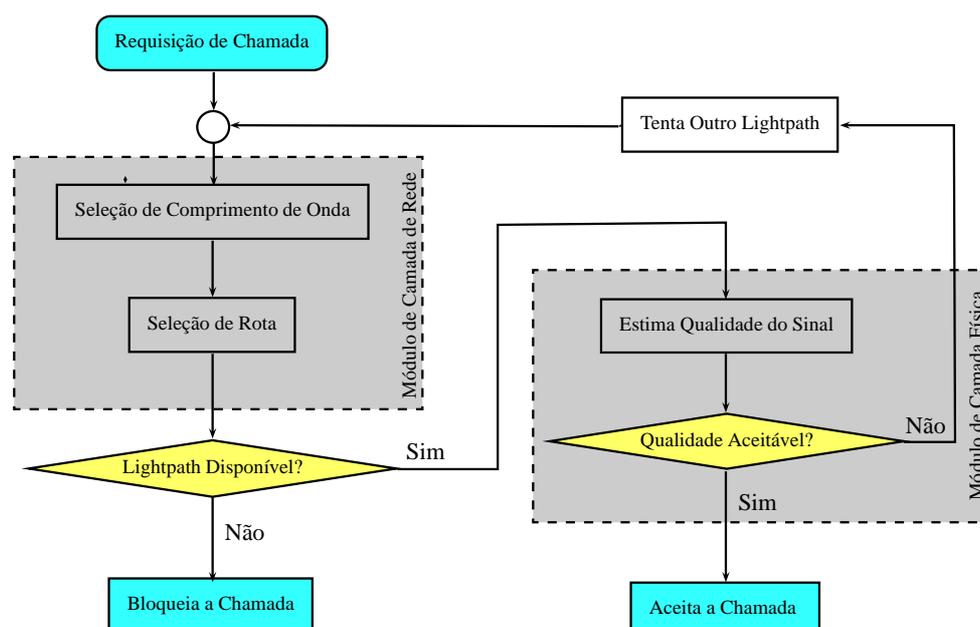


Figura 3.1: Fluxograma utilizado para solução do problema de roteamento e atribuição de comprimentos tipo 1.

Na segunda categoria (tipo2), o algoritmo de RWA é tratado em três passos: primeiro uma computação de *lightpath* em um módulo de camada de rede é feita, resultado, como no caso anterior, em um (ou nenhum) *lightpath* possível para cada comprimento de onda. Então, para cada possível *lightpath* encontrado, é executada a verificação pelo módulo de camada física, comparando o critério de OSNR pré-estabelecido com o resultado calculado para cada *lightpath*. Entre o *lightpaths* que

passam na verificação de módulo de camada física (*i.e.* *lightpaths* que têm qualidade de serviço aceitável) o melhor, considerando-se alguma métrica, é escolhido. A figura 3.2 mostra um fluxograma típico para esta segunda categoria. Pointurier *et al.* usam essa técnica em [41] e desenvolvem um esquema de roteamento baseado no fator Q que incorpora os efeitos do *crossstalk* heterodino no módulo de verificação de camada física. Anagnostopoulos e colaboradores desenvolveram uma abordagem semelhante, considerando também a mistura de quatro ondas (FWM), modulação de fase cruzada (XPM) e o ruído ASE gerado no EDFA [42].

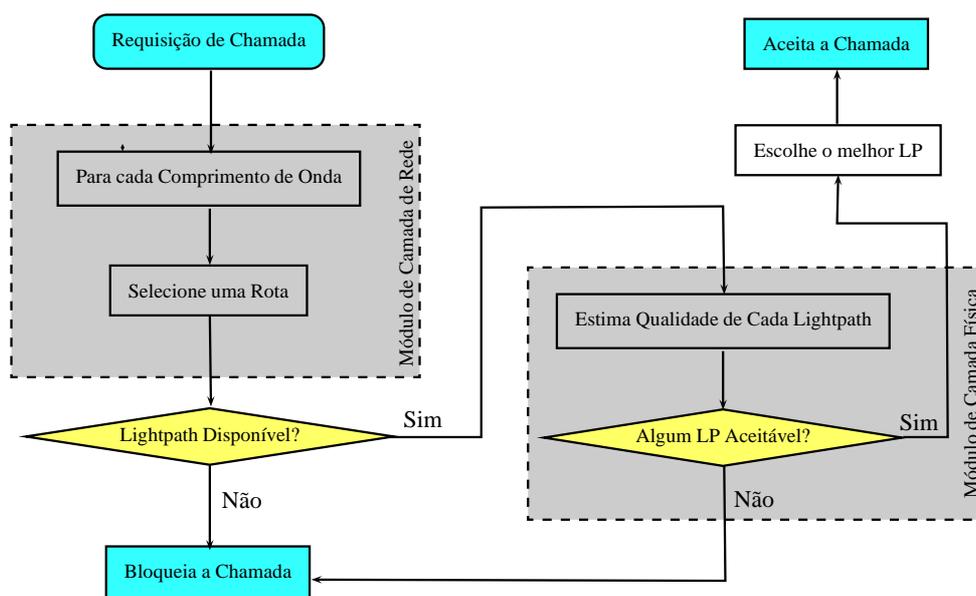


Figura 3.2: Fluxograma utilizado para solução do problema de roteamento e atribuição de comprimentos tipo 2.

Na terceira categoria (Tipo3) está o algoritmo IRWA-JWR, isto é, o algoritmo executa o roteamento e atribuição de comprimentos de onda juntos, levando em consideração a degradação do sinal imposta pela camada física. Martins-Filho *et al.* propõem em [32] um algoritmo roteamento dinâmico baseado em encontrar rotas que menos degradem a OSNR (caminho com a menor NF), incluindo para tal o acúmulo de ASE, a saturação de ganho de amplificador e a dependência do ganho do amplificador com o comprimento de onda. Cardillo *et al.* propõem usar o modelo de OSNR considerado em [40] com algumas penalidades adicionais: efeitos não lineares que acontecem ao longo de transmissão [26]. Kulkarni *et al.* utilizam o fator Q como um parâmetro de desempenho, levando em conta os efeitos das penalidades de dispersão cromática, PMD, ruído ASE, XPM e concatenação de filtro [43].

3.6 Algoritmos de RWA utilizados nesta dissertação

Nos próximos capítulos da dissertação serão propostas duas novas funções custo de enlaces. Com o intuito de realizar uma comparação entre os algoritmos propostos e os algoritmos já existentes na literatura, foram escolhidas três funções SP, LRW e OSNR-R, as quais são detalhadamente descritas a seguir. O algoritmo para a solução do RWA segue os passos do fluxograma mostrado na figura 3.3. O RWA é dividido em duas etapas independentes: roteamento e atribuição de comprimento de onda. Para o roteamento é utilizado o algoritmo de Dijkstra, o qual tenta encontrar a rota de menor custo, usando como custo as métricas definidas pelos esquemas SP, LRW e OSNR-R. Para a atribuição de comprimentos de onda o algoritmo *first fit* é utilizado. Além disso, os algoritmos são utilizados em redes com uma única fibra, sem conversão de comprimentos de onda, com requisição de chamadas dinâmica, e com estabelecimento de conexão chaveada a circuito.

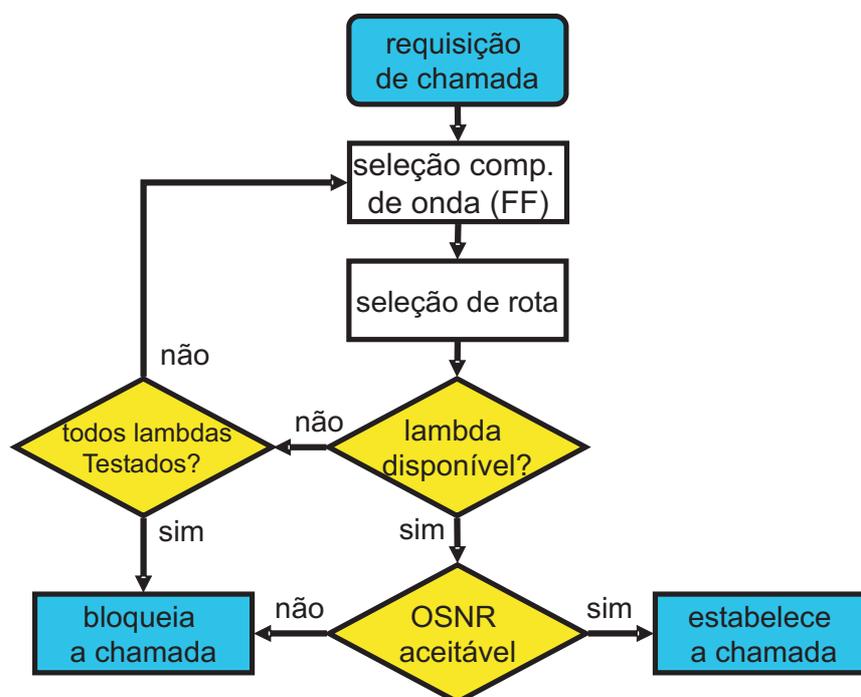


Figura 3.3: Fluxograma utilizado para solução do problema de roteamento e atribuição de comprimentos de onda usado para simulação.

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

$$w_{i,j} = d_{i,j}. \quad (3.1)$$

Portanto, o custo de cada enlace é fixo, ou seja este algoritmo é do tipo FR. Este algoritmo foi

escolhido para comparação pois ele é o algoritmo mais elementar e o mais utilizado na literatura para avaliação de desempenho de algoritmos de roteamento.

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

$$w_{i,j} = \begin{cases} \frac{C_{\max}^T}{C_{i,j}^A} & \text{if } C_{i,j}^A \neq 0, \\ \infty & \text{if } C_{i,j}^A = 0, \end{cases} \quad (3.2)$$

onde $C_{i,j}^A$ representa o número de comprimentos de onda disponíveis no enlace, $C_{i,j}^T$ o número total de comprimentos de onda num enlace e C_{\max}^T o número máximo de comprimentos de onda, ou seja, $C_{\max}^T = \max(C_{i,j}^T)$. Pela equação pode-se notar que quanto maior o número de comprimento de onda disponíveis no enlace ($C_{i,j}^A$) menor o custo deste enlace, uma vez que $w_{i,j}$ é inversamente proporcional a $C_{i,j}^A$. Esta função custo é interessante a título de comparação, uma vez que ela é capaz de balancear a carga na rede.

OSNR-R: A idéia por trás dessa função de custo é encontrar a rota com menor degradação da OSNR para um determinado comprimento do onda. Um algoritmo usando essa função custo foi primeiramente introduzido por Martins-Filho, trabalho no qual o algoritmo de roteamento baseia-se em encontrar a rota que apresenta a menor figura de ruído para um dado comprimento de onda [32]. Se todos os transmissores da rede tiverem a mesma OSNR, encontrar o *lightpath* que minimiza a NF total é exatamente o mesmo que encontrar o *lightpath* que maximiza a OSNR total. Cardillo *et al.* propõem um algoritmo para encontrar o *lightpath* que apresenta a máxima relação sinal ruído na saída [26]. Entretanto, este esquema tem um alto custo computacional uma vez que ele faz uma busca em todas as rotas e em todos os comprimentos de onda disponíveis.

Uma característica interessante do OSNR-R é que ele faz, naturalmente, uma distribuição de carga na rede. Isso porque os enlaces mais ocupados da rede tendem a causar maior degradação na relação sinal ruído dos sinais do que os menos ocupados. Como o algoritmo escolhe o caminho com a maior relação sinal ruído, os caminhos mais ocupados serão evitados, pois terão maior custo.

Pode-se notar da formulação desenvolvida na seção 2.6 que a OSNR na saída de uma cascata de

i enlaces é dependente dos enlaces anteriores. Por isso, a magnitude relativa da penalidade de ruído induzida no i -ésimo enlace é dependente do ruído acumulado nos enlaces anteriores da cascata. Assim, para o algoritmo OSNR-R não é correto modelar a função de custo de um dado enlace independentemente da rota escolhida, como é feito nos algoritmos SP e LRW. Porém, o OSNR-R pode ser implementado por uma simples modificação do algoritmo de Dijkstra, recalculando-se a OSNR acumulada desde o nó origem até o nó destino a cada nó visitado pelo algoritmo [44]. Deve ser lembrado que quanto maior a OSNR melhor a qualidade do sinal e por isso o algoritmo de Dijkstra deve ser ajustado para encontrar o caminho de "maior" custo, ou seja, maior OSNR. Matematicamente, se $\pi(i, j)$ representa todas as rotas possíveis entre os nós i e j , $f_{\text{OSNR}}[\pi(i, j), \lambda]$ representa a OSNR_{out} para essas rotas no comprimento de onda λ , então, a rota determinada pelo algoritmo OSNR-R em λ pode ser expressa como:

$$R_{i,j}^{\lambda} = \max \{ f_{\text{OSNR}} [\pi(i, j), \lambda] \}. \quad (3.3)$$

Como o *first fit* é utilizado para a atribuição de comprimentos de onda, $R_{i,j}^{\lambda}$ é escolhida para o λ de menor índice que esteja disponível em todos os enlaces pertencentes a rota $\pi(i, j)$. Esta função custo foi escolhida para comparação de desempenho pois é uma função de alto desempenho em redes limitadas por penalidade físicas.

3.7 Novas propostas de RWA

Está claro que o uso dos algoritmos de RWA tradicionais fornecem um desempenho de rede inadequado quando as redes de interesse são aquelas limitadas pelas penalidades da camada física (redes totalmente ópticas). Nestas redes, se o gerenciador da rede desejar uma rede de alto desempenho, obrigatoriamente ele terá de usar uma abordagem de IRWA para resolver o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda.

O que se deseja para os algoritmos de RWA em redes limitadas pelas penalidades da camada física é que eles sejam rápidos, tenham como entrada parâmetros de rede simples e de fácil obtenção e além disso forneçam um alto desempenho de rede. Atender a estes três requisitos de forma simultânea não é uma tarefa fácil. Primeiro, para serem rápidos, eles têm de fugir das complexas modelagens de penalidades da camada física. Em contraste, para terem a alto desempenho os algoritmos de IRWA precisam fazer uso destes modelos. Por isso, em geral, os algoritmos de IRWA fazem uso de informações coletadas diretamente da camada física, necessitando a instalação de novos equipamento

para realizar esta coleta de dados e encarecendo o custo da rede. Ou seja, é obviamente não trivial, a partir de parâmetros de redes simples como o comprimento dos enlaces ou a ocupação dos mesmos, obter um algoritmo de RWA capaz de fornecer alto desempenho.

Neste trabalho são propostas duas formas de se atender a esses requisitos de forma simultânea. Nas proposições, parâmetros de rede simples como comprimento dos enlaces e ocupação dos mesmos são usados como entrada para algoritmos de roteamento, que são capazes de utilizá-los e atingir um alto desempenho de rede. São atendidos os requisitos de rapidez e simplicidade, virtude dos RWA tradicionais, e alto desempenho em redes totalmente óticas, virtude dos IRWA. Esse bom desempenho é conseguido através do treinamento de uma função custo de enlace. Essas funções têm alguns parâmetros livres os quais são encontrados de forma a se obter a melhor performance de rede. Durante o treinamento a rede óptica é considerada com suas penalidades físicas limitantes, isso faz com que os parâmetros livres armazenem o conhecimento sobre a camada física de forma indireta. Os algoritmos propostos neste trabalho não levam em conta as penalidades da camada física como entradas para do algoritmo de RWA durante sua solução, mas essas penalidades são levadas em conta para a verificação da qualidade de serviço de cada *lightpath* encontrado tanto na etapa de treinamento como na etapa de funcionamento dos algoritmos. Utilizando-se dessa estratégia, é possível alcançar alto desempenho e rapidez fazendo uso de parâmetros de entrada simples.

No capítulo 4 é mostrada a primeira função de custo proposta neste trabalho. Ela possui duas variáveis de entrada: comprimento dos enlaces e ocupação dos mesmos, e ainda dois parâmetros livres que armazenarão o conhecimento sobre a camada óptica. No capítulo 5 é mostrado um procedimento sistemático para se construir a função custo do enlace.

CAPÍTULO 4

FUNÇÃO DE CUSTO ADAPTATIVA - PIAWF

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

— Confúcio

Informações como distância, disponibilidade e número de saltos que o sinal tem que percorrer para atender uma chamada têm alta correlação com ruído acumulado ao longo do *lightpath*. O aumento do comprimento do enlace implica em amplificadores ópticos com ganhos maiores para compensar as perdas impostas por uma fibra óptica mais extensa. De forma geral, quanto maior o ganho do amplificador, mais ruído ASE ele gera [1; 23]. Por outro lado, a ocupação do enlace também tem impacto na saturação dos amplificadores e na quantidade de ruído ASE gerado, uma vez que ganho de amplificador e a figura de ruído do mesmo dependem da potência total na sua entrada [1; 23]. Além disso, com o aumento do número de nós pelos quais o *lightpath* tem que trafegar mais ruído de *crosstalk* é adicionado pelos comutadores colocados nos nós intermediários. Tendo em vista estes aspectos, justifica-se utilizar estes parâmetros de rede elementares (distância, disponibilidade e número de saltos) para construir um esquema mais simples de roteamento, em vez de usar esquemas complexos que utilizam os ruídos no processo de roteamento, e ainda assim obter o desempenho de rede (em termos de probabilidade de bloqueio) semelhante ao conseguido por estes

últimos, que como visto no capítulo 3 são claramente superiores aos algoritmos que não levam em conta a camada física.

Propõe-se aqui, uma função de custo adaptativa PIAWF (*Physical Impairment Aware Weight Function*), a qual, pode ser usada como métrica (função custo de enlace) num algoritmo de roteamento do tipo AR. Os parâmetros de entrada para este algoritmo são informações de rede simples como disponibilidade e comprimento dos enlaces. Dois parâmetros ajustáveis também são utilizados para memorizar informações sobre os ruídos da camada física durante o treinamento da função custo. Essa função tem uma dependência não linear com a ocupação do enlace e uma dependência linear com o comprimento total do enlace. Além disso, o custo avaliado pela função é adaptativo, ou seja, tem uma dependência com o estado atual de rede.

Como a distância entre dois nós adjacentes é altamente relacionado com a degradação da OSNR [26], então, para minimizar este efeito a função custo precisa fornecer valores altos para rotas longas e valores pequenos para rotas curtas. A função de custo relacionada com o comprimento do enlace entre os nós i e j é:

$$g_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{d_{max}}, \quad (4.1)$$

onde $d_{i,j}$ é comprimento do enlace entre os nós i e j e d_{max} é o comprimento do enlace mais longo da rede.

O custo de um enlace também deve estar relacionado com a atual ocupação do mesmo, isso porque o ganho no amplificador óptico sofre com o efeito da saturação de ganho quando a potência total de entrada aumenta (*i.e.* com o aumento do número de canais ativos). O ruído ASE adicionado pelos amplificadores também depende da saturação de ganho [23]. Então, PIAWF modela o custo $f_{i,j}$ relacionado à ocupação por:

$$f_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j}^U}{\lambda_{i,j}^T}, \quad (4.2)$$

onde, $\lambda_{i,j}^U$ e $\lambda_{i,j}^T$, são os números de comprimentos de onda ativos e total, respectivamente, entre os nós i e j . Nota-se que os valores de $f_{i,j}$ e de $g_{i,j}$ são normalizados, ou seja, estão sempre no intervalo de [0,1]. Combinando essas duas métricas define-se a função custo $w_{i,j}$, a qual representa o custo total do enlace entre os nós i e j :

$$w_{i,j} = \gamma(g_{i,j}) + (1 - \gamma)(f_{i,j})^n, \quad (4.3)$$

onde γ e n são parâmetros ajustáveis que serão encontrados dependendo da topologia da rede. $\gamma \in [0,1]$ e n é um valor real não negativo. O parâmetro n introduz um comportamento não linear em relação ao custo associado à ocupação do enlace, enquanto γ pondera a importância relativa de $g_{i,j}$ e

$(f_{i,j})^n$ no custo total $w_{i,j}$ do enlace. A idéia de se introduzir um comportamento não linear a função de ocupação de enlace foi proposta em várias funções custos disponíveis na literatura [35; 36]. Os melhores valores para os parâmetros n e γ dependem da topologia, das características dos dispositivos ópticos e da carga da rede. Assim, antes de se atribuir $w_{i,j}$ como função de custo em um esquema de roteamento, deve-se primeiro executar simulações *offline* para a determinação destes parâmetros. Os valores de γ e n devem ser escolhidos para minimizar a probabilidade de bloqueio de chamadas na rede. Essa procura pelos valores otimizados de γ e n é chamada de treinamento dos parâmetros γ e n . Esta pode ser implementada por meio de algoritmos de otimização como Algoritmos Genéticos, busca Local, PSO, ou ainda através de uma busca exaustiva. Uma vez estabelecida a função de custo PIAWF resta averiguar seu desempenho em uma rede óptica. Para tal foi utilizado o *software* de simulação descrito na seção 2.7. Nas próximas seções serão descritas as características de simulação utilizadas para a simulação de PIAWF, bem como a metodologia utilizada e os resultados obtidos.

4.1 Características de Simulação

O software de simulação utilizado segue o fluxograma mostrado na figura 4.1 para a solução do problema de RWA. Quando uma chamada é solicitada à rede, primeiro seleciona-se um comprimento de onda disponível utilizando-se o algoritmo de *first-fit*. A rota é definida por um algoritmo de roteamento que usa como métrica a função $w_{i,j}$ (PIAWF). Então, a $OSNR$ do *lightpath* é avaliada. Se esta relação sinal ruído está acima do nível predeterminado de ($OSNR_{QoS}$) a chamada é aceita e estabelecida na rede na rota e no comprimento de onda selecionados. As chamadas são bloqueadas se não houver nenhum comprimento de onda disponível ou se a $OSNR_{out}$ para o *lightpath* selecionado estiver abaixo do limiar $OSNR_{QoS}$. $OSNR_{QoS}$ é a relação sinal ruído óptica definida para que a taxa de erro de bit no *lightpath* seja menor do que 10^{-12} . As chamadas bloqueadas são perdidas.

4.1.1 Geração de Chamadas e carga da rede

Admitiu-se neste trabalho que os pedido de conexões (ou chamadas) à rede chegam de forma dinâmica (DLE) e, por isso, o processo de geração de chamadas é um processo estocástico. Para cada chamada, dois nós da rede são escolhidos aleatoriamente seguindo uma distribuição uniforme. Isso quer dizer que todos os nós da rede são igualmente prováveis de serem sorteados. Estes dois nós sorteados são os escolhidos para serem os nós fonte e destino da chamada. O processo de chegada de solicitação de conexões segue um processo de Poisson: o intervalo de tempo entre chamadas é exponencialmente distribuído com média μ e a duração de cada chamada também segue uma distribuição

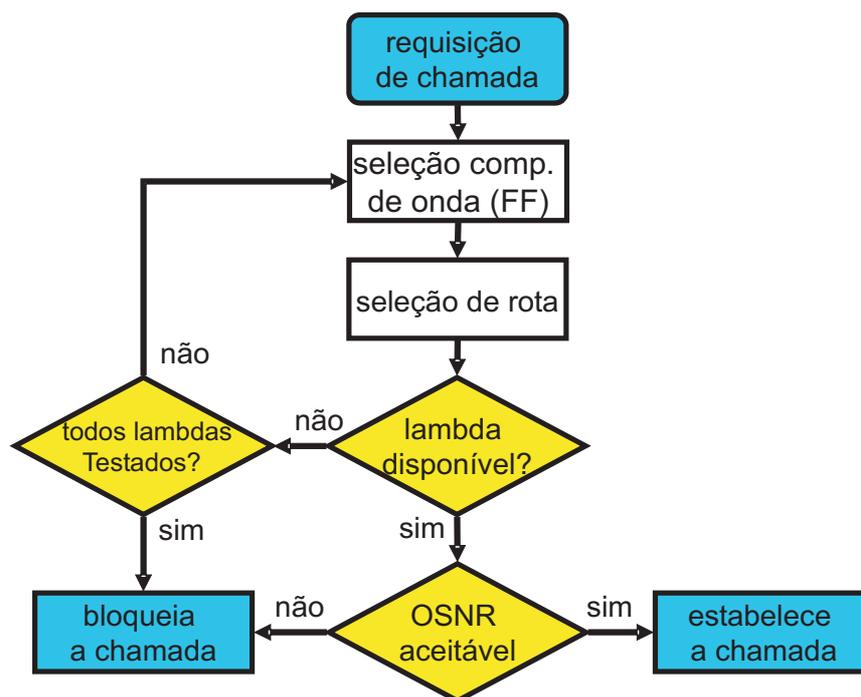


Figura 4.1: Fluxograma utilizado para solução do problema de roteamento e atribuição de comprimentos de onda usado para simulação.

exponencial, porém com média $1/H$. Com estes parâmetros, pode-se definir a carga L_{rede} da rede por [18]:

$$L_{rede} = \mu H, \quad (4.4)$$

na qual, H é o tempo, em média, que a chamada fica ativa e μ é a taxa, em média, com que as chamadas chegam à rede. Apesar de L_{rede} ser adimensional, na literatura é comum se atribuir a unidade Erlang à carga da rede. A carga da rede é uma medida de quanto a rede está sendo utilizada. Alta carga significa que existem muitas conexões em curso através de rede enquanto que baixa carga significa que existe um número pequeno de conexões ativas na rede. Os parâmetros μ e H medem quantitativamente este uso. Se, em média, as conexões ficam por muito tempo ativas (H grande), obviamente a rede ficará mais ocupada. Se por outro lado as conexões ficam, em média, por pouco tempo ativas (H pequeno), a rede ficará menos ocupada. Além disso, se os pedidos de conexão chegam à rede em intervalos de tempo pequenos (μ grande) a rede ficará mais ocupada que se os mesmos chegassem em intervalos de tempo maiores (μ pequeno).

4.1.2 Cálculo da probabilidade de bloqueio

A probabilidade de bloqueio da rede é uma medida da quantidade relativa de chamadas perdidas pela rede. Isso significa que quanto maior a probabilidade de bloqueio da rede menos usuários são atendidos e, conseqüentemente, pior é o desempenho da mesma. A probabilidade de bloqueio PB é obtida por:

$$PB = \frac{C_{bloqueadas}}{C_{total}}, \quad (4.5)$$

onde $C_{bloqueadas}$ é o número de chamadas bloqueadas pela rede e C_{total} dado por:

$$C_{total} = C_{bloqueadas} + C_{aceitas}, \quad (4.6)$$

é o número total de chamadas solicitadas à rede. Para cada simulação de rede, um certo conjunto de chamadas simuladas são necessárias. Neste trabalho o número de chamadas solicitadas à rede, durante a simulação, foi de tal forma que $C_{bloqueadas} \geq 200$ para se ter, ao mesmo tempo, rapidez no tempo de simulação e uma confiabilidade estatística na PB , uma vez que a chegada de solicitação de chamadas à rede é um processo estocástico.

4.1.3 Camada óptica

Para a camada óptica foi assumido que cada ligação entre nós da rede (enlaces) existiam conexões bidirecional, ou seja, uma fibra óptica diferente para cada direção de comunicação. Os nós foram assumidos sem capacidade de conversão de comprimento de onda, ou seja, desde o nó origem da chamada até o nó de destino o sinal óptico é transmitido por um mesmo comprimento de onda, não importando número de nós que esse sinal atravessa. Além disso, a rede foi assumida como comutada a circuito. Na comutação por circuito o *software* de controle da rede estabelece um caminho físico desde a origem de chamada até o destino, e nenhuma informação é transmitida até que este caminho seja estabelecido [3]. Os parâmetros ópticos usados na simulação são mostrados na tabela 4.1

Os ganhos dos amplificadores ópticos foram ajustados para compensar as perdas no enlace. A disposição dos dispositivos na rede bem como a modelagem utilizada para o cálculo a OSNR estão mostradas no capítulo 2. Para as simulações neste capítulo foram considerados os ruídos de ASE, saturação de ganho e saturação do ruído ASE além do *crosstalk* coerente gerado no OXC.

Foram usadas três topologias de rede diferentes para simulação, a saber, topologias 1, 2 e 3, como mostrado nas figuras 4.2,4.3,4.4 respectivamente. Essas topologias foram escolhidas devido às suas características diferentes, de forma que se pudesse avaliar o desempenho do algoritmo proposto em diferentes casos. A Topologia 1 representa um caso de uma rede bem conectada. Topologia 2 é

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor	Definição
P_{sat}	16 dBm	Potência de saturação na saída do amplificador
P_{in}	0 dBm	Potência de entrada por canal considerada
$OSNR_{in}$	30 dB	Relação sinal-ruído óptica na entrada
$OSNR_{QoS}$	23 dB	Relação sinal-ruído óptica adotada como critério de QoS
B	40 Gbps	Taxa de transmissão
B_0	100 GHz	Largura de banda a 3 dB do filtro óptico
W	36	Número de comprimentos de onda em cada enlace da rede
Δf	100 GHz	Espaçamento na frequência entre canais
λ_i	1550, 12 nm	Menor comprimento de onda pertencente à grade
λ_0	1510 nm	Comprimento de onda cujo valor do coeficiente de dispersão é igual a zero
α	0,2 dB/km	Coefficiente de atenuação da fibra
L_{Mx}	3 dB	Perda do multiplexador
L_{Dx}	3 dB	Perda do demultiplexador
L_{Sw}	3 dB	Perda do <i>switch</i>
F_{Amp}^0	3,162	Fator de ruído do amplificador para baixos valores de potência do sinal ($NF = 5$ dB)
ϵ	40 dB	Fator de isolamento do <i>switch</i>
A_1	100	Parâmetro de ajuste do modelo da figura de ruído dinâmica
A_2	4 W	Parâmetro de ajuste do modelo da figura de ruído dinâmica

uma rede grande com grande interesse prático (semelhante à rede NSFNET - *backbone* americano).

Topologia 3 é uma rede pequena, simétrica e regular.

4.2 Resultados

Nesta seção, apresentam-se os resultados das simulações realizadas. O objetivo principal dos algoritmos de RWA é encontrar uma rota e um comprimento de onda que atenda a chamada solicitada. Além disso, é desejável que esses algoritmos encontrem rotas e comprimentos de onda de tal forma que a quantidade de chamadas perdidas (bloqueadas) seja minimizada. Por isso, a probabilidade de bloqueio da rede, de acordo com a seção 4.1.2, é a medida mais utilizada para quantificar o desempenho do algoritmo de roteamento. O algoritmo de roteamento também deve fornecer probabilidades de bloqueio compatíveis com a carga atual da rede, uma vez que é esperado que a probabilidade de

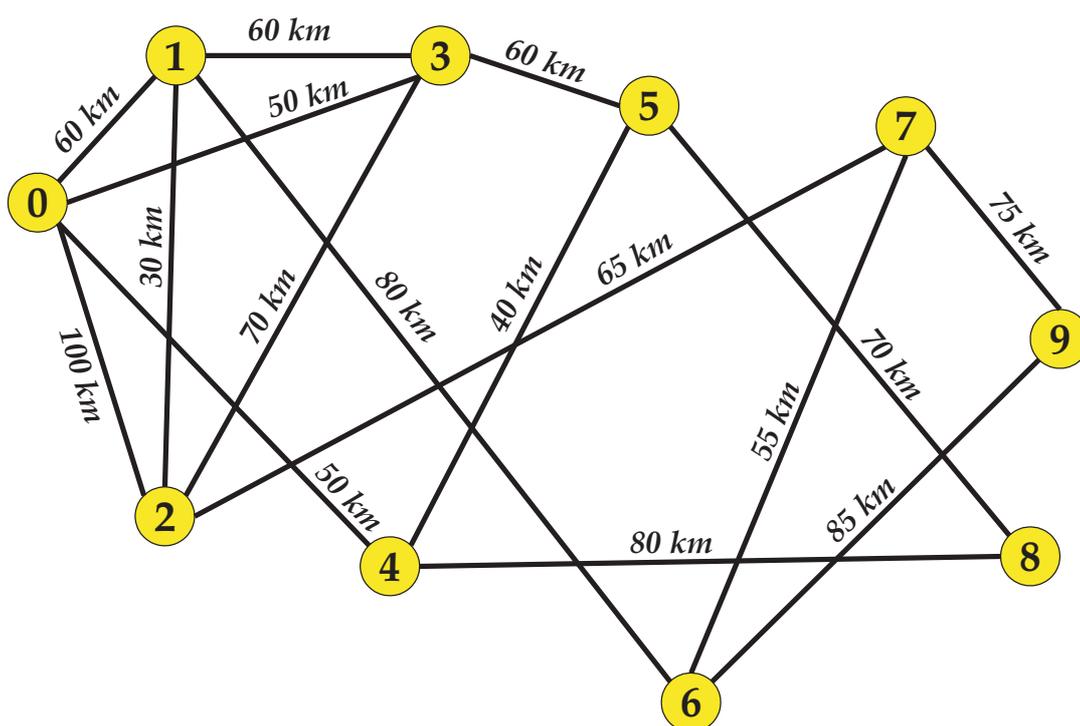


Figura 4.2: Topologia 1 - topologia de rede nas simulações.

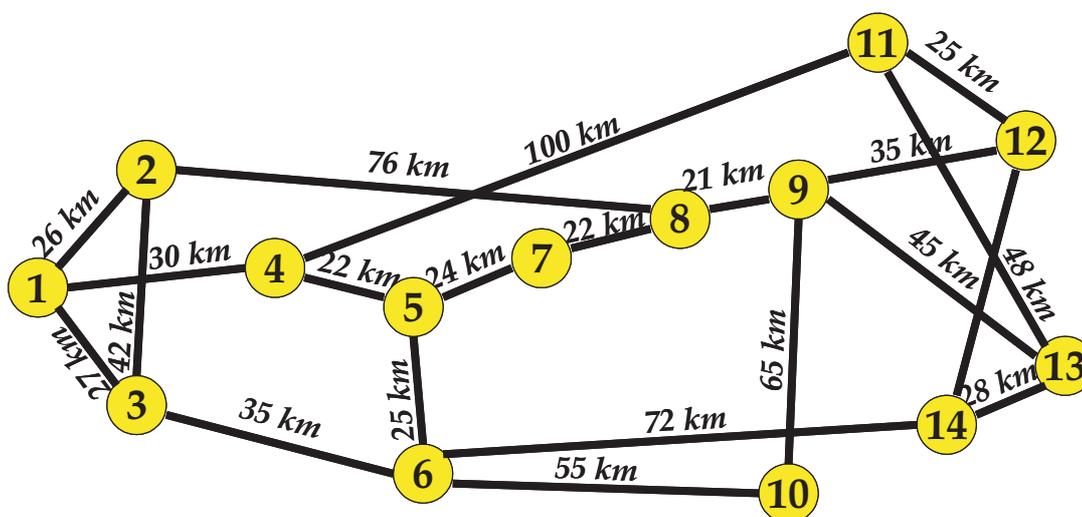


Figura 4.3: Topologia 2 - topologia de rede nas simulações.

bloqueio da rede seja menor para baixas cargas do que para altas cargas. Por isso, o gráfico que é largamente usado para se avaliar o desempenho de um algoritmo de roteamento é o da probabilidade de bloqueio versus carga da rede [12; 13; 26; 36; 40]. Obtiveram-se esses gráficos para as três topologias de rede citadas anteriormente.

Os parâmetros de rede e os parâmetros dos dispositivos da camada física foram fixados para

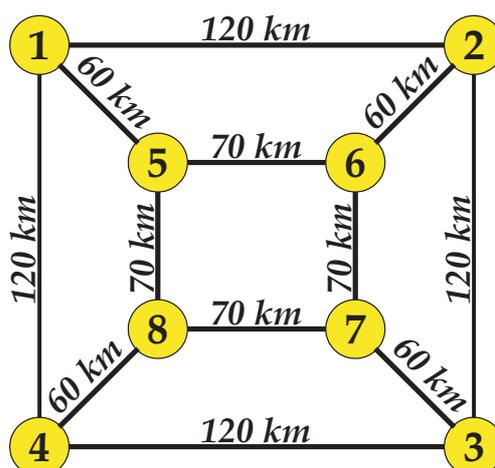


Figura 4.4: Topologia 2 - topologia de rede nas simulações.

dois cenários diferentes: primeiro cenário, o qual foi denominado C_1 , as chamadas são bloqueadas principalmente devido a degradação da OSNR ao longo do *lightpath*, isto é, o número de chamadas bloqueadas devido a falta de comprimento de onda disponível é desprezível. O segundo cenário, o qual foi denominado C_2 , as chamadas bloqueadas são devidas a falta de comprimento de onda e degradação de OSNR. Esse segundo cenário foi construído de tal forma que o número de chamadas bloqueadas por falta de comprimentos de onda fosse bastante semelhante ao número de chamadas bloqueadas devido a degradação de OSNR. A diferença principal entre C_1 e C_2 é o número de comprimentos de onda total disponível em cada enlace.

A tabela 4.2 mostra o número total de comprimentos de onda disponíveis por enlace para cada topologia nos cenários C_1 e C_2 . Para o cenário C_1 , o número de comprimentos de onda disponíveis por enlace foi ajustado alto o suficiente de forma a se obter um número de bloqueios por falta de comprimentos de onda desprezível. A partir de cenário C_1 , chega-se ao cenário C_2 diminuindo-se o número de comprimentos de onda disponíveis por enlace até haver um equilíbrio entre o número de bloqueios devido à degradação da OSNR acima de $OSNR_{QoS}$ e o número de bloqueios por falta de comprimentos de onda. Essa escolha do número de comprimentos de onda para cada cenário foi feita utilizando-se o algoritmo OSNR-R.

Tabela 4.2: Comprimentos de onda por enlace para os diferentes cenários de simulação.

Topologia	C_1	C_2
	λ	λ
1	36	11
2	36	22
3	36	15

4.2.1 Otimização dos parâmetros γ e n

Como dito anteriormente, o primeiro passo antes se utilizar PIAWF como função custo para o algoritmo de roteamento é encontrar os valores ótimos para γ e n . Para cada topologia foi executada uma busca exaustiva dentro do espaço de busca $\gamma \times n$. A carga utilizada nesta busca foi a carga média dentro do intervalo de cargas de interesse para cada rede. O intervalo de cargas de interesse de cada rede é estabelecido segundo as seguintes diretrizes: primeiramente não há interesse em redes que tenham uma probabilidade de bloqueio maior do que 1% [1]. Em segundo lugar, a probabilidade de bloqueio não deve ser muito baixa, pois seria necessário um número muito grande de chamadas durante a simulação para obtê-la, resultando assim em um tempo de simulação muito longo. Para atender a ambas as restrições simultaneamente, decidiu-se que o intervalo de cargas de interesse para cada rede seria tal que as probabilidades de bloqueio das redes estivessem confinadas, aproximadamente, entre 10^{-5} e 0,01. A tabela 4.3 mostra os parâmetros γ e n ótimos encontrados para cada cenário e para cada topologia, bem como a carga usada em cada caso.

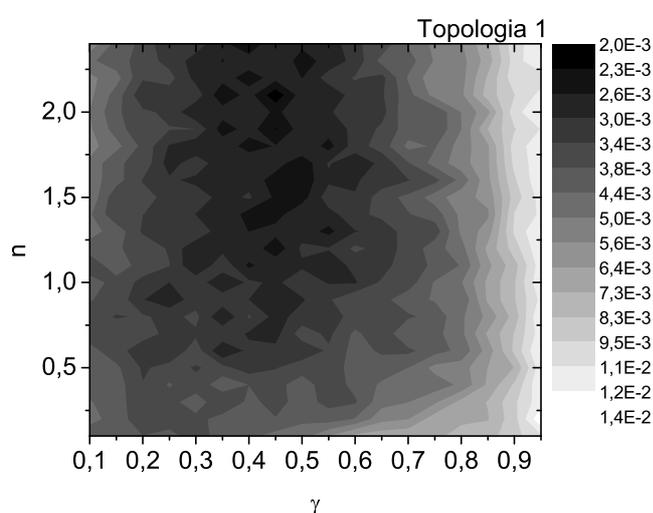
A meta da otimização destes parâmetros é a minimização da probabilidade de bloqueio da rede. Simulações preliminares mostraram que ao se usar n acima de 2,5 resultava em probabilidades de bloqueio muito altas. Assim, o espaço de busca foi limitado dentro dos intervalos de $\gamma \in [0; 1]$ e $n \in [0; 2, 5]$. Ambos foram avaliados dentro de seus intervalos com passos de 0,01. O procedimento utilizado foi o seguinte: para cada par (γ, n) cada topologia foi simulada com um conjunto de chamadas conforme a seção 4.1.2. Então, o par que resultou na menor probabilidade de bloqueio foi escolhido.

Para ilustrar a dependência de γ e n com a topologia e com a probabilidade de bloqueio, são mostrados os gráficos das otimizações para o cenário C_2 nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

A figura 4.5 mostra a dependência da probabilidade de bloqueio com γ e n para a topologia 1. A figura mostra o valor da probabilidade de bloqueio em escala de cinza. As regiões mais escuras

Tabela 4.3: Parâmetros ótimos para diferentes cenários de simulação.

Topologia	Carga	C ₁		C ₂	
		γ	n	γ	n
1	20 Erlangs	0,35	0,20	0,45	2,10
2	75 Erlangs	0,85	0,30	0,50	1,70
3	35 Erlangs	0,69	0,84	0,65	0,90

**Figura 4.5:** Probabilidade de bloqueio em função dos parâmetros γ e n para a topologia 1 no cenário C₂.

representam probabilidades de bloqueio mais baixas, enquanto as regiões mais claras representam probabilidades de bloqueio mais altas. Isso significa que as regiões mais escuras do gráfico são a regiões onde a rede bloqueia menos chamadas. Pode-se notar, na figura 4.5, que a melhor região para o parâmetro γ é no intervalo [0,4;0,5], e a melhor região para parâmetro de n está situada no intervalo [1,0;2,5]. Os valores ótimos encontrados para γ e n estão mostrados na tabela 4.3. Fazendo-se uma análise similar para as demais topologias (figura 4.6 e 4.7) tem-se: $\gamma \in [0,45;0,55]$ e $n \in [1,6;1,9]$ para a topologia 2, e $\gamma \in [0,55;0,65]$ e $n \in [0,6;1,5]$ para a topologia 3.

Comparando-se as figuras 4.5, 4.6 e 4.7 pode-se notar a grande influência que a topologia tem nos parâmetros ótimos encontrado. Este fato conduz à conclusão de que a simulação para otimização dos parâmetros γ e n deve ser executada a cada mudança na topologia de rede.

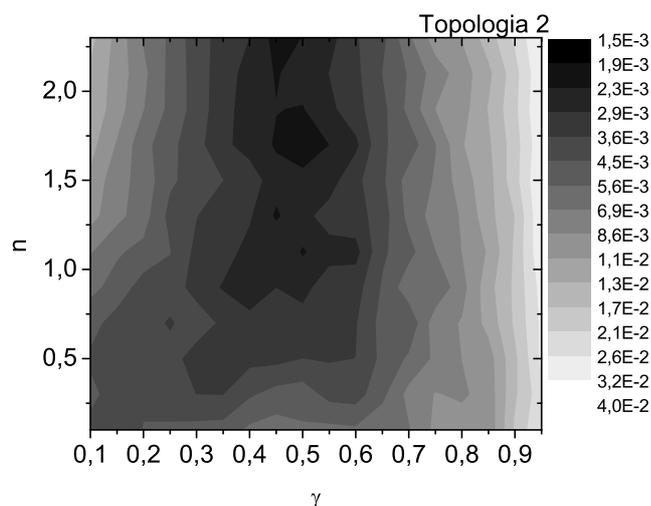


Figura 4.6: Probabilidade de bloqueio em função dos parâmetros γ e n para a topologia 2 no cenário C_2 .

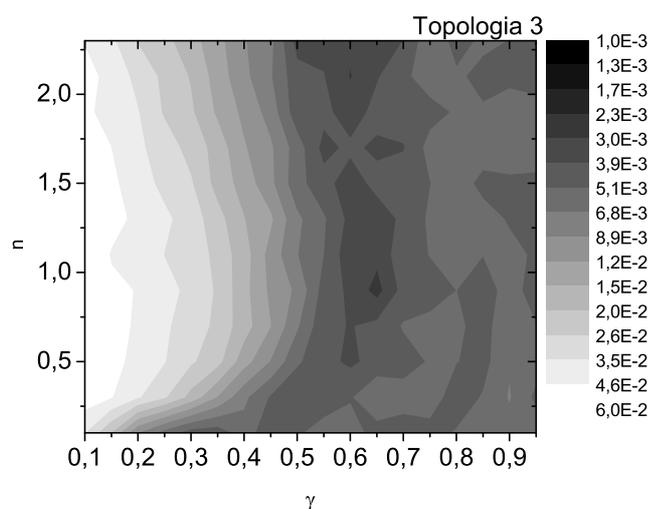


Figura 4.7: Probabilidade de bloqueio em função dos parâmetros γ e n para a topologia 3 no cenário C_2 .

4.2.2 Avaliação do desempenho de PIAWF na rede

Uma vez encontrados os valores ótimos de γ e n , para cada topologia, pode-se calcular o custo do enlace (número de canais ativos) através de $w_{i,j}$. Comparou-se a função proposta $w_{i,j}$ com outros algoritmos de roteamento bem conhecidos na literatura e discutidos na seção 3.6, são eles: o SP que usa como função custo a distância entre enlaces, LRW que usa como função custo a ocupação do

enlace, e OSNR-R que usa a $OSNR_{out}$ do *lightpath* como função de custo.

Nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10 mostra-se a probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para os quatro algoritmos de roteamento diferentes no cenário C_1 (bloqueio de chamadas principalmente devido à degradação da OSNR) para três topologias 1, 2 e 3, respectivamente. Nota-se das figuras que o uso da função de custo de $w_{i,j}$ PIAWF apresenta uma probabilidade de bloqueio muito menor do que SP e LRW em todos os casos. Além disso, PIAWF apresenta probabilidades de bloqueio mais baixas que OSNR-R para topologias 1 e 2. Para topologia 3, PIAWF apresentou um desempenho, semelhante à OSNR-R para cargas médias e altas. Porém, alcança uma probabilidade de bloqueio ligeiramente mais alta para cargas baixas. A importância de se comparar a probabilidade de bloqueio de PIAWF com OSNR-R é que este último é um algoritmo que fornece um ótimo desempenho, pois leva em conta, no processo de roteamento, os ruídos da camada física.

Nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13 mostra-se a probabilidade de bloqueio em função da carga da rede para os quatro algoritmos de roteamento diferentes no cenário C_2 (bloqueios de chamadas devido à degradação de OSNR e falta de comprimento de onda disponível balanceadas) para as topologias 1, 2 e 3, respectivamente. Como foi verificado para o cenário C_1 , o uso de função de custo de $w_{i,j}$ PIAWF apresenta probabilidade de bloqueio muito menores do que SP e LRW. PIAWF apresenta desempenho melhor que OSNR-R para topologias 1 e 2. Para topologia 3, PIAWF apresentou ainda um desempenho semelhante a OSNR-R para cargas médias e altas, porém alcançou probabilidade de bloqueio ligeiramente mais alta para cargas muito baixas, exatamente o mesmo comportamento verificado no cenário C_1 .

Fica claro então que PIAWF e OSNR-R são esquemas de roteamento que têm desempenho bastante semelhantes em termos de probabilidade de bloqueio e ambas têm desempenho superior aos esquemas tradicionais de RWA (SP e LRW). Porém, deve-se comparar não somente o desempenho em termos de probabilidade de bloqueio, mas também comparar o tempo que cada algoritmo leva para resolver o problema de RWA. Para tal, usou-se um computador Athlon XP 1700+ com 512MB para executar esta comparação. Os tempos médios gastos resolver o RWA por chamada, executando-se 50.000 chamadas no cenário C_1 , são mostrados na tabela 4.4. A tabela 4.5 mostra os valores apresentados na tabela 4.4 normalizando os valores desta última pelo tempo gasto por PIAWF (i.e. considerando o tempo gasto por PIAWF como igual a 1 e calculando os tempos dos outros algoritmos). Pela tabela 4.5, percebe-se que utilizando a função custo PIAWF o problema de RWA é resolvido de 4 a 6 vezes mais rapidamente que se utilizando OSNR-R. Isto acontece porque em PIAWF o tempo que se consome para avaliar os ruídos da camada física é executado *offline*, antes de

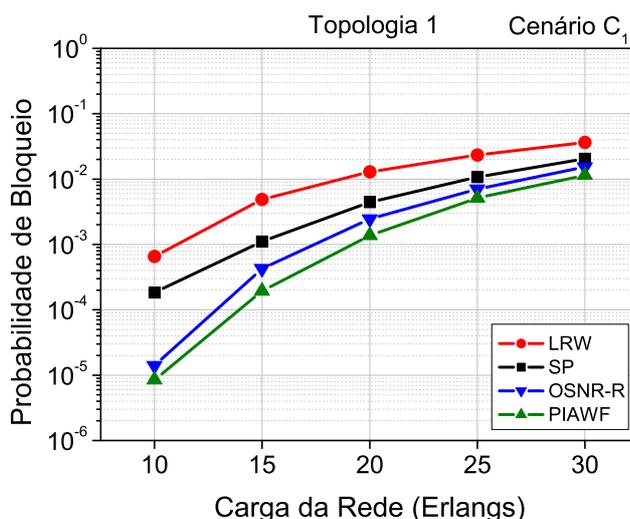


Figura 4.8: Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 1 no cenário C_1 .

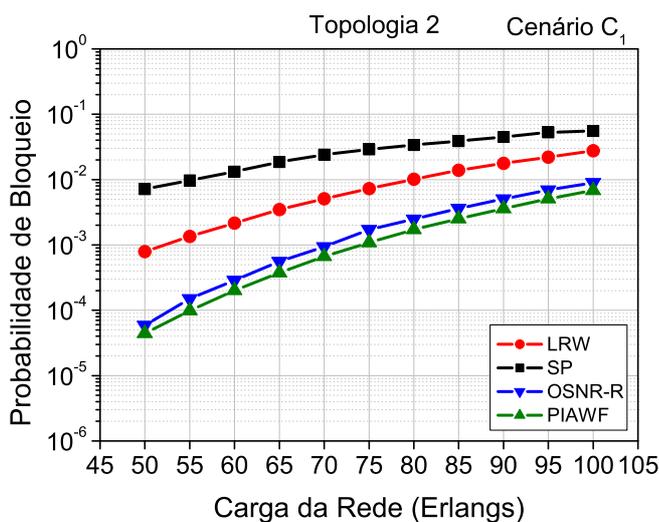


Figura 4.9: Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 2 no cenário C_1 .

PIAWF ser usada como função custo no algoritmo de roteamento, durante o processo de otimização de γ e n . Enquanto que no algoritmo de OSNR-R, a solução para o ruído óptico acumulado ao longo de um dado *lightpath* é encontrada por chamada. A tabela 4.5 também mostra que LRW consome, no melhor caso, 71% do tempo gasto por PIAWF. Esta pequena diferença é devida ao fato da fórmula usada para calcular o custo no LRW ser bem mais simples, levando a um menor tempo para o

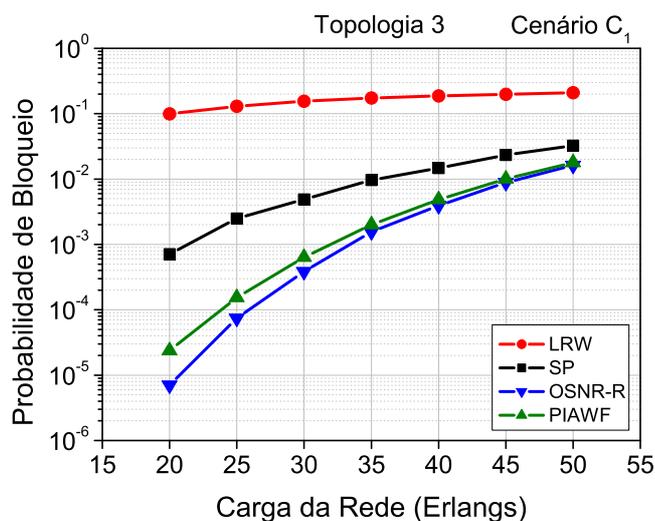


Figura 4.10: Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 3 no cenário C₁.

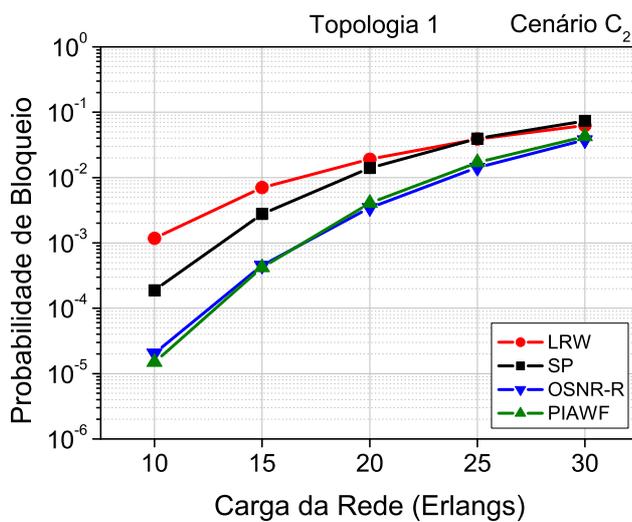


Figura 4.11: Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 1 no cenário C₂.

cálculo do mesmo. O esquema SP não foi considerado, pois ele tem uma tabela de roteamento fixa (algoritmo do tipo FR).

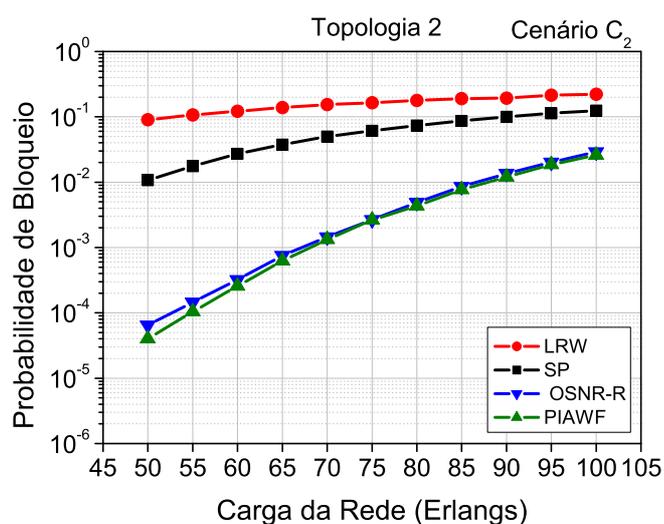


Figura 4.12: Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 2 no cenário C₂.

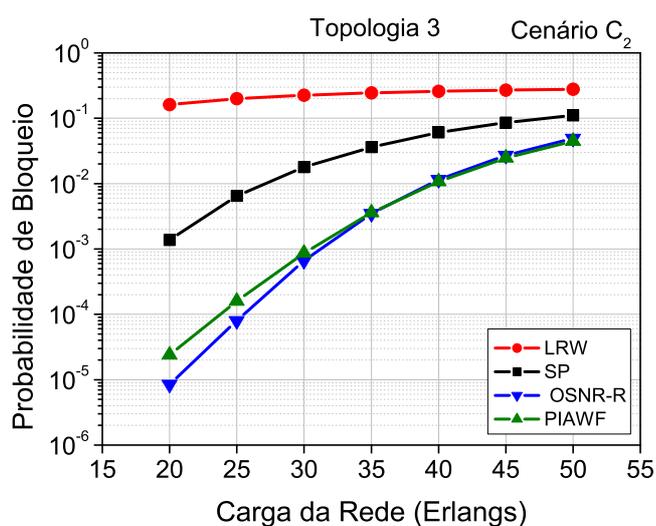


Figura 4.13: Probabilidade de bloqueio em função da carga total da rede usando diferentes funções de custo: comprimento do enlace (SP), (LRW), (OSNR-R) e (PIAWF) para a topologia 3 no cenário C₂.

Tabela 4.4: Tempo médio gasto por chamada para se resolver o RWA.

Topologia	Carga	LRW	PIAWF	OSNR-R
1	30 Erlangs	0,14 ms	0,18 ms	1,10 ms
2	100 Erlangs	0,24 ms	0,32 ms	1,50 ms
3	50 Erlangs	0,10 ms	0,14 ms	0,86 ms

Tabela 4.5: *Tempo médio gasto por chamada para se resolver o RWA normalizado pelo tempo gasto pelo PIAWF.*

Topologia	Carga	LRW	PIAWF	OSNR-R
1	30 Erlangs	0,78	1,00	6,11
2	100 Erlangs	0,75	1,00	4,69
3	50 Erlangs	0,71	1,00	6,14

CAPÍTULO 5

ROTEAMENTO POR SÉRIE DE POTÊNCIAS - PSR

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

— **Albert Einstein**

Neste capítulo é proposta uma forma sistemática de se construir a função custo para um enlace de uma rede, baseada em um conjunto de parâmetros de rede determinados por um especialista. Essa é uma ferramenta importante para projeto de algoritmos de roteamento, uma vez que a determinação dos parâmetros importantes para composição da função custo de enlace é uma tarefa relativamente fácil para um especialista em rede, porém, achar a função que melhor combina estes parâmetros é uma tarefa muito mais complexa. Esta forma sistemática foi denominada PSR (**PSR** - *Power Series Routing*). O PSR é aplicado para se construir uma função custo adaptativa a ser utilizada em redes totalmente ópticas, e está baseado na expansão da função de custo em uma série de potência. Parâmetros de rede simples como disponibilidade e comprimento do enlace são usados como variáveis de entrada para a função custo. Os coeficientes da série de potência são encontrados pela técnica de otimização chamada PSO (**PSO** - *Particle Swarm Optimization*) a qual será descrita adiante. Como será visto, a utilização de PSR nas redes totalmente ópticas combina a simplicidade e a rapidez dos algoritmos de roteamento tradicionais (nos quais não são levadas em consideração as

penalidades da camada física), com o alto desempenho (*i.e.* baixa probabilidade de bloqueio da rede) conseguido pelos esquemas IRWA. PSR tem formulação matemática semelhante às funções de custo tradicionais (*e.g.* as mostradas em [36]). Porém, diferentemente delas, PSR é treinado baseado na degradação dos sinais na camada física.

5.1 Roteamento por séries de potência

Nesta seção é apresentada uma nova maneira sistemática para construir uma função de custo para um enlace em uma rede. Ela é denominada PSR e consiste, basicamente, de três passos: Primeiro, são escolhidos os parâmetros de rede importantes que devem ser levados em consideração na função custo segundo um especialista em rede. Então, a função de custo é escrita em termos de uma série. Esta série é expandida em termos de funções que formam uma base no espaço de funções. Por fim, um algoritmo de otimização é usado para encontrar os coeficientes da série que minimizam a probabilidade de bloqueio da rede. O procedimento para a construção do PSR pode ser resumido no esquema mostrado na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Passos para a construção do PSR.

Etapa	Descrição	Implementação
Passo 1	Escolha das variáveis da função custo de enlace (parâmetros de entrada para a função de roteamento)	Especialista determina quais variáveis devem ser utilizadas
Passo 2	Expansão da função custo em uma série	Podem ser utilizadas várias séries: Séries de potência, Legendre, Fourier, Hermite, etc.
Passo 3	Determinação dos coeficientes da série	Uso de algum algoritmo de otimização: busca exaustiva, algoritmo genético, PSO, busca local, etc

É bem conhecido que funções podem ser expressas em termos de séries. Muitas destas representações usam um conjunto completo de funções ortogonais. Por exemplo, pode-se expandir uma função de uma variável $f(x)$ em uma série de funções de ortogonais como:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \varphi_n(x), \quad (5.1)$$

onde $\varphi_n(x)$ $n = 0, 1, 2, \dots$ é um determinado conjunto de funções ortogonais. De acordo com o

conjunto $\varphi_n(x)$ utilizado, a série recebe diferentes nomes, *e.g.* a série de potências para $\varphi_n(x) = 1, x, x^1, x^2, \dots$, série de Legendre para $\varphi_n(x) = L_n(x)$ (onde $L_n(x)$ os polinômios de Legendre), série de Fourier, para $\varphi_n(x)$ como seno e cossenos. Os dois primeiros fazem uso de um conjunto de polinômios ortogonais e o último usa funções trigonométricas.

Neste trabalho a análise é baseada em séries de potências, mas nada impede que outras séries sejam utilizadas. Portanto, fazendo $\varphi_n(x) = 1, x, x^1, x^2, \dots$, pode-se obter da equação (5.1):

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n. \quad (5.2)$$

Usando a propriedade de ortogonalidade de $\varphi_n(x)$, a expansão mostrada na equação (5.2) também pode ser feita para uma função de muitas variáveis:

$$f(x_0, x_1, \dots, x_k) = \sum_{n_0=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{n_k=0}^{\infty} b_{n_0, n_1, \dots, n_k} \prod_{j=0}^k x_j^{n_j}. \quad (5.3)$$

É possível encontrar os coeficientes b_{n_0, n_1, \dots, n_k} por meio de derivadas (série de Taylor para funções de muitas variáveis) [45]. Porém, utilizando esta série só se pode representar funções diferenciáveis. Apesar do fato que não existir nenhuma forma analítica fechada e simples para achar os coeficientes b_{n_0, n_1, \dots, n_k} em funções descontínuas, a equação (5.3) é também capaz de representar funções contínuas por partes [46]. No entanto, a falta de uma forma analítica para achar b_{n_0, n_1, \dots, n_k} não é um obstáculo se for possível encontrar estes coeficientes por procedimento não analítico. Deve ser ressaltado que PSR permite se incluir um número de parâmetros arbitrários como variáveis de entrada da função custo, inclusive informações diretas sobre às penalidades físicas.

5.2 Aplicação de PSR em redes ópticas

O PSR discutido na seção anterior foi usado para construir uma função de custo adaptativa para ser usada num esquema de IRWA em redes totalmente ópticas. O primeiro passo do procedimento é escolher os parâmetros de rede que serão as variáveis de entrada para a função de custo. Informações como comprimento de enlace, disponibilidade de enlace e número de *hops* têm alta correlação com a degradação do sinal acumulado ao longo de um *lightpath*. Com o aumento do comprimento do enlace, ganhos mais altos devem ser providos pelos amplificadores ópticos para compensar as perdas ao longo de fibras mais longas. Amplificadores com ganhos maiores geram mais ruído ASE. Por outro lado, a disponibilidade dos enlaces tem impacto na saturação de ganho do amplificador e na geração de ruído ASE, uma vez que o ganho do amplificador e figura de ruído do mesmo dependem da contribuição total de potência na entrada do amplificador [1; 25]. Por fim, com o aumento do número

de *hops*, mais ruído de *crossstalk* é adicionado nos nós intermediários que compõe *lightpath*. Então, estes parâmetros de rede podem ser utilizados para se construir um esquema de roteamento simples, em vez de usar a informação de degradação da camada física diretamente, ainda obtendo desempenho de rede semelhante aos fornecidos pelos esquemas IRWA [29]. Pelos argumentos acima, escolheram-se como variáveis de entrada para a função de custo dois parâmetros de rede simples: disponibilidade de enlace normalizada e comprimento de enlace normalizado. O número de hops também será levado em conta como será visto adiante.

O segundo passo é escrever a função de custo em termos de uma série como na equação (5.3), de acordo com o número de parâmetros de rede escolhidos. Uma vez que foram escolhidas duas variáveis como entrada da função custo, a mesma pode ser expandida numa forma de duas variáveis a partir da equação (5.3):

$$f(x_{i,j}, y_{i,j}) = \sum_{n_0=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} b_{n_0, n_1} x_{i,j}^{n_0} y_{i,j}^{n_1}, \quad (5.4)$$

onde $f(x_{i,j}, y_{i,j})$ é a função custo associada ao enlace que interliga os nós i e j , $x_{i,j}$ e $y_{i,j}$ são, respectivamente, a disponibilidade e comprimento de enlace normalizados entre os nós i e j . A disponibilidade $x_{i,j}$ é definida como:

$$x_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j}^a}{\lambda_{i,j}^T}, \quad (5.5)$$

onde $\lambda_{i,j}^a$ e $\lambda_{i,j}^T$ são, respectivamente, o número de canais não ativos e o número total de comprimentos de onda no enlace entre nós i e j . Por outro lado, o comprimento de enlace normalizado $y_{i,j}$ é definido como:

$$y_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{d_{max}}, \quad (5.6)$$

onde $d_{i,j}$ é comprimento de enlace entre nós i e j , e d_{max} é o máximo comprimento de enlace na rede. Uma vez que não é possível ter um número infinito de termos na expansão mostrada na equação (5.4) para a simulação, pode-se truncar a série para obter uma aproximação com N termos:

$$f(x_{i,j}, y_{i,j}) = \sum_{n_0=0}^N \sum_{n_1=0}^N b_{n_0, n_1} x_{i,j}^{n_0} y_{i,j}^{n_1}. \quad (5.7)$$

Pode-se notar da equação (5.7) que esta função apresenta um termo constante. Este termo constante é capaz de modelar o custo associado a cada *hop* no *lightpath*, uma vez que quanto mais *hops* presentes no *lightpath*, mais vezes esse termo constante será adicionado ao custo total do mesmo.

O terceiro passo consiste em usar PSO para encontrar os coeficientes da série de potências que otimizam um parâmetro de desempenho de rede. Por exemplo, pode-se maximizar a eficiência da rede (*throughput*) ou pode-se minimizar a probabilidade de bloqueio da mesma. Neste trabalho

optou-se pela segunda opção, encontrando-se os coeficientes b_{n_0, n_1, \dots, n_k} que minimizassem a probabilidade de bloqueio da rede. A aplicação aqui proposta de PSR em redes ópticas pode ser resumida na tabela 5.2

Tabela 5.2: Aplicação de PSR em redes ópticas.

Etapa	Descrição	Implementação
Passo 1	Escolha das variáveis da função custo de enlace (parâmetros de entrada para a função de roteamento)	Parâmetros escolhidos: ocupação ($x_{i,j}$) e comprimento ($y_{i,j}$) de enlace
Passo 2	Expansão da função custo em uma série	Série de potências: $f(x_{i,j}, y_{i,j}) = \sum_{n_0=0}^N \sum_{n_1=0}^N b_{n_0, n_1} x_{i,j}^{n_0} y_{i,j}^{n_1}$.
Passo 3	Determinação dos coeficientes da série	Uso do PSO

5.3 Particle Swarm Optimization

Para encontrar os coeficientes b_{n_0, n_1} foi utilizada a técnica de otimização chamada PSO [47], a qual é descrita no apêndice A. O PSO foi proposto por Kennedy e Eberhart em 1995 e sua descoberta foi feita a partir do estudo do comportamento da formação de bando de pássaros em vôo [48]. No PSO, cada partícula i é uma possível solução do problema de interesse.

Como visto no apêndice A, existem muitas variações para a implementação do PSO. A seguir, descreve-se detalhadamente o PSO utilizado para encontrar os coeficientes b_{n_0, n_1} da série. Para a topologia de comunicação entre partículas usou-se a topologia local em um modelo em anel, também conhecida como *lbest*, na qual cada partícula tem informação sobre dois de seus vizinhos no enxame [49]. As partículas que formam o enxame são numeradas de 1 até o número de partículas no mesmo. As partículas vizinhas à partícula i são as partículas cujos índices na lista numerada são $i - 1$ e $i + 1$. Ou seja, o termo vizinhança não está relacionado à proximidade física das partículas, mas à proximidade na disposição das partículas numa lista. É recomendado em [49] usar este modelo local (*lbest*), em vez utilizar o modelo global (*gbest*) usado na primeira definição do PSO, uma vez que utilizando *lbest* o enxame tem menor probabilidade de ficar preso em mínimos/máximos locais. O algoritmo em pseudo código que foi utilizado para a implementação do PSO está mostrado no apêndice A na tabela A.2.

O espaço de busca do PSO foi determinado dentro do intervalo $[-a, a]$. Cada partícula tem uma

velocidade máxima $v_{max} = a$ e uma velocidade mínima $v_{min} = -a$. Quando uma partícula é arremessada para fora do espaço de busca definido, ela é devolvida de volta para dentro do espaço com a mesma velocidade (módulo e direção), mas em sentido oposto com que saiu. O critério de parada utilizado foi o número máximo de iterações I_{PSO} que o algoritmo iria ser executado.

A cada iteração do PSO, a velocidade de cada partícula do enxame deve ser calculada e atualizada. Para fazer essa atualização usou-se a abordagem chamada *constriction factor* [50].

5.4 Características de Simulação

As características de simulação são as mesmas apresentadas na seção 4.1 para PIAWF. A rede utilizada foi a topologia 2 (figura 4.3). Para o PSR além das características mostradas na seção 4.1 são necessários também os parâmetros de simulação para o PSO. Estes estão mostrados na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Parâmetros de simulação usados para o PSO.

Parâmetros	Valor	Definição
P	50	Número de partículas
I_{PSO}	5000	Número de iterações
c_1, c_2	2.05	Parâmetro para atualização de velocidade
ϵ_1, ϵ_2	U[0,1]	Números aleatórios com distribuição uniforme
χ	0.72984	<i>Constriction factor</i>
S	[-1,+1]	Espaço de procura do PSO
V_{max}	+1	Velocidade máxima
V_{min}	-1	Velocidade mínima

5.5 Resultados

Antes de atribuir a função construída por PSR (equação (5.7)) como a função de custo de enlace para ser utilizada por um algoritmo de roteamento é necessário encontrar os valores ótimos para os coeficientes b_{n_0, n_1} . Um otimizador PSO foi utilizado para realizar tal propósito, como descrito na seção 5.3. A procura foi feita para uma carga de 100 Erlangs e a meta desta procura é minimizar a probabilidade de bloqueio da rede (BP). Cada partícula representa um conjunto de parâmetros da série de potências, ou seja, uma função de roteamento diferente. Essa função é atribuída como função de roteamento da rede e então é avaliada a aptidão desta função para a solução do problema de

RWA. Para avaliar a aptidão de uma determinada partícula, cada rede é simulada para um conjunto de 10^5 chamadas. A probabilidade de bloqueio resultante é considerada como a aptidão do indivíduo, ou seja, a probabilidade de bloqueio que resulta do uso da função de roteamento associada a essa partícula.

As simulações para determinação dos coeficientes b_{n_0, n_1} são denominadas de simulações *offline* pois elas são feitas antes da rede entrar em operação. A figura 5.1 mostra a convergência do PSO. A probabilidade de bloqueio mais baixa encontrada pelo PSO ao fim de cada iteração é mostrada. A otimização foi feita para quatro valores de N : $N = 3$, $N = 4$, $N = 5$ e $N = 7$ (número de termos utilizados na expansão em séries de potências). Probabilidade de bloqueio mais baixa foi obtida para $N = 5$ e portanto esse valor foi escolhido como valor padrão para execução do PSO. Com o aumento de N também cresce a complexidade computacional associada ao PSO, pois mais coeficientes têm de ser encontrados e mais cálculos são exigidos.

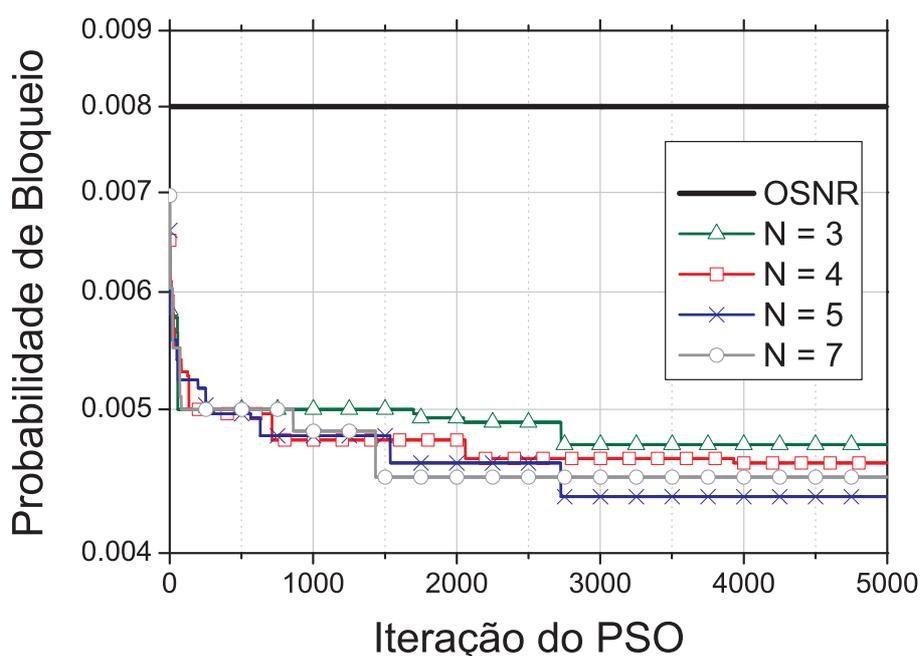


Figura 5.1: Convergência do PSO.

Como foi discutido na seção 5.1 foram escolhidas duas variáveis como parâmetros de entrada para PSR: disponibilidade ($x_{i,j}$) e comprimento normalizado ($y_{i,j}$) do enlace. Utilizando os melhores coeficientes b_{n_0, n_1} da expansão em série encontrados pelo PSO, pode-se plotar a função custo do

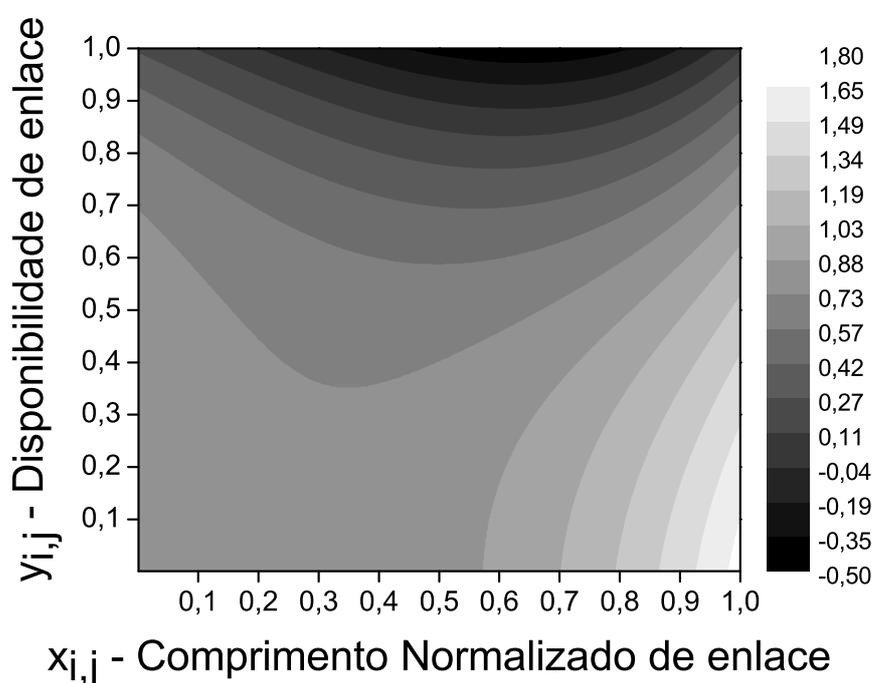


Figura 5.2: Melhor função custo encontrada pelo PSO.

enlace encontrada em termos suas variáveis de entrada $x_{i,j}$ e $y_{i,j}$ na forma de curvas de nível, como mostrado em figura 5.2. Pode-se notar que, como esperado, o custo é alto para distâncias longas e baixas disponibilidades de enlace (regiões brancas no gráfico) e o custo é baixo para distâncias curtas e disponibilidades de enlace altas (regiões pretas no gráfico). Além disso, a figura 5.2 mostra que a função de custo tem uma dependência complexa com suas variáveis. Isso demonstra a necessidade de usar uma forma sistemática para construir a função de custo, uma vez fornecidos os parâmetros de rede que devem ser levados em conta no processo de RWA.

Uma vez que foi encontrada a função de custo para os enlaces (figura 5.2) pode-se iniciar a operação da rede utilizando-a como função de custo de enlace pelo algoritmo de roteamento. Com isso, pode-se avaliar o desempenho de rede da função custo encontrada. Para propósitos de comparação, o PSR foi executado nas mesmas condições de outros três algoritmos descritos na literatura: SP, LRW e OSNR-R, os quais estão explicados na seção 3.6. Estes algoritmos foram escolhidos para comparação devido às seguintes razões: SP é simples e muito utilizado para propósitos de comparação de algoritmos de roteamento; LRW é um algoritmo capaz de encontrar rotas menos congestionadas

e, por isto, conduz a uma distribuição de carga de rede melhorada, fornecendo um resultado excelente em rede opacas; e OSNR-R é um esquema de roteamento que usa a informação das penalidades da camada física diretamente durante o procedimento RWA. A figura 5.3 mostra a probabilidade de bloqueio como uma função da carga total oferecida à rede para estes quatro algoritmos diferentes. Pode-se notar que o PSR tem desempenho muito superior aos resultados obtidos usando SP ou LRW. Além disso, quando comparado com a aproximação de IRWA (OSNR-R), PSR tem um desempenho de rede bem parecido em termos de probabilidade de bloqueio. Isso significa que PSR é capaz de alcançar o alto desempenho de rede de esquemas de IRWA, mas sem utilizar diretamente nenhuma informação das penalidades durante o processo de roteamento. A informação sobre as penalidades é adquirida *offline* durante o treinamento (busca dos coeficientes b_{n_0, n_1}).

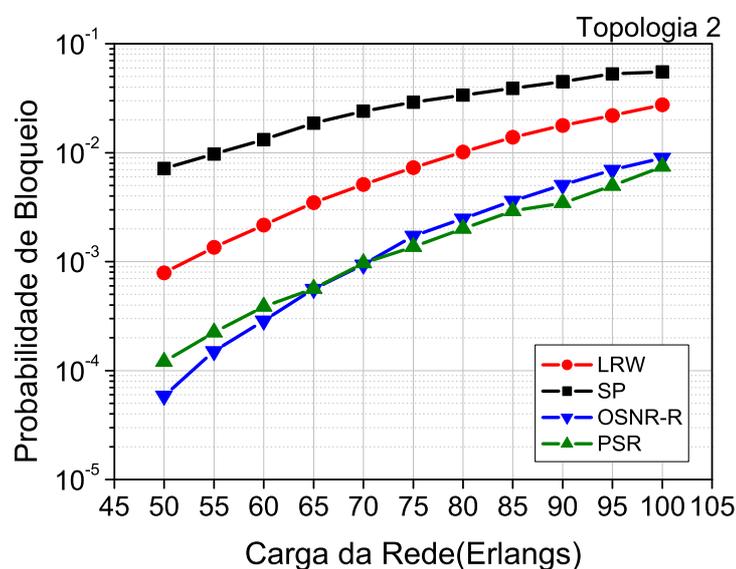


Figura 5.3: Probabilidade de bloqueio da rede em função da carga total da mesma para os algoritmos: LRW, SP, OSNR-R e PSR.

Os algoritmos PSR e OSNR-R têm desempenho bastante semelhante em termos de probabilidade de bloqueio. Entretanto, além de comparar este desempenho, também se deve comparar o tempo gasto por cada algoritmo para obter a solução do problema de RWA. Para realizar esta comparação utilizou-se um computador Intel® Core™2 @2.13 GHz com 3 GB de RAM. Os resultados do tempo médio gasto por chamada para resolver o RWA, executando-se 50000 chamadas, são mostrados na tabela 5.4. O PSR proposto resolve o problema de RWA oito vezes mais rápido que o OSNR-R. Isto porque no PSR o tempo gasto em cálculos para avaliar as penalidades físicas é utilizado durante

o processo *offline*, na otimização dos parâmetros b_{n_0, n_1} . Por outro lado, no algoritmo de OSNR-R, como também em outros algoritmos IRWA, estes cálculos acontecem durante a solução on-line do problema de RWA, sendo feito, portanto a cada requisição de conexão recebida pela rede. A tabela 5.4 também mostra que PSR é 1.33 vezes mais lento que LRW. Esta pequena diferença é devida à fórmula matemática mais simples da função de LRW, a qual envolve uma única operação de divisão. O algoritmo SP não foi considerado para análise de tempo uma vez que não é um algoritmo fixo, ou seja, as rotas já estão predeterminadas para cada par fonte destino.

Tabela 5.4: Tempo médio para a solução do RWA por chamada para a topologia 2 com carga de 100 Erlangs

Algoritmo	Tempo	Tempo Normalizado
LRW	0,12 ms	0,75
PSR	0,16 ms	1,0
OSNR-R	1,28 ms	8,0

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

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

— **Gandhi**

Nesta dissertação foi estudado um importante tópico concernente às redes totalmente ópticas: os algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA). Como foi visto, estes algoritmos têm forte impacto no desempenho de rede e por isso, o estudo e desenvolvimento de algoritmos de RWA capazes de encontrar rotas nas quais a degradação do sinal óptico é a menor possível é muito importante. Em redes ópticas limitadas por penalidades da camada óptica fala-se de algoritmo de IRWA, os quais têm desempenho de rede muito superior aos tradicionais, aqueles que não levam em conta estas penalidades. Entretanto, os algoritmos de IRWA têm alto custo computacional, pois têm que resolver as complexas equações que modelam a camada óptica durante o processo de definição da rota.

A primeira etapa deste trabalho foi o desenvolvimento de um software capaz de simular as redes totalmente ópticas. O *software*, que foi desenvolvido em colaboração com outros membros do grupo de pesquisa, foi feito baseado na modelagem da camada óptica desenvolvida em nosso grupo de pesquisa. Um intenso trabalho de programação e depuração do *software* foi feito, com a colaboração de diversas pessoas, até que o *software* chegasse a sua versão final funcional e com suporte para o desenvolvimento dos algoritmos de RWA.

Foram propostas duas novas formas para solucionar o problema de RWA em redes totalmente ópticas limitadas pelas penalidades da camada ópticas, de forma a se obter, ao mesmo tempo, o ótimo desempenho de rede dos algoritmos de IRWA e a simplicidade dos algoritmos tradicionais de RWA não conscientes da camada física. Foi mostrado que com o uso de parâmetros de rede simples como comprimento e ocupação dos enlaces e com um treinamento prévio de alguns coeficientes, é possível construir um esquema de roteamento capaz de atender a essa necessidade.

O primeiro esquema de roteamento proposto, PIAWF (*Physical Impairment Aware Weight Function*), foi aplicado a três topologias de redes diferentes, e cada uma delas sob dois cenários diferentes. No primeiro, as requisições de chamadas eram bloqueadas apenas por falta de qualidade de serviço (número de comprimentos de onda disponíveis muito grande) e no segundo por falta de qualidade de serviço e por falta de comprimentos de onda. Em todos os cenários, o PIAWF mostrou desempenho comparável ao algoritmo de IRWA de controle (OSNR-R) só ficando um pouco pior que este último na topologia 1 em cargas muito baixas. Quando comparado com algoritmos de RWA tradicionais (LRW e SP), PIAWF demonstrou desempenho muito superior. Além de conseguir um ótimo desempenho de rede, PIAWF foi capaz de resolver o problema de RWA até 8 vezes mais rápido que o algoritmo IRWA de comparação (OSNR-R). Resumindo, com PIAWF conseguiu-se simplificar os parâmetros de entrada para o algoritmo de roteamento ao mesmo tempo que se conseguiu um ótimo desempenho de rede e uma rápida solução do problema de RWA.

O segundo esquema é a aplicação em redes totalmente ópticas do processo sistemático, proposto neste trabalho, para a construção de funções adaptativas de custo de enlace. Este processo sistemático consiste na determinação dos parâmetros de rede relevantes para a função custo, por um especialista em redes; o uso destes parâmetros como variáveis de entrada para a função de custo, seguido da expansão da mesma em uma série de potência; e a determinação dos coeficientes da série pelo algoritmo de otimização PSO. Este procedimento, denominado PSR (*Power Series Routing*) foi aplicado como esquema de roteamento na topologia 2 e comparado com outros algoritmos de RWA. Verificou-se que, com o uso de PSR, é conseguido um desempenho de rede similar ao conseguido pelo esquema de IRWA usado para comparação (OSNR-R). Quando comparado com algoritmos de RWA tradicionais (LRW e SP), PSR mostrou desempenho muito superior. Além de conseguir um ótimo desempenho de rede, PSR foi capaz de resolver o problema de RWA cerca de 6 vezes mais rápido que o algoritmo IRWA de comparação (OSNR-R). Em resumo, a aplicação de PSR no ambiente de redes totalmente óptica atendeu as expectativas, uma vez que, conseguiu-se simplificar os parâmetros de entrada para o algoritmo de roteamento ao mesmo tempo em que se conseguiu um

ótimo desempenho de rede e uma rápida solução do problema de RWA.

Como foi visto, ambas as propostas de funções custo de enlace mostradas nessa dissertação obtiveram desempenho de rede, em termos de probabilidade de bloqueio, muito superior aos desempenhos obtidos por funções custo tradicionais como SP e LRW. Quando comparado com a função custo OSNR-R, a qual é uma métrica que leva em consideração as degradações sofridas pelo sinal na camada óptica, as propostas apresentadas obtiveram, na maioria dos casos desempenho, superior ao OSNR-R. Isso é possível pois a métrica OSNR-R se preocupa apenas em encontrar a rota que dispõe da maior relação sinal ruído de saída. Olhar apenas para este aspecto pode ser prejudicial ao algoritmo, pois sempre poderia haver uma rota, não com a melhor OSNR de saída, mas ainda com esta num nível aceitável (que atendesse aos critérios de qualidade de serviço) e fornecesse um desempenho de rede melhor que a melhor rota segundo o critério de OSNR-R (rota com $OSNR_{out}$ máxima). As propostas apresentadas têm mérito de otimizar o desempenho de rede olhando não só para o aspecto da OSNR do sinal, mas dando atenção, de forma equilibrada, aos vários aspectos importantes para o desempenho total de rede como ocupação dos enlaces, distribuição de carga na rede, OSNR do sinal entre outros. Apesar de OSNR-R também levar em conta, de forma indireta estes aspectos, uma vez que todos eles contribuem para o aumento ou diminuição da OSNR em um *lightpath*, a mudança de foco do objetivo principal da métrica de minimizar a OSNR (estratégia utilizada por OSNR-R) para a maximização de desempenho de rede (estratégia utilizada pelos algoritmos propostos) trás benefícios às abordagens propostas nessa dissertação.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Alguns temas podem ser estudados como continuação deste trabalho, e estão dispostos a seguir como sugestões:

Outras penalidades Estudo de aplicações do PSR em outras redes e considerando outros efeitos de penalidades da camada óptica como PMD, FWM, XPM, SPM.

Outras Topologias e cenários Aplicação do PSR em outras topologias de rede e outros cenários de simulação.

Investigação de parâmetros Investigação de outros parâmetros de entrada para a função custo, além dos usados, os quais poderiam ser utilizados junto com PSR.

APÊNDICE A

PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Neste apêndice será introduzido o conceito e os fundamentos do PSO (**PSO** - *Particle Swarm Optimization*). O PSO é uma técnica de computação inteligente proposta por Kennedy e Eberhart em 1995 e sua descoberta foi feita a partir do estudo do comportamento da formação dos pássaros em um bando em vôo [48]. O PSO original foi inspirado no comportamento social de organismos biológicos, especificamente na habilidade de grupos de algumas espécies de animais para trabalhar em conjunto para localizar posições desejáveis em uma dada área (*e.g.* um bando de pássaros procurando por comida) [49]. Esse mecanismo de busca foi associado à otimização de soluções de equações não lineares num espaço de busca real (variáveis reais). O PSO se mostra muito eficiente para resolução de problemas de otimização de alta dimensionalidade e complexidade num espaço de busca real. A principal utilização do PSO se dá em problemas nos quais é fácil (ou viável) se saber o grau de adequação de uma solução arbitrária para este problema, mas se determinar a melhor solução é uma tarefa complexa. Por exemplo, é relativamente fácil saber o grau de adequação da solução $x = a$ na equação transcendental:

$$\cos x = 5 \exp x, \tag{A.1}$$

basta definir uma função $h(x)$ de forma que:

$$h(x) = \cos x - 5 \exp x, \tag{A.2}$$

e calcular o valor de $h(a)$. Se $h(a) = 0$ então a é solução da equação (A.1). Porém quanto mais próximo de zero é $h(a)$, melhor é a aproximação para a solução da equação (A.1). No PSO, o grau

de adequação de uma solução e chamado de força, aptidão ou *fitness*.

Apesar de ser uma técnica relativamente nova, o uso do PSO vem rapidamente crescendo, e hoje ele é usado para resolver os mais diversos problemas em vários campos do conhecimento devido à sua simplicidade e alto desempenho. [51].

O PSO é composto por um conjunto de partículas (ou agentes) o qual é denominado enxame. A posição de cada agente representa uma possível solução do problema. Uma partícula individual i é composta de três vetores: sua posição no espaço de busca D -dimensional $\vec{x}_i = (x_{i,1}, x_{i,2} \dots x_{i,D})$, a melhor posição encontrada por esta partícula $\vec{p}_i = (p_{i,1}, p_{i,2} \dots p_{i,D})$ e sua velocidade $\vec{v}_i = (v_{i,1}, v_{i,2} \dots v_{i,D})$. No início do algoritmo, as partículas são criadas de forma aleatória, uniformemente distribuídas, ao longo do espaço de busca. Isso significa que tanto a velocidade \vec{v}_i como a posição inicial \vec{x}_i de cada partícula são aleatórios no início do algoritmo. Uma vez criadas, estas partículas movem-se ao longo do espaço de busca regidas por equações muito simples de atualização de posição e velocidade, as quais serão vistas mais adiante.

Na maioria das implementações do PSO, as partículas se movem no do espaço de busca usando uma combinação de atração para a melhor solução encontrada pela própria partícula e atração para a melhor solução encontrada por uma partícula situada na vizinhança. Ou seja, cada partícula aprende com sua própria experiência (a melhor solução encontrada por ela) e com a experiência do grupo (a melhor solução encontrada na vizinhança). No PSO, a vizinhança de uma dada partícula i é definida por todas as partículas do enxame com as quais i pode se comunicar. No primeiro modelo de PSO a vizinhança para uma dada partícula i foi baseada na distância euclidiana. Esta era calculada para determinar quais partículas estavam próximas o suficiente da partícula i para esta se comunicar com ela. Isso foi feito imitando-se o comportamento de bando de pássaros, similar aos modelos biológicos nos quais pássaros individuais só podem se comunicar com indivíduos do bando próximos a ele. Quando o foco da pesquisa mudou de estudo de sistemas biológicos para otimizações matemáticas, a vizinhança euclidiana foi abandonada em favor de modelagens que exigissem menor esforço computacional. Vizinhanças topológicas não relacionadas à posição em si das partículas no espaço de busca começaram a ser usadas. Hoje existem várias possibilidades de vizinhança, as mais comuns são: a vizinhança global (conhecida também como *gbest*), na qual cada partícula pode se comunicar com todas as outras partículas do enxame; e a vizinhança local (conhecida também como *lbest*) na qual as partículas que formam o enxame são numeradas de 1 até o número de partículas no enxame, e as partículas vizinhas à partícula i são as partículas cujos índices na lista são $i - 1$ e $i + 1$. A figura A.1 mostra graficamente a topologia de comunicação *gbest* (figura A.1(a)) e *lbest* (figura A.1(b)).

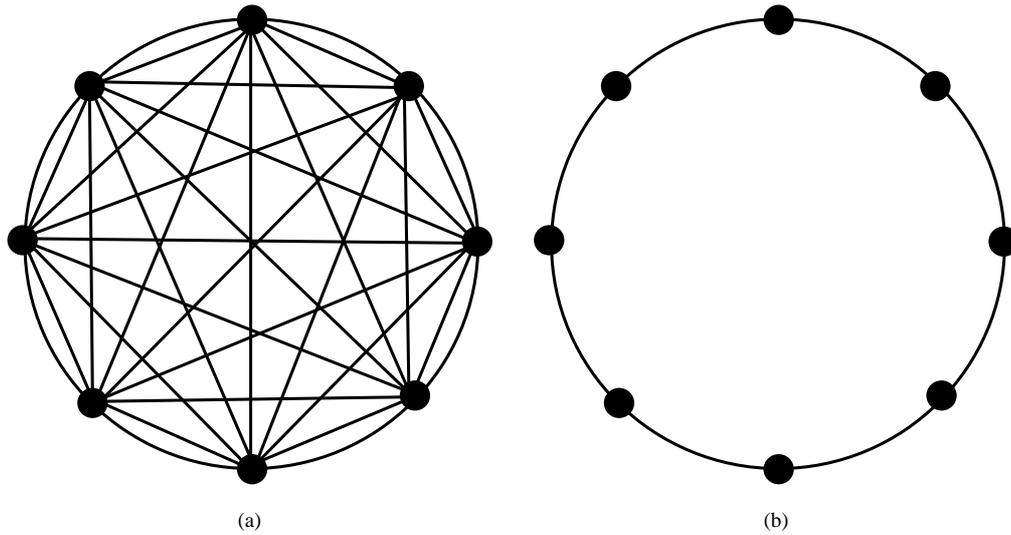


Figura A.1: Topologias de comunicação das partículas no PSO (a) Topologia gBest (b) Topologia lBest.

O PSO é um algoritmo iterativo. A cada iteração do PSO a posição e a velocidade de todas as partículas do enxame são atualizadas. Originalmente essa atualização de posição e velocidade era feita para cada partícula em todas as dimensões, seguindo as equações:

$$v_{i,d} = v_{i,d} + c\epsilon_1(p_{i,d} - x_{i,d}) + c\epsilon_2(p_{g,d} - x_{i,d}), \quad (\text{A.3})$$

e

$$x_{i,d} = x_{i,d} + v_{i,d}, \quad (\text{A.4})$$

onde, nas equações originais c era uma constante com o valor igual a 2,0, ϵ_1 e ϵ_2 são números aleatórios independentemente gerados (com distribuição uniforme entre zero e um) para cada dimensão D e a cada iteração do PSO, e \vec{p}_g é a melhor posição já encontrada por algum vizinho da partícula. Estas operações podem ser resumidas no algoritmo mostrado na tabela A.1.

Introduzindo um fator de inércia w na equação A.3 tem-se outra possibilidade para a atualização das velocidades das partículas, conhecida por *inertial factor*. A nova equação de atualização de velocidades, neste caso é:

$$v_{i,d} = wv_{i,d} + c\epsilon_1(p_{i,d} - x_{i,d}) + c\epsilon_2(p_{g,d} - x_{i,d}). \quad (\text{A.5})$$

Utilizando a equação A.5 em lugar da equação A.3 no algoritmo mostrado na tabela A.1 pode-se obter um melhor balanço entre a busca global (busca em amplitude) e a busca local (busca em profundidade), um problema nas primeiras propostas de PSO [49].

Tabela A.1: Algoritmo PSO.

Algoritmo de PSO
Gera partículas aleatórias Para cada iteração t faça Para cada partícula i do enxame faça calcule $\vec{v}_i(t)$ usando a equação A.3 calcule $\vec{x}_i(t)$ usando a equação A.4 calcula a força da partícula i $f(\vec{x}_i(t))$ recalcula \vec{p}_i e \vec{p}_g Fim Para Fim Para

Outro método que realiza bem esse balanço é conhecido por *constriction factor* [50]. Nessa abordagem a velocidade da partícula é calculada pela seguinte equação:

$$v_{i,d} = \chi(v_{i,d} + c_1\epsilon_1(p_{i,d} - x_{i,d}) + c_2\epsilon_2(p_{g,d} - x_{i,d})), \quad (\text{A.6})$$

onde χ é o *constriction factor* e é calculado por:

$$\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = c_1 + c_2. \quad (\text{A.7})$$

Clerc e colaboradores encontram que se $\varphi > 4$, a convergência do PSO é garantida [50]. Por esse motivo escolheu-se neste trabalho esta abordagem para implementação do PSO. Como se deve utilizar $\varphi > 4$ para haver convergência, usualmente se utiliza $c_1 = c_2 = 2,05$ de forma que $c_1 + c_2 > 4$.

Denotando por $v_{i,d}$ a d -ésima componente do vetor \vec{v}_i e usando a mesma notação para os outros vetores, pode-se estabelecer o algoritmo em pseudocódigo que foi utilizado nessa dissertação para a implementação do PSO. Este é mostrado na tabela A.2. $g()$ é a função que calcula a força ou aptidão de uma determinada partícula do enxame, $\min_i(\vec{p}_{vizinho})$ retorna a posição $\vec{p}_{vizinho}$ da partícula vizinha mais apta (aquela que tem o maior $g()$), dentre as duas possíveis.

Tabela A.2: Algoritmo PSO.

Algoritmo PSO
<p>Inicialize com uma população aleatória</p> <p>Faça</p> <p> Para $i = 1$ até Tamanho da população</p> <p> Se $g(\vec{x}_i) < g(\vec{p}_i)$ Então $\vec{p}_i = \vec{x}_i$</p> <p> $\vec{p}_g = \min_i(\vec{p}_{vizinho})$</p> <p> Para $d = 1$ até Dimensão</p> <p> $v_{i,d} = \chi(v_{i,d} + c_1\epsilon_1(p_{i,d} - x_{i,d}) + c_2\epsilon_2(p_{g,d} - x_{i,d}))$</p> <p> $x_{i,d} = (v_{i,d} + x_{i,d})$</p> <p> Próximo d</p> <p> Próximo i</p> <p>Até Critério de parada</p>

APÊNDICE B

LISTA DE PUBLICAÇÕES

B.1 Artigos publicados

1. D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel Physical Impairments Aware Adaptative Weight Function for Routing in All Optical Networks. In: **Proceedings do International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC**, 2007, Salvador. SBMO/IEEE MTT-S. v. 1. p. 1-5.
2. H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Impact of Physical Layer Impairments in All-Optical Networks. In: **Proceedings do International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC**, 2007, Salvador. SBMO/IEEE MTT-S. v. 1. p. 1-6.
3. 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**, 2007, Recife. v. 1. p. 1-6.
4. H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Noise Penalties Modeling for the Performance Evaluation of All-Optical Networks. In: **Proceedings do 9º International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**, 2007, Roma - Itália. v. 4. p. 55-58.

5. C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, H. A. PEREIRA, J. F. MARTINS-FILHO, Genetic Algorithm for Amplifiers Gain Optimization in All-Optical Networks. In: **Proceedings do International Telecommunications Symposium – ITS**, 2006, Fortaleza. v. 1. p. 517-522.
6. H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Optimization of Wavelength Assignment in an Optical Link Considering Four Wave Mixing Using Genetic Algorithm. In: **Proceedings do International Telecommunications Symposium – ITS**, 2006, Fortaleza. v. 1. p. 501-506.
7. H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Otimização da Alocação de Comprimentos de Onda Considerando o Efeito de Mistura de Quatro Ondas. In: **Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT**, 2005, Campinas. p. 1-6.

B.2 Artigo Aceito

1. D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel Adaptive Routing Algorithm for All-Optical Networks Based on Power Series and Particle Swarm Optimization. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*.

B.3 Artigos submetidos

1. D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel Physical Impairments Aware Adaptive Weight Function for Routing in All Optical Networks *IEEE/ACM Transactions on Networking*.
2. H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Wavelength Assignment Considering Four Wave Mixing Using Genetic Algorithm. *Journal of Communication and Information Systems*.
3. H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, A Novel Model to Consider Physical Layer Impairments in All-Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology*.

REFERÊNCIAS

- [1] R. RAMASWAMI, K. N. SIVARAJAN, **Optical Networks: A Practical Perspective**, 2^a ed. Morgan Kaufmann, 2002.
- [2] E. DESURVIRE, Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades, *Journal of Lightwave Technology*, v. 24, n. 12, p. 4697–4710, Dezembro 2006.
- [3] A. S. TANENBAUM, **Redes de Computadores**, 4^a ed. Ed. Campus, 2003.
- [4] M. J. O’MAHONY, C. POLITI, D. KLONIDIS, R. NEJABATI, D. SIMEONIDOU, Future optical networks, *Journal of Lightwave Technology*, v. 24, n. 12, p. 4684–4696, Dezembro 2006.
- [5] J. R. A. AMAZONAS, **Projeto de sistemas de comunicações ópticas**, 1^a ed. Editora Manole, 2002.
- [6] K. THYAGARAJAN, A. K. GHATAK, **An Introduction to Fiber Optics**, 1^a ed. Cambridge - EUA, 1998.
- [7] P. GRENN, Progress in optical networking, *IEEE Communications Magazine*, v. 39, n. 1, p. 54–61, Janeiro 2001.
- [8] Z. ZHANG, J. FU, D. GUO, L. ZHANG, Lightpath routing for intelligent optical networks, *IEEE Network*, v. 15, n. 4, p. 28–35, Julho 2001.
- [9] **Impairments and other constraints on optical layer routing - RFC4054**. Disponível em: <http://www.ietf.org/rfc.html>. Último acesso em: 14/01/2008: IETF, 2005.
- [10] 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.
- [11] S. RAI, B. MUKHERJEE, C. SU, T. HAMADA, Provisioning in ultra-long-haul optical networks, In: **Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. OFC/NFOEC 2007.**, Março 2007, p. 1–3.

- [12] B. RAMAMURTHY, D. DATTA, H. FENG, J. P. HERITAGE, B. MUKHERJEE, Impact of Transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks, *Journal of Lightwave Technology*, v. 17, n. 10, p. 1713–1723, Outubro 1999.
- [13] 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.
- [14] B. MUKHERJEE, WDM optical communication networks: Progress and challenges, *Journal of Selected Areas in Communications*, v. 18, n. 10, p. 1810–1824, Outubro 2000.
- [15] I. TOMKOS, D. VOGIATZIS, C. MAS, I. ZACHAROPOULOS, A. TZANAKAKI, E. VARVARIGOS, Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing, *Communications Magazine*, v. 42, n. 8, p. 40–47, Agosto 2004.
- [16] C. PINART, E. LE ROUZIC, I. MARTINEZ, Physical-layer considerations for the realistic deployment of impairment-aware connection provisioning, In: **9th International Conference on Transparent Optical Networks, 2007. ICTON '07**, v. 3, Julho 2007, p. 134–137.
- [17] 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.
- [18] T. S. RAPPAPORT, **Wireless Comunnications**, 1^a ed. Prentice Hall, 1996.
- [19] C. J. L. PIMENTEL, **Comunicação Digital**. Brasport, 2007.
- [20] G. P. AGRAWAL, **Fiber-optic communication systems**, 3^a ed. Wiley-Interscience, 2002.
- [21] J. SINGH, **Semiconductor Optoelectronics - Physics and Technology**, 1^a ed. McGraw-Hill, 1995.
- [22] I. KAMINOW, T. LI, **Optical Fiber Telecommunication IV-B**, 1^a ed. Elsevier, Março 2002.
- [23] P. C. BECKER, N. A. OLSSON, J. R. SIMPSON, **Erbium doped fiber amplifiers**, 1^a ed. Academic Press, 1999.
- [24] 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.

- [25] H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Impact of physical layer impairments in all-optical networks, In: **Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2007**, v. 1, 2007, p. 536–541.
- [26] R. CARDILLO, V. CURRI, M. MELLIA, Considering transmission impairments in wavelength routed networks, In: **Proceeding of Optical Network Design and Modeling – ONDM**, v. 1, Fevereiro 2005, p. 421–429.
- [27] H. A. PEREIRA, D. A. R. CHAVES, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Noise penalties modeling for the performance evaluation of all-optical networks, In: **Proceedings of 9^o International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**, v. 4. IEEE/LEOS, Julho 2007, p. 55–58.
- [28] 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.
- [29] D. A. R. CHAVES, D. O. AGUIAR, H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Novel physical impairments aware adaptative weight function for routing in all optical networks, In: **Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2007**, v. 1, 2007, p. 194–198.
- [30] 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.
- [31] G. P. AGRAWAL, **Nonlinear fiber optics**, 2^a ed. Academic Press, 1989.
- [32] 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: **Anais do International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC**, v. 2. IEEE-MTS/SBMO, Setembro 2003, p. 919–923.
- [33] J. F. MARTINS-FILHO, C. J. A. BASTOS-FILHO, S. C. OLIVEIRA, E. A. J. ARANTES, E. FONTANA, F. D. NUNES, Novel routing algorithm for optical networks based on noise figure and physical impairments, In: **Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communication – ECOC**, v. 3. Optical Society of America, 2003, p. 856–857.

- [34] C. S. R. MURTHY, M. GURUSAMY, **WDM optical Networks - Concepts, Design, and Algorithms**, 1^a ed. Prentice Hall, 2002.
- [35] B. WEN, R. SHENAI, K. SIVALINGAM, Routing, wavelength and time-slot-assignment Algorithms for wavelength-routed optical wdm/tdm networks, *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 9, p. 2598–2609, Setembro 2005.
- [36] N. M. BHIDE, K. M. SIVALINGAM, T. FABRY-ASZTALOS, Routing mechanisms employing adaptive weight functions for shortest path routing in multi-wavelength optical wdm networks, *Journal of Photonic Network Communications*, v. 3, p. 227–236, Julho 2001.
- [37] X. CHU, B. LI, K. SOHRABY, Z. ZHANG, Routing and wavelength assignment issues in the presence of wavelength conversion for all-optical networks, In: **Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM '02. IEEE**, v. 3, Novembro 2002, p. 2787–2791.
- [38] X. YANG, B. RAMAMURTHY, Sparse regeneration in translucent wavelength-routed optical networks: Architecture, network design and wavelength routing, *Journal Photonic Network Communications*, v. 10, n. 1, p. 39–53, Julho 2005.
- [39] M. SAAD, L. ZHI-QUAN, On the routing and wavelength assignment in multifiber WDM networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 22, n. 9, p. 1708 – 1717, Novembro 2004.
- [40] Y. HUANG, J. P. HERITAGE, B. MUKHERJEE, Connection provisioning with transmission impairment consideration in optical wdm networks with high-speed channels, *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 3, p. 982–993, Março 2005.
- [41] Y. POINTURIER, M. BRANDT-PEARCE, Routing and wavelength assignment incorporating the effects of crosstalk enhancement by fiber nonlinearity, In: **Proceedings of the 39th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)**, Baltimore, MD, USA, Março 2005, p. 212–216.
- [42] V. ANAGNOSTOPOULOS, C. T. POLITI, C. MATRAKIDIS, A. STAVDAS, Physical layer impairment aware wavelength routing algorithms based on analytically calculated constraints, *Optics Communications*, v. 270, p. 247–254, Fevereiro 2007.
- [43] P. KULKARNI, A. TZANAKAKI, C. M. MACHUKA, I. TOMKOS, Benefits of q-factor based routing in wdm metro networks, In: **Proceedings of 31st European Conference on Optical Communication, 2005 - ECOC 2005**, v. 4, Setembro 2005, p. 981–982.

- [44] E. A. J. ARANTES, Contribuições ao algoritmo de roteamento para redes ópticas baseado na figura de ruído e nas penalidades físicas, Dissertação, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Março 2006.
- [45] S. LANG, **Second Course in Calculus**, 2^a ed. Adison-Wesley Publishing, 1970.
- [46] G. B. ARFKEN, H. J. WEBER, **Mathematical Methods For Physicists**, 6^a ed. Elsevier Academic Press, 2005.
- [47] A. P. ENGELBRECHT, **Fundamentals of computational swarm intelligence**. England: John Wiley and sons, 2005.
- [48] J. KENNEDY, R. EBERHART, Particle swarm optimization, In: **proceedings of the 1995 IEEE Internacional Conference on Neural Networks**, v. IV, 1995, p. 1942–1948.
- [49] D. BRATTON, J. KENNEDY, Defining a standard for particule swarm optimization, In: **Proceedings IEEE Swarm Intelligence Symposium - SIS 2007**, v. 1, 2007, p. 120–127.
- [50] M. CLERC, J. KENNEDY, The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 1, p. 58–73, Fevereiro 2002.
- [51] X. HU, Y. SHI, R. EBERHART, Recent advances in particle swarm, In: **Congress on Evolutionary Computation, 2004 - CEC 2004**, v. 1, 2004, p. 90–97.