

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

HELDER ALVES PEREIRA

ANÁLISE SISTÊMICA DAS PENALIDADES
DE RUÍDO NAS REDES ÓPTICAS
TRANSPARENTES

VIRTUS IMPAVIDA

RECIFE, NOVEMBRO DE 2007.

HELDER ALVES PEREIRA

**ANÁLISE SISTÊMICA DAS PENALIDADES
DE RUÍDO NAS REDES ÓPTICAS
TRANSPARENTES**

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

ORIENTADOR: JOAQUIM FERREIRA MARTINS-FILHO, PhD

Recife, Novembro de 2007.

©Helder Alves Pereira, 2007

P436a

Pereira, Helder Alves.

Análise sistêmica das penalidades de ruído nas redes ópticas transparentes / Helder Alves Pereira. - Recife: O Autor, 2007.
106 folhas, il : figs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2007.

Inclui bibliografia e Apêndice.

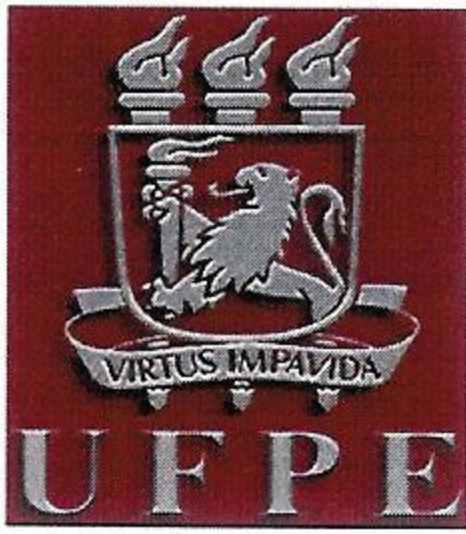
1. Engenharia Elétrica. 2. Redes Ópticas 3. Algoritmos
4. Comunicação óptica. Título.

UFPE

621.3

CDD (22. ed.)

BCTG/2007-163



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE DE
DOUTORADO

HELDER ALVES PEREIRA

TÍTULO

“ANÁLISE SISTÊMICA DAS PENALIDADES DE RUÍDO NAS REDES
ÓPTICAS TRANSPARENTES”

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE, EDUARDO FONTANA, DES/UFPE, CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO, DCC/UPE, ALUÍZIO FAUSTO RIBEIRO DE ARAÚJO, CIN/UFPE e AMÍLCAR CARELI CÉSAR, DEE/USP sob a presidência do prof. Eduardo Fontana, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, consideram o candidato **APROVADO**.

Recife, 12 de novembro de 2007.

EDUARDO FONTANA

Coordenador e Membro Titular Interno

JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO

Orientador e Membro Titular Interno

ALUÍZIO FAUSTO RIBEIRO ARAÚJO

Membro Titular Externo

CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO

Membro Titular Externo

AMÍLCAR CARELI CÉSAR

Membro Titular Externo

*Dedico este trabalho aos meus pais
e à Dinalva Lacerda Cabral.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Joaquim Ferreira Martins Filho e ao Prof. Frederico Dias Nunes pelo apoio e oportunidades oferecidas.

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

Aos amigos: alunos de iniciação científica, mestrado, doutorado, engenheiros e trabalhadores da pós-graduação.

Aos grandes amigos: André Leite pela ajuda incondicional na utilização do \LaTeX Daniel Augusto Ribeiro Chaves pelo suporte no desenvolvimento do programa computacional necessário para obtenção dos resultados deste trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer ao CAESER, CNPq e ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica.

HELDER ALVES PEREIRA

Universidade Federal de Pernambuco

12 de Novembro de 2007

Quem passou pela vida em branca nuvem,
E em plácido repouso adormeceu;
Quem não sentiu o frio da desgraça,
Quem passou pela vida e não sofreu,
Foi espectro de homem, não foi homem,
Só passou pela vida, não viveu.

— Francisco Otaviano

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

ANÁLISE SISTÊMICA DAS PENALIDADES DE RUÍDO NAS REDES ÓPTICAS TRANSPARENTES

Helder Alves Pereira

Novembro/2007

Orientador: Joaquim Ferreira Martins-Filho, PhD

Área de Concentração: Fotônica

Palavras-chaves: Comunicações ópticas, Algoritmos, Redes ópticas, Relação sinal-ruído óptica.

Número de páginas: 114

Nesta tese são estudados os processos de atribuição de comprimento de onda e o de roteamento nas redes ópticas transparentes. Além de considerar os recursos da camada de rede (disponibilidade de comprimentos de onda), avalia-se também o impacto da camada física na transmissão dos sinais para ambos os casos. Quanto à atribuição de comprimento de onda, o estudo visa a minimização do efeito da mistura de quatro ondas entre os sinais propagantes. Os algoritmos exaustivo e genético são utilizados no estudo para comparação em termos de desempenho computacional. O primeiro examina todas as possibilidades de alocações de comprimentos de onda, enquanto que o segundo utiliza o processo evolucionário para encontrar as possíveis soluções. Quanto ao roteamento, desenvolve-se um modelo analítico que quantifica a degradação da relação sinal-ruído óptica ao longo da propagação do sinal. Os efeitos físicos considerados são: o efeito da saturação do ganho e a emissão espontânea amplificada produzida nos amplificadores ópticos, a interferência homodina nos comutadores ópticos e a mistura de quatro ondas na fibra óptica. O efeito da dispersão por modo de polarização também é considerado como penalidade temporal. O modelo analítico proposto é aplicado para avaliação do desempenho das redes ópticas transparentes em termos da probabilidade de bloqueio das chamadas, e em um algoritmo de roteamento.

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

**SYSTEMIC ANALYSIS OF NOISE PENALTIES IN
ALL-OPTICAL NETWORKS**

Helder Alves Pereira

November/2007

Supervisor: Joaquim Ferreira Martins-Filho, PhD

Area of Concentration: Photonics

Keywords: Optical communications, Algorithms, Optical networks, Optical signal-to-noise ratio.

Number of pages: 114

In this thesis, the routing and wavelength assignment processes are addressed. Besides of considering the network layer resources (number of available wavelengths in a link), the impact of physical layer effects in the transmitted optical signals is analyzed for both processes. The optimization of the wavelength assignment process is obtained by minimizing the FWM effect among propagation optical signals. Exhaustive and genetic algorithms are used in the optimization process and for comparison in terms of computational performance. The first tests all possible wavelength dispositions, while the second uses the evolutionary process to find the solutions. Also an analytical model is developed for routing algorithms in transparent optical networks. This formulation quantifies the degradation of the optical signal-to-noise ratio along signal propagation. The physical effects considered are: the saturation effect and the amplified spontaneous emission produced in optical amplifiers, the coherent crosstalk in optical switches and the four wave mixing in optical fiber. The polarization mode dispersion is also considered as a pulse broadening penalty. The developed analytical model is applied for all-optical network performance analysis in terms of blocking probability of requested calls, and in a routing algorithm.

LISTA DE SIGLAS

| Sigla | Descrição | Significado |
|--------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| ASE | Amplified Spontaneous Emission. | Emissão espontânea amplificada. |
| BER | Bit Error Rate. | Taxa de erro por bit. |
| CF | – | Cálculo de força. |
| DLE | Dynamic Lightpath Establishment. | Estabelecimento dinâmico das rotas. |
| DES | – | Departamento de Eletrônica e Sistemas. |
| DSF | Dispersion Shifted Fiber. | Fibras com dispersão deslocada. |
| EDFA | Erbium Doped Fiber Amplifier. | Amplificador a fibra dopada com érbio. |
| FWM | Four Wave Mixing. | Mistura de quatro ondas. |
| GA | Genetic Algorithm. | Algoritmo genético. |
| GVD | Group Velocity Dispersion. | Dispersão da velocidade de grupo. |
| HAW | Hop count and Available Wavelengths. | Número de enlaces e comprimentos de onda disponíveis. |
| HTAW | Hop count and Total wavelengths and Available Wavelengths. | Número de enlaces, total de comprimentos de onda e disponíveis. |
| ISO | International Standards Organization. | Organização internacional de padronização. |
| ITU-T | International Telecommunication Union. | União internacional de telecomunicações. |
| LB | Load Balance. | Balanco de cargas. |
| LRW | Least Resistance Weight. | Menor resistência. |
| MD | Minor Delay. | Menor atraso. |
| NF | Noise Figure. | Figura de ruído. |
| NZDSF | Non-Zero Dispersion Shifted Fiber. | Fibra com dispersão deslocada não-nula. |
| 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. |

| Sigla | Descrição | Significado |
|-------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| OXC | Optical Cross-Connect. | Comutador óptico. |
| PMD | Polarization Mode Dispersion. | Dispersão do modo de polarização. |
| QoS | Quality of Service. | Qualidade de serviço. |
| RWA | Routing and Wavelength Assignment. | Roteamento e atribuição de comprimento de onda. |
| SBS | Scattering Brillouin Stimulated. | Espalhamento Brillouin estimulado. |
| SGA | Simple Genetic Algorithm. | Algoritmo genético simples. |
| SLE | Static Lightpath Establishment. | Estabelecimento estático das rotas. |
| SNR | Signal-to-Noise Ratio. | Relação sinal-ruído. |
| SOA | Semiconductor Optical Amplifier. | Amplificador óptico a semicondutor. |
| SP | Shortest Path. | Menor distância. |
| SPM | Self-Phase Modulation. | Auto-modulação de fase. |
| SRS | Scattering Raman Stimulated. | Espalhamento Raman estimulado. |
| TAW | Total wavelengths and Available Wavelengths. | Número total de comprimentos de onda e disponíveis. |
| UFPE | – | Universidade Federal de Pernambuco. |
| UPE | – | Universidade de Pernambuco. |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing. | Multiplexação por divisão em comprimento de onda. |
| XPM | Cross-Phase Modulation. | Modulação cruzada de fase. |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Simbologia | Descrição |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\langle i_S \rangle$ | Corrente gerada pela detecção do sinal óptico. |
| $\langle i_S \rangle^2$ | Componente de potência elétrica referente ao sinal óptico detectado no fotodetector. |
| $\langle i_{S-in} \rangle^2$ | Potência elétrica do sinal na saída do fotodetector para o caso de ausência de dispositivo no modelo optoeletrônico. |
| $\langle i_{S-out} \rangle^2$ | Potência elétrica do sinal na saída do fotodetector para a fibra óptica utilizada como dispositivo no modelo optoeletrônico. |
| $\langle \Delta i_{FWM}^2 \rangle$ | Potência elétrica de ruído devido às componentes de potência produzidas pelo efeito de FWM incidentes no comprimento de onda propagante. |
| $\langle \Delta i_N^2 \rangle$ | Valor médio quadrático da potência elétrica de ruído. |
| $\langle \Delta i_{N-in}^2 \rangle$ | Potência elétrica do ruído associado na saída do fotodetector para o caso de ausência de dispositivo no modelo optoeletrônico. |
| $\langle \Delta i_{N-out}^2 \rangle$ | Potência elétrica do ruído associado na saída do fotodetector para a fibra óptica utilizada como dispositivo no modelo optoeletrônico. |
| $\langle \Delta i_{N-shot}^2 \rangle$ | Potência elétrica do ruído balístico. |
| α | Coefficiente de atenuação da fibra óptica. |
| γ | Coefficiente não-linear da fibra óptica. |
| δ | Máximo percentual do alargamento temporal permitido do pulso óptico. |
| Δf | Espaçamento em frequência entre canais. |
| Δt | Alargamento temporal do pulso óptico. |
| ε | Fator de isolamento do <i>switch</i> . |
| ε_0 | Permissividade elétrica do vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m). |
| η | Eficiência quântica do fotodetector. |
| η' | Eficiência do efeito de FWM. |
| κ | Constante. |
| λ | Comprimento de onda. |
| λ_0 | Comprimento de onda cujo valor do coeficiente de dispersão é igual a zero. |
| λ_i | Menor comprimento de onda pertencente à grade. |
| λ_{DSF} | Comprimento de onda de dispersão zero para fibra DSF. |
| λ_{Th} | Valor limiar para o número de comprimentos de onda. |

| Simbologia | Descrição |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\pi(m, n)$ | Representa todas as rotas possíveis entre os nós m e n . |
| ϕ | Fase da onda eletromagnética. |
| ω | Frequência angular do sinal propagante. |
| θ | Fase de um número complexo. |
| \vec{E} | Vetor campo elétrico. |
| \mathcal{R} | Responsividade do fotodetector. |
| A | Área efetiva da fibra óptica. |
| A_1 | Parâmetro de ajuste da figura de ruído dinâmica. |
| A_2 | Parâmetro de ajuste da figura de ruído dinâmica. |
| B | Taxa de transmissão. |
| B_e | Largura de banda de 3 dB do filtro presente na entrada do fotodetector. |
| B_o | Largura de banda de 3 dB do filtro óptico. |
| c | Velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s). |
| C_{F-Ex} | Número de cálculos de força executados pelo algoritmo exaustivo. |
| C_{F-GA} | Número de cálculos de força executados pelo algoritmo genético. |
| $C_{m,n}^A$ | Número de comprimentos de onda disponíveis no enlace correspondente aos nós m e n . |
| $C_{m,n}^T$ | Número total de comprimentos de onda no enlace correspondente aos nós m e n . |
| C_{max}^T | Número máximo de comprimentos de onda. |
| d | Comprimento da fibra óptica. |
| D | Fator de degenerência, o qual pode ser igual a 3 ou 6 dependendo da combinação de frequências (caso degenerado ou não-degenerado). |
| D^{PMD} | Coefficiente de PMD. |
| D_{Th}^{PMD} | Valor limiar para o coeficiente de PMD. |
| f | Frequência do sinal. |
| $f_{OSNR}[\pi(m, n), \lambda]$ | Representa a $OSNR_{out}$ para todas as rotas possíveis entre os nós m e n no respectivo comprimento de onda λ . |
| F | Fator de ruído. |
| F_{Amp}^0 | Fator de ruído do amplificador óptico para baixos valores de potência óptica. |
| F_{Amp} | Fator de ruído dinâmico do amplificador. |
| G | Número de gerações. |
| G_0 | Número de gerações que otimiza o algoritmo genético, em termos de cálculos de força. |
| G_{Amp} | Ganho dinâmico linear do amplificador óptico. |
| G_{Amp}^0 | Ganho não-saturado do amplificador óptico. |
| h | Constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34}$ Js). |
| i_{Dt} | Corrente detectada pelo fotodetector referente ao sinal recebido. |

| Simbologia | Descrição |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| L_{Cn} | Perda do conector. |
| L_{Dx} | Perda do demultiplexador. |
| L_{Em} | Perda da emenda. |
| L_{Mx} | Perda do multiplexador. |
| L_{Sw} | Perda do <i>switch</i> . |
| n_{Cn} | Número de conectores presentes na rota. |
| n_{Ef} | Índice de refração efetivo da fibra óptica. |
| n_{Em} | Número de emendas realizadas ao longo da rota. |
| N_{Amp} | Potência óptica de ruído produzida pelo amplificador óptico devido ao ruído ASE. |
| N_{FWM} | Potência óptica de ruído total produzida pelo efeito de FWM. |
| N_I | Número de comprimentos de onda alocáveis. |
| N_{in} | Potência de ruído óptica na entrada do sistema. |
| N_{out} | Potência de ruído óptica na saída do sistema. |
| N_{Sw} | Potência óptica de ruído total produzida devido ao não-isolamento ideal do <i>switch</i> . |
| N_T | Número de comprimentos de onda disponíveis na grade. |
| $OSNR_{in}$ | Relação sinal-ruído óptica na entrada do sistema. |
| $OSNR_{out}$ | Relação sinal-ruído óptica na saída do sistema. |
| $OSNR_{Th}$ | Relação sinal-ruído óptica adotada como critério de QoS. |
| P | Tamanho da população inicial. |
| $P_{\lambda-in}$ | Potência óptica de entrada por canal. |
| $P_{\lambda-in (regular)}$ | Potência de entrada por canal considerada na topologia regular. |
| $P_{\lambda-in (americana)}$ | Potência de entrada por canal considerada na topologia americana. |
| P_{ASE} | Potência óptica de ruído produzida pelo amplificador óptico devido ao ruído ASE. |
| P_{Cr} | Probabilidade de que a operação de cruzamento seja realizada. |
| P_{Dt} | Potência elétrica detectada. |
| $P_{DtSinal}$ | Potência elétrica do sinal detectado. |
| P_{FWM} | Potência óptica produzida pelo efeito de FWM. |
| P_{ijk} | Potência óptica gerada pela combinação de 3 frequências (f_i , f_j e f_k) devido ao efeito de FWM. |
| P_{in} | Potência óptica do sinal na entrada do sistema. |
| P_{Mg} | Margem de perdas. |
| P_{Mt} | Probabilidade de que a operação de mutação seja realizada. |
| P_{Opt} | Potência óptica do sinal. |
| P_{out} | Potência óptica do sinal na saída do sistema. |

| Simbologia | Descrição |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P_{Pn} | Compensação de todas as penalidades sofridas pelo sinal ao longo da rota. |
| P_{Rc} | Potência óptica recebida no fotodetector. |
| P_S | Potência óptica do sinal. |
| $P_{S_{min}}$ | Valor mínimo da potência óptica na entrada do fotodetector que garante QoS para o sinal recebido. |
| P_{St} | Potência de saturação na saída do amplificador. |
| P_{Sw} | Potência de ruído produzida no <i>switch</i> devido ao não-isolamento ideal. |
| q | Carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C). |
| $R_{m,n}^\lambda$ | Rota determinada pelo algoritmo OSNR-R, entre os nós m e n , que maximiza o valor da $OSNR_{out}$ no respectivo comprimento de onda λ . |
| R_{Ex-GA} | Relação entre o número de cálculos de força executados pelo algoritmo exaustivo e pelo genético. |
| S_N | Densidade espectral de potência de ruído. |
| $SNR_{<}$ | Menor SNR_{out} calculada referente a um comprimento de onda ativo pertencente a uma determinada alocação de canais. |
| SNR_{in} | Relação sinal-ruído na entrada do sistema. |
| SNR_{out} | Relação sinal-ruído na saída do sistema. |
| SNR_{Th} | Relação sinal-ruído utilizada como critério de QoS. |
| $w_{m,n}$ | Função custo do enlace correspondente aos nós m e n . |
| W | Número de comprimentos de onda em cada enlace da rede. |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Representação da rede em camadas. | 25 |
| 2.2 | Componentes de um sistema de comunicações ópticas básico. | 26 |
| 3.1 | Ilustração das perdas, ganhos e adição de ruído na propagação dos sinais ópticos em um enlace. | 35 |
| 4.1 | Alocação de comprimentos de onda codificada, utilizando o padrão da grade do ITU-T, $N_T = 15$ e $N_I = 8$ | 41 |
| 4.2 | Algoritmo genético utilizado no processo de otimização da atribuição de comprimento de onda em um enlace óptico. | 43 |
| 4.3 | Menor relação sinal-ruído da melhor alocação de comprimentos de onda obtida com o algoritmo exaustivo, considerando uma variação na potência de entrada por canal e diferentes espaçamentos em frequência entre os canais. | 45 |
| 4.4 | Resultado das simulações para: (a) número médio de cálculos de força e (b) número médio de gerações, em função do número de indivíduos da população, considerando $N_T = 20$, $N_I = 10$ e $P_{\lambda-in} = -10$ dBm. | 48 |
| 4.5 | Pseudo-código que otimiza a determinação de P e G para o algoritmo genético no processo de atribuição de comprimento de onda, considerando qualquer configuração de N_T e N_I | 49 |
| 4.6 | Número médio de gerações e de cálculos de força executados pelo algoritmo genético em função de uma variação na potência de entrada por canal, considerando diferentes configurações. | 50 |
| 4.7 | Menor relação sinal-ruído da melhor alocação de comprimentos de onda obtida com o algoritmo exaustivo, em função de uma variação da potência de entrada por canal, considerando diferentes configurações. | 51 |
| 5.1 | Configuração do enlace contendo os dispositivos considerados na formulação desenvolvida para nós adjacentes. | 55 |
| 5.2 | 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). | 56 |
| 5.3 | Tela principal do programa de simulação desenvolvido. | 60 |
| 5.4 | Tela de apresentação com a rede a ser simulada. | 61 |

| | | |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5 | Telas de configuração dos parâmetros relativos ao: (a) enlace e (b) nó da rede. | 62 |
| 5.6 | Tela de configuração dos parâmetros da simulação. | 62 |
| 5.7 | Telas informativas quanto ao processo de simulação: (a) em andamento e (b) término da simulação. | 63 |
| 5.8 | Topologias utilizadas nas simulações e suas respectivas distâncias entre os nós: (a) regular e (b) irregular ou americana. | 65 |
| 5.9 | Configuração do nó roteador de comprimentos de onda com M fibras e N comprimentos de onda em cada uma delas. | 65 |
| 5.10 | Pseudo-código do algoritmo de roteamento pela menor distância ou menor resistência. | 66 |
| 5.11 | Probabilidade de bloqueio das chamadas em função da potência óptica de entrada por canal, para diferentes valores de carga, considerando a potência de saturação de saída igual a 19 dBm e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana. | 67 |
| 5.12 | Probabilidade de bloqueio das chamadas em função do número de comprimentos de onda presentes em cada enlace, considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs. | 68 |
| 5.13 | Probabilidade de bloqueio das chamadas em função do fator de isolamento do <i>switch</i> , considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs. | 69 |
| 5.14 | Probabilidade de bloqueio das chamadas em função da potência óptica de entrada por canal, considerando valores de figura de ruído (5 e 7 dB), potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs. | 69 |
| 5.15 | Probabilidade de bloqueio das chamadas em função da potência óptica de entrada por canal, considerando valores de λ_0 (1510 e 1550 nm), potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs. | 70 |
| 5.16 | Probabilidade de bloqueio das chamadas em função do coeficiente de dispersão do modo de polarização, considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs e uma taxa de transmissão igual a 40 Gbps. | 71 |
| 5.17 | Pseudo-código do algoritmo de roteamento pela menor OSNR. | 72 |
| 5.18 | Probabilidade de bloqueio das chamadas em função da carga, considerando os três algoritmos de roteamento (LRW, SP e OSNR-R) e as duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana. | 74 |
| A.1 | Modelo optoeletrônico que considera: (a) ausência de dispositivo, e (b) fibra óptica como dispositivo entre a fonte e o fotodetector. | 81 |
| B.1 | Algoritmo genético simples. | 90 |

| | | |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| B.2 | Representação cromossômica típica e seu significado no domínio da variável do problema. | 90 |
| B.3 | Operação de cruzamento monoponto entre indivíduos. | 93 |
| B.4 | Operação de cruzamento uniforme entre indivíduos. | 94 |
| B.5 | Operação de mutação realizada na terceira posição do indivíduo. | 94 |
| B.6 | Mecanismo de seleção baseado no somatório das aptidões de todos os indivíduos. | 95 |
| C.1 | Rota com um enlace. | 97 |
| C.2 | Rota com dois enlaces. | 100 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Parâmetros utilizados nas simulações. | 45 |
| 4.2 | Análise da adição de um comprimento de onda a partir da melhor alocação para $N_I = 7$, considerando $P_{\lambda\text{-in}} = -10$ dBm. | 46 |
| 4.3 | Análise da retirada de um comprimento de onda a partir da melhor alocação para $N_I = 8$, considerando $P_{\lambda\text{-in}} = -10$ dBm. | 47 |
| 4.4 | Parâmetros genéticos otimizados. | 48 |
| 5.1 | Valores padrão dos parâmetros utilizados nas simulações. | 64 |
| 5.2 | Distância média das rotas, para as chamadas estabelecidas, encontrada pelos três algoritmos de roteamento (LRW, SP e OSNR-R), considerando-se uma carga igual a 60 Erlangs e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana. | 74 |
| B.1 | Procedimento da operação de cruzamento monoponto. | 93 |
| B.2 | Procedimento da operação de mutação monoponto. | 94 |
| B.3 | Procedimento de seleção baseado no somatório das aptidões de todos os indivíduos. | 95 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 | Motivação | 21 |
| 1.2 | Objetivos | 22 |
| 1.3 | Organização | 22 |
| 2 | REDES ÓPTICAS | 24 |
| 2.1 | Características básicas de um sistema de comunicações ópticas | 26 |
| 2.2 | Aspectos gerais das redes ópticas | 27 |
| 2.3 | Tipos de tráfego, algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda | 27 |
| 3 | PENALIDADES FÍSICAS | 31 |
| 3.1 | Dispositivos ópticos e suas características | 32 |
| 3.2 | Características de projeto dos sistemas de comunicações ópticas | 34 |
| 3.2.1 | Considerações das penalidades físicas | 35 |
| 4 | CONSIDERAÇÃO DAS PENALIDADES FÍSICAS NO PROCESSO DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA | 39 |
| 4.1 | Algoritmos utilizados no processo de otimização da alocação de comprimentos de onda | 41 |
| 4.1.1 | Resultados | 44 |
| 4.2 | Otimização dos parâmetros do algoritmo genético | 47 |
| 4.2.1 | Resultados | 50 |
| 5 | MODELAGEM DAS PENALIDADES FÍSICAS NAS REDES ÓPTICAS | 53 |
| 5.1 | Modelagem das penalidades físicas para uma rota | 54 |
| 5.2 | Descrição do programa desenvolvido para as simulações | 60 |
| 5.3 | Características das simulações | 63 |
| 5.3.1 | Análise do impacto das penalidades físicas | 66 |
| 5.3.2 | Análise via algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda | 71 |
| 6 | CONCLUSÃO | 76 |
| 6.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 78 |

| | | |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Apêndice A | MODELO PARA QUANTIFICAR O EFEITO DA MISTURA DE QUATRO ONDAS EM UM ENLACE ÓPTICO | 80 |
| A.1 | Formulação para calcular a figura de ruído baseada no efeito da mistura de quatro ondas | 81 |
| A.2 | Cálculo das componentes de ruído aditivo | 83 |
| Apêndice B | ALGORITMOS GENÉTICOS | 88 |
| B.1 | Algoritmo genético simples | 89 |
| B.1.1 | Mecanismos de cruzamento | 92 |
| B.1.2 | Mecanismos de mutação | 94 |
| B.1.3 | Mecanismos de seleção | 95 |
| B.2 | Aplicações dos algoritmos genéticos nas redes ópticas | 96 |
| Apêndice C | PROCEDIMENTO DE MODELAGEM DAS PENALIDADES FÍSICAS NAS REDES ÓPTICAS TRANSPARENTES | 97 |
| Apêndice D | LISTA DE PUBLICAÇÕES | 104 |
| D.1 | Artigos publicados | 104 |
| D.2 | Artigos submetidos | 105 |
| | REFERÊNCIAS | 106 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

*Sorte é o que acontece quando a
preparação encontra a oportunidade.*

— Elmer Letterman

Nas últimas décadas, a conexão entre sistemas passou de simples conexões ponto-a-ponto para sistemas conectados por meio de redes em anel ou em malha [1]. Com a crescente demanda por largura de banda em sistemas de telecomunicações, predominando as aplicações multimídia e o aumento no tráfego da *internet*, além da tecnologia de multiplexação por divisão em comprimento de onda¹ viabilizar a utilização otimizada da largura de banda disponível na fibra óptica, da diversidade de protocolos de comunicação e de sistemas conectados, as redes ópticas transparentes (*all-optical networks*) vêm ganhando destaque nas pesquisas científicas nos últimos 20 anos [2].

Uma chamada representa a conexão entre dois pontos, ou nós da rede, e o processo de atribuir um comprimento de onda e determinar um conjunto de enlaces ópticos para que uma chamada seja estabelecida é conhecido na literatura como roteamento e atribuição de comprimento de onda². Do ponto de vista da camada de rede, vários algoritmos de RWA foram propostos na literatura [1].

¹WDM – Wavelength Division Multiplexing.

²RWA – Routing and Wavelength Assignment.

Enquanto que os efeitos lineares (atenuação e dispersão cromática) podem ser compensados por dispositivos ópticos bem conhecidos na literatura (amplificadores ópticos e compensadores de dispersão), as penalidades devido aos efeitos não-lineares não podem ser desprezadas, em determinadas condições de operação do sistema, limitando o estabelecimento das chamadas nas redes ópticas. Dentre os efeitos não-lineares, considerando um aumento no número de comprimentos de onda, menor espaçamento na frequência entre canais e a utilização de fibras com dispersão deslocada³ e com dispersão deslocada não-nula⁴ nos enlaces ópticos, o efeito da mistura de quatro ondas⁵ pode ser limitante para alocações de comprimento de onda em sistemas WDM, devido à perda de potência e geração de ruído entre os comprimentos de onda propagantes [3; 4].

1.1 Motivação

Redes ópticas transparentes envolvem transmissão fim-a-fim do sinal no domínio óptico, ou seja, o sinal óptico não é convertido para o domínio elétrico ao longo da propagação nessas redes. Nas redes ópticas comutadas por circuito, cada comprimento de onda é responsável pelo transporte de tráfego entre dois nós da rede (fonte e destino) [1].

Os principais desafios nessas redes consistem em garantir a qualidade do sinal⁶ durante o processo de transmissão e utilizar algoritmos de RWA de modo a minimizar o percentual de chamadas bloqueadas devido à falta de comprimentos de onda disponíveis ou degradação da relação sinal-ruído óptica⁷ [5–7]. Para isso, torna-se importante considerar a degradação do sinal durante o processo de transmissão devido às características do meio e dispositivos que compõem a camada física [8–15].

A motivação deste trabalho envolve os seguintes pontos:

1. Garantir a qualidade do sinal óptico durante todo o processo de transmissão nas redes ópticas transparentes.
2. Utilizar algoritmos de RWA que minimizam o número de chamadas bloqueadas.
3. Contribuir para o estado da arte em modelos analíticos e algoritmos, para análise das redes ópticas transparentes, considerando características da camada física.

³DSF – Dispersion Shifted Fiber.

⁴NZDSF – Non-Zero Dispersion Shifted Fiber.

⁵FWM – Four Wave Mixing.

⁶QoS – Quality of Service.

⁷OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principais objetivos o desenvolvimento e a aplicação de modelos analíticos para análise das redes ópticas transparentes do ponto de vista sistêmico. Dessa forma, o problema de RWA é tratado considerando as limitações impostas pelos efeitos da camada física na transmissão dos sinais ópticos. Na literatura, os aspectos de atribuição de comprimento de onda e roteamento já consideram os efeitos da camada física, porém este trabalho se propõe a dar as seguintes contribuições:

Quanto ao processo de atribuição de comprimento de onda: desenvolver uma metodologia para alocação de comprimentos de onda que leve em consideração o efeito de FWM utilizando algoritmo genético.

Quanto ao processo de roteamento: desenvolver um modelo analítico que considere o cascadeamento de vários efeitos físicos na degradação da OSNR dos sinais propagantes e demonstrar sua aplicação na avaliação do impacto das penalidades físicas nas redes ópticas transparentes, e aplicação em algoritmo de roteamento para determinar a rota pela menor degradação da OSNR.

1.3 Organização

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2: trata de uma revisão dos conceitos mais importantes relacionados às redes ópticas.

Capítulo 3: faz uma revisão de algumas penalidades que atuam nos sinais na transmissão em sistemas de comunicações ópticas.

Capítulo 4: apresenta uma nova estratégia para utilização do efeito de FWM como critério para alocação de comprimento de onda em um enlace óptico, considerando a grade de canais recomendada pela União Internacional de Telecomunicações⁸. Para isso, utiliza-se uma formulação que calcula a figura de ruído da fibra óptica para cada comprimento de onda propagante pertencente à alocação [16].

⁸ITU-T – International Telecommunication Union.

Uma análise do comportamento das alocações quanto à adição, remoção e alocação aleatória dos comprimentos de onda é realizada. Além disso, a melhor alocação e as alocações satisfatórias são determinadas utilizando uma das técnicas de computação inteligente chamada de algoritmo genético⁹, adotando como função objetiva a maior taxa de erro por bit¹⁰ dentre os canais ativos.

Capítulo 5: descreve um novo modelo analítico, baseado na OSNR, que considera o impacto das penalidades físicas nas redes ópticas transparentes. Tais penalidades compreendem o efeito da saturação do ganho e do ruído devido à emissão espontânea amplificada¹¹ nos amplificadores, interferência intracanal (*coherent crosstalk*) nos comutadores ópticos (*switch*), o efeito de FWM e o alargamento temporal dos pulsos ópticos devido à dispersão do modo de polarização¹² nas fibras ópticas.

O programa de computador desenvolvido, para realização das simulações, e aplicações desse modelo na análise do desempenho das redes ópticas transparentes também fazem parte desse capítulo.

Capítulo 6: trata da conclusão deste trabalho e da apresentação das sugestões para trabalhos futuros.

⁹GA – Genetic Algorithm.

¹⁰BER – Bit Error Rate.

¹¹ASE – Amplified Spontaneous Emission.

¹²PMD – Polarization Mode Dispersion.

CAPÍTULO 2

REDES ÓPTICAS

Lembre-se de que os vencedores fazem aquilo que os perdedores não querem fazer.

— H. Jackson Brown Jr

Para simplificar o estudo, análise, projetos de dispositivos e programas, as funções executadas pelas redes de comunicações são divididas em camadas. Esse tipo de modelo, proposto pela organização internacional de padronização¹, no início da década de 80 do século XX, é chamado de modelo de referência ISO OSI, referindo-se à conexão entre sistemas² e está ilustrado na figura 2.1 [1].

O modelo de referência ISO OSI tem sete camadas empilhadas verticalmente, onde cada uma delas executa um determinado conjunto de funções, executando um certo conjunto de serviços para a camada superior. As camadas são as seguintes [17]:

Física: trata da transmissão dos sinais envolvendo considerações de interfaces mecânicas, elétricas, de sincronização e características do meio físico.

Enlace de dados: possui a tarefa principal de fazer com que o canal de transmissão pareça livre de erros de transmissão para a camada de rede.

¹ISO – International Standards Organization.

²OSI – Open Systems Interconnection.



Figura 2.1: Representação da rede em camadas.

Rede: é responsável por determinar a rota de uma chamada solicitada, controlar o congestionamento das chamadas, devido ao compartilhamento dos mesmos caminhos e recursos da rede, fornecendo QoS quanto ao atraso, tempo em trânsito, instabilidade e outros fatores.

Transporte: possui a função básica de aceitar os dados da camada superior, dividi-los em unidades menores e determinar qual tipo de serviço será fornecido à camada de sessão.

Sessão: permite que os usuários estabeleçam sessões entre eles, ou seja, comuniquem-se de forma que seja realizado um controle de quem deve transmitir em cada momento. Dessa forma, impede que as duas partes tentem executar a mesma operação ao mesmo tempo e realiza uma verificação periódica de transmissões longas para permitir que elas continuem a partir do ponto em que estavam na ocorrência de falhas.

Apresentação: está relacionada à sintaxe e à semântica das informações transmitidas, ou seja, para tornar possível a comunicação entre computadores, com diferentes representações de dados, as estruturas de dados a serem trocadas podem ser definidas de maneira abstrata, juntamente com uma codificação padrão que será usada durante a chamada.

Aplicação: contém um conjunto de protocolos comumente necessários para os usuários, dependendo da necessidade e das funções requeridas pelas aplicações, tais como: transferência de arquivos, correio eletrônico e transmissão de notícias pela rede.

2.1 Características básicas de um sistema de comunicações ópticas

A invenção do laser por Shawlow e Townes em 1958, seguida pelo trabalho de Kao e Hockham em fibras ópticas em 1965, e a demonstração prática da utilização delas como meio de comunicação por Maurer e colaboradores em 1970, revolucionaram as áreas de redes e de telecomunicações. A disponibilidade do laser e a utilização da fibra óptica como meio de transmissão forneceram aos sistemas de telecomunicações a oportunidade de transportar grande quantidade de informação, em comparação com os sistemas de rádio microondas [18; 19].

Um sistema de comunicações ópticas básico está ilustrado na figura 2.2 e consiste basicamente nos seguintes componentes [18]:

Transmissor: geralmente é um diodo laser com componentes eletrônicos associados para realizar a modulação dos sinais, ou seja, a codificação dos sinais na forma de uma cadeia de pulsos ópticos.

Meio de transmissão: consiste de uma fibra óptica capaz de transportar os sinais ópticos na forma de ondas guiadas, embora possa ser utilizado o espaço livre em alguns sistemas de comunicações ópticas, representando um material dielétrico que envolve basicamente um núcleo e uma casca, diferindo pelo valor do índice de refração.

Receptor: é composto de um detector de energia luminosa e componentes eletrônicos associados, de forma que os pulsos ópticos são recebidos e transformados para o domínio elétrico.

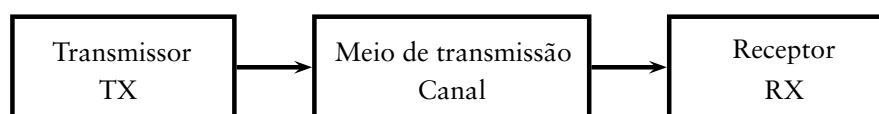


Figura 2.2: Componentes de um sistema de comunicações ópticas básico.

2.2 Aspectos gerais das redes ópticas

Entre os anos de 1985 a 1995, quatro eventos significativos tornaram possível a implementação prática das redes ópticas, foram eles [19]:

1. Criação e desenvolvimento de amplificadores ópticos viáveis comercialmente.
2. Viabilidade econômica e prática da utilização de sistemas WDM.
3. Demonstração de um roteador óptico³, tornando possível a configuração de rotas baseadas em comprimentos de onda.
4. A convergência de serviços e demanda por taxas de transmissão elevadas.

Na primeira geração das redes ópticas, a fibra óptica foi utilizada para atender a capacidade exigida, fornecendo menor atenuação do sinal e maior capacidade de transmissão que os sistemas que utilizavam o cobre como meio de propagação dos sinais. A comutação dos dados e outras funções da rede eram realizadas exclusivamente no domínio elétrico. Atualmente, as redes ópticas estão na segunda geração, onde possuem funções de comutação, roteamento e tomada de decisões no domínio óptico [1].

2.3 Tipos de tráfego, algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda

Existem três tipos básicos de solicitação de chamadas em uma rede comutada por circuito, são eles: estático, incremental e dinâmico. No caso estático, a lista de chamadas é conhecida e o problema se reduz à determinação de rotas para minimizar o uso dos recursos da rede, tais como: número de comprimentos de onda ou de fibras. Uma maneira alternativa de se utilizar esse caso é estimando o número máximo de chamadas que podem ser atendidas para um dado número fixo de comprimentos de onda. Para o caso estático o problema de roteamento é conhecido como estabelecimento estático das rotas⁴ [5; 20; 21]. Para o caso incremental, as chamadas chegam seqüencialmente e uma vez que a rota é estabelecida, esta permanece por tempo indefinido na rede. No caso dinâmico, a rota estabelecida tem sua permanência na rede limitada por um período de tempo.

³OXC – Optical Cross-Connect.

⁴SLE - Static Lightpath Establishment.

Nesses casos, o objetivo do algoritmo de roteamento é o de minimizar a probabilidade de bloqueio das chamadas (dinâmico) ou de maximizar o número das chamadas estabelecidas na rede em um determinado período de tempo (incremental). Esse problema é chamado de estabelecimento dinâmico das rotas⁵.

Três tipos básicos de algoritmos de roteamento podem ser encontrados na literatura, são eles [22–25]:

Fixo: consiste em selecionar sempre a mesma rota para um determinado par fonte-destino.

Fixo-alternativo: nesse tipo de roteamento cada nó possui uma tabela com uma lista ordenada de rotas para cada destino da rede. Uma rota primária é considerada como a primeira da lista e uma rota alternativa é qualquer outra rota que não compartilhe qualquer enlace com a primeira da lista. Quando uma chamada é solicitada, o nó fonte tenta configurar a chamada em uma das rotas presentes na lista de rotas, percorrendo sequencialmente essa lista, até que uma rota com um comprimento de onda disponível seja encontrada, caso contrário ela é bloqueada.

Adaptativo: o roteamento é realizado de maneira dinâmica, ou seja, uma rota é determinada a partir do estado atual da rede, onde esse estado é determinado pelo conjunto de chamadas que se encontram em curso.

Para os casos em que as chamadas são solicitadas uma de cada vez (tráfego incremental ou dinâmico), algumas heurísticas são utilizadas para atribuir comprimento de onda às rotas. As heurísticas representam métodos, estratégias ou algoritmos, de modo que as soluções são determinadas pela avaliação do progresso obtido na busca de um resultado final, onde as mais importantes encontradas na literaturas são as seguintes [10; 26–31]:

Aleatória: considerando um conjunto de comprimentos de onda disponíveis, seleciona-se aleatoriamente dentre eles um comprimento de onda para estabelecimento da chamada na rota determinada.

Primeiro da lista: todos os comprimentos de onda são enumerados nesse esquema de atribuição e, para o estabelecimento de uma chamada, o comprimento de onda de menor índice é selecionado dentre os disponíveis.

Menos utilizado: o comprimento de onda menos utilizado em toda a rede é selecionado para o estabelecimento da chamada.

⁵DLE - Dynamic Lightpath Establishment.

Mais utilizado: realiza o oposto da heurística anterior, ou seja, seleciona o comprimento de onda mais utilizado em toda a rede para o estabelecimento da chamada.

Algumas heurísticas são utilizadas para redes multifibras, tais como: mínimo produto, menos carregado e Max Sum [5]. A primeira tem como objetivo compactar comprimentos de onda nas fibras de modo a minimizar o número de fibras na rede. A segunda seleciona o comprimento de onda que tem a maior capacidade residual no enlace mais carregado da rota determinada. Em redes com uma única fibra, essa heurística assume o comportamento de atribuição de comprimento de onda referente ao primeiro da lista, onde a capacidade residual toma os valores 0 ou 1. A última considera todas as rotas possíveis, para um dado par fonte-destino, e tenta maximizar as capacidades das rotas restantes após o estabelecimento da chamada, ou seja, escolhe o comprimento de onda que minimiza a perda de capacidade de todas as rotas. Outras heurísticas se destinam a diminuir a probabilidade de bloqueio das chamadas que possuem rotas com maior número de enlaces. O estabelecimento das chamadas é realizado de maneira mais justa entre as rotas com menor e maior número de enlaces, ocasionando em uma probabilidade média de bloqueio das chamadas solicitadas na rede mais elevada. Embora essa probabilidade média de bloqueio apresente um crescimento quando esses métodos de atribuição de comprimento de onda são utilizados, chamadas que necessitem de rotas mais longas são mais prováveis de serem estabelecidas [5].

Os algoritmos de roteamento utilizam algumas métricas na determinação das rotas, por exemplo: menor distância⁶ [17], mínimo atraso⁷ [17], balanço de cargas⁸ [17], menor número de enlaces, comprimentos de onda disponíveis, número de enlaces e comprimentos de onda disponíveis⁹, número total de comprimentos de onda e comprimentos de onda disponíveis¹⁰, número de enlaces, número total de comprimentos de onda e comprimentos de onda disponíveis¹¹ [32] e mínima resistência¹² [33].

⁶SP – Shortest Path.

⁷MD – Minor Delay.

⁸LB – Load Balance.

⁹HAW – Hop count and Available Wavelengths.

¹⁰TAW – Total wavelengths and Available Wavelengths.

¹¹HTAW – Hop count and Total wavelengths and Available Wavelengths.

¹²LRW – Least Resistance Weight.

Do ponto de vista da camada física, alguns autores propõem algoritmos de RWA que consideram as penalidades devido à presença de efeitos lineares e não-lineares [34], utilizando métodos numéricos aplicados à equação não-linear de Schrödinger [35], seleção de rotas considerando ruídos adicionados durante a propagação dos sinais [6; 7; 36], bem como atribuição de comprimento de onda segundo critérios de maior ganho na faixa de amplificação óptica [37], minimização do efeito de FWM na rota selecionada ou nas rotas estabelecidas [13; 38; 39].

No capítulo 4 novos algoritmos de alocação de comprimentos de onda são desenvolvidos, enquanto que no capítulo 5 novos algoritmos de roteamento são propostos.

CAPÍTULO 3

PENALIDADES FÍSICAS

Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.

— Mahatma Gandhi

As redes ópticas podem ser classificadas em opacas ou transparentes, dependendo se o sinal propagante é convertido ou não do domínio óptico para o elétrico e vice-versa. Em redes ópticas opacas, o sinal óptico é eletricamente regenerado em cada nó da rede, eliminando qualquer penalidade que possa tê-lo degradado no decorrer da transmissão. O processo de regeneração eletrônico torna mais simples o projeto de transmissão, fazendo com que a relação sinal-ruído¹ tenha valor suficiente para garantir a QoS do sinal até o próximo nó da rede. Para essas redes, os algoritmos de RWA podem fornecer uma rota que pode utilizar comprimentos de onda diferentes em cada enlace. Portanto, o roteamento se resume a analisar cada enlace pertencente à rota e a otimização se restringe a minimizar parâmetros como número de enlaces ou comprimento da rota analisada. Em redes ópticas transparentes, o sinal permanece no domínio óptico desde o nó fonte até o nó destino, ou seja, não é convertido para o domínio elétrico. Desse modo, é necessário avaliar a rota completa de modo a garantir a QoS da chamada e a otimização consiste em minimizar a probabilidade de bloqueio das chamadas solicitadas na rede [11; 40].

¹SNR – Signal-to-Noise Ratio.

As vantagens em utilizar os regeneradores eletrônicos, para cada comprimento de onda nos nós da rede, são [1]:

1. A conversão optoeletrônica permite que o sinal seja regenerado (formatado, amplificado e ajustado no seu respectivo intervalo de tempo).
2. Um sinal recebido em qualquer comprimento de onda, e em qualquer fibra na entrada do dispositivo, pode ser roteado para qualquer outra fibra na saída em qualquer comprimento de onda disponível.
3. O monitoramento dos dados transmitidos pode ser efetuado em cada nó, permitindo a localização precisa de falhas, simplificando desse modo o gerenciamento da rede.

Entretanto, tais regeneradores limitam a taxa de transmissão, além de serem dispositivos que apresentam um alto custo na implementação da rede, de modo que a utilização de tais dispositivos deve ser evitada ao máximo [1]. A transição de redes ópticas opacas para transparentes envolve os seguintes passos [1; 41]:

1. Substituição dos regeneradores eletrônicos por amplificadores e compensadores de dispersão ópticos.
2. Instalação de multiplexadores ópticos de adição e remoção de comprimentos de onda² e comutadores ópticos para realizar o roteamento dos sinais no domínio óptico.

3.1 Dispositivos ópticos e suas características

Durante a propagação dos sinais ópticos, nas redes ópticas transparentes, tanto o meio de transmissão quanto os dispositivos pertencentes à rede degradam a qualidade dos sinais propagantes. As penalidades sofridas pelos sinais propagantes envolvem atenuação, alargamento temporal do pulso, interferência, adição de ruído, ou até mesmo resposta não linear do meio ou dispositivos considerados. De acordo com Ramaswami [1], o termo **interferência** se refere à atuação de outros sinais ópticos no sinal de interesse, podendo ser no mesmo comprimento de onda ou entre comprimentos de onda diferentes, enquanto que o termo **ruído** pode ser considerado como o conjunto de campos eletromagnéticos aleatórios que ocupam a mesma região espectral do sinal propagante de interesse [42].

²OADM – Optical Add/Drop Multiplexer.

Dentre os dispositivos utilizados nos sistemas de comunicações ópticas, têm-se os seguintes, com suas respectivas penalidades:

Transmissor: gera um ruído proveniente das flutuações na intensidade do sinal óptico devido às reflexões causadas pela presença de emendas e conectores ao longo do enlace [1]. Gera outro ruído que se refere à potência óptica de emissão espontânea produzida devido ao decaimento espontâneo e à geração de fótons incoerentes no processo de geração dos pulsos ópticos [42].

Amplificador óptico: adiciona ruído ASE, onde fótons incoerentes em relação ao sinal são amplificados no dispositivo [18; 43]. Também apresenta um efeito de saturação do ganho, a partir de um determinado valor de potência de entrada, em que o ganho diminui. Esse efeito depende das características de projeto do amplificador, do valor da potência óptica de bombeio, da figura de ruído e da potência de entrada no dispositivo [1; 43].

Comutador, multiplexador e demultiplexador ópticos: além das próprias perdas, inerentes aos dispositivos, podem causar interferências nos sinais ópticos propagantes. Elas podem incidir no mesmo comprimento de onda do sinal, ou ainda, ter comprimento de onda diferente do sinal. No primeiro caso, podem ser detectadas pelo fotodetector, enquanto que no segundo podem ser filtradas [1].

Fibra óptica: os sinais podem sofrer penalidades devido a dois tipos de efeitos: os lineares e os não-lineares. Os primeiros se referem à atenuação e à dispersão do sinal, causando perda de potência e alargamento temporal do pulso óptico. Os segundos ocorrem devido à dependência não-linear do índice de refração da fibra com a intensidade do sinal propagante. Com a utilização de sistemas WDM, e dependendo das condições do sistema, tais efeitos se tornam limitantes na propagação dos sinais, dentre eles têm-se: auto-modulação de fase³, modulação de fase cruzada⁴, FWM, espalhamentos Raman⁵ e Brillouin⁶ estimulados [8]. No capítulo 4, a consideração do efeito de FWM na atribuição de comprimento de onda em redes ópticas transparentes será abordada.

³SPM – Self-Phase Modulation.

⁴XPM – Cross-Phase Modulation.

⁵SRS – Scattering Raman Stimulated.

⁶SBS – Scattering Brillouin Stimulated.

Fotodetector: os ruídos balístico e térmico degradam a SNR do sinal durante o processo de detecção dos sinais ópticos. O primeiro tem origem na geração aleatória dos elétrons que compõem a corrente elétrica do sinal detectado. Portanto, mesmo que uma potência óptica constante incida na entrada do fotodetector, a corrente elétrica produzida apresentará flutuações em torno de um valor médio. O segundo tem origem no resistor de carga presente no circuito de detecção, de modo que é gerado um ruído devido ao movimento aleatório dos elétrons por causa da temperatura [18].

3.2 Características de projeto dos sistemas de comunicações ópticas

O projeto de sistemas de comunicações ópticas envolve aspectos como seleção do tipo de transmissor, de fibra e de fotodetector, basicamente. Desse modo, a escolha dos dispositivos depende da distância entre os nós fonte e destino e da taxa de transmissão de interesse. A partir disso, aspectos como custo de implementação do sistema, confiabilidade dos dispositivos e possibilidade de expansão da rede também podem ser considerados [18].

Considerando um valor mínimo da potência óptica na entrada do fotodetector ($P_{S_{\min}}$), que garante QoS para o sinal recebido, o projeto dos sistemas de comunicações ópticas pode ser realizado, basicamente, considerando penalidades de potência nos sinais transmitidos. Essa análise envolve contabilização das perdas de potência do sinal ao longo da rota, tais como: propagação na fibra óptica, presença de emendas e conectores, e uma margem de perdas para o caso de expansão ou deterioração do sinal em algum dispositivo do sistema. Se todas as perdas estão em escala logarítmica (decibéis), então a potência óptica recebida no fotodetector (P_{Rc}) em dBm, devido a uma potência óptica de entrada P_{in} , pode ser calculada a partir da seguinte expressão [1]:

$$P_{Rc} = P_{in} - n_{Cn}L_{Cn} - n_{Em}L_{Em} - P_{Pn} - \alpha d, \quad (3.1)$$

onde n_{Cn} representa o número de conectores presentes na rota, L_{Cn} o valor da perda de cada conector em dB, n_{Em} o número de emendas realizadas ao longo da rota, L_{Em} o valor da perda de cada emenda em dB, P_{Pn} o valor da compensação de todas as penalidades sofridas pelo sinal ao longo da rota em dB, α o valor do coeficiente de atenuação da fibra óptica em dB/km e d o comprimento da fibra óptica em km.

Para se obter um valor mínimo da potência óptica na entrada do fotodetector, com esse respectivo valor de P_{Rc} calculado pela equação (3.1), é necessário estabelecer a seguinte condição:

$$P_{Rc} - P_{Mg} > P_{S_{min}}, \quad (3.2)$$

onde P_{Mg} representa a margem de perdas em dB.

Existe ainda outra análise de projeto que se baseia no alargamento do pulso óptico devido aos efeitos de dispersão na fibra e resposta temporal dos transmissores e receptores, de forma a verificar se o sistema será capaz ou não de operar na taxa de transmissão de interesse [1; 18].

Uma característica da análise de projeto por penalidade de potência é que os ruídos adicionados ao longo da propagação dos sinais ópticos não são considerados. De modo que considerando os dispositivos e a adição de seus respectivos ruídos, conforme ilustrado na figura 3.1, pode ser que o sinal recebido não atenda ao critério de QoS estabelecido. No capítulo 5, a degradação da relação sinal-ruído óptica ao longo das rotas será abordada em mais detalhes.

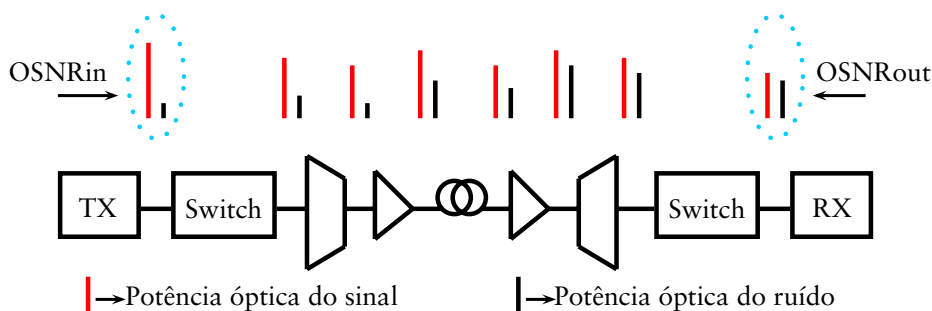


Figura 3.1: Ilustração das perdas, ganhos e adição de ruído na propagação dos sinais ópticos em um enlace.

3.2.1 Considerações das penalidades físicas

O impacto de várias penalidades físicas, no desempenho das redes ópticas transparentes, tem sido considerado por meio das seguintes abordagens: avaliação da SNR, utilizando o fator Q [1], e da OSNR dos sinais. Geralmente, os pesquisadores analisam o desempenho das redes ópticas transparentes considerando a degradação do sinal ao longo dos enlaces pertencentes à rota.

Na referência [9], as penalidades de interferência intracanal no *switch* e de ruído ASE nos amplificadores ópticos são consideradas para avaliação do critério de QoS. Dessa forma, calcula-se a BER da rota determinada a partir da SNR do sinal recebido. As chamadas são bloqueadas caso não haja comprimento de onda disponível ou se a BER do sinal possuir valor acima de um limiar estabelecido. Na referência [44], analisa-se a alocação de recursos dinâmicos em redes translúcidas. Essas redes são caracterizadas pela presença de regeneradores eletrônicos em alguns nós da rede, de modo que são formadas sub-redes transparentes, denominadas de ilhas de transparência. Nessas ilhas são consideradas as penalidades físicas, envolvendo ainda dois aspectos: 1) penalidade de alargamento de pulso, onde são considerados os efeitos da dispersão cromática e de PMD; 2) ruído ASE produzido nos amplificadores e a interferência intracanal produzida no *switch*, sendo cada um desses efeitos modelado separadamente e agregados no destino de modo a calcular a SNR da rota. Na referência [45], analisa-se a capacidade de fornecer proteção às rotas considerando a presença de regeneradores eletrônicos em alguns nós da rede e as penalidades sofridas pelo sinal. As penalidades físicas são consideradas também envolvendo dois aspectos: 1) efeito de PMD através da penalidade de alargamento temporal do pulso óptico; 2) ruído ASE total produzido pelo número de amplificadores percorridos pelo sinal e aplicando um critério de restrição desse efeito, ou seja, admitindo-se um limiar de ruído ASE para a rota estabelecida. Na referência [46], os autores desenvolvem um modelo analítico, baseando-se no fator Q, para os seguintes efeitos calculados separadamente: dispersão da velocidade de grupo⁷, PMD, ruído ASE, assim como os efeitos não-lineares XPM, FWM e SRS, na fibra óptica, considerando um sistema de transmissão com uma taxa de 10 Gbps. O modelo analítico é avaliado em dois conjuntos de enlaces com características de fibra, taxa de transmissão e potência de entrada por canal diferentes.

Nas referências [47; 48], os autores propõem a aplicação de um modelo analítico, baseado no cálculo do fator Q, em dois algoritmos de roteamento cuja métrica é a menor distância, considerando as seguintes penalidades: ruídos balístico e térmico no receptor, ruído ASE no amplificador, XPM e FWM na fibra óptica. O impacto das penalidades físicas é avaliado pela probabilidade de bloqueio das chamadas solicitadas e pelo balanço de carga na rede. A chamada é estabelecida caso exista comprimento de onda disponível, o fator Q da rota determinada esteja acima do limiar estabelecido e o fator Q das chamadas já estabelecidas não decaiam abaixo do limiar caso essa chamada seja estabelecida na rede.

⁷GVD – Group Velocity Dispersion.

Na referência [49], tem-se um dos primeiros trabalhos a abordar a avaliação da OSNR. A OSNR é calculada ao longo de uma rota, considerando o impacto da camada física, utilizando ainda diferentes algoritmos de roteamento para comparar o desempenho da rede. As penalidades consideradas nesse trabalho são: ruído ASE produzido nos amplificadores e a interferência intracanal no *switch*. O modelo proposto se baseia na relação entre a OSNR no receptor, o fator Q e a relação entre as larguras de banda óptica do canal e elétrica do fotodetector, sendo esse modelo válido apenas quando o ruído produzido pelo amplificador é considerado [43]. A interferência intracanal é considerada como penalidade de potência. Na referência [50], propõem-se algoritmos de RWA que consideram as seguintes penalidades físicas: ASE nos amplificadores Raman e à fibra dopada com érbio⁸, interferência multipercursos no amplificador Raman e interferência intracanal no *switch*. O critério de penalidade por alargamento temporal do pulso óptico também é considerado por meio do efeito de PMD. O critério de parada utilizado no algoritmo de RWA é baseado na falta de comprimentos de onda e OSNR, ou PMD, abaixo de um limiar estabelecido. Na referência [51], o modelo para avaliação de desempenho da rede envolve: 1) dispersão cromática residual em cada comprimento de onda, representando penalidade por alargamento temporal do pulso óptico; 2) cálculo da OSNR através do acúmulo de ruído ASE na rota determinada pelo algoritmo de RWA. Nesse trabalho, o enlace corresponde a um conjunto de amplificadores e fibras, de forma que as chamadas são bloqueadas por falta de comprimento de onda, alargamento temporal ou valor da OSNR calculada abaixo do limiar estabelecido. Na referência [52], o cálculo da OSNR é utilizado para avaliar o desempenho de um sistema DWDM de 64 canais com 10 Gbps em um enlace, considerando as seguintes penalidades: os efeitos não-lineares, por meio de aproximações na equação não-linear de Schrödinger, e do ruído ASE produzido nos amplificadores.

Na referência [53], o cálculo da OSNR considera as penalidades de ruído ASE nos amplificadores e a interferência entre canais no *switch*. Um problema de otimização da OSNR em cada comprimento de onda é formulado de modo que todos os comprimentos de onda mantenham um nível de OSNR aceitável, enquanto que a potência óptica de entrada é minimizada.

⁸EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier.

Na referência [54], um algoritmo é proposto, baseado na teoria de jogos e considerando a degradação da OSNR devido ao ruído ASE nos amplificadores, de modo a se obter a maximização da OSNR em cada um dos comprimentos de onda. Na referência [55], a teoria dos jogos é utilizada para controle da potência dos comprimentos de onda nas redes ópticas transparentes, de modo que o processo de otimização da OSNR considera apenas o ruído ASE nos amplificadores como penalidade física.

Diferente dos trabalhos mencionados nesta seção, esta tese considera os seguintes aspectos no roteamento:

1. Efeito de saturação do ganho e ruído ASE produzidos no amplificador óptico, interferência intracanal no comutador óptico, FWM e efeito de PMD na fibra óptica.
2. Todos os efeitos que degradam a qualidade do sinal são considerados em conjunto na degradação da OSNR do sinal óptico recebido no nó destino.
3. As chamadas são bloqueadas por indisponibilidade de comprimento de onda, alargamento temporal do pulso óptico ou OSNR do sinal recebido abaixo de um limiar estabelecido.

No capítulo 5, a obtenção e o uso da OSNR para o processo de roteamento em redes ópticas transparentes serão abordados.

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÃO DAS PENALIDADES FÍSICAS NO PROCESSO DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA

Freqüentemente é necessário mais coragem para ousar fazer certo do que temer fazer errado.

— Abraham Lincoln

Com a utilização das fibras DSF e NZDSF nos sistemas ópticos, menor espaçamento em frequência entre canais e um maior número de sinais transmitidos nos sistemas WDM, o efeito de FWM pode se tornar um limitador para o estabelecimento das chamadas nas rotas determinadas pelos algoritmos de RWA. Hill e colaboradores [56] estudaram o efeito de FWM, teoricamente e experimentalmente, de modo a estimar o seu valor de potência. Shibata e colaboradores [57] utilizaram uma técnica para calcular o efeito de FWM e propuseram uma formulação que incluía a dependência dele com o espaçamento em frequência, comprimento da fibra, dispersão cromática e a curva de dispersão característica.

Song e colaboradores [58] fizeram uma revisão das formulações e propuseram um modelo considerando a atenuação dos sinais, devido à propagação desses na fibra óptica, assim como os efeitos de SPM e XPM na eficiência do efeito de FWM. Enquanto isso, Inoue [59] considerou os ruídos gerados pelos amplificadores e pelo efeito de FWM em um cascadeamento de enlaces, por meio de uma expressão matemática, determinando o intervalo de potência óptica a ser utilizado na entrada do sistema.

A figura de ruído¹ [60], fator de ruído expresso em dB, é um parâmetro importante para se determinar o desempenho de um dispositivo e muitas formulações, baseadas nesse conceito, foram propostas na literatura. Summerfield [61], Obermann e colaboradores [62] calcularam a figura de ruído de um conversor de comprimento de onda baseado em um amplificador óptico a semicondutor². Nesse caso, eles consideraram a potência produzida pelo efeito de FWM como a potência do sinal e o ruído balístico (*shot noise*) como referência para a potência de ruído na entrada do dispositivo. Os valores obtidos da figura de ruído (em torno de 20 dB) foram maiores do que os comumente encontrados nos amplificadores ópticos (em torno de 6 dB). Fonseca e colaboradores [13; 38; 39] propuseram algoritmos de atribuição de comprimento de onda para minimizar o impacto do efeito de FWM nas rotas estabelecidas ou nas rotas a serem admitidas.

Recentemente, Bastos-Filho e Martins-Filho propuseram uma nova formulação que considera as potências produzidas pelo efeito de FWM e o ruído balístico como componentes de potência de ruído [16]. De fato, essa formulação permite quantificar a degradação do sinal devido aos ruídos interferentes na mesma frequência do sinal óptico propagante. Em [16], definiu-se a figura de ruído da fibra de modo a incluir o efeito de FWM para calcular o desempenho da transmissão dos sinais ópticos, sendo o modelo proposto validado por meio de comparação com resultados simulados em uma ferramenta computacional de simulação de enlaces ópticos [16]. Essa formulação é apresentada no Apêndice A.

¹NF – Noise Figure.

²SOA – Semiconductor Optical Amplifier.

Neste capítulo é proposto um algoritmo para a otimização do processo de alocação de comprimentos de onda em um enlace óptico, minimizando o efeito de FWM e estimando alocações aceitáveis que não comprometam a QoS entre eles.

4.1 Algoritmos utilizados no processo de otimização da alocação de comprimentos de onda

A otimização do processo de alocação de comprimentos de onda, em um enlace óptico, é realizada através da minimização da degradação da SNR do sinal recebido devido ao efeito de FWM e determinação das alocações aceitáveis que não comprometam a QoS entre eles (alocações satisfatórias). Dois algoritmos são utilizados para comparar o desempenho computacional em termos de **cálculo de força** na obtenção das soluções, são eles: o exaustivo e o genético. O primeiro examina todas as possibilidades de alocações de comprimento de onda, para uma grade de canais e comprimentos de onda alocáveis definidos previamente, enquanto que o segundo, utilizando o processo evolucionário nas soluções possíveis, executa um esforço computacional menor para determinar a melhor alocação de comprimentos de onda.

Inicialmente, o número de comprimentos de onda disponíveis na grade (N_T) e o número de alocáveis (N_I) são definidos. Utiliza-se a codificação binária para representar uma alocação de comprimentos de onda (indivíduo), de modo que o dígito 0 representa comprimento de onda inativo e o dígito 1 significa comprimento de onda ativo na grade. Cada um dos comprimentos de onda ativos é indicado por uma seta na figura 4.1 e possui seu valor de SNR correspondente.

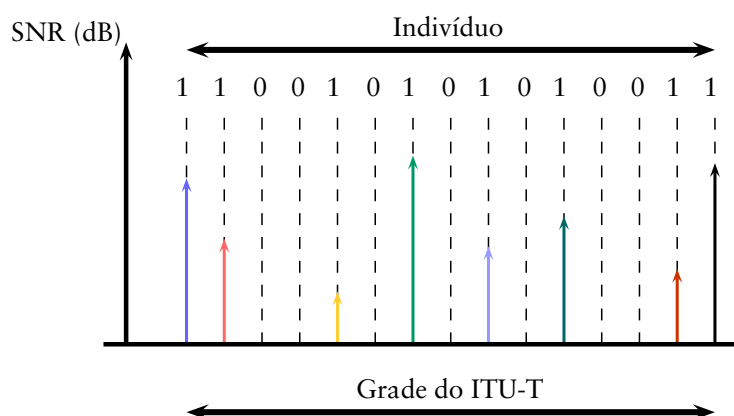


Figura 4.1: Alocação de comprimentos de onda codificada, utilizando o padrão da grade do ITU-T, $N_T = 15$ e $N_I = 8$.

Cada indivíduo é caracterizado pelo menor valor de SNR_{out} dentre os valores obtidos para cada comprimento de onda ativo pertencente à alocação (SNR_{ζ}). Um indivíduo que possui valor de SNR_{ζ} maior do que outro é considerado mais forte. O processo de calcular a SNR_{out} de todos os comprimentos de onda ativos na alocação e determinar a SNR_{ζ} é definido como **cálculo de força**³(C_F) e envolve os procedimentos descritos no Apêndice A.

De modo a satisfazer a proposta de QoS adotada neste trabalho, o valor de SNR_{ζ} encontrado deve ser maior do que o valor de SNR_{Th} estabelecido.

As melhores alocações e as alocações satisfatórias, em termos de QoS, são obtidas com a utilização de um GA. A descrição do GA simples e suas características mais importantes são descritas no Apêndice B. Para determinação do critério de convergência do GA e comparação dos resultados obtidos, utiliza-se o algoritmo exaustivo.

O algoritmo exaustivo encontra todas as alocações possíveis para um dado par de parâmetros (N_T e N_I) e executa o seguinte número de cálculos de força:

$$C_F = C_{F-Ex} = \frac{N_T!}{(N_T - N_I)!N_I!}. \quad (4.1)$$

Para um dado par de parâmetros (N_T e N_I), o GA cria uma população inicial e determina o valor de SNR_{ζ} para cada indivíduo correspondente. Caso algum indivíduo satisfaça o critério de parada, ou o processo evolucionário esteja na última geração, o melhor dentre eles é retornado como solução. Caso contrário o GA evolui a população através das operações de cruzamento, mutação e seleção, conforme pseudo-código ilustrado na figura 4.2.

As operações realizadas pelo GA são descritas a seguir:

1. **Determinação da população inicial:** Com N_T e N_I definidos, os indivíduos são criados aleatoriamente, ou seja, N_I posições na grade de comprimentos de onda são aleatoriamente selecionadas de modo que os transmissores ópticos são ativados nos comprimentos de onda associados. Dessa forma, um conjunto (população) com P indivíduos possíveis é criado inicialmente.
2. **Operação de cruzamento:** Formada a população, todos os pares possíveis de indivíduos são examinados sequencialmente, ou seja, $\frac{P(P-1)}{2}$ pares de indivíduos têm a possibilidade de realizarem a operação de cruzamento de acordo com uma probabilidade determinada (P_{Cr}).

³CF – Cálculo de Força.

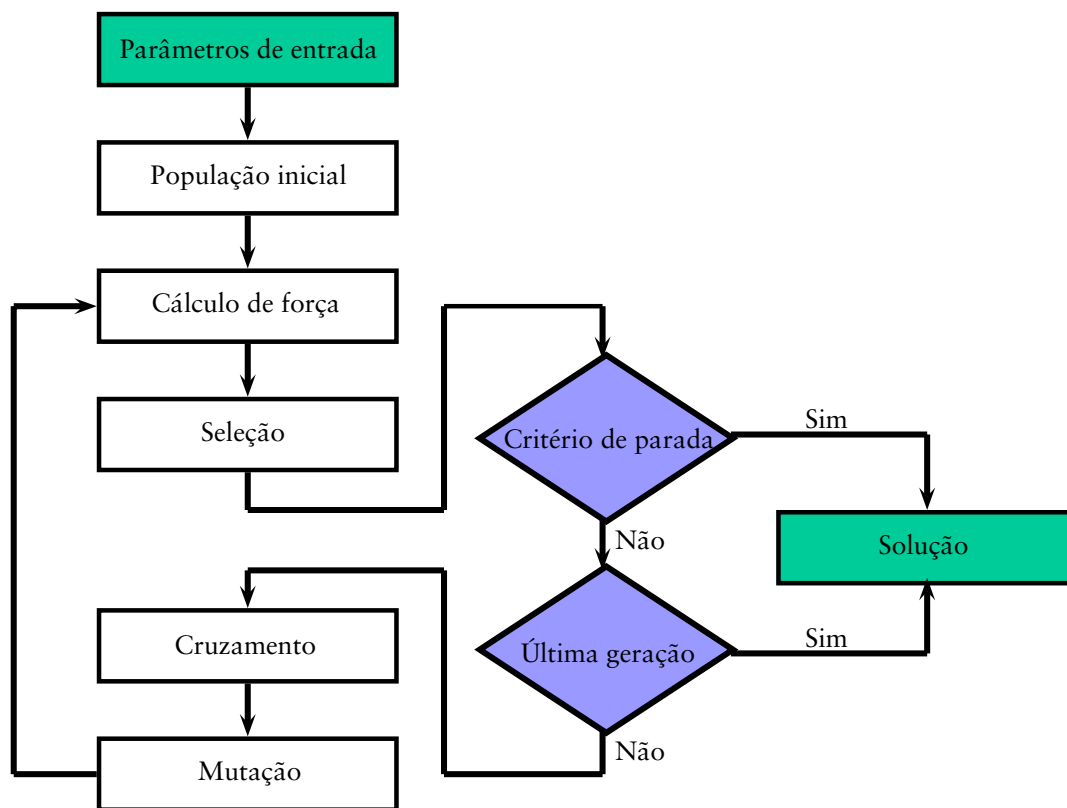


Figura 4.2: Algoritmo genético utilizado no processo de otimização da atribuição de comprimento de onda em um enlace óptico.

Dado um par de indivíduos (I_1 e I_2), a operação de cruzamento é realizada da seguinte forma: seleciona-se aleatoriamente um transmissor cujo estado esteja ativo em I_1 e inativo em I_2 , efetuando-se uma troca de estados entre eles. Novamente, a operação de troca de estados em um transmissor é realizada, agora considerando-se a seleção aleatória de um transmissor que esteja inativo em I_1 e ativo em I_2 . Após o cruzamento, indivíduos resultantes dessa operação são adicionados   população desde que sejam diferentes dos já existentes.

3. **Operação de mutação:** Todos os indivíduos gerados após a operação de cruzamento, e os já pertencentes à população, têm potencial para serem selecionados para a operação de mutação. Para isso, cada um deles é selecionado de acordo com uma probabilidade determinada (P_{Mt}). Dessa forma, para o indivíduo selecionado, as posições dos transmissores, referentes aos estados ativo e inativo na grade de comprimentos de onda, são escolhidas aleatoriamente e trocadas entre si, formando assim um novo indivíduo na população.

4. **Operação de seleção:** Nesta operação, os P indivíduos com valores de SNR_z mais elevados da população são selecionados para compor uma nova população e dar continuidade ao processo evolucionário, ou seja, repetição das operações anteriores até que se atinja o critério de parada estabelecido ou o número de gerações (G) atinja o valor limite.

A expressão que fornece o valor de C_F para o GA depende dos parâmetros genéticos (P , G , P_{Cr} e P_{Mt}). Para determinação de C_F , conforme ilustrado na figura 4.2, são realizados P cálculos de força para todos os indivíduos que compõe a população inicial, e posteriormente, apenas nos indivíduos que sofrem cruzamento ($2PP_{Cr}$) e mutação ($(2PP_{Cr} + P)P_{Mt}$) em um número de gerações especificado (G). Dessa forma, o número de cálculos de força executados pelo GA corresponde à seguinte expressão:

$$C_F = C_{F-GA} = P \{1 + G [2P_{Cr} + (1 + 2P_{Cr}) P_{Mt}]\}. \quad (4.2)$$

O GA pode ser utilizado para encontrar a melhor alocação ou as alocações satisfatórias em termos de QoS. No primeiro caso, o GA utiliza como critério de parada a melhor solução encontrada pelo algoritmo exaustivo. No segundo caso, utiliza o valor de SNR_{Th} estabelecido.

4.1.1 Resultados

Considerando os parâmetros informados na tabela 4.1, $N_T = 16$, $N_I = 8$ e diferentes espaçamentos em frequência entre os canais, o algoritmo exaustivo pode ser utilizado para determinar a SNR_z da melhor alocação, para uma variação na potência de entrada por canal ($P_{\lambda-in}$).

A figura 4.3 mostra a máxima potência de entrada por canal, para cada espaçamento em frequência, de modo que o critério de QoS ainda seja satisfeito ($\text{SNR}_{Th} = 22,97$ dB). Por exemplo, considerando-se $\Delta f = 25$ GHz, tem-se que $P_{\lambda-in} \approx -12,6$ dBm. Para $\Delta f = 50$ GHz, tem-se $P_{\lambda-in} \approx -9,3$ dBm, enquanto que para $\Delta f = 100$ GHz, tem-se $P_{\lambda-in} \approx -5,7$ dBm.

Tabela 4.1: Parâmetros utilizados nas simulações.

| Parâmetro | Valor | Definição |
|-----------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| P_{Cr} | 50 % | Probabilidade de cruzamento. |
| P_{Mt} | 5 % | Probabilidade de mutação. |
| d | 19,82 km | Comprimento da fibra óptica. |
| SNR_{in} | 38,50 dB | Relação sinal-ruído da entrada. |
| SNR_{Th} | 22,97 dB | Relação sinal-ruído utilizada como critério de QoS. |
| Δf | 50 GHz | Espaçamento em frequência entre canais. |
| λ_i | 1550,12 nm | Comprimento de onda inicial da grade. |
| λ_{DSF} | 1544 nm | Comprimento de onda cujo valor do coeficiente de dispersão é igual a zero para fibra DSF. |

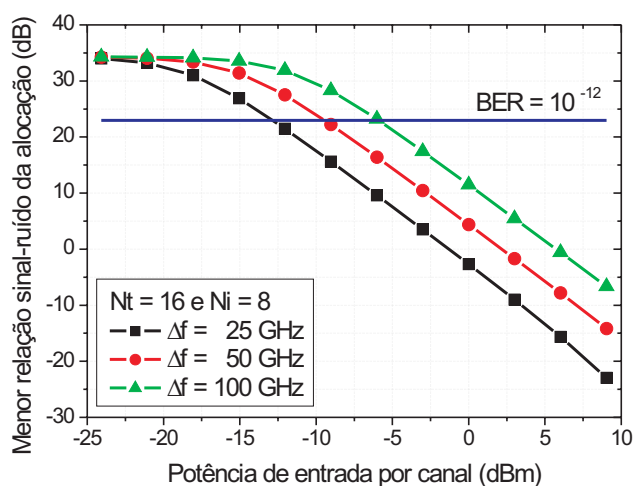


Figura 4.3: Menor relação sinal-ruído da melhor alocação de comprimentos de onda obtida com o algoritmo exaustivo, considerando uma variação na potência de entrada por canal e diferentes espaçamentos em frequência entre os canais.

Considerando as redes ópticas transparentes e o tráfego dinâmico, os comprimentos de onda são adicionados e retirados para estabelecer e finalizar chamadas também dinamicamente, de modo que essas operações dependem da capacidade dos enlaces e dos equipamentos WDM utilizados.

Dessa forma, a partir da melhor alocação de comprimentos de onda, obtida pelo algoritmo exaustivo para $N_T = 16$ e $N_I = 7$, o comportamento da SNR_c de cada alocação pode ser analisado quando um novo comprimento de onda for adicionado para se estabelecer uma nova chamada.

A tabela 4.2 ilustra as diferentes alocações e seus respectivos valores de SNR_{ζ} . Pode-se perceber que a melhor alocação para $N_I = 7$ tem $\text{SNR}_{\zeta} \approx 26,90$ dB. Esse valor está acima da SNR_{Th} e representa uma alocação satisfatória. Adicionando-se um comprimento de onda, estabelece-se uma nova alocação, agora com $N_I = 8$. Por exemplo, ativando-se $\lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}$ ou λ_{14} , obtêm-se novas alocações que não satisfazem o critério de QoS estabelecido. Pode-se ainda perceber que a melhor alocação para $N_I = 8$ satisfaz o critério de QoS e a mesma é diferente da melhor alocação para $N_I = 7$. Isso significa que adicionar aleatoriamente comprimentos de onda, a partir da melhor alocação para um dado N_I , pode afetar a QoS de todos os outros comprimentos de onda da alocação quando o efeito de FWM é considerado. Desse modo, é importante adicionar comprimentos de onda em posições pré-determinadas e modificar outras na alocação de modo a minimizar o impacto do efeito de FWM, como pode ser percebido nas melhores alocações para $N_I = 7$ e $N_I = 8$.

Tabela 4.2: Análise da adição de um comprimento de onda a partir da melhor alocação para $N_I = 7$, considerando $P_{\lambda\text{-in}} = -10$ dBm.

| Alocação de comprimento de onda | Condição | SNR_{ζ} (dB) |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 1100010010001011 | Melhor alocação ($N_I = 7$) | 26,90 |
| 1110010010001011 | λ_3 ativo | 18,67 |
| 1101010010001011 | λ_4 ativo | 22,38 |
| 1100110010001011 | λ_5 ativo | 20,72 |
| 1100011010001011 | λ_7 ativo | 20,52 |
| 1100010110001011 | λ_8 ativo | 21,56 |
| 1100010011001011 | λ_{10} ativo | 21,33 |
| 1100010010101011 | λ_{11} ativo | 22,18 |
| 1100010010011011 | λ_{12} ativo | 21,36 |
| 1100010010001111 | λ_{14} ativo | 17,12 |
| 0101001100100111 | Alocação aleatória ($N_I = 8$) | 18,95 |
| 1100101000101101 | Melhor alocação ($N_I = 8$) | 24,03 |

Considerando a melhor alocação para $N_I = 8$, um comprimento de onda pode ser retirado e diferentes alocações podem ser geradas. A tabela 4.3 ilustra essas alocações e verifica-se que todas elas possuem SNR_{ζ} acima da SNR_{Th} , representando assim alocações satisfatórias em termos de QoS. Entretanto, quando se gera uma alocação aleatória, ou seja, atribui-se aleatoriamente comprimentos de onda na grade, a mesma pode não satisfazer o critério de QoS estabelecido.

Tabela 4.3: Análise da retirada de um comprimento de onda a partir da melhor alocação para $N_I = 8$, considerando $P_{\lambda-in} = -10$ dBm.

| Alocação de comprimento de onda | Condição | SNR _c (dB) |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 1100101000101101 | Melhor alocação ($N_I = 8$) | 24,03 |
| 0100101000101101 | λ_1 inativo | 23,51 |
| 1000101000101101 | λ_2 inativo | 23,81 |
| 1100001000101101 | λ_5 inativo | 24,80 |
| 1100100000101101 | λ_7 inativo | 24,45 |
| 1100101000001101 | λ_{11} inativo | 26,71 |
| 1100101000100101 | λ_{13} inativo | 25,94 |
| 1100101000101001 | λ_{14} inativo | 24,78 |
| 1100101000101100 | λ_{16} inativo | 25,09 |
| 0100001100100111 | Alocação aleatória ($N_I = 7$) | 19,26 |
| 1100010010001011 | Melhor alocação ($N_I = 7$) | 26,90 |

4.2 Otimização dos parâmetros do algoritmo genético

O tamanho da população (P) e o número de gerações (G) são parâmetros importantes dos algoritmos genéticos e seus valores influenciam no número de cálculos de força que o algoritmo realiza para encontrar a solução de um problema.

Dessa forma, encontrar valores ótimos para esses parâmetros não é uma tarefa fácil, pois dependem do problema a ser resolvido, e no caso das alocações, dependem de N_T e N_I .

Um conjunto de simulações com o GA foi realizado, considerando-se diferentes configurações de N_T e N_I , de modo a se obter valores otimizados dos parâmetros P e G . Para essas simulações, o critério de parada utilizado foi a melhor alocação encontrada pelo algoritmo exaustivo, onde o número de gerações e de cálculos de força necessários para obtê-la foi registrado. Os parâmetros utilizados nas simulações estão informados na tabela 4.1 e considerou-se $P_{\lambda-in}$ igual a -10 dBm.

As figuras 4.4(a) e 4.4(b) mostram a evolução da média desses parâmetros em função de P , para $N_T = 20$ e $N_I = 10$, onde cada ponto representa uma média de 100 simulações realizadas. A figura 4.4(a) mostra que o valor ótimo para P , que minimiza C_F , é aproximadamente igual a 85, enquanto que a figura 4.4(b) mostra que para G é 37. Entretanto, ambas figuras mostram que tanto C_F quanto G têm pouca dependência com P , para valores maiores que 60.

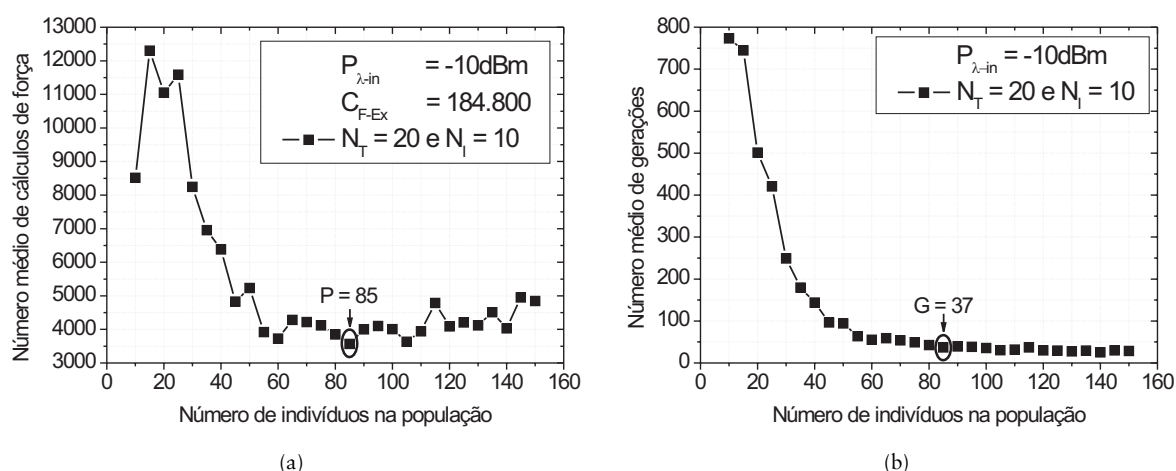


Figura 4.4: Resultado das simulações para: (a) número médio de cálculos de força e (b) número médio de gerações, em função do número de indivíduos da população, considerando $N_T = 20$, $N_I = 10$ e $P_{\lambda-in} = -10\text{dBm}$.

Simulações similares foram realizadas considerando-se as seguintes configurações de N_T/N_I : 12/6, 16/8 e 20/10. Os resultados estão ilustrados na tabela 4.4. Essa tabela mostra também o parâmetro R_{Ex-GA} , que é a relação entre o número de cálculos de força executados pelo algoritmo exaustivo e pelo genético. Dessas simulações, conclui-se que se P e G forem iguais a 100 para qualquer configuração, C_F permanecerá próximo do valor mínimo.

Tabela 4.4: Parâmetros genéticos otimizados.

| Configuração | P_{otimo} | G_{otimo} | R_{Ex-GA} |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
| $N_T = 12$ e $N_I = 6$ | 30 | 11 | 2,42 |
| $N_T = 16$ e $N_I = 8$ | 50 | 18 | 12,88 |
| $N_T = 20$ e $N_I = 10$ | 85 | 37 | 51,77 |

Para uma configuração menor ($N_T = 12$ e $N_I = 6$), R_{Ex-GA} é igual a 2,42, ou seja, o GA realiza menos da metade do número de cálculos de força executados pelo algoritmo exaustivo para encontrar a melhor alocação de comprimentos de onda. Considerando-se agora configurações maiores (16/8 e 20/10), o GA amplia essa vantagem, em termos de número de cálculos de força, uma vez que realiza uma percentagem menor de cálculos de força para encontrar a mesma solução que o exaustivo.

Embora os valores encontrados ($P = 100$ e $G = 100$) minimizem o número de cálculos de força para se encontrar as melhores alocações nas médias e grandes configurações, pode ser que para as pequenas, o GA execute cálculos desnecessários na busca da melhor alocação.

De modo a evitar essa possibilidade, um pseudo-código foi desenvolvido de forma a otimizar a escolha do GA quanto aos parâmetros ótimos de P e G , considerando-se pequenas, médias e grandes configurações. O pseudo-código está ilustrado na figura 4.5 e realiza os seguintes procedimentos: informam-se os parâmetros de entrada da configuração e do processo evolucionário (N_T , N_I , P_{Cr} e P_{Mt}). Depois, calcula-se o número de cálculos de força executados pelo algoritmo exaustivo por meio da equação (4.1).

Nessa etapa, o parâmetro inicial utilizado pelo GA ($P = 100$) é comparado com o número de cálculos de força executados pelo algoritmo exaustivo (C_{F-Ex}). Se C_{F-Ex} for menor do que 100, P se torna igual ao valor de C_{F-Ex} e G a zero. Caso contrário, se C_{F-Ex} for maior que 100, P se torna igual a 100 e G assume um valor igual a G_0 ou a 100, onde G_0 é a parte inteira do número encontrado pela seguinte expressão, obtida a partir da equação (4.2):

$$G_0 = \left(\frac{C_{F-Ex}}{P} - 1 \right) \frac{1}{2P_{Cr} + P_{Mt}(1 + 2P_{Cr})}. \quad (4.3)$$

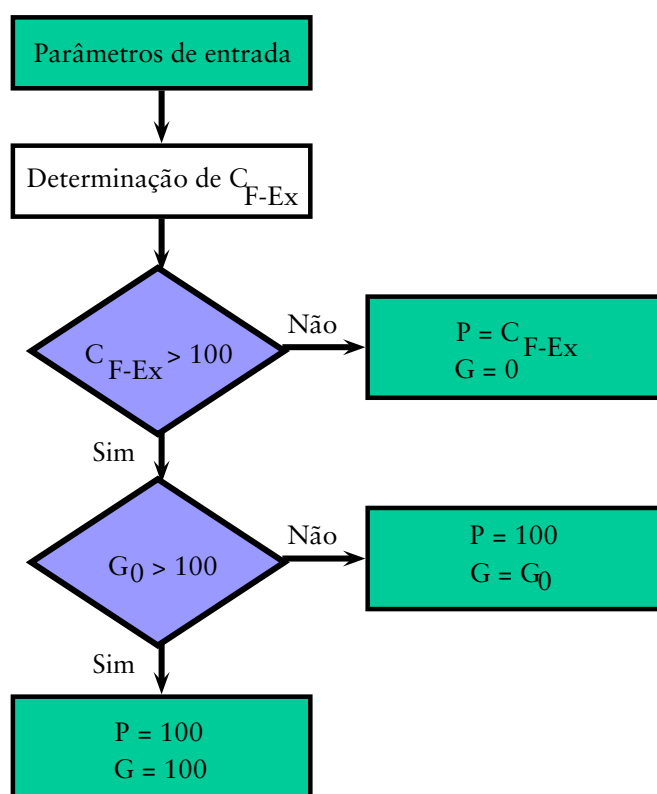


Figura 4.5: Pseudo-código que otimiza a determinação de P e G para o algoritmo genético no processo de atribuição de comprimento de onda, considerando qualquer configuração de N_T e N_I .

Esse pseudo-código simples garante que o GA obtenha as melhores alocações, considerando qualquer configuração de N_T e N_I , realizando-se menor esforço computacional, em termos de cálculo de força, em relação ao algoritmo exaustivo.

4.2.1 Resultados

Considerando o tráfego dinâmico na rede óptica transparente, é necessário se determinar alocações de comprimentos de onda que satisfaçam o critério de QoS. Nessa situação é mais interessante obter alocações satisfatórias, em termos de QoS, do que a melhor alocação. Essas alocações podem ser obtidas utilizando o GA, adotando como critério de parada um valor mínimo de SNR que garanta QoS, ou seja, SNR_{ζ} igual a 22,97 dB. A figura 4.6 ilustra o número médio de gerações e de cálculos de força executados pelo GA, de modo a se obter alocações satisfatórias para três configurações diferentes, considerando uma variação na potência de entrada por canal. O número de cálculos de força executados pelo algoritmo exaustivo é informado a título de comparação com o GA.

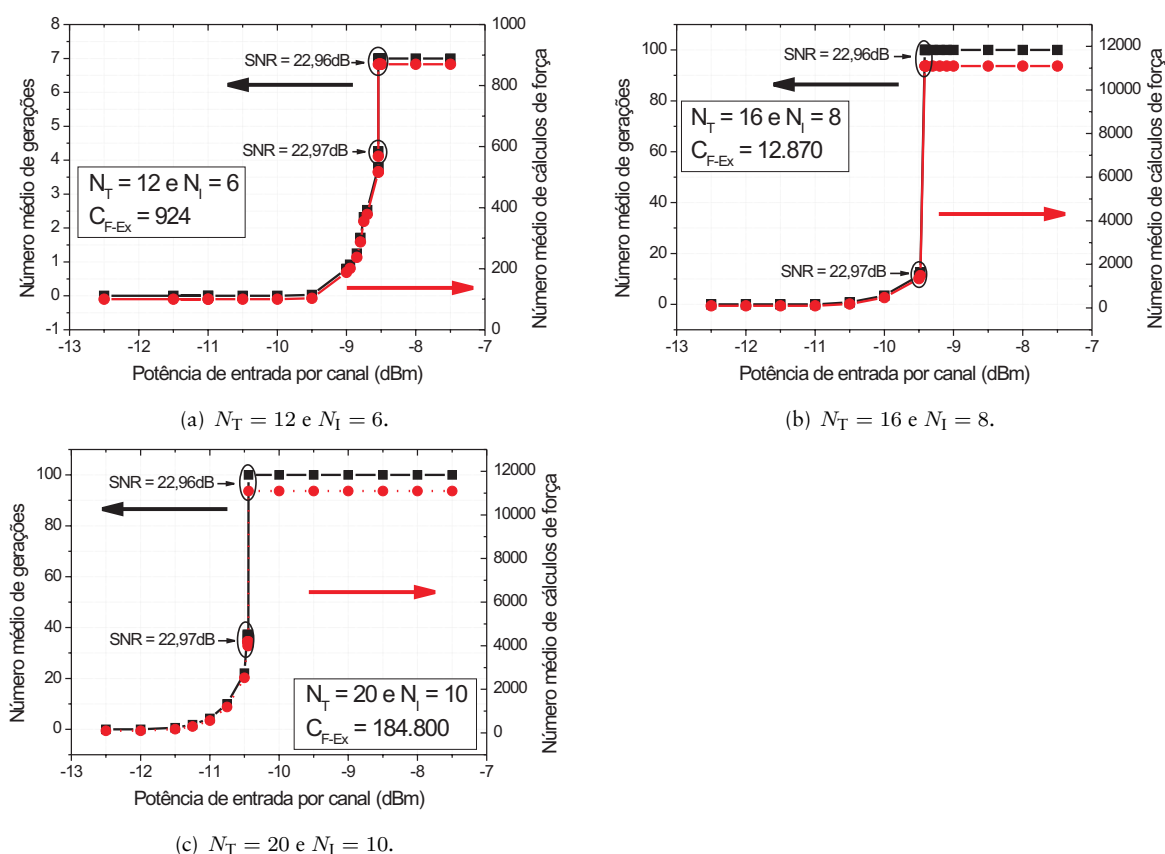


Figura 4.6: Número médio de gerações e de cálculos de força executados pelo algoritmo genético em função de uma variação na potência de entrada por canal, considerando diferentes configurações.

Pode-se perceber, da figura 4.6, que o GA encontra alocações satisfatórias na população inicial ($G = 0$), quando são considerados baixos valores de potência de entrada por canal. Isso ocorre porque o efeito de FWM se torna desprezível para esta faixa de potência. Na medida em que $P_{\lambda\text{-in}}$ aumenta, o efeito de FWM se torna relevante de modo que o GA necessita de mais gerações para se determinar alocações satisfatórias. A figura 4.6 também mostra o valor obtido de SNR_{ζ} da última alocação satisfatória. Essa alocação ocorre em $-8,54$ dBm para $N_T = 12$ e $N_I = 6$, $-9,48$ dBm para $N_T = 16$ e $N_I = 8$, e $-10,44$ dBm para $N_T = 20$ e $N_I = 10$. Para potências mais altas, o GA não encontra mais uma alocação satisfatória, no entanto, em qualquer configuração, não realiza um número de cálculos de força maior que o algoritmo exaustivo.

A figura 4.7 mostra o valor de SNR_{ζ} das melhores alocações de comprimentos de onda, obtidas com o algoritmo exaustivo, em função de uma variação da potência de entrada por canal, considerando-se diferentes configurações. Como esperado, o valor de SNR_{ζ} diminui com o aumento da potência, uma vez que o efeito de FWM se torna mais prejudicial. Para potências ópticas abaixo de -25 dBm por canal, o efeito de FWM pode ser desprezado e o valor de SNR_{ζ} é afetado unicamente pela atenuação da fibra óptica. Os valores de potência, de modo a se obter um valor de SNR_{ζ} no limite aceitável de QoS, são muito próximos dos obtidos com o GA, conforme os resultados ilustrados na figura 4.6.

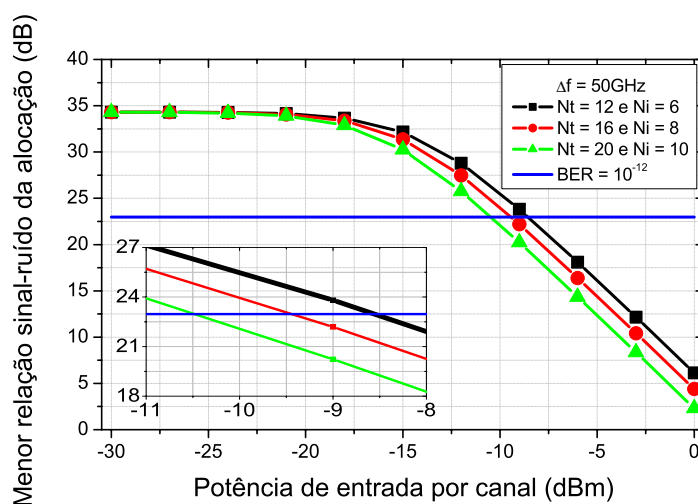


Figura 4.7: Menor relação sinal-ruído da melhor alocação de comprimentos de onda obtida com o algoritmo exaustivo, em função de uma variação da potência de entrada por canal, considerando diferentes configurações.

No entanto, a figura 4.7 mostra que a otimização realizada nos parâmetros genéticos torna o GA mais eficiente na busca das alocações satisfatórias, até mesmo quando tais soluções são difíceis de se determinar, como no caso de potências mais elevadas. Isso porque para essa faixa de potência, existe um valor determinado onde a única solução satisfatória é a melhor alocação, o qual pode ser determinada pelo GA durante o processo evolucionário.

CAPÍTULO 5

MODELAGEM DAS PENALIDADES FÍSICAS NAS REDES ÓPTICAS

Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais seguro para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.

— Thomas Edison

Em redes ópticas transparentes comutadas por circuito, para cada chamada solicitada, um comprimento de onda é atribuído em cada enlace pertencente à rota determinada pelo algoritmo de roteamento. No entanto, se a rede não possui capacidade de conversão de comprimentos de onda em seus nós, o mesmo comprimento de onda deve ser atribuído em todos os enlaces [1; 8].

Utilizar um algoritmo de RWA apropriado e obter um valor de OSNR aceitável, em termos de QoS, representam desafios no gerenciamento das redes ópticas transparentes. De um modo geral, as principais penalidades físicas que causam degradação na OSNR são as seguintes: efeito de saturação do ganho e potência de ruído ASE produzida nos amplificadores ópticos, interferência intracanal na saída do *switch*, dispersão cromática, PMD e efeitos não lineares presentes nas fibras ópticas [6–9; 9–15; 63–66].

Nos últimos anos, foram desenvolvidos novos algoritmos de RWA que consideram o impacto das penalidades físicas nas redes ópticas. Tais pesquisas objetivam minimizar a degradação da QoS dos sinais devido à presença dos ruídos causados por: ASE [7; 9; 66], interferências [9; 66; 67], dispersão cromática [68], cascata de filtros ópticos [68] e efeito de FWM [38; 66]. Esses trabalhos também fornecem resultados, com melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio das chamadas solicitadas, em comparação com os algoritmos que consideram apenas características da camada de rede.

5.1 Modelagem das penalidades físicas para uma rota

O modelo analítico, desenvolvido neste trabalho, quantifica a degradação da OSNR ao longo da propagação do sinal nas redes ópticas transparentes. O impacto das penalidades, relacionadas à camada física, é considerado por meio da avaliação quantitativa das potências ópticas do sinal e do ruído no nó destino, ambas afetadas por ganhos e perdas ao longo da rota. Além disso, alguns dispositivos adicionam ruído durante a propagação dos sinais, tais como:

Amplificadores ópticos: através da potência de ruído ASE e da diminuição do ganho devido ao efeito de saturação;

Switch: através da interferência intracanal devido ao isolamento não-ideal entre suas portas;

Fibras ópticas: através do ruído devido ao efeito de FWM e do alargamento temporal do pulso óptico devido ao efeito de PMD.

Neste trabalho, a dispersão cromática é desprezada considerando que o parâmetro de GVD é compensado em todos os enlaces da rede.

Os dispositivos que compõem o enlace óptico, para nós adjacentes considerados na formulação desenvolvida, são os seguintes: transmissor, *switch*, multiplexador, amplificador óptico de potência (*booster*), fibra óptica, pré-amplificador óptico, demultiplexador e receptor, ilustrados na figura 5.1.

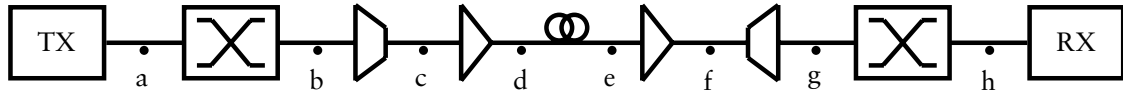


Figura 5.1: Configuração do enlace contendo os dispositivos considerados na formulação desenvolvida para nós adjacentes.

De **a** até **h**, têm-se pontos de avaliação, onde 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 na entrada do sistema (N_{in}). A relação entre P_{in} e N_{in} define a OSNR do transmissor ou a 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 a interferência intracanal adicionada na saída do *switch*. Isso ocorre porque uma pequena quantidade de potência é adicionada ao sinal propagante, no mesmo comprimento de onda, devido ao não-isolamento ideal do dispositivo. A potência de ruído produzida por esse efeito, em cada *switch*, é dada por [1]:

$$N_{Sw} = \varepsilon \sum_{j=1}^n P_{Sw_j}, \quad (5.1)$$

onde P_{Sw_j} é a potência óptica do sinal presente na j -ésima porta de entrada, ε representa o fator de isolamento e n 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 ASE produzido 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 ASE pode ser quantificado como [69]:

$$N_{Amp} = P_{ASE} = \frac{hfB_oG_{Amp}F_{Amp}}{2}, \quad (5.2)$$

onde h é a constante de Planck, f representa a frequência do sinal, 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.

A figura 5.2 ilustra o ganho e a figura de ruído do amplificador em função da potência óptica de entrada por canal ($P_{\lambda\text{-in}}$), considerando-se um EDFA montado no laboratório do Grupo de Fotônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas (DES) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Os resultados experimentais são típicos dos EDFAs e estão representados por pontos, enquanto que os resultados obtidos das equações (5.3) e (5.4) estão representados por curvas sólidas na figura 5.2. 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), $P_{St} = 15$ dBm, $A_1 = 500$ e $A_2 = 2$ W.

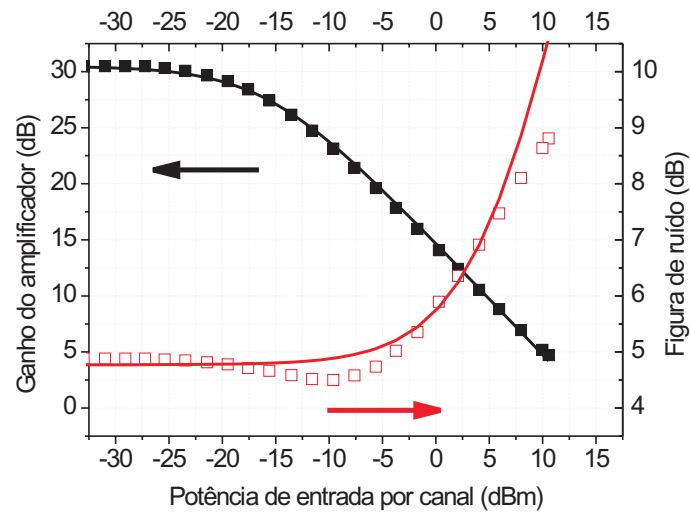


Figura 5.2: Ganho e figura de ruído do amplificador em função da potência de entrada por canal, ambos obtidos de resultados experimentais (pontos) e modelo empírico (curvas sólidas).

O efeito de saturação do ganho é considerado por meio da seguinte expressão:

$$G_{Amp} = \frac{G_{Amp}^0}{1 + \frac{P_{out}}{P_{St}}}, \quad (5.3)$$

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

Pode-se perceber, por meio da equação (5.3), que G_{Amp} depende da potência óptica na entrada do amplificador. Uma vez que F_{Amp} também depende da potência de sinal [43], a seguinte expressão foi obtida empiricamente para determinar o comportamento real de F_{Amp} como função da potência óptica de entrada:

$$F_{\text{Amp}} = F_{\text{Amp}}^0 \left(1 + A_1 - \frac{A_1}{1 + \frac{P_{\text{in}}}{A_2}} \right), \quad (5.4)$$

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.

Nos amplificadores ópticos, tanto o ruído ASE quanto o ganho diminuem com o aumento da potência de entrada [43]. Na figura 5.2, pode-se observar que a figura de ruído aumenta enquanto que o ganho diminui de forma mais acentuada. Dessa forma, utilizando a equação (5.2), verifica-se que a potência de ruído ASE diminui com o aumento da potência de entrada.

No ponto e da figura 5.1, considera-se o ruído produzido pelo efeito de FWM [8]. Esse efeito não-linear depende do número de sinais propagantes, potência de cada um deles, espaçamento em frequência, coeficiente de dispersão e comprimento de onda com valor de dispersão igual a zero. Cada potência produzida pelo efeito de FWM pode ser determinada utilizando-se a seguinte expressão proposta por Song e colaboradores [58]:

$$P_{\text{FWM}}(\lambda) = P_{ijk}(\lambda) = \frac{\eta'}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha d} \left[\frac{(1 - e^{-\alpha d})^2}{\alpha^2} \right], \quad (5.5)$$

onde η' representa a eficiência do efeito de FWM, D o fator de degenerescência, que pode ser igual a 3 (caso degenerado) ou 6 (não-degenerado), γ o coeficiente não-linear, P_i , P_j e P_k as potências de entrada para os sinais nas frequências f_i , f_j e f_k , respectivamente, α o coeficiente de atenuação e d o comprimento da fibra óptica. As frequências dos sinais produzidos pelo efeito de FWM podem ser determinadas por [8]:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \quad (5.6)$$

onde i e j são diferentes de k .

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

$$N_{\text{FWM}} = \sum_{j=1}^m P_{\text{FWM}_j}, \quad (5.7)$$

onde N_{FWM} representa a potência óptica de ruído total devido ao efeito de FWM e P_{FWM_j} uma das m potências ópticas produzidas por esse efeito que incide no comprimento de onda do sinal propagante.

Finalmente, no ponto \mathbf{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:

$$P_{\text{out}} = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}^2} P_{\text{in}}, \quad (5.8)$$

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*, 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:

$$\begin{aligned} N_{\text{out}} = & \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}^2} N_{\text{in}} + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \varepsilon \sum_{j=1}^n P_{\text{Sw}_{1,j}} + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \frac{hf B_o}{2} \left(F_{\text{Amp}_1} + \frac{F_{\text{Amp}_2}}{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_1}} \right) + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \sum_{j=1}^m P_{\text{FWM}_j} + \varepsilon \sum_{j=1}^s P_{\text{Sw}_{2,j}}. \end{aligned} \quad (5.9)$$

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

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

$$P_{\text{out}_i} = \left(\frac{G_{\text{Amp}_{i,1}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{i,2}}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \right) P_{\text{out}_{i-1}} \quad (5.10)$$

e

$$\begin{aligned} N_{\text{out}_i} = & \frac{G_{\text{Amp}_{1,i}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{2,i}}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{out}_{i-1}} + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_{1,i}} e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{2,i}}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \frac{h f B_0}{2} \left(F_{\text{Amp}_{1,i}} + \frac{F_{\text{Amp}_{2,i}}}{e^{-\alpha d_i} G_{\text{Amp}_{1,i}}} \right) + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_{2,i}}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \sum_{j=1}^m P_{\text{FWM}_{i,j}} + \varepsilon \sum_{j=1}^s P_{\text{Sw}_{i+1,j}}, \end{aligned} \quad (5.11)$$

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

Os procedimentos para determinação das equações (5.8), (5.9), (5.10) e (5.11), são descritos em mais detalhes no Apêndice C.

O alargamento temporal do pulso óptico, devido ao efeito de PMD, é considerado por meio da seguinte expressão [70]:

$$\Delta t = B \sqrt{\sum_{j=1}^i (D_j^{\text{PMD}})^2 d_j}, \quad (5.12)$$

onde B representa a taxa de transmissão, D_j^{PMD} o coeficiente de PMD e d_j o comprimento do j -ésimo enlace pertencente à rota. O parâmetro Δt deve ser menor que o máximo percentual do alargamento temporal permitido (δ).

5.2 Descrição do programa desenvolvido para as simulações

As simulações, que consideram o impacto das penalidades físicas, e a variação de parâmetros importantes, no contexto das redes ópticas transparentes, foram realizadas através de um *software* desenvolvido no Grupo de Fotônica do DES/UFPE em conjunto com alunos de iniciação científica da Universidade de Pernambuco (UPE). Esse programa foi escrito em linguagem C++, com recursos visuais, procurando agregar todas as necessidades para realização das simulações, tais como: variação dos parâmetros sistêmicos e obtenção dos resultados.

A figura 5.3 ilustra a tela principal do programa, onde consta a opção de abrir ou configurar uma nova rede na seleção do menu **Arquivo**.

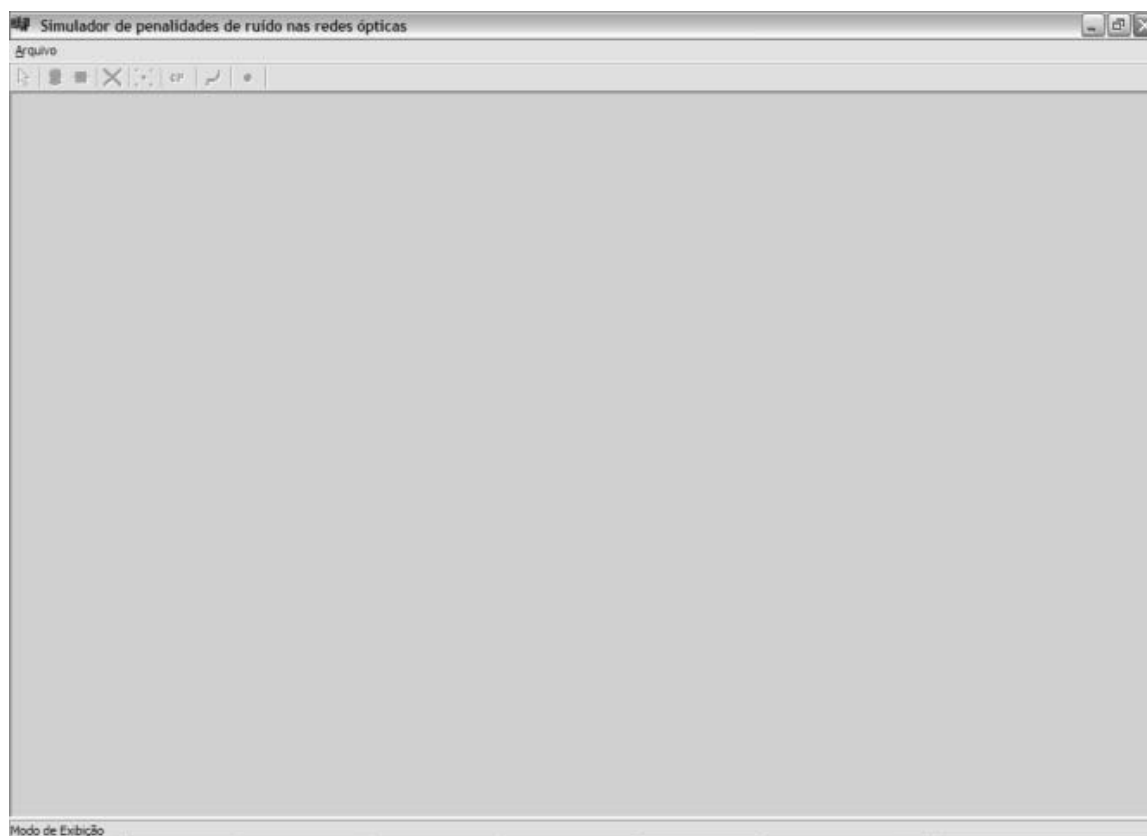


Figura 5.3: Tela principal do programa de simulação desenvolvido.

Após selecionar a opção de criar uma nova rede, ou até mesmo abrir uma rede existente, o programa oferece novas opções ao usuário no menu **Editar**, tais como: editar a rede na tela (excluindo ou inserindo nós e conectando-os por meio de enlaces) e configurar os parâmetros dos nós e dos enlaces para a simulação, conforme ilustrado na figura 5.4.

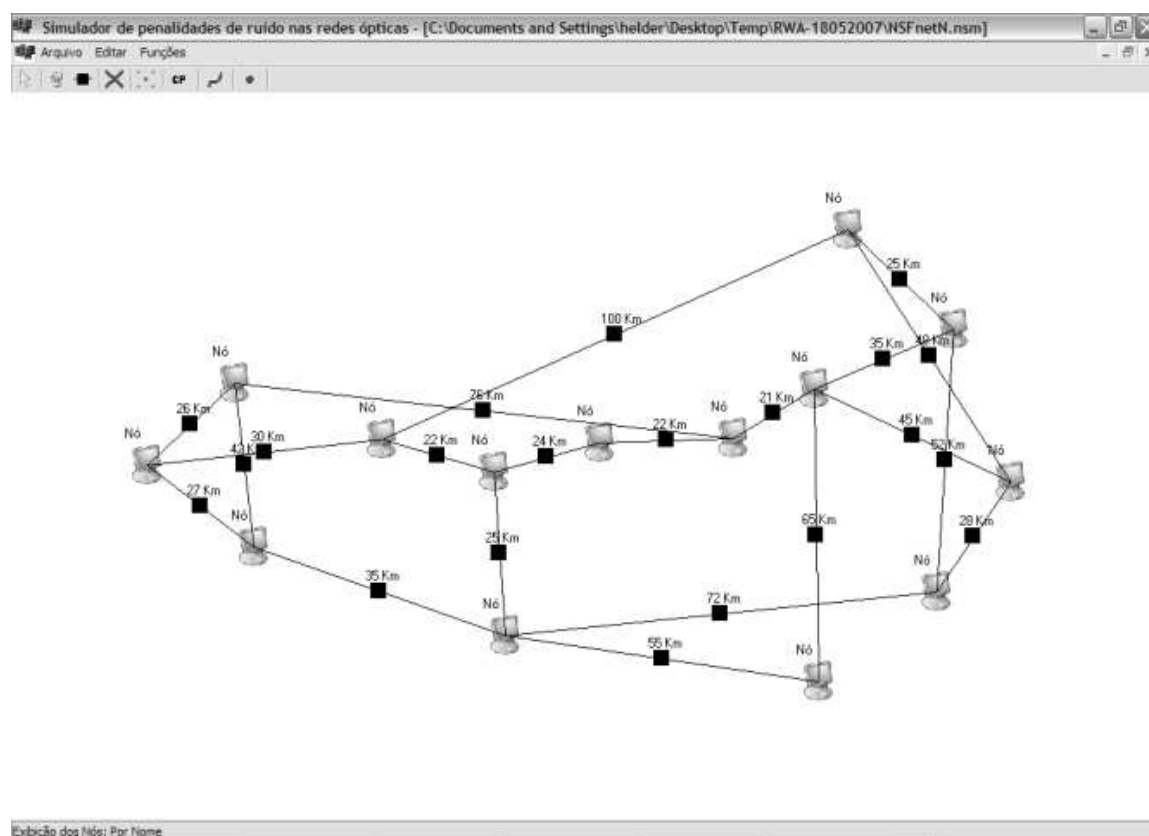


Figura 5.4: Tela de apresentação com a rede a ser simulada.

Na opção do menu **Funções**, pode-se escolher configurar os parâmetros de todos os nós, todos os enlaces, ou modificação de cada dispositivo presente na rede por meio de cliques com o *mouse* na própria tela de apresentação com a rede ilustrada. Dessa forma, quanto aos enlaces, têm-se os seguintes parâmetros: 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 do *booster* e do pré-amplificador, conforme ilustrado na figura 5.5(a). Quanto aos nós, têm-se as seguintes opções de configuração: valor da perda do *switch*, dos parâmetros $OSNR_{in}$ e $P_{\lambda-in}$, conforme ilustrado na figura 5.5(b).

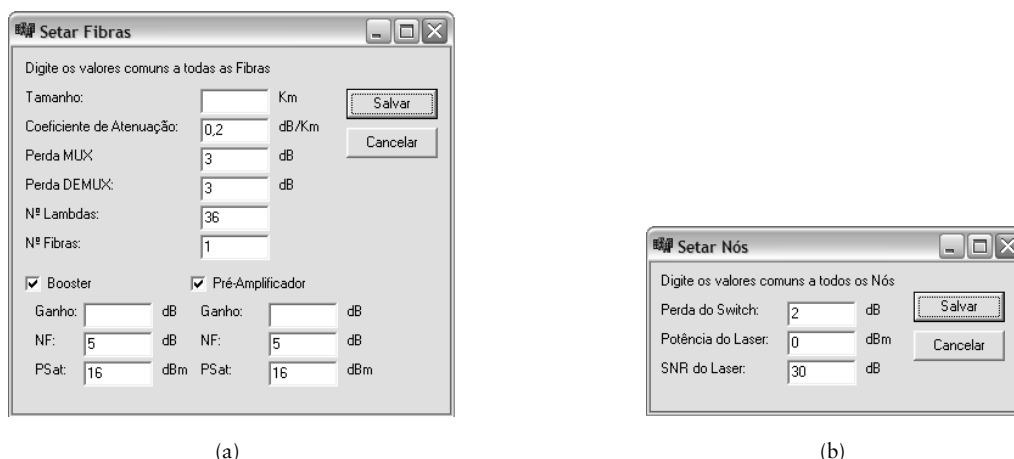


Figura 5.5: Telas de configuração dos parâmetros relativos ao: (a) enlace e (b) nó da rede.

A figura 5.6 ilustra os parâmetros da simulação, ainda na opção do menu **Funções**, tais como: número de chamadas, valor do parâmetro $OSNR_{Th}$, 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 maior que a opção anterior.

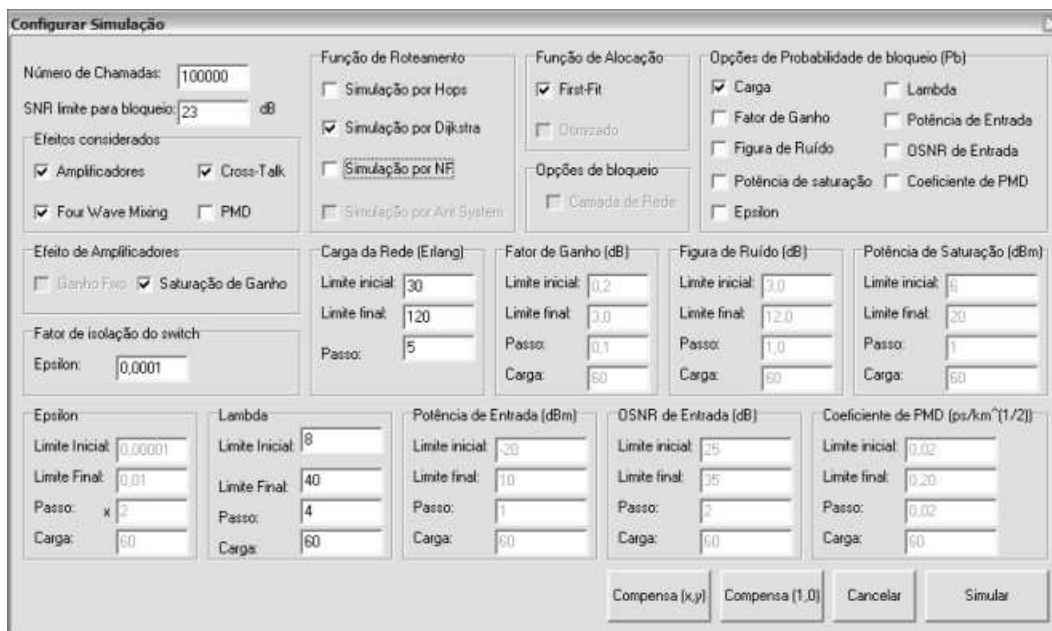


Figura 5.6: Tela de configuração dos parâmetros da simulação.

A figura 5.7 ilustra as próximas telas após clicar na opção **Simular**, ilustrada na figura 5.6.

A figura 5.7(a) informa ao usuário que a simulação está em andamento e uma barra em movimento previne que o usuário espere por uma simulação que, por algum problema, tenha sido perdida de alguma forma. A figura 5.7(b) ilustra o fim da simulação e informa o resultado em forma de gráfico.

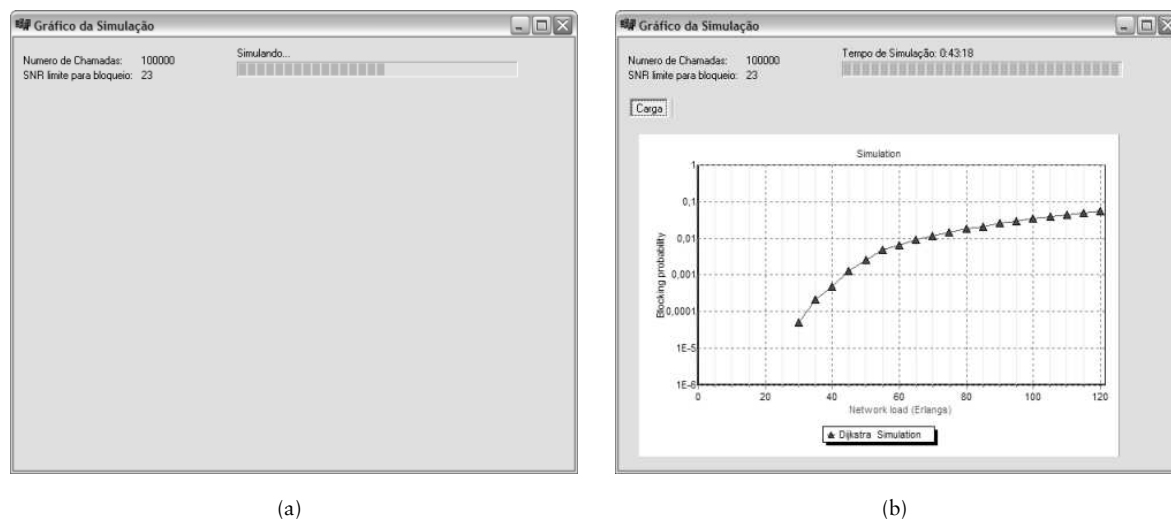


Figura 5.7: Telas informativas quanto ao processo de simulação: (a) em andamento e (b) término da simulação.

5.3 Características das simulações

Para cada simulação realizada, um conjunto de no mínimo 10^5 chamadas é gerado de modo que:

1. A seleção de um par fonte-destino obedece a uma distribuição uniforme.
2. A chegada das chamadas obedece a uma distribuição de Poisson.
3. A duração de cada uma delas obedece a uma distribuição exponencial.

Considera-se que as chamadas, comutadas por circuito, são solicitadas de forma bidirecional, ou seja, os pares fonte-destino 2-3 e 3-2, por exemplo, utilizam duas fibras diferentes entre os respectivos nós, e que a rede não possui capacidade de conversão de comprimento de onda. As chamadas bloqueadas são perdidas e a probabilidade de bloqueio é obtida a partir da relação entre o número de chamadas bloqueadas e o número total de chamadas solicitadas na rede.

Os amplificadores ópticos são configurados, inicialmente, de forma que seus respectivos valores de ganhos não-saturados compensem as perdas ao longo de um enlace. A tabela 5.1 ilustra os parâmetros utilizados nas simulações, onde foram escolhidos de modo que o bloqueio das chamadas aconteça, principalmente, por causa da degradação da OSNR dos sinais propagantes, e não indisponibilidade de comprimentos de onda durante a geração de chamadas, para um valor de carga igual a 60 Erlangs.

Tabela 5.1: Valores padrão dos parâmetros utilizados nas simulações.

| Parâmetro | Valor | Definição |
|-------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| P_{St} | 16 dBm | Potência de saturação na saída do amplificador. |
| $P_{\lambda\text{-in}}(\text{regular})$ | -1 dBm | Potência de entrada por canal considerada na topologia regular. |
| $P_{\lambda\text{-in}}(\text{americana})$ | -3 dBm | Potência de entrada por canal considerada na topologia americana. |
| $OSNR_{in}$ | 30 dB | Relação sinal-ruído óptica na entrada. |
| $OSNR_{Th}$ | 23 dB | Relação sinal-ruído óptica adotada como critério de QoS. |
| B | 40 Gbps | Taxa de transmissão. |
| B_o | 100 GHz | Largura de banda de 3 dB do filtro óptico. |
| W | 36 | Número de comprimentos de onda em cada enlace da rede. |
| Δf | 100 GHz | Espaçamento em 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). |
| 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. |
| ϵ | -40 dB | Fator de isolamento do <i>switch</i> . |
| δ | 10% | Máximo percentual do alargamento temporal permitido do pulso óptico. |
| D^{PMD} | 0,05 ps/km ^{1/2} | Coefficiente de PMD. |
| Carga | 60 Erlangs | Carga da rede. |

A figura 5.8 ilustra as duas topologias utilizadas nas simulações, de modo que a figura 5.8(a) mostra uma topologia regular com 8 nós, enquanto que a figura 5.8(b) ilustra uma topologia irregular com 14 nós, similar à rede NSFnet porém com distâncias entre nós reduzidas. A configuração de cada nó da rede é ilustrada na figura 5.9 e é similar à utilizada na referência [9].

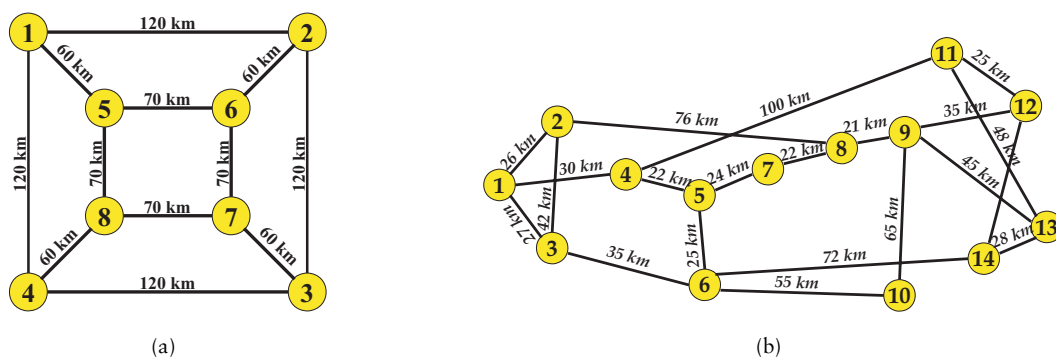


Figura 5.8: Topologias utilizadas nas simulações e suas respectivas distâncias entre os nós: (a) regular e (b) irregular ou americana.

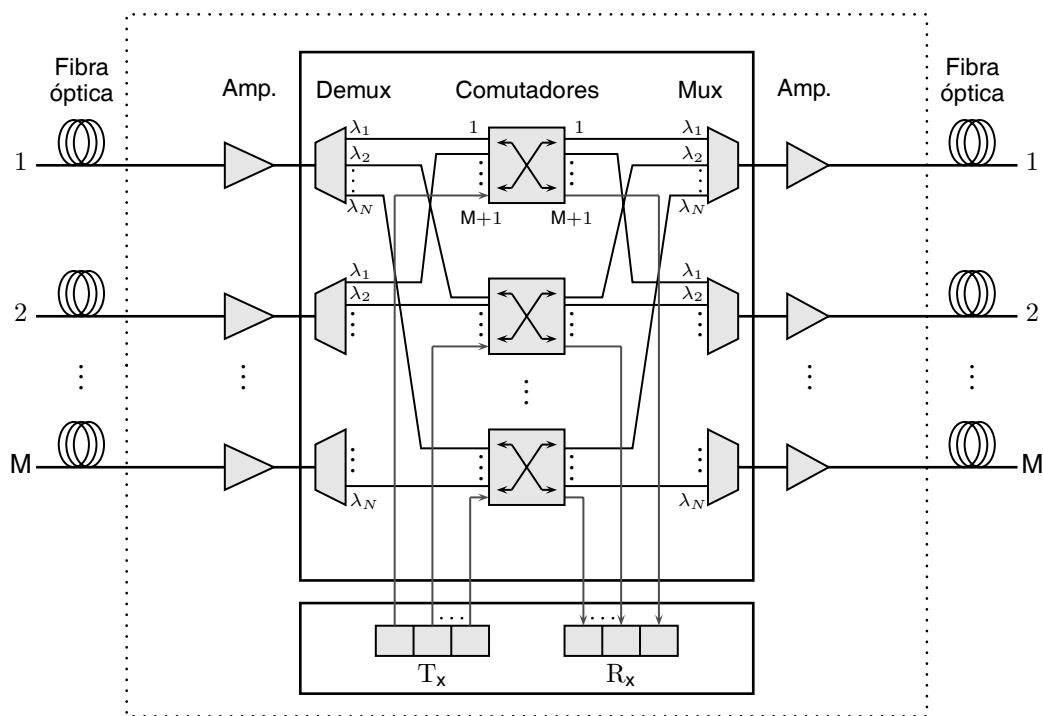


Figura 5.9: Configuração do nó roteador de comprimentos de onda com M fibras e N comprimentos de onda em cada uma delas.

5.3.1 Análise do impacto das penalidades físicas

Nesta seção, o modelo analítico proposto é aplicado como forma de avaliação do impacto das penalidades físicas no desempenho da rede. Calcula-se o impacto das penalidades, em termos de probabilidade de bloqueio das chamadas, conforme pseudo-código ilustrado na figura 5.10. Dessa forma, para cada chamada solicitada, determina-se uma rota por meio do algoritmo de menor distância e atribui-se o primeiro comprimento de onda disponível (*first fit*) [5].

Uma chamada é bloqueada caso não exista comprimento de onda disponível, o alargamento temporal do pulso óptico esteja acima do nível estabelecido, ou ainda se o valor de $OSNR_{out}$, no respectivo comprimento de onda, esteja abaixo do valor de $OSNR_{Th}$.

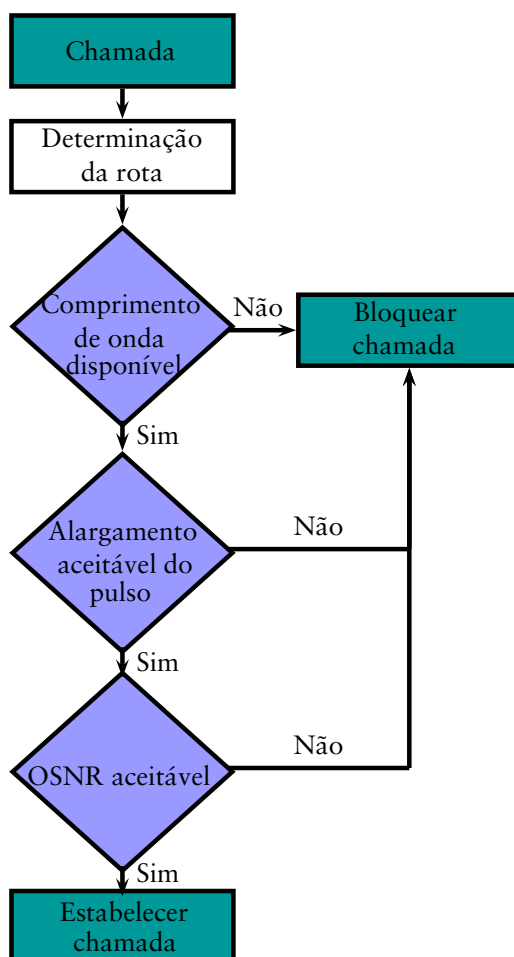


Figura 5.10: Pseudo-código do algoritmo de roteamento pela menor distância ou menor resistência.

A figura 5.11 ilustra a probabilidade de bloqueio das chamadas em função da variação da potência óptica de entrada por canal, para diferentes valores de carga, considerando as topologias ilustradas na figura 5.8 e a potência de saturação de saída do amplificador igual a 19 dBm.

Percebe-se que para cada topologia analisada o menor valor da probabilidade de bloqueio é obtido para um valor diferente de $P_{\lambda\text{-in}}$. Para a topologia regular, tem-se $P_{\lambda\text{-in}} = 0$ dBm, de acordo com a figura 5.11(a), e $P_{\lambda\text{-in}} = -3$ dBm, conforme ilustrado na figura 5.11(b), para uma carga igual a 60 Erlangs. A probabilidade de bloqueio das chamadas aumenta conforme aumento da carga, ou seja, à medida que o tráfego da rede se torna maior, as penalidades físicas se tornam cada vez mais relevantes, causando uma maior degradação nos valores de OSNR, além da indisponibilidade de comprimentos de onda para uma carga maior simulada.

Para uma determinada carga, considerando valores de $P_{\lambda\text{-in}}$ mais elevados, a interferência intracanal, efeitos de FWM e de saturação do ganho se tornam mais relevantes na degradação da OSNR, enquanto que para valores mais baixos, a contribuição mais significativa é a potência de ruído ASE produzida pelos amplificadores ópticos.

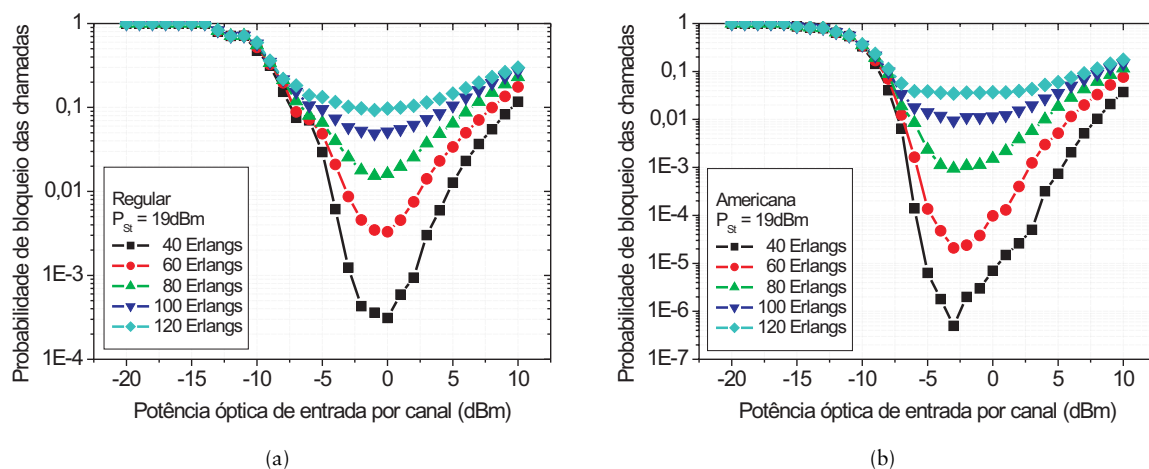


Figura 5.11: Probabilidade de bloqueio das chamadas em função da potência óptica de entrada por canal, para diferentes valores de carga, considerando a potência de saturação de saída igual a 19 dBm e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana.

A figura 5.12 ilustra a probabilidade de bloqueio das chamadas em função do número de comprimentos de onda presentes em cada enlace, considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs.

Verifica-se um limiar no número de comprimentos de onda em cada rede (λ_{Th}), de forma que para valores menores que este limiar, a probabilidade de bloqueio das chamadas ocorre devido à indisponibilidade de comprimentos de onda. Nesse caso, qualquer aumento na potência de saturação de saída dos amplificadores não produz qualquer melhora no desempenho da rede. Acima do valor de limiar, a probabilidade de bloqueio das chamadas ocorre devido à degradação da OSNR nas chamadas solicitadas. Pode-se perceber que 36 comprimentos de onda em cada enlace são necessários para se obter a menor probabilidade de bloqueio em ambas potências de saturação de saída para a topologia americana e 32 comprimentos de onda para a topologia regular.

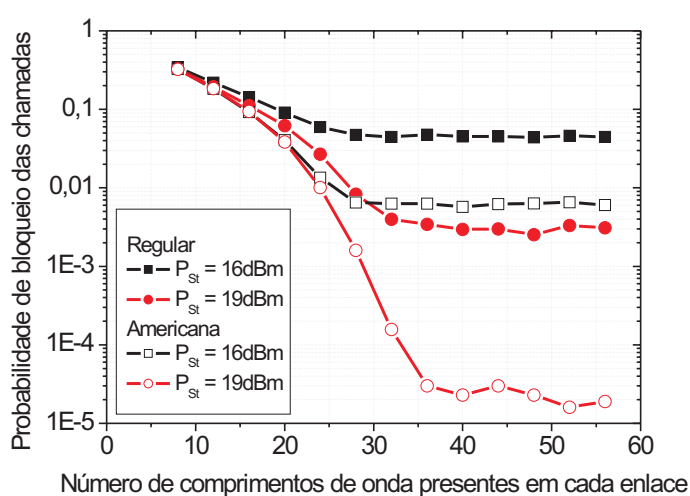


Figura 5.12: Probabilidade de bloqueio das chamadas em função do número de comprimentos de onda presentes em cada enlace, considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs.

A figura 5.13 ilustra a probabilidade de bloqueio das chamadas em função do fator de isolamento do *switch*, considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs. Verifica-se que para valores de ε abaixo de -40 dB, o efeito de interferência intracanal pode ser desprezado. Quando ε assume valores maiores que -40 dB, percebe-se que o impacto da interferência intracanal aumenta de forma acentuada. A figura 5.13 mostra ainda que o fator de isolamento do *switch* é um parâmetro crítico para o desempenho das redes ópticas transparentes.

A figura 5.14 ilustra a probabilidade de bloqueio das chamadas em função da potência óptica de entrada por canal, considerando valores de figura de ruído (5 e 7 dB), potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs.

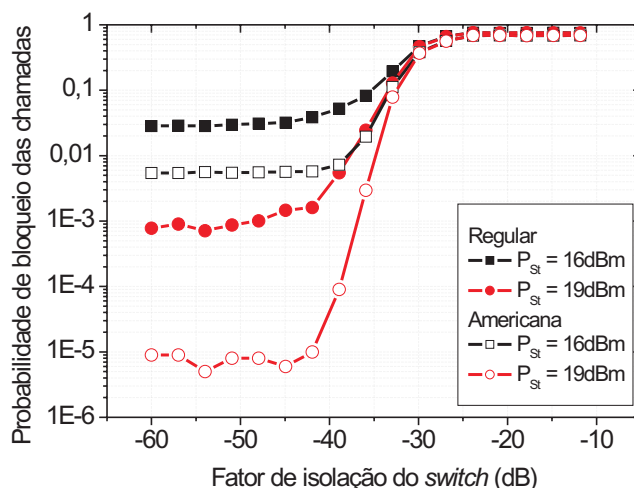


Figura 5.13: Probabilidade de bloqueio das chamadas em função do fator de isolamento do switch, considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs.

Observa-se que com uma diferença de 2 dB entre a figura de ruído dos amplificadores, o desempenho da rede sofre um impacto considerável. Considerando o menor valor de probabilidade de bloqueio das chamadas obtido, observa-se que a potência óptica ótima de entrada por canal relacionada com esse valor sofre uma alteração quando diferentes valores de figura de ruído são considerados. Para amplificadores que possuem altos valores desse parâmetro, maiores valores de $P_{\lambda-in}$ são necessários para diminuir o impacto relacionado à potência de ruído ASE produzida pelos amplificadores.

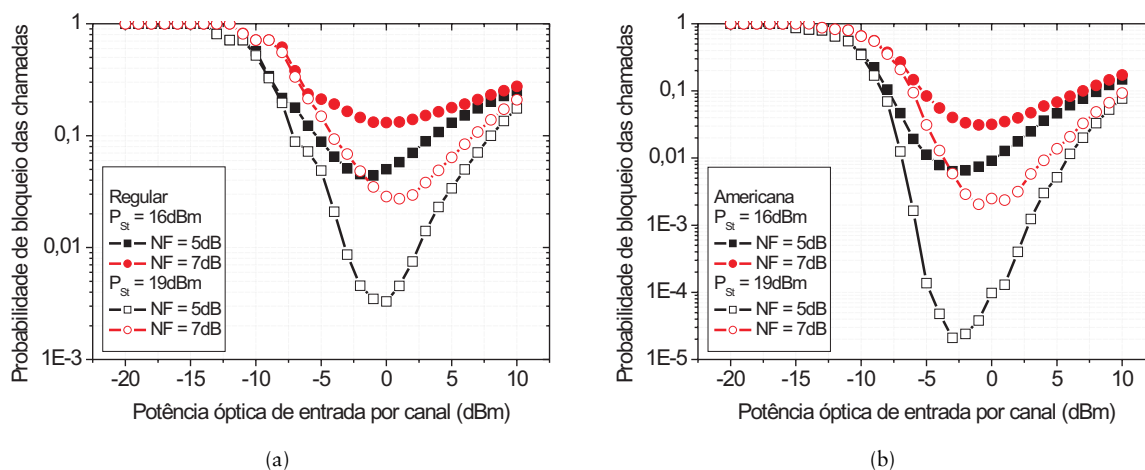


Figura 5.14: Probabilidade de bloqueio das chamadas em função da potência óptica de entrada por canal, considerando valores de figura de ruído (5 e 7 dB), potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs.

A figura 5.15 ilustra a probabilidade de bloqueio das chamadas em função da potência óptica de entrada por canal, considerando valores de λ_0 (1510 e 1550 nm), potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs. Quando a fibra NZDSF é utilizada ($\lambda_0 = 1510$ nm), obtêm-se os menores valores de probabilidade de bloqueio das chamadas, enquanto que para fibras DSF ($\lambda_0 = 1550$ nm), esses valores sofrem um aumento relevante. A figura 5.15 também mostra que para as fibras DSF é necessário utilizar baixos valores de potência óptica de entrada por canal para se obter valores menores de probabilidade de bloqueio das chamadas.

Isso ocorre, basicamente, devido ao efeito de FWM se tornar mais relevante nesse tipo de fibra óptica. Nesse caso, a utilização de amplificadores com maior valor de potência de saturação de saída, por exemplo $P_{st} = 19$ dBm, não representa melhoramento considerável em termos de probabilidade de bloqueio das chamadas.

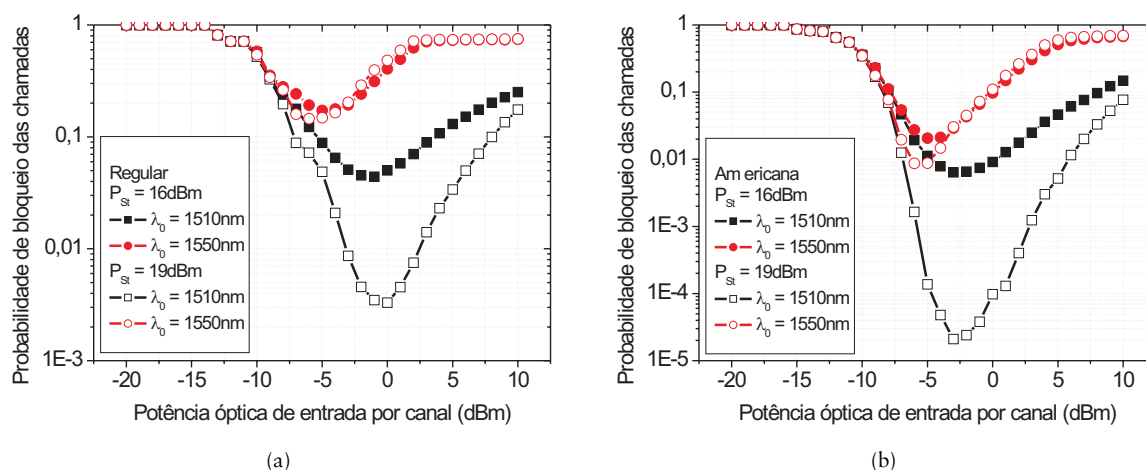


Figura 5.15: Probabilidade de bloqueio das chamadas em função da potência óptica de entrada por canal, considerando valores de λ_0 (1510 e 1550 nm), potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs.

A figura 5.16 mostra a probabilidade de bloqueio das chamadas em função do coeficiente de dispersão do modo de polarização, considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs e uma taxa de transmissão igual a 40 Gbps. Verifica-se que existe um limiar para o coeficiente de PMD (D_{Th}^{PMD}), de modo que abaixo desse valor o efeito de PMD pode ser desprezado e a probabilidade de bloqueio das chamadas envolve apenas a degradação da OSNR das chamadas.

Para valores de D^{PMD} acima do limiar, o efeito de PMD se torna relevante e se torna a causa da maior parte do bloqueio das chamadas na rede. Nesse caso a probabilidade de bloqueio das chamadas não pode ser melhorada aumentando-se a potência de saturação de saída dos amplificadores, visto que o efeito de PMD penaliza o sinal no domínio do tempo. Para a topologia regular, tem-se que $D_{\text{Th}}^{\text{PMD}} = 0,16 \text{ ps/km}^{1/2}$ e para a topologia americana $D_{\text{Th}}^{\text{PMD}} = 0,19 \text{ ps/km}^{1/2}$. A topologia regular é mais sensível ao efeito de PMD devido à distância média das rotas para as chamadas estabelecidas ser maior do que a obtida para a topologia americana. Para a primeira, tem-se 124,02 km, enquanto que para a segunda tem-se 84,99 km.

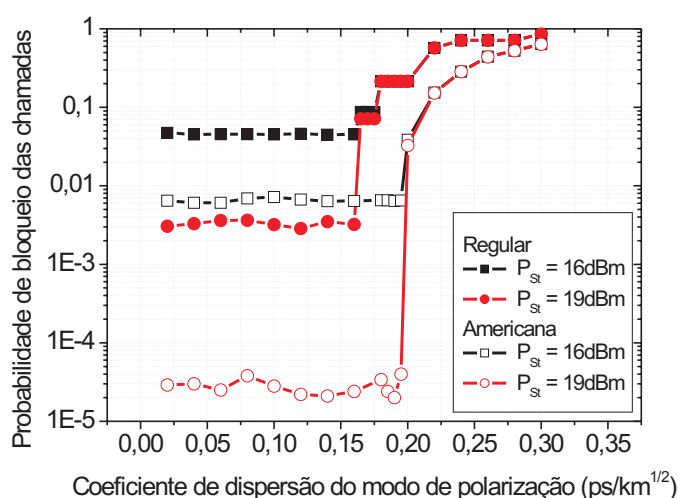


Figura 5.16: Probabilidade de bloqueio das chamadas em função do coeficiente de dispersão do modo de polarização, considerando potências de saturação de saída (16 e 19 dBm) e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana, para uma carga igual a 60 Erlangs e uma taxa de transmissão igual a 40 Gbps.

5.3.2 Análise via algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda

Nesta seção, o modelo analítico proposto na seção 5.1 é aplicado como métrica de um algoritmo de roteamento baseado na degradação da OSNR¹. Esse algoritmo de RWA proposto nesta seção obtém a rota com menor degradação da OSNR de maneira similar ao algoritmo proposto em [71]. No entanto, além dos efeitos de saturação de ganho, perdas e ruído dos amplificadores considerados em [71], os efeitos de depleção de ASE, interferência homodina nos comutadores, FWM e PMD nas fibras são considerados. A utilização desse algoritmo é comparada, em termos de probabilidade de bloqueio das chamadas, com outros dois algoritmos de roteamento (LRW e SP) [32; 33] e seu pseudo-código é ilustrado na figura 5.17.

¹OSNR-R – Optical Signal-to-Noise Ratio Routing.

Dessa forma, para cada chamada solicitada, são realizados os seguintes passos:

1. Seleciona-se um comprimento de onda, baseado no algoritmo de *first fit*.
2. Determina-se uma rota, utilizando o modelo analítico proposto como custo no algoritmo de Dijkstra [17].

A chamada é bloqueada caso não haja comprimento de onda disponível, a OSNR da rota esteja abaixo do valor de $OSNR_{Th}$, no respectivo comprimento de onda, ou ainda, se o alargamento temporal do pulso esteja acima do valor estabelecido.

O algoritmo de Dijkstra utilizado, baseia-se no Dijkstra modificado introduzido e desenvolvido nas referências [6; 7; 71]. Esses trabalhos também analisam o desempenho das redes ópticas transparentes em termos de penalidades físicas, porém consideram apenas o efeito de saturação de ganho e o ruído ASE produzido pelos amplificadores ópticos ao longo da rota.

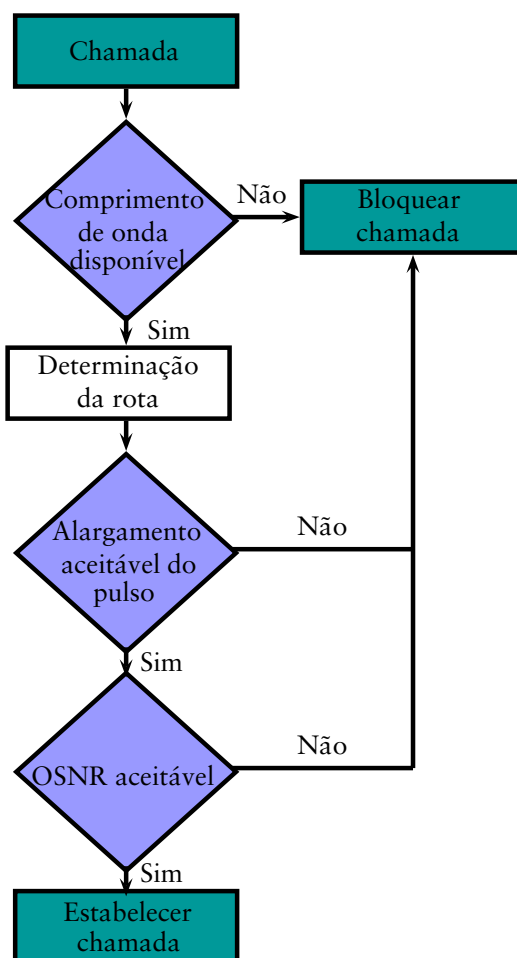


Figura 5.17: Pseudo-código do algoritmo de roteamento pela menor OSNR.

Cada um dos algoritmos utilizados nesta seção possui sua própria métrica, ou seja:

SP: A função custo de cada enlace $(w_{m,n})$ corresponde à distância física entre os dois nós m e n [32].

LRW: Nesse algoritmo, $w_{m,n}$ é calculada como sendo [33]:

$$w_{i,j} = \begin{cases} \frac{C_{\max}^T}{C_{m,n}^A} & \text{if } C_{m,n}^A \neq 0, \\ \infty & \text{if } C_{m,n}^A = 0, \end{cases} \quad (5.13)$$

onde $C_{m,n}^A$ representa o número de comprimentos de onda disponíveis no enlace, $C_{m,n}^T$ o número total de comprimentos de onda no enlace e C_{\max}^T o número máximo de comprimentos de onda, ou seja, $C_{\max}^T = \max(C_{m,n}^T)$.

OSNR-R: Sua métrica se baseia em determinar a rota com menor degradação da OSNR em um dado comprimento de onda. O valor da potência óptica de ruído no i -ésimo enlace depende da potência de ruído acumulada nos enlaces anteriores da cascata, ou seja, a métrica do algoritmo OSNR-R não depende exclusivamente de um enlace, e sim de todo o conjunto de enlaces analisados, diferentemente dos algoritmos de roteamento vistos anteriormente (SP e LRW). Contudo, o algoritmo OSNR-R pode ser implementado via algoritmo de Dijkstra, alterando-se sua função custo, que é referente à distância física, para o valor da OSNR no devido enlace. Isso faz com que o algoritmo de Dijkstra modificado [71] possa calcular o valor da OSNR desde o nó fonte até o nó atual. Matematicamente, se $\pi(m,n)$ representa todas as rotas possíveis entre os nós m e n , $f_{\text{OSNR}}[\pi(m,n), \lambda]$ representa a OSNR_{out} para essas rotas no respectivo comprimento de onda λ , então, a rota determinada pelo algoritmo OSNR-R em λ pode ser expressa como:

$$R_{m,n}^\lambda = \max \{ f_{\text{OSNR}} [\pi (m, n) , \lambda] \}. \quad (5.14)$$

Para se realizar uma comparação justa entre os três algoritmos, o modelo analítico proposto é utilizado para calcular a degradação da OSNR em cada rota determinada por eles (LRW, SP e OSNR-R), dessa forma, as chamadas são bloqueadas se a OSNR da rota determinada for menor que OSNR_{Th} . O pseudo-código utilizado pelos algoritmos SP e LRW está ilustrado na figura 5.10, enquanto que para o OSNR-R tem-se o pseudo-código ilustrado na figura 5.17.

A figura 5.18 ilustra a probabilidade de bloqueio das chamadas em função da carga, considerando os três algoritmos de roteamento (LRW, SP e OSNR-R) e as duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana.

Pode-se perceber que para ambas topologias, o algoritmo OSNR-R fornece valores menores de probabilidade de bloqueio das chamadas para todas as cargas, enquanto que o desempenho dos algoritmos SP e LRW podem diferir dependendo da topologia analisada.

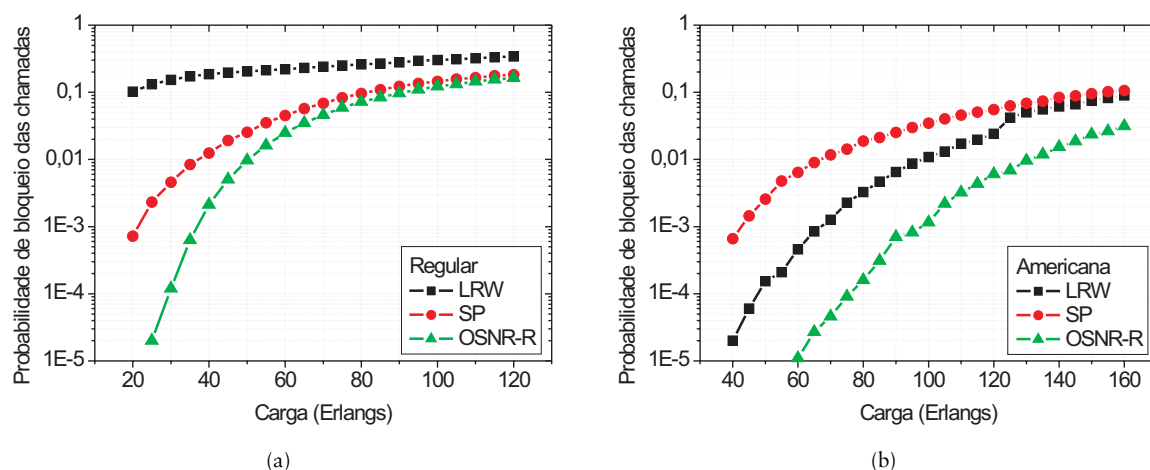


Figura 5.18: Probabilidade de bloqueio das chamadas em função da carga, considerando os três algoritmos de roteamento (LRW, SP e OSNR-R) e as duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana.

A tabela 5.2 ilustra a distância média das rotas, para as chamadas estabelecidas, encontrada pelos três algoritmos de roteamento (LRW, SP e OSNR-R), considerando-se uma carga igual a 60 Erlangs e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana.

Tabela 5.2: Distância média das rotas, para as chamadas estabelecidas, encontrada pelos três algoritmos de roteamento (LRW, SP e OSNR-R), considerando-se uma carga igual a 60 Erlangs e duas topologias diferentes: (a) regular e (b) americana.

| Topologia | LRW | SP | OSNR-R |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Regular | 123,60 km | 124,02 km | 127,28 km |
| Americana | 92,07 km | 84,99 km | 89,48 km |

Pode-se perceber que para a topologia regular têm-se os valores mais altos desse parâmetro para todos os três algoritmos analisados. Além disso, pode-se notar que além de gerar menor probabilidade de bloqueio, o OSNR-R consegue estabelecer rotas mais longas, em média, principalmente para a topologia regular.

Isso indica que o OSNR-R consegue aumentar a extensão da ilha de transparência da rede. Outro aspecto importante é que o OSNR-R realiza o balanceamento de carga na rede, pois quando uma determinada rota estiver muito congestionada a OSNR dessa rota será degradada e o algoritmo tenderá a encontrar rotas alternativas para as novas chamadas, com maior OSNR.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A mente que se abre a uma nova idéia jamais volta ao seu tamanho original.

— Albert Einstein

Neste trabalho, foram estudados dois aspectos importantes referentes às redes ópticas transparentes: o de atribuição de comprimento de onda e o de roteamento e estabelecimento das chamadas solicitadas. Além de considerar recursos da camada de rede (disponibilidade de comprimento de onda), foi avaliado o impacto da camada física na transmissão dos sinais, utilizando-se critério de QoS para ambos os casos.

Considerando-se o processo de atribuição de comprimento de onda, o impacto da camada física na SNR dos sinais transmitidos em um enlace foi calculado. A formulação utilizada considera o efeito de FWM e o ruído balístico, no processo de detecção do sinal óptico, como penalidades físicas e foi utilizada em conjunto com os algoritmos genéticos, para otimizar a distribuição de comprimentos de onda em um enlace.

O algoritmo desenvolvido, com a proposta de otimizar a alocação de comprimentos de onda, considera o tamanho da grade de canais, o número de comprimentos de onda disponíveis na grade, a potência óptica de cada sinal transmitido, o tipo de fibra utilizada e o espaçamento em frequência entre canais.

Alocações de comprimentos de onda foram encontradas satisfazendo o critério de QoS estabelecido, o qual corresponde a uma BER inferior a 10^{-12} para qualquer sinal pertencente à alocação, considerando os parâmetros utilizados nas simulações realizadas para este trabalho. Além disso, foi analisado o custo computacional em termos de cálculos de força para obtenção de tais alocações, onde o algoritmo desenvolvido encontrou alocações satisfatórias executando um menor número de cálculos de força em comparação com um algoritmo que sempre testa todas as possíveis alocações de comprimentos de onda.

Verificou-se ainda que a partir de uma alocação satisfatória, pode-se obter alocações satisfatórias quando comprimentos de onda são removidos da grade de canais. Dessa forma, o algoritmo desenvolvido pode determinar o número máximo de comprimentos de onda alocáveis e a posição deles na grade, com garantia de QoS dada em termos de BER.

Verificou-se que o efeito de FWM deve ser considerado no processo de atribuição de comprimento de onda em um enlace óptico quando fibras DSF ou NZDSF forem utilizadas em sistemas WDM com menor espaçamento em frequência, grande quantidade de canais e altos valores de potência de entrada por canal. Dessa forma, o efeito de FWM representa um fator importante no estabelecimento das chamadas nas redes ópticas transparentes. Estima-se que o algoritmo desenvolvido possua aplicações em tarefas que não sejam executadas em tempo real (*off-line*), de modo a representar um ponto de partida nas escolhas dos comprimentos de onda utilizados nas redes ópticas transparentes.

Além disso, foi proposto um modelo analítico que considera a degradação da OSNR, ao longo de uma rota, devido ao impacto dos efeitos da camada física nos sinais transmitidos. Esse modelo é inovador por se basear na consideração de efeitos físicos durante a propagação dos sinais ópticos, utilizando equações bem fundamentadas na literatura ou obtidas a partir de experimentos em dispositivos ópticos. Considera-se ainda a dependência do ganho, fator de ruído e potência de ruído produzida nos amplificadores ópticos em função da potência óptica de entrada. Os efeitos considerados são: saturação do ganho e potência de ruído ASE produzida nos amplificadores, interferência intracanal produzida no *switch*, efeito de FWM e alargamento temporal do pulso óptico devido à PMD nas fibras ópticas.

O modelo analítico proposto foi aplicado para avaliação do desempenho das redes ópticas transparentes em termos da probabilidade de bloqueio das chamadas solicitadas. Para o caso de avaliação do impacto de cada dispositivo na rede, foi utilizado o algoritmo de roteamento baseado no algoritmo de Dijkstra, tomando-se como métrica a distância física dos enlaces, e o algoritmo de *first fit* como função de atribuição de comprimento de onda.

Os resultados obtidos mostram que para baixos valores de potência, o bloqueio das chamadas solicitadas é devido, principalmente, ao ruído produzido pelos amplificadores ópticos, enquanto que para altos valores de potência, isso ocorre devido ao efeito de saturação do ganho, FWM e isolamento não-ideal do *switch*. Verificou-se que a potência óptica, que resulta em menor probabilidade de bloqueio das chamadas solicitadas, depende da topologia da rede e dos parâmetros utilizados nos dispositivos, considerando os parâmetros adotados nas simulações realizadas neste trabalho.

O modelo analítico também foi aplicado como proposta de utilização em algoritmos que consideram as penalidades físicas (*impairment-constraint routing*). O algoritmo RWA se baseia em encontrar a rota com menor degradação da OSNR (OSNR-R) utilizando o modelo analítico proposto, de modo que este algoritmo fornece melhor desempenho, em termos de probabilidade de bloqueio das chamadas solicitadas, em comparação com algoritmos que apenas consideram características da camada de rede, seja rota com menor distância (SP) ou rota com maior disponibilidade de comprimentos de onda (LRW).

Conclui-se que o modelo analítico proposto possui aplicações em algoritmos de RWA que consideram penalidades físicas, além de poder ser utilizado em projetos, com o objetivo de reduzir custos e melhorar o desempenho da rede, onde este é dependente dos parâmetros utilizados nos dispositivos, tais como: potência de saturação de saída e figura de ruído dos amplificadores ópticos, fator de isolamento do *switch* e tipo de fibra utilizada, de modo que tais parâmetros representam impacto considerável no custo de implantação das redes.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

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

Penalidades físicas: proposição de modelo de penalidades físicas tais como: SPM, XPM, SRS e SBS, de modo a incluir tais efeitos no modelo proposto neste trabalho.

Dispersão residual: embora existam componentes ópticos compensadores de dispersão, pode-se estudar o impacto da dispersão residual em cada comprimento de onda na transmissão dos sinais ópticos.

Algoritmos RWA: estudo de algoritmos RWA que consideram o impacto da camada física na transmissão dos sinais, porém fornecendo resultados com menor esforço computacional.

Atribuição de comprimento de onda: utilizar a metodologia proposta neste trabalho, para um enlace óptico, de modo a se obter uma expressão referente ao cascadeamento de enlaces ópticos considerando o efeito de FWM ou em conjunto com outros efeitos físicos.

APÊNDICE **A**

MODELO PARA QUANTIFICAR O EFEITO DA MISTURA DE QUATRO ONDAS EM UM ENLACE ÓPTICO

*Perseguir, sem cessar, uma meta: Este é o
segredo do sucesso.*

— Anna Pavlova

O efeito de FWM pode ser quantificado, para uma determinada alocação, por meio do cálculo do fator de ruído (F) em cada comprimento de onda, utilizando um método de avaliação de desempenho optoeletrônico, desenvolvido por Bastos-Filho em [16]. As seções seguintes descrevem esse método e o desenvolvimento dos passos para o cálculo das componentes de potência produzidas pelo efeito de FWM incidentes em cada comprimento de onda presente na alocação [16].

A.1 Formulação para calcular a figura de ruído baseada no efeito da mistura de quatro ondas

Baney e colaboradores [69] conceituam a figura de ruído em termos de parâmetros mensuráveis. O fator de ruído é definido como:

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}, \quad (\text{A.1})$$

onde SNR_{in} representa a relação sinal-ruído na entrada e SNR_{out} na saída do sistema. A SNR pode ser expressa da seguinte forma:

$$SNR = \frac{\langle i_S \rangle^2}{\langle \Delta i_N^2 \rangle}, \quad (\text{A.2})$$

onde o termo $\langle i_S \rangle^2$ está relacionado com a fotocorrente gerada pelo sinal óptico no fotodetector, sendo proporcional à potência elétrica do sinal detectado, e $\langle \Delta i_N^2 \rangle$ representa o valor médio quadrático da potência de ruído associada ao sinal [69].

A formulação baseia-se em um modelo optoeletrônico ilustrado na figura A.1. Na figura A.1(a) não existe dispositivo entre a fonte e o fotodetector. Nesse caso, pode-se calcular a potência elétrica do sinal $\langle i_{S-in} \rangle^2$ e a potência elétrica de ruído associada $\langle \Delta i_{N-in}^2 \rangle$ na saída do fotodetector. Na figura A.1(b), tem-se a inserção de um dispositivo óptico entre a fonte e o fotodetector, nesse caso uma fibra óptica, de modo a modificar tanto a potência elétrica do sinal $\langle i_{S-out} \rangle^2$ quanto a do ruído na saída do fotodetector $\langle \Delta i_{N-out}^2 \rangle$.

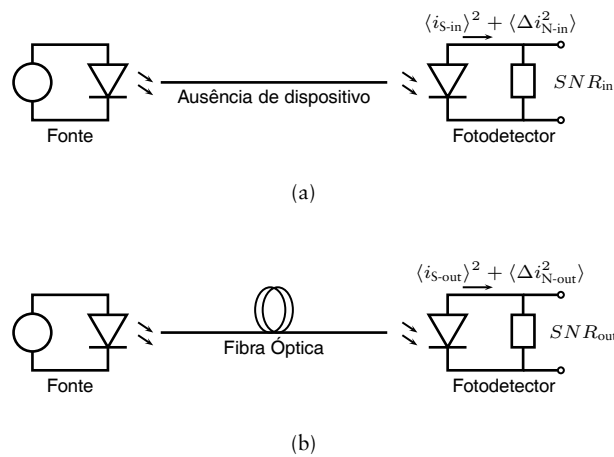


Figura A.1: Modelo optoeletrônico que considera: (a) ausência de dispositivo, e (b) fibra óptica como dispositivo entre a fonte e o fotodetector.

A fotocorrente gerada pelo sinal óptico pode ser obtida a partir de:

$$\langle i_S \rangle = \mathcal{R}P_S, \quad (\text{A.3})$$

onde \mathcal{R} representa a responsividade do fotodetector e P_S a potência óptica do sinal recebido.

A potência elétrica de ruído associada pode ser expressa por:

$$\langle \Delta i_N^2 \rangle = \mathcal{R}^2 \int_{B_e} S_N(f) df, \quad (\text{A.4})$$

onde B_e representa a largura de banda de 3 dB do filtro presente na entrada do fotodetector, $S_N(f)$ a densidade espectral de potência de ruído e f a frequência do sinal.

Considerando o ruído balístico como fonte de ruído de referência na entrada do sistema, tem-se que [69]:

$$SNR_{\text{in}} = \frac{\langle i_{S\text{-in}} \rangle^2}{\langle \Delta i_{N\text{-shot}}^2 \rangle}, \quad (\text{A.5})$$

onde $\langle \Delta i_{N\text{-shot}}^2 \rangle$ quantifica a potência elétrica do ruído balístico.

De acordo com [69], essa potência pode ser expressa por:

$$\langle \Delta i_{N\text{-shot}}^2 \rangle = 2qB_e\mathcal{R}P_S, \quad (\text{A.6})$$

onde q representa a carga do elétron.

Desse modo, substituindo-se as equações (A.3) e (A.6) na equação (A.5), tem-se que:

$$SNR_{\text{in}} = \frac{\mathcal{R}^2 P_S^2}{2qB_e\mathcal{R}P_S}. \quad (\text{A.7})$$

Na saída da fibra óptica, devido às potências produzidas pelo efeito de FWM adicionadas com o ruído balístico, tem-se que:

$$SNR_{\text{out}} = \frac{\mathcal{R}^2 (P_S e^{-\alpha d})^2}{2qB_e\mathcal{R}P_S e^{-\alpha d} + \langle \Delta i_{\text{FWM}}^2 \rangle}, \quad (\text{A.8})$$

onde d representa o comprimento, α o coeficiente de atenuação da fibra óptica e $\langle \Delta i_{\text{FWM}}^2 \rangle$ corresponde à potência elétrica de ruído devido às componentes de potência produzidas pelo efeito de FWM incidentes no comprimento de onda propagante.

Utilizando as equações (A.1), (A.7) e (A.8), o fator de ruído da fibra óptica pode ser determinado como:

$$F = \frac{\frac{\mathcal{R}^2 P_S^2}{2qB_e \mathcal{R} P_S}}{\frac{\mathcal{R}^2 (P_S e^{-\alpha d})^2}{2qB_e \mathcal{R} P_S e^{-\alpha d} + \langle \Delta^2 i_{\text{FWM}} \rangle}}, \quad (\text{A.9})$$

que corresponde a:

$$F = e^{\alpha d} \left(1 + \frac{\langle \Delta^2 i_{\text{FWM}} \rangle}{2qB_e \mathcal{R} P_S} e^{\alpha d} \right). \quad (\text{A.10})$$

As alocações de comprimentos de onda podem ser analisadas calculando-se a SNR_{out} de cada comprimento de onda utilizando as equações (A.10) e (A.1), considerando que o valor de SNR_{in} seja conhecido. O critério de QoS adotado (SNR_{Th}) corresponde a um determinado valor de SNR, que neste trabalho equivale uma BER de 10^{-12} , e é aproximadamente igual a 22,97 dB [18].

A.2 Cálculo das componentes de ruído aditivo

Adotando-se como referência um fotodetector de lei quadrática, a fotocorrente gerada na saída do fotodetector é representada pela seguinte expressão [60]:

$$i_{\text{Dt}} = \mathcal{R} \kappa \left| \sum_i \vec{E}_i \right|^2 = \mathcal{R} P_{\text{Opt}}, \quad (\text{A.11})$$

onde $\vec{E}_i = E_i e^{j(\omega_i t + \phi_i)} \hat{a}_i$ representa o campo elétrico da i -ésima onda eletromagnética propagante, κ uma constante igual a $\frac{n_{\text{Ef}} A \varepsilon_0 c}{2}$, sendo n_{Ef} correspondente ao índice de refração efetivo da fibra óptica, A a área efetiva da fibra óptica, ε_0 a permissividade elétrica do vácuo, c a velocidade da luz no vácuo e P_{Opt} a potência óptica do sinal correspondente.

O termo $\langle \Delta i_{\text{N}}^2 \rangle$ é obtido quando se considera a incidência das componentes de potência de ruído na mesma frequência do sinal propagante.

Desse modo, a expressão geral de $\langle \Delta i_{\text{N}}^2 \rangle$ pode ser determinada fazendo as seguintes considerações:

1 componente do sinal e 1 componente de ruído incidente produzida pelo efeito de FWM:

De acordo com a equação (A.11), tem-se que:

$$i_{\text{Dt}} = \mathcal{R}\kappa \left| \vec{E}_0 + \vec{E}_1 \right|^2 = \mathcal{R}P_{\text{Opt}}, \quad (\text{A.12})$$

onde

$$\vec{E}_0 = E_0 e^{j(\omega_0 t + \phi_0)} = E_0 e^{j\theta_0} \quad (\text{A.13})$$

e

$$\vec{E}_1 = E_1 e^{j(\omega_1 t + \phi_1)} = E_1 e^{j\theta_1}, \quad (\text{A.14})$$

sendo ω_0 e ω_1 as frequências, ϕ_0 e ϕ_1 as fases dos sinais propagantes.

Substituindo as equações (A.13) e (A.14) na equação (A.12), tem-se que:

$$i_{\text{Dt}} = \mathcal{R}\kappa \left[E_0^2 + E_1^2 + 2E_0 E_1 \cos(\theta_0 - \theta_1) \right]. \quad (\text{A.15})$$

Considerando $\theta_0 = \theta_1$ na equação (A.15), devido aos campos elétricos possuírem a mesma frequência e considerando as fases iguais, tem-se que:

$$i_{\text{Dt}} = \mathcal{R}\kappa \left(E_0^2 + E_1^2 + 2E_0 E_1 \right). \quad (\text{A.16})$$

Considerando que

$$P_{\text{Opt}_0} = \kappa E_0^2 \quad (\text{A.17})$$

e

$$P_{\text{Opt}_1} = \kappa E_1^2, \quad (\text{A.18})$$

tem-se que:

$$i_{Dt} = \Re \left(P_{Opt_0} + P_{Opt_1} + 2\sqrt{P_{Opt_0}P_{Opt_1}} \right). \quad (A.19)$$

Sabendo-se que [8]:

$$P_{Dt} = i_{Dt}^2, \quad (A.20)$$

representa a potência elétrica na saída do fotodetector, tem-se que:

$$P_{Dt} = \Re^2 \left(P_{Opt_0} + P_{Opt_1} + 2\sqrt{P_{Opt_0}P_{Opt_1}} \right)^2. \quad (A.21)$$

Considerando que:

$$P_{Dt} = P_{Dt_{Sinal}} + \langle \Delta^2 i_N \rangle = P_{Dt_{Sinal}} + \langle \Delta^2 i_{FWM} \rangle, \quad (A.22)$$

onde $P_{Dt_{Sinal}}$ representa a potência elétrica do sinal, tem-se que:

$$\boxed{\langle \Delta i_N^2 \rangle = \langle \Delta^2 i_{FWM} \rangle = \Re^2 \left[\left(P_{Opt_0} + P_{Opt_1} + 2\sqrt{P_{Opt_0}P_{Opt_1}} \right)^2 - P_{Opt_0}^2 \right]}. \quad (A.23)$$

1 componente do sinal e 2 componentes de ruído incidentes produzidas pelo efeito de FWM:

Seguindo os passos descritos no caso anterior, obtêm-se as seguintes expressões:

$$i_{Dt} = \Re \left[P_{Opt_0} + P_{Opt_1} + P_{Opt_2} + 2 \left(\sqrt{P_{Opt_0}P_{Opt_1}} + \sqrt{P_{Opt_0}P_{Opt_2}} + \sqrt{P_{Opt_1}P_{Opt_2}} \right) \right], \quad (A.24)$$

$$P_{Dt} = \Re^2 \left[P_{Opt_0} + P_{Opt_1} + P_{Opt_2} + 2 \left(\sqrt{P_{Opt_0}P_{Opt_1}} + \sqrt{P_{Opt_0}P_{Opt_2}} + \sqrt{P_{Opt_1}P_{Opt_2}} \right) \right]^2 \quad (A.25)$$

e

$$\langle \Delta i_N^2 \rangle = \langle \Delta^2 i_{\text{FWM}} \rangle = \mathcal{R}^2 \left\{ \left[P_{\text{Opt}_0} + P_{\text{Opt}_1} + P_{\text{Opt}_2} + 2 \left(\sqrt{P_{\text{Opt}_0} P_{\text{Opt}_1}} + \sqrt{P_{\text{Opt}_0} P_{\text{Opt}_2}} + \sqrt{P_{\text{Opt}_1} P_{\text{Opt}_2}} \right) \right]^2 - P_{\text{Opt}_0}^2 \right\}. \quad (\text{A.26})$$

1 componente do sinal e n componentes de ruído incidentes produzidas pelo efeito de FWM:

De acordo com as expressões obtidas nos casos anteriores, pode-se generalizar as expressões da seguinte forma [16]:

$$i_{\text{Dt}} = \mathcal{R} \left(\sum_{x=0}^n P_{\text{Opt}_x} + 2 \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=x+1}^n \sqrt{P_{\text{Opt}_x} P_{\text{Opt}_y}} \right), \quad (\text{A.27})$$

$$P_{\text{Dt}} = \mathcal{R}^2 \left(\sum_{x=0}^n P_{\text{Opt}_x} + 2 \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=x+1}^n \sqrt{P_{\text{Opt}_x} P_{\text{Opt}_y}} \right)^2 \quad (\text{A.28})$$

e

$$\langle \Delta i_N^2 \rangle = \langle \Delta^2 i_{\text{FWM}} \rangle = \mathcal{R}^2 \left[\left(\sum_{x=0}^n P_{\text{Opt}_x} + 2 \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=x+1}^n \sqrt{P_{\text{Opt}_x} P_{\text{Opt}_y}} \right)^2 - P_{\text{Opt}_0}^2 \right], \quad (\text{A.29})$$

onde P_{Opt_0} representa a potência óptica do sinal no detector e P_{Opt_x} ($x = 1, 2, \dots, n$) são as n potências ópticas de ruído incidentes no mesmo comprimento de onda do sinal.

O termo $\langle \Delta i_{\text{FWM}}^2 \rangle$ pode ser calculado utilizando-se a equação (A.29). Para isso, substitui-se P_{Opt_0} por $P_S e^{-\alpha d}$, onde P_{Opt_0} representa a potência do sinal após propagação na fibra óptica.

As n potências produzidas pelo efeito de FWM (P_{Opt_x}) podem ser determinadas utilizando-se a seguinte expressão [58]:

$$P_{\text{FWM}}(\lambda) = P_{ijk}(\lambda) = \frac{\eta'}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha d} \left[\frac{(1 - e^{-\alpha d})^2}{\alpha^2} \right], \quad (\text{A.30})$$

onde η' representa a eficiência do efeito de FWM, D o fator de degenerescência, o qual pode ser igual a 3 ou 6 dependendo da combinação de frequências (caso degenerado ou não-degenerado), γ é o coeficiente não-linear da fibra óptica, P_i , P_j e P_k são as potências ópticas para os sinais nas frequências f_i , f_j e f_k , respectivamente.

As frequências produzidas pelo efeito de FWM podem ser determinadas por [8]

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \quad (\text{A.31})$$

onde i e j são diferentes de k .

Substituindo-se a equação (A.29) na equação (A.10), a figura de ruído da fibra óptica pode ser calculada para cada comprimento de onda propagante.

APÊNDICE **B**

ALGORITMOS GENÉTICOS

As pessoas que vencem neste mundo são as que procuram as circunstâncias de que precisam e, quando não as encontram, as criam.

— Bernard Shaw

No século XIX houve uma mudança significativa no modo de perceber e interpretar o mundo. As idéias de permanência e previsibilidade que embasavam a compreensão da natureza e da sociedade passaram a coexistir com a concepção de que a matéria, viva ou não, estava em constante transformação. Desse modo, a imutabilidade das espécies foi colocada em xeque e a formação dos sistemas vivos começou a ser entendida, não como criação simultânea, mas como decorrência de etapas sucessivas. O livro de Charles Darwin, *A Origem das Espécies* publicado em 1859, foi concebido em ressonância com o espírito dessa época. Transformista, Darwin rejeitou o princípio de fixidez das espécies, aderindo à noção de variação gradual dos seres vivos graças ao acúmulo de modificações pequenas, sucessivas e favoráveis, e não por modificações extraordinárias, surgidas repentinamente. Foi nessa obra que Darwin apresentou o núcleo de sua concepção evolucionária - a seleção natural ou a permanência do mais apto [72].

Atualmente, o darwinismo incorporou os conhecimentos da genética e da citologia e sob a designação de neodarwinismo reconhece como principais fatores evolucionários além da seleção natural, a recombinação gênica e a mutação [72].

Os algoritmos genéticos utilizam os conceitos da seleção natural, recombinação gênica, mutação e evolução das espécies para resolução de problemas em diferentes áreas. Desde o pioneiro trabalho de J. H. Holland [73] nos anos 70, aplicações utilizando GA têm contribuído de maneira significativa em diferentes áreas, tais como: identificação de sistemas e parâmetros, controle, robótica, reconhecimento de padrões, reconhecimento de voz, projetos de engenharia, classificação de sistemas, redes ópticas, entre outros [74].

B.1 Algoritmo genético simples

O GA é uma abordagem utilizada para otimização, ou solução de problemas complexos, e realiza isso através da evolução de um conjunto de indivíduos, baseando-se em conceitos da genética e da seleção natural [74]. Os indivíduos são compostos por um conjunto de parâmetros (cromossomos) e representam possíveis soluções do problema a ser resolvido [75]. No GA, o mecanismo de codificação dos cromossomos e os diferentes operadores utilizados na evolução das soluções precisam ser direcionados às características do problema que se almeja resolver [75].

A elaboração do GA para um determinado problema demanda as seguintes considerações: tipo de codificação de um indivíduo (representação cromossômica), determinação das funções objetivo e aptidão, tamanho da população inicial, características dos operadores de cruzamento, mutação e seleção [74; 76]. A estrutura do GA simples é ilustrada na figura B.1 e cada bloco desse algoritmo é descrito nos parágrafos seguintes.

Os indivíduos são codificados, na forma de cadeia cromossômica, de modo que os genes são mapeados de acordo com as variáveis que representam possíveis soluções do problema. A cadeia cromossômica de maneira isolada não fornece nenhuma informação sobre o problema que se pretende resolver. Somente com a decodificação do cromossomo, em seu valor de variável correspondente, é que se pode obter algum significado de sua importância no domínio do problema. Entretanto, o processo evolucionário é baseado nesta codificação, ao invés dos valores das possíveis soluções, exceto quando a codificação em valor real é utilizada. A representação cromossômica binária é uma das representações utilizadas em GA, existindo outros tipos encontrados na literatura, como por exemplo o ternário, o inteiro e o real [74].

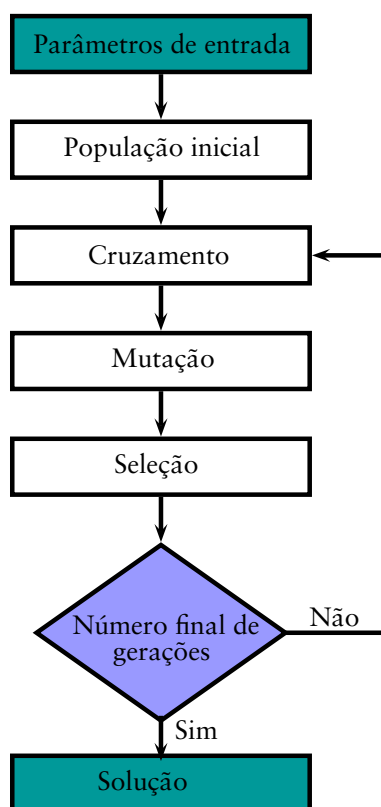


Figura B.1: Algoritmo genético simples.

Na figura B.2 são ilustrados dois indivíduos utilizados em um determinado problema de maximiza o. Para uma análise de cada indivíduo, e verifica o de sua viabilidade como soluço, é preciso avaliar sua aptidão. No exemplo, o indivíduo 1 apresenta um valor de aptidão igual a 14 e o indivíduo 2 apresenta um valor igual a 35, dessa forma, para um problema de maximiza o, o indivíduo 2 se torna mais apto como soluço.

| Indivíduo | Representa o cromossômica | Valor de aptidão |
|-----------|---------------------------|------------------|
| 1 | 1 0 1 1 | 14 |
| 2 | 0 0 1 0 | 35 |

Figura B.2: Representa o cromossômica típica e seu significado no domínio da variável do problema.

Após decisão de qual representa o cromossômica utilizar, o próximo passo em um algoritmo genético simples¹ é de criar uma popula o inicial.

¹SGA – Simple Genetic Algorithm.

Geralmente, consegue-se realizar tal objetivo gerando um determinado número de indivíduos de forma aleatória, com o tamanho da população variando de acordo com o problema [74].

O desempenho dos indivíduos é determinado por meio de uma função objetivo. Na natureza, isto seria equivalente à habilidade do indivíduo sobreviver no respectivo meio ambiente. Durante essa fase, cada indivíduo possui um valor de aptidão fornecido por meio da função objetivo. Esse valor pode ser utilizado para influenciar na seleção de indivíduos mais aptos, dependendo do GA, onde tais indivíduos têm maior probabilidade de serem escolhidos para cruzamento do que indivíduos com valores inferiores de aptidão [74].

O ciclo evolucionário pode ser repetido até que um critério de parada seja atingido. Tal critério pode ser configurado como o número de ciclos evolucionários, grau de desvio entre valores de aptidão de indivíduos de gerações diferentes ou um valor de aptidão pré-definido. Desde que indivíduos se tornem mais aptos no decorrer do processo evolucionário, espera-se que na população final seja possível encontrar a melhor solução ou algumas soluções satisfatórias [75]. Desse modo, a escolha da solução final fica a cargo do usuário, tornando o GA potencialmente útil para identificar possíveis soluções alternativas [74].

Pela aplicação dos operadores de cruzamento, mutação e seleção nos indivíduos, para uma determinada população, uma nova população pode ser produzida. Uma geração compreende o intervalo de tempo entre duas escolhas de sobreviventes. Se um ou mais, dos indivíduos mais aptos, são deterministicamente selecionados para as gerações sucessivas então costuma-se dizer que o GA utiliza estratégia elitista.

O GA apresenta as seguintes vantagens em sua utilização na resolução de problemas [74]:

1. Procura a aptidão de cada um dos integrantes de uma população em paralelo e não busca um único indivíduo como solução.
2. Manipula restrições do problema anexando essas informações na estrutura cromossômica dos indivíduos ou nos operadores genéticos.
3. Pode resolver problemas com múltiplos objetivos de otimização.

O GA também apresenta as seguintes desvantagens [74]:

1. Não fornece garantia de obter o ótimo global, ou seja, o melhor indivíduo, embora ofereça uma tendência de melhoramento dos indivíduos no decorrer do processo evolutivo.
2. O algoritmo pode convergir para um ótimo local, ou seja, uma solução satisfatória, de modo a retornar essa solução como melhor indivíduo.
3. O fato da população ser modificada com o processo evolutivo pode não refletir em melhoria para os indivíduos no contexto do problema, de modo que para problemas que necessitem de uma solução imediata e viável, o GA não seja indicado para ser utilizado.

B.1.1 Mecanismos de cruzamento

O operador de cruzamento produz novos indivíduos a partir do material genético dos seus pais [74]. A aplicação desse operador em indivíduos mais aptos, faz com que suas boas qualidades se propaguem no decorrer das gerações [75].

Essa operação não é necessariamente executada em todos os indivíduos, ao invés disto, pode ser aplicada com uma certa probabilidade (P_{Cr}) de modo que os pares selecionados sofram cruzamento [74]. O aumento desse valor ocasiona em uma crescente troca de material genético entre os indivíduos, fazendo com que propriedades boas possam ser trocadas entre eles ou acarretar a perda de bons indivíduos no decorrer do processo evolucionário [74].

Os operadores genéticos manipulam os genes dos cromossomos diretamente, de modo que o operador de cruzamento pode trocar material genético entre pares ou grupos de indivíduos, sendo a forma mais simples conhecida como cruzamento monoponto. Tal operação é realizada de acordo com o procedimento informado na tabela B.1. No caso do exemplo, ilustrado na figura B.3, a segunda posição nos indivíduos foi escolhida como ponto de cruzamento.

Tabela B.1: Procedimento da operação de cruzamento monoponto.

| Passo | Descrição |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | De acordo com uma probabilidade de cruzamento (P_{Cr}), os indivíduos são selecionados aos pares. |
| 2 | Um número aleatório é gerado entre a primeira e penúltima posição cromossômica do indivíduo. |
| 3 | Após selecionada a posição no cromossomo, o material genético dos indivíduos é trocado a partir da segunda metade de forma a gerar os descendentes. |

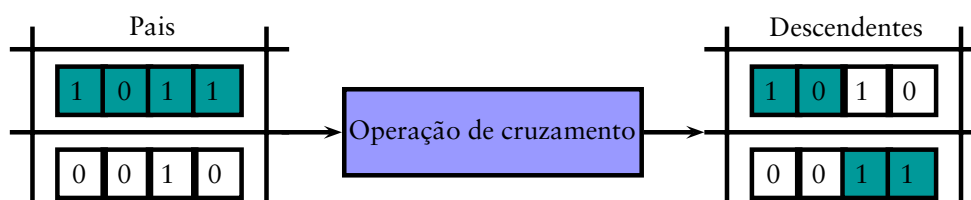


Figura B.3: Operação de cruzamento monoponto entre indivíduos.

Para o cruzamento multiponto, m posições de cruzamento são escolhidas aleatoriamente e organizadas de forma crescente, de modo que as informações entre pontos de cruzamento sucessivos são trocadas entre os pais de modo a formar os descendentes. A seção entre a primeira posição e o primeiro ponto de cruzamento permanece inalterável.

A idéia desse tipo de cruzamento é de que as partes da representação cromossômica, que contribuem para um melhor desempenho de um indivíduo em particular, podem não estar contidas necessariamente em seções adjacentes [77]. Além do mais, essa operação de cruzamento multiponto permite que o algoritmo possa explorar o espaço global de soluções, ao invés de favorecer a convergência para indivíduos considerados mais aptos no início do processo evolucionário [78].

Outra técnica de cruzamento que pode ser utilizada é a de cruzamento uniforme. Ela generaliza a recombinação de modo que toda posição cromossômica se torna um ponto de cruzamento em potencial. Uma máscara de cruzamento, com mesmo comprimento estrutural do indivíduo, é criada aleatoriamente e a paridade dos bits determina quais descendentes surgirão a partir dos pais, conforme ilustrado na figura B.4 [74].

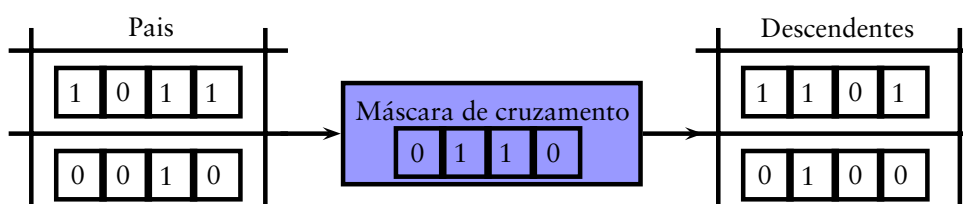


Figura B.4: Operação de cruzamento uniforme entre indivíduos.

B.1.2 Mecanismos de mutação

Na evolução natural o processo de mutação é aleatório, fazendo com que um gene seja substituído por outro de modo a produzir uma nova estrutura genética. No GA, o operador de mutação é aplicado com uma certa probabilidade (P_{Mt}), de modo a modificar elementos nos cromossomos, possuindo a função de criar diversidade. A consequência é a diminuição da possibilidade de convergência para um ótimo local ao invés do global [79]. A operação de mutação é descrita na tabela B.2 e ilustrada na figura B.5.

Tabela B.2: Procedimento da operação de mutação monoponto.

| Passo | Descrição |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Seleciona-se um indivíduo de acordo com uma probabilidade de mutação (P_{Mt}). |
| 2 | Gera-se um número aleatório entre a primeira e a última posição cromossômica. |
| 3 | O gene determinado pela posição escolhida é modificado. |

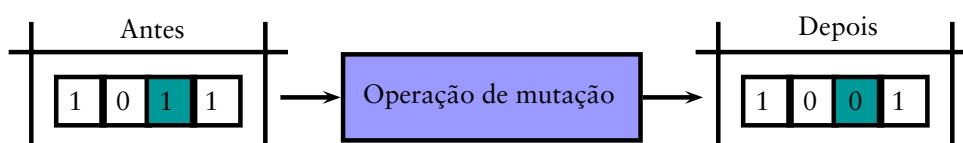


Figura B.5: Operação de mutação realizada na terceira posição do indivíduo.

Existe uma grande variedade de operadores de mutação. Como exemplo, pode-se utilizar um que influencia a mutação em indivíduos com valores de aptidão inferiores ao valor de aptidão médio da população, aumentando assim a exploração do espaço de soluções sem perder a informação dos indivíduos mais aptos [80]. Outro exemplo é o operador que diminui a probabilidade de mutação à medida que a população converge em direção ao ponto ótimo [81].

B.1.3 Mecanismos de seleção

A etapa de seleção pode ser descrita como um compromisso entre dois processos: o determinístico e o probabilístico. O primeiro é representado pelo valor da aptidão e tem a função de assegurar, em casos particulares, a escolha das melhores soluções para as futuras gerações.

O segundo deve garantir que até mesmo as piores soluções possam estar presentes nas próximas gerações de modo a criar boas soluções diante de algumas circunstâncias do processo evolucionário.

Se nem todos os novos indivíduos puderem ser utilizados ou se um maior número de descendentes for gerado em comparação com o tamanho da população original, então o operador de seleção deve ser utilizado para determinar quais indivíduos devem compor uma nova população. Uma das técnicas utilizadas é baseada no somatório das aptidões de todos os indivíduos. Seu procedimento é descrito na tabela B.3 e ilustrado na figura B.6 [74].

Tabela B.3: Procedimento de seleção baseado no somatório das aptidões de todos os indivíduos.

| Passo | Descrição |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Calcula-se a soma das aptidões de todos os indivíduos da população. |
| 2 | Gera-se um número aleatório entre 0 e o valor total de aptidão. |
| 3 | Retorna-se o primeiro indivíduo da população cujo valor de aptidão adicionado com os outros valores de aptidão dos indivíduos anteriores seja maior ou igual ao número aleatório gerado. |

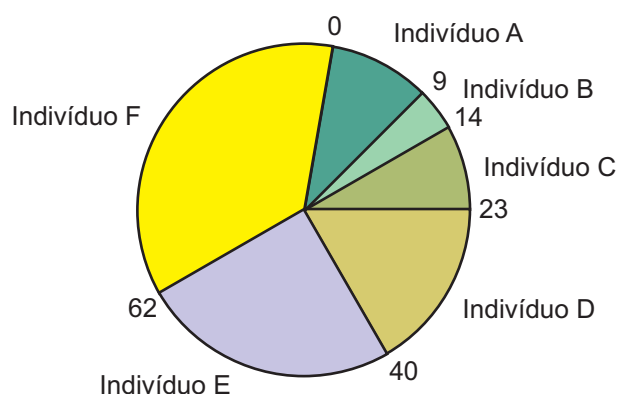


Figura B.6: Mecanismo de seleção baseado no somatório das aptidões de todos os indivíduos.

B.2 Aplicações dos algoritmos genéticos nas redes ópticas

A aplicação do GA nas redes ópticas é encontrada em alguns trabalhos publicados na literatura. Tais trabalhos utilizam os algoritmos genéticos em processos de atribuição de comprimento de onda [4; 76], roteamento das chamadas [75], problemas de RWA considerando penalidades na transmissão dos sinais ópticos [82], determinação da disposição de componentes ópticos na rede, utilização de conversores de comprimento de onda e o impacto desses resultados na probabilidade de bloqueio das chamadas [83].

O problema de atribuição de comprimento de onda é tratado na referência [76], considerando a seleção do canal que minimiza o comprimento da fibra necessária para o estabelecimento da chamada na rota obtida. O problema de RWA é investigado em [12]. Os autores consideram a degradação dos sinais transmitidos pelos componentes ópticos presentes ao longo da rota analisada. Os objetivos, neste caso, são o de maximizar o número de rotas estabelecidas na rede e determinar os níveis de potência, de modo que o sinal permaneça acima de um limiar pré-estabelecido para atendimento da chamada solicitada.

A disposição dos amplificadores na rede, em locais estratégicos, de modo a garantir que todos os sinais sejam adequadamente amplificados enquanto minimiza o número total de amplificadores utilizados, é tratada em [84]. Enquanto que o número ótimo e a disposição dos conversores de comprimentos de onda na rede são determinados em [83]. O problema de RWA considerando os efeitos de PMD e ASE, quando se admite conversão completa, esparsa ou ausência de conversão de comprimento de onda na rede, é avaliado para reduzir a probabilidade de bloqueio das chamadas na referência [82].

APÊNDICE **C**

PROCEDIMENTO DE MODELAGEM DAS PENALIDADES FÍSICAS NAS REDES ÓPTICAS TRANSPARENTES

A evolução consciente começa assim que tomamos a responsabilidade de remover nossas próprias barreiras.

— Dan Millman

O modelo analítico desenvolvido neste trabalho se baseia no cálculo das potências ópticas do sinal e do ruído em cada um dos pontos assinalados na figura C.1, por exemplo, e determinação da OSNR no nó destino. Para isso, encontra-se a expressão das potências ópticas do sinal e do ruído no ponto anterior ao receptor, que no caso da figura C.1, refere-se ao ponto h.

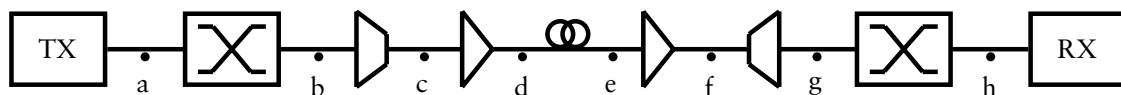


Figura C.1: Rota com um enlace.

Desse modo, analisando-se cada ponto, obtêm-se as seguintes expressões para as potências ópticas do sinal e do ruído:

Ponto a

$$P_a = P_{in} \quad (C.1)$$

e

$$N_a = N_{in}. \quad (C.2)$$

Ponto b

$$P_b = \frac{1}{L_{Sw}} P_{in} \quad (C.3)$$

e

$$N_b = \frac{1}{L_{Sw}} N_{in} + N_{Sw_1}. \quad (C.4)$$

Ponto c

$$P_c = \frac{1}{L_{Sw} L_{Mx}} P_{in} \quad (C.5)$$

e

$$N_c = \frac{1}{L_{Sw} L_{Mx}} N_{in} + \frac{1}{L_{Mx}} N_{Sw_1}. \quad (C.6)$$

Ponto d

$$P_d = \frac{G_{Amp_1}}{L_{Sw} L_{Mx}} P_{in} \quad (C.7)$$

e

$$N_d = \frac{G_{Amp_1}}{L_{Sw} L_{Mx}} N_{in} + \frac{G_{Amp_1}}{L_{Mx}} N_{Sw_1} + N_{Amp_1}. \quad (C.8)$$

Ponto e

$$P_e = \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d}}{L_{Sw} L_{Mx}} P_{in} \quad (C.9)$$

e

$$N_e = \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d}}{L_{Sw} L_{Mx}} N_{in} + \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d}}{L_{Mx}} N_{Sw_1} + e^{-\alpha d} N_{Amp_1} + N_{FWM}. \quad (C.10)$$

Ponto f

$$P_f = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Sw}} L_{\text{Mx}}} P_{\text{in}} \quad (\text{C.11})$$

e

$$N_f = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Sw}} L_{\text{Mx}}} N_{\text{in}} + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}}} N_{\text{Sw}_1} + e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2} N_{\text{Amp}_1} + \\ + G_{\text{Amp}_2} N_{\text{FWM}} + N_{\text{Amp}_2}. \quad (\text{C.12})$$

Ponto g

$$P_g = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Sw}} L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}}} P_{\text{in}} \quad (\text{C.13})$$

e

$$N_g = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Sw}} L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}}} N_{\text{in}} + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}}} N_{\text{Sw}_1} + \frac{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}}} N_{\text{Amp}_1} + \\ + \frac{G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}}} N_{\text{FWM}} + \frac{1}{L_{\text{Dx}}} N_{\text{Amp}_2}. \quad (\text{C.14})$$

Ponto h

$$P_h = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Sw}} L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}}} \boxed{\frac{P_{\text{in}}}{L_{\text{Sw}}}} \quad (\text{C.15})$$

e

$$N_h = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Sw}} L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}}} \boxed{\left(\frac{N_{\text{in}}}{L_{\text{Sw}}} + N_{\text{Sw}_1} \right)} + \frac{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{Amp}_1} + \\ + \frac{G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{FWM}} + \frac{1}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{Amp}_2} + N_{\text{Sw}_2}. \quad (\text{C.16})$$

No ponto **h**, P_{out} e N_{out} podem ser determinadas, substituindo as equações (5.1), (5.2) e (5.7), na equação (C.16), desse modo tem-se que:

$$P_{out} = \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Mx} L_{Dx} L_{Sw}} \boxed{\frac{P_{in}}{L_{Sw}}} \quad (C.17)$$

e

$$\begin{aligned} N_{out} = & \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Mx} L_{Dx} L_{Sw}} \boxed{\left(\frac{N_{in}}{L_{Sw}} + \varepsilon \sum_{j=1}^n P_{Sw_{1,j}} \right)} + \\ & + \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Dx} L_{Sw}} \frac{hf B_0}{2} \left(F_{Amp_1} + \frac{F_{Amp_2}}{e^{-\alpha d} G_{Amp_1}} \right) + \\ & + \frac{G_{Amp_2}}{L_{Dx} L_{Sw}} \sum_{j=1}^m P_{FWM_j} + \varepsilon \sum_{j=1}^s P_{Sw_{2,j}}. \end{aligned} \quad (C.18)$$

Para uma rota com dois enlaces, conforme ilustrado na figura C.2, obtêm-se as seguintes expressões para as potências ópticas do sinal e do ruído, a partir do ponto **h**:

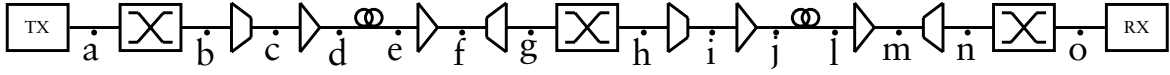


Figura C.2: Rota com dois enlaces.

Ponto h

$$\begin{aligned} P_h &= \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Sw} L_{Mx} L_{Dx} L_{Sw}} P_{in} \\ &= P_{out-Enlace_1} \end{aligned} \quad (C.19)$$

e

$$\begin{aligned} N_h &= \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Sw} L_{Mx} L_{Dx} L_{Sw}} N_{in} + \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Mx} L_{Dx} L_{Sw}} N_{Sw_1} + \frac{e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Dx} L_{Sw}} N_{Amp_1} + \\ &+ \frac{G_{Amp_2}}{L_{Dx} L_{Sw}} N_{FWM} + \frac{1}{L_{Dx} L_{Sw}} N_{Amp_2} + N_{Sw_2} \\ &= N_{out-Enlace_1}. \end{aligned} \quad (C.20)$$

Ponto i

$$P_i = \frac{1}{L_{Mx}} P_{\text{out-Enlace}_1} \quad (\text{C.21})$$

e

$$N_i = \frac{1}{L_{Mx}} N_{\text{out-Enlace}_1}. \quad (\text{C.22})$$

Ponto j

$$P_j = \frac{G_{\text{Amp}_1}}{L_{Mx}} P_{\text{out-Enlace}_1} \quad (\text{C.23})$$

e

$$N_j = \frac{G_{\text{Amp}_1}}{L_{Mx}} N_{\text{out-Enlace}_1} + N_{\text{Amp}_1}. \quad (\text{C.24})$$

Ponto l

$$P_l = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d}}{L_{Mx}} P_{\text{out-Enlace}_1} \quad (\text{C.25})$$

e

$$N_l = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d}}{L_{Mx}} N_{\text{out-Enlace}_1} + e^{-\alpha d} N_{\text{Amp}_1} + N_{\text{FWM}}. \quad (\text{C.26})$$

Ponto m

$$P_m = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{Mx}} P_{\text{out-Enlace}_1} \quad (\text{C.27})$$

e

$$N_m = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{Mx}} N_{\text{out-Enlace}_1} + e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2} N_{\text{Amp}_1} + G_{\text{Amp}_2} N_{\text{FWM}} + N_{\text{Amp}_2}. \quad (\text{C.28})$$

Ponto n

$$P_n = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{Mx} L_{Dx}} P_{\text{out-Enlace}_1} \quad (\text{C.29})$$

e

$$N_n = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{Mx} L_{Dx}} N_{\text{out-Enlace}_1} + \frac{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{Dx}} N_{\text{Amp}_1} + \frac{G_{\text{Amp}_2}}{L_{Dx}} N_{\text{FWM}} + \frac{1}{L_{Dx}} N_{\text{Amp}_2}. \quad (\text{C.30})$$

Ponto o

$$P_o = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} P_{\text{out-Enlace}_1} \quad (\text{C.31})$$

e

$$\begin{aligned} N_o = & \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{out-Enlace}_1} + \frac{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{Amp}_1} + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{FWM}} + \frac{1}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{Amp}_2} + N_{\text{Sw}_2}. \end{aligned} \quad (\text{C.32})$$

No ponto o, P_{out} e N_{out} podem ser determinadas, substituindo as equações (5.1), (5.2) e (5.7), na equação (C.32), desse modo tem-se que:

$$P_{\text{out}} = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} P_{\text{out-Enlace}_1} = P_{\text{out-Enlace}_2} \quad (\text{C.33})$$

e

$$\begin{aligned} N_{\text{out}} = & \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{out-Enlace}_1} + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \frac{hf B_o}{2} \left(F_{\text{Amp}_1} + \frac{F_{\text{Amp}_2}}{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_1}} \right) + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \sum_{j=1}^m P_{\text{FWM}_j} + \varepsilon \sum_{j=1}^s P_{\text{Sw}_{2,j}} = N_{\text{out-Enlace}_2}. \end{aligned} \quad (\text{C.34})$$

A partir das considerações realizadas nos dois casos anteriores, pode-se verificar que para uma rota com três enlaces são obtidas as seguintes expressões:

$$P_{\text{out}} = \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} P_{\text{out-Enlace}_2} = P_{\text{out-Enlace}_3} \quad (\text{C.35})$$

e

$$\begin{aligned} N_{\text{out}} = & \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Mx}} L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} N_{\text{out-Enlace}_2} + \frac{G_{\text{Amp}_1} e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \frac{hf B_o}{2} \left(F_{\text{Amp}_1} + \frac{F_{\text{Amp}_2}}{e^{-\alpha d} G_{\text{Amp}_1}} \right) + \\ & + \frac{G_{\text{Amp}_2}}{L_{\text{Dx}} L_{\text{Sw}}} \sum_{j=1}^m P_{\text{FWM}_j} + \varepsilon \sum_{j=1}^s P_{\text{Sw}_{2,j}} = N_{\text{out-Enlace}_3}. \end{aligned} \quad (\text{C.36})$$

Para uma rota com i enlaces, essas expressões podem ser generalizadas da seguinte forma:

$$P_{out} = \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Mx} L_{Dx} L_{Sw}} P_{out-Enlace_{i-1}} \quad (C.37)$$

e

$$\begin{aligned} N_{out} = & \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Mx} L_{Dx} L_{Sw}} N_{out-Enlace_{i-1}} + \frac{G_{Amp_1} e^{-\alpha d} G_{Amp_2}}{L_{Dx} L_{Sw}} \frac{hf B_o}{2} \left(F_{Amp_1} + \frac{F_{Amp_2}}{e^{-\alpha d} G_{Amp_1}} \right) + \\ & + \frac{G_{Amp_2}}{L_{Dx} L_{Sw}} \sum_{j=1}^m P_{FWM_j} + \varepsilon \sum_{j=1}^s P_{Sw_{2,j}}, \end{aligned} \quad (C.38)$$

onde

$$P_{out-Enlace_0} = \frac{P_{in}}{L_{Sw}} \quad (C.39)$$

e

$$N_{out-Enlace_0} = \frac{N_{in}}{L_{Sw}} + \varepsilon \sum_{j=1}^n P_{Sw_{1,j}}. \quad (C.40)$$

APÊNDICE **D**

LISTA DE PUBLICAÇÕES

Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis uma montanha.

— Confúcio

D.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 Adaptive Weight Function for Routing in All Optical Networks. In: **Anais 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: **Anais 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: **Anais 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: **Anais 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: **Anais 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.

D.2 Artigos submetidos

1. 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*.
2. 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] D. H. RICHARDS, J. L. JACKEL, N. SMYTH, M. GOODMAN, W. T. ANDERSON, Advances in optical network modeling, *13^o Annual Meeting Lasers and Electro-Optics Society*, v. 1, p. 96–97, Novembro 2000.
- [3] N. BIRYUKOV, O. TYTARCHUK, N. TRISKA, Evaluation of four-wave mixing products in c-range, In: **Anais do 4^o International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**, v. 1. IEEE/LEOS, Abril 2002, p. 229–232.
- [4] H. A. PEREIRA, C. J. A. BASTOS-FILHO, D. A. R. CHAVES, 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**, Setembro 2005, p. 1–6.
- [5] 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 1999.
- [6] 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.
- [7] 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: **Anais do European Conference and Exhibition on Optical Communication – ECOC**, v. 3. Optical Society of America, 2003, p. 856–857.
- [8] G. P. AGRAWAL, **Fiber-optic communication systems**, 3^a ed. Wiley-Interscience, 2002.
- [9] 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.
- [10] E. KARASAN, E. AYANOGLU, Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in wdm optical networks, *ACM Transactions on Networking*, v. 6, n. 2, p. 186–196, Abril 1998.
- [11] 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. S40–S47, Agosto 2004.
- [12] M. ALI, B. RAMAMURTHY, J. S. DEOGUN, Routing and wavelength assignment with power considerations in optical networks, *Elsevier Computer Networks*, v. 32, n. 5, p. 539–555, Maio 2000.
- [13] I. E. FONSECA, M. R. N. RIBEIRO, R. C. ALMEIDA JR., H. WALDMAN, Preserving global optical qos in fwm impaired dynamic networks, *Eletronics Letters*, v. 40, n. 3, p. 191–192, Fevereiro 2004.
- [14] M. ALI, L. TANCEVSKI, Impact of polarization-mode dispersion on the design of wavelength-routed networks, *Photonics Technology Letters*, v. 14, p. 720–722, Maio 2002.
- [15] M. ALI, D. ELIE-DIT-COSAQUE, L. TANCEVSKI, Network optimization with transmission impairments-based routing, In: **Anais do European Conference on Optical Communication – ECOC**. OSA, 2001, p. 42–43.
- [16] C. J. A. BASTOS-FILHO, J. F. MARTINS-FILHO, Noise figure model for transmission Performance evaluation considering four wave mixing and source spontaneous Emission, In: **Anais do International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC**. IEEE-MTS/SBMO, Julho 2005.
- [17] A. S. TANENBAUM, **Redes de Computadores**, 4^a ed. Ed. Campus, 2003.

- [18] A. K. GHATAK, K. THYAGARAJAN, **An Introduction to Fiber Optics**, 1^a ed. Cambridge - USA, 1998.
- [19] 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.
- [20] R. G. DANTE, E. MOSCHIM, J. F. MARTINS-FILHO, Modified distributed relative capacity loss algorithm for wdm optical networks, *Journal of Optical Networking*, v. 4, n. 5, p. 271–284, Maio 2005, <http://www.osa-jon.org/abstract.cfm?URI=JON-4-5-271>.
- [21] A. MARINCIC, V. ACIMOVIC-RASPOPOVIC, Evolution of wdm optical networks, In: **Anais do 5^o International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service**, v. 2. IEEE, Setembro 2001, p. 473–480.
- [22] K. CHAN, T. P. YUM, Analysis of least congested path routing in wdm lightwave networks, In: **Anais do 13^o International Conference on Computer Communications – INFOCOM**, v. 2. IEEE, Abril 1994, p. 962–969.
- [23] H. HARAI, M. MURATA, H. MIYAHARA, Performance of alternate routing methods in all-optical switching networks, In: **Anais do 16^o International Conference on Computer Communications – INFOCOM**, v. 2. IEEE, Abril 1997, p. 516–524.
- [24] L. LI, A. K. SOMANI, Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information, *ACM Transactions on Networking*, v. 7, n. 5, p. 779–786, Outubro 1999.
- [25] S. RAMAMURTHY, B. MUKHERJEE, Fixed-alternative routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks, In: **Anais do Global Telecommunications Conference – Globecom**, v. 4. IEEE, Novembro 1998, p. 2295–2302.
- [26] I. CHLAMTAC, A. GANZ, G. KARMI, Purely optical networks for terabit communication, In: **Anais do 8^o International Conference on Computer Communications – INFOCOM**, v. 3. IEEE, Abril 1989, p. 887–896.
- [27] R. A. BARRY, S. SUBRAMANIAM, The max-sum wavelength assignment algorithm for wdm ring networks, In: **Anais do Optical Fiber Communication Conference – OFC**. IEEE, 1997, p. 121–122.

- [28] A. BIRMAN, A. KERSHENBAUM, Routing and wavelength assignment methods in single-hop all-optical networks with blocking, In: **Anais do 14o International Conference on Computer Communications – INFOCOM**, v. 2. IEEE, Abril 1995, p. 431–438.
- [29] G. JEONG, E. AYANOGLU, Comparison of wavelength-interchanging and wavelength-selective cross-connects in multiwavelength all-optical networks, In: **Anais do 15o International Conference on Computer Communications – INFOCOM**, v. 1. IEEE, Março 1996, p. 156–163.
- [30] S. SUBRAMANIAM, R. A. BARRY, Wavelength assignment in fixed routing wdm networks, In: **Anais do International Conference on Communications – ICC**, v. 1. IEEE, Junho 1997, p. 406–410.
- [31] X. ZHANG, C. QIAO, Wavelength assignment for dynamic traffic in multi-fiber wdm networks, In: **Anais do International Conference on Computer Communications and Networks – ICCCN**. IEEE, Outubro 1998, p. 479–485.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] M. KOWALEWSKI, M. MARCINIAK, A. SEDLIN, Optimisation of short-haul dwdm fibre telecommunication systems in presence of nonlinear optical phenomena, In: **Anais do 2o International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**. IEEE, Junho 2000, p. 139–142.
- [35] E. IANNONE, F. MATERA, R. SABELLA, M. SETTEMBRE, Impact of fiber non-linearities in transmission across geographical optical networks, In: **Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting**, v. 1. IEEE, Novembro 1996, p. 103–104.
- [36] D. LEVANDOVSKY, Wavelength routing based on physical impairments, In: **Anais do Optical Fiber Communication Conference and Exhibit – OFC**, v. 2. IEEE, 2001, p. TuG7-1–TuG7-3.

- [37] C. MARAND, S. BARONI, F. DI PASQUALE, P. BAYVEL, Design of wavelength-routed optical networks with optimised channel allocation in the edfa bandwidth, In: **Anais do 22o European Conference on Optical Communication – ECOC**, v. 2. IEEE, Setembro 1996, p. 273–276.
- [38] I. FONSECA, R. ALMEIDA, M. RIBEIRO, H. WALDMAN, Algorithms for fwm-aware routing and wavelength assignment, In: **Anais do International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC**, v. 2. IEEE-MTS/SBMO, Setembro 2003, p. 707–712.
- [39] I. E. FONSECA, R. C. ALMEIDA JR., H. WALDMAN, M. R. N. RIBEIRO, Meeting optical qos requirements with reduced complexity in dynamic wavelength assignment, In: **Anais do 1o International Conference on Broadband Networks**. IEEE, Outubro 2004, p. 331–334.
- [40] R. MEDINA, Photons vs. electrons [all optical network], *Potentials*, v. 21, n. 2, p. 9–11, Abril-Maio 2002.
- [41] M. EL-SAYED, J. JAFFE, A view of telecommunications network evolution, *Communications Magazine*, v. 40, n. 12, p. 74–81, Dezembro 2002.
- [42] A. YARIV, P. YEH, **Photonics: optical electronics in modern communications**, 6^a ed. Oxford University Press, 2007.
- [43] P. C. BECKER, N. A. OLSSON, J. R. SIMPSON, **Erbium doped fiber amplifiers**, 1^a ed. Academic Press, 1999.
- [44] X. YANG, B. RAMAMURTHY, Dynamic routing in translucent wdm optical networks: The intradomain case, *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 3, p. 955–971, Março 2005.
- [45] X. YANG, L. SHEN, B. RAMAMURTHY, Survivable lightpath provisioning in wdm mesh networks under shared path protection and signal quality constraints, *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 4, p. 1556–1567, Abril 2005.
- [46] S. PACHNICKE, T. GRAVEMANN, M. WINDMANN, E. VOGES, Physically constrained routing in 10-gb/s dwdm networks including fiber nonlinearities and polarization effects, *Journal of Lightwave Technology*, v. 24, n. 9, p. 3418–3426, Setembro 2006.

- [47] C. POLITI, V. ANAGNOSTOPOULOS, C. MATRAKIDIS, A. STAVDAS, Physical layer impairment aware routing algorithms based on analytically calculated q-factor, In: **Anais do Optical Fiber Communication Conference – OFC. IEEE/LEOS**, Março 2006.
- [48] 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.
- [49] R. SABELLA, IANNONE, M. MARCO LISTANTI, M. BERDUSCO, S. BINETTI, Impact of Transmission performance on path routing in all-optical transport networks, *Journal of Lightwave Technology*, v. 16, n. 11, p. 1965–1998, Novembro 1998.
- [50] 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.
- [51] N. ZULKIFLI, C. OKONKWO, K. GUILD, Dispersion optimised impairment constraint based routing and wavelength assignment algorithms for all-optical networks, In: **Anais do 8o International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**, v. 3. IEEE/LEOS, Junho 2006, p. 177–180.
- [52] H. LOUCHET, A. HODŽIĆ, K. PETERMANN, Analytical model for the performance evaluation of dwdm transmission systems, *Photonics Technology Letters*, v. 15, n. 9, p. 1219–1221, Setembro 2003.
- [53] L. PAVEL, Osnr optimization in optical networks: modeling and distributed algorithms via a central cost approach, *Journal on Selected Areas in Communications*, v. 24, n. 4, p. 54–65, Abril 2006.
- [54] —, Gen02-1: Hierarchical iterative algorithm for a coupled constrained osnr nash game, In: **Anais do Global Telecommunications Conference – GLOBECOM. IEEE**, Novembro 2006, p. 1–6.
- [55] —, A noncooperative game approach to osnr optimization in optical networks, *Transactions on Automatic Control*, v. 51, n. 5, p. 848–852, Maio 2006.
- [56] K. O. HILL, D. JOHNSON, B. S. KAWASAKI, R. I. MACDONALD, Cw three-wave mixing in single mode fibers, *Journal of Applied Physics*, v. 49, n. 10, p. 5098–5106, Outubro 1978.

- [57] N. SHIBATA, R. BRAUN, R. WAARTS, Phase-mismatch dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single mode fiber, *Journal of Quantum Electronics*, v. 23, n. 7, p. 1205–1211, Julho 1987.
- [58] S. SONG, C. ALLEN, K. DEMAREST, R. HUI, Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers, *Journal of Lightwave Technology*, v. 17, n. 11, p. 2285–2290, Novembro 1999.
- [59] K. INOUE, A simple expression for optical fdm network scale considering fiber four-wave mixing and optical amplifier noise, *Journal of Lightwave Technology*, v. 13, n. 5, p. 856–861, Maio 1995.
- [60] H. A. HAUS, Noise figure definition valid from rf to optical frequencies, *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 6, n. 2, p. 240–247, Março – Abril 2000.
- [61] M. A. SUMMERFIELD, R. S. TUCKER, Noise figure and conversion efficiency of four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers, *Electronics Letters*, v. 31, n. 14, p. 1159–1160, Julho 1995.
- [62] K. OBERMANN, I. KOLTCHANOV, K. PETERMANN, S. DIEZ, R. LUDWIG, H. WEBER, Noise analysis of frequency converters utilizing semiconductor-laser amplifiers, *Journal of Quantum Electronics*, v. 33, n. 1, p. 81–88, Janeiro 1997.
- [63] B. MUKHERJEE, Wdm optical communication networks: Progress and challenges, *Journal of Selected Areas in Communications*, v. 18, n. 10, p. 1810–1824, 2000.
- [64] R. LUIS, A. CARTAXO, Impact of dispersion slope on spm degradation in wdm systems with high channel count, *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 11, p. 3764–3772, Novembro 2005.
- [65] —, Analytical characterization of spm impact on xpm-induced degradation in dispersion-compensated wdm systems, *Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 3, p. 1503–1513, Março 2005.
- [66] R. CARDILLO, V. CURRI, M. MELLIA, Considering transmission impairments in wavelength routed networks, In: **Anais do Optical Network Design and Modeling – ONDM**, Fevereiro 2005, p. 421–429.

- [67] Y. POINTURIER, M. BRANDT-PEARCE, Routing and wavelength assignment incorporating the effects of crosstalk enhancement by fiber nonlinearity, In: **Anais do 39º Annual Conference on Information Sciences and Systems**, Março 2005.
- [68] C. MAS, D. VOGIATZIS, L. TOMKOS, Impairment aware routing in metropolitan area optical networks, In: **Anais do 6º International Conference on Transparent Optical Networks – ICTON**, v. 1. IEEE/LEOS, Julho 2004, p. 91–96.
- [69] 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, 2000.
- [70] 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.
- [71] E. A. J. ARANTES, Contribuições ao algoritmo de roteamento para redes ópticas baseado na figura de ruído e nas penalidades físicas, Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Março 2006.
- [72] R. C. E. GUALTIERI, **Darwinismo: A História de Uma Idéia**. Fórum Ciência on Line, acessado em 07 de Janeiro de 2006. [Online]. Disponível: http://www.cienciaonline.org/revista/02_06/historia/
- [73] J. H. HOLLAND, **Adaption in Natural and Artificial Systems**, 1ª ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1975.
- [74] K. F. MAN, K. S. TANG, S. KWONG, Genetic algorithms: Concepts and applications, *Transactions on Industrial Eletronics*, v. 43, n. 5, p. 519–534, Outubro 1996.
- [75] D. BISBAL, ET AL., Dynamic routing and wavelength assignment in optical networks by means of genetic algorithms, *Photonic Network Communications*, v. 7, n. 1, p. 43–58, Janeiro 2004.
- [76] R. INKRET, B. MIKAC, I. PODNAR, A heuristic approach to wavelength assignment in all-optical networks, In: **Anais do 9º Mediterranean Electrotechnical Conference – MELECON**, v. 2. IEEE, Maio 1998, p. 759–763.
- [77] L. BOOKER, Improving search in genetic algorithms, *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, p. 61–73, 1987.

- [78] W. M. SPEARS, K. A. DE JONG, An analysis of multi-point crossover, In: **Foundations of Genetic Algorithms**. Morgan Kaufmann, 1991, p. 301–315, citeseer.ist.psu.edu/97440.html.
- [79] D. E. GOLDBERG, **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**, 1^a ed. Addison Wesley Publishing Company, Janeiro 1989.
- [80] L. DAVIS, Adapting operator probabilities in genetic algorithms, In: **Anais do 30 International Conference on Genetic Algorithms**, J. D. SCHAFFER, Ed. Morgan Kaufmann, 1989, p. 61–69.
- [81] T. C. FOGARTY, Varying the probability of mutation in the genetic algorithm, In: **Anais do 30 International Conference on Genetic Algorithms**. Morgan Kaufmann, 1989, p. 104–109.
- [82] M. A. C. LIMA, A. C. CESAR, A. F. R. ARAUJO, Optical network optimization with transmission impairments based on genetic algorithm, In: **Anais do International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC**, v. 1. IEEE-MTS/SBMO, Setembro 2003, p. 361–365.
- [83] S. RUNGGERATIGUL, P. THONGSRI, P. SUMSIRIPONG, Optimal number of wavelength converters for wdm network design, In: **Anais do TENCON**, v. 3. IEEE, Novembro 2004, p. 93–96.
- [84] L. ZHONG, B. RAMAMURTHY, Optimization of amplifier placements in switch-based optical networks, In: **Anais do International Conference on Communications – ICC**, v. 1. IEEE, Junho 2001, p. 224–228.