

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE–UERN

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO–UFERSA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Carlos Evandro de Medeiros Fernandes

*Algoritmos de Alocação de Rota e Comprimento de Onda em  
Redes Óticas Limitadas por PMD e XPM/SPM*

Mossoró

2010

Carlos Evandro de Medeiros Fernandes

*Algoritmos de Alocação de Rota e Comprimento de Onda em  
Redes Óticas Limitadas por PMD e XPM/SPM*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Ciência da Computação da UERN–UFERSA,  
como requisito parcial para a obtenção do grau de  
MESTRE em Ciência da Computação.

**Orientador: Prof. Iguatemi Eduardo da Fonseca**

**D.Sc.**

Mossoró

2010

**Ficha catalográfica preparada pelo setor de classificação e  
catalogação da Biblioteca “Orlando Teixeira” da UFERSA**

F363 p Fernandes, Carlos Evandro de Medeiros.  
Algoritmos de alocação de rota e comprimento de onda  
em redes óticas limitadas por PMD e XPM/SPM / Carlos  
Evandro de Medeiros Fernandes. -- Mossoró, 2010.  
80f.: il.

Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) –  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Universidade do  
Estado do Rio Grande do Norte.  
Orientador: Prof. PhD. Iguatemi Eduardo da Fonseca.

1.Redes óticas. 2.Limitações da camada física.  
3.Algoritmo RWA 4.Qualidade de transmissão.  
I.Título.

CDD: 004.67809

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB15 120

# Algoritmos de Alocação de Rota e Comprimento de Onda em Redes Óticas Limitadas por PMD e XPM/SPM

Carlos Evandro de Medeiros Fernandes

Dissertação de Mestrado apresentada em Junho de 2010

Iguatemi Eduardo da Fonseca, D. Sc.  
Orientador

---

Componente da banca

---

Componente da banca

---

Componente da banca

Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil

À minha mãe, Maria Aurineide de Medeiros Fernandes, que sempre me incentivou e esteve ao meu lado nos momentos difíceis da minha vida,  
E à minha noiva, Ana Sila Tavares de Queiroz e o seu filho, Lucca Queiroz Liberalino, por estarem sempre presentes nos momentos especiais durante a minha vida acadêmica.

# Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Iguatemi Eduardo da Fonseca, por ter me dado todo o suporte necessário para o desenvolvimento deste trabalho, por ser uma pessoa compreensiva, ética e atenciosa, além de ser um verdadeiro exemplo de inspiração para futuros docentes e pesquisadores;

Ao meu co-orientador, Marcelo Sampaio de Alencar, pelos ensinamentos passados que servirão para diversos momentos da minha vida;

A todos que fazem parte do corpo docente do mestrado, às secretárias Rosita, Manuela, Marília e Rosângela, e aos professores Hércio, Luciano e Ronaldo;

À CAPES e à UFES;

Aos pesquisadores e discentes: Alexandra Ferreira Gomes, Victor André, Ubiratan S. P. Filho e Moisés R. N. Ribeiro, pelos trabalhos desenvolvidos em conjunto;

Aos discentes do Mestrado em Ciência da Computação UFERSA/UERN, pelas horas de estudo em grupo e momentos de descontração;

À CNPq pelo apoio financeiro;

Por fim, à UFERSA e à UERN por terem me aceitado como parte do seu corpo discente no programa de Mestrado em Ciência da Computação.

## Resumo

Esta Dissertação apresenta um estudo sobre a influência que os efeitos de Modulação Cruzada de Fase (XPM), Auto-Modulação de Fase (SPM) e Dispersão de Modo de Polarização (PMD) têm sobre o desempenho de uma rede ótica transparente. Dois algoritmos IA-RWA que levam em conta estes efeitos são propostos e analisados. Simulações numéricas realizadas em diferentes cenários de rede sugerem que existe um relacionamento entre os efeitos de XPM/SPM e PMD no momento da escolha da rota e do comprimento de onda para servir uma conexão oriunda de uma rede cliente da rede ótica. Além disso, o uso de um algoritmo IA-RWA, em que a rota e comprimento de onda são escolhidos ao mesmo tempo, pode melhorar o desempenho da rede e reduzir o impacto negativo dos efeitos da camada física sobre a qualidade de transmissão (QoT) dos caminhos óticos.

Palavras-chaves: redes óticas; limitações da camada física; algoritmo de roteamento e atribuição de comprimento de onda; qualidade de transmissão.

## Abstract

This work presents a study about the influence of Cross-phase Modulation/Self-Phase Modulation (XPM/SPM) and Polarization Mode Dispersion (PMD) over the performance of a transparent dynamic optical network. Two IA-RWA's algorithms, taking into account these physical impairments, are proposed and analyzed. Numerical simulations in different networks scenarios suggest that there is a relationship between XPM/SPM and PMD effects. Furthermore, the use of an IA-RWA algorithm, where the route and wavelength choice is made at the same time, may improve network performance and reduce the negative impact of the physical impairments over the lighthpath qualify of transmission (QoT).

Keywords: Optical networks; physical impairments; routing and wavelength assignment algorithm; quality of transmission.

# Conteúdo

|   |    |
|---|----|
| Capítulo 1 – Introdução.....  | 1  |
| 1.1 Trabalhos relacionados.....   | 3  |
| 1.2 Proposta de pesquisa.....   | 6  |
| Capítulo 2 – Qualidade de transmissão em redes óticas.....  | 9  |
| 2.1 A camada ótica e a camada cliente.....  | 13 |
| 2.1.1 Algoritmo RWA tradicional.....  | 15 |
| 2.2 Limitações da camada física.....  | 17 |
| 2.2.1 Equação Não-Linear de Schrödinger.....  | 18 |
| 2.2.2 Efeitos inerentes à escolha da rota.....  | 19 |
| 2.2.2.1 Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE –<br><i>Amplified Spontaneous Emission</i> ).....                          | 19 |
| 2.2.2.2 Dispersão Cromática.....  | 20 |
| 2.2.2.3 Dispersão de Modo de Polarização (PMD –<br><i>Polarization-Mode Dispersion</i> ).....                                   | 22 |
| 2.2.3 Efeitos inerentes à escolha do comprimento de onda .....  | 22 |
| 2.2.3.1 Modulação Cruzada de Fase (XPM – <i>Cross-Phase<br/>Modulation</i> ).....   | 22 |
| 2.2.3.2 Automodulação de Fase (SPM – <i>Self-Phase<br/>Modulation</i> ).....  | 23 |
| 2.2.3.3 Mistura de Quatro Ondas (FWM – <i>Four-Wave<br/>Mixing</i> ).....   | 24 |
| 2.2.4 Penalidade de potência e diagrama de olho.....  | 24 |
| Capítulo 3 – Modelos de Inclusão da Modulação Cruzada de Fase/ Automodulação<br>de Fase e Dispersão de Modo de Polarização..... | 27 |
| 3.1 O efeito XPM e o impacto na BER.....  | 28 |
| 3.1.1 Modelo de inclusão do XPM.....  | 30 |
| 3.2 A dispersão de modo de polarização.....   | 36 |
| 3.2.1 Modelo de inclusão do PMD.....  | 37 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3 Sumário do capítulo.....   | 39 |
| Capítulo 4 – Proposta de algoritmos IA-RWA e resultados numéricos..... | 40 |
| 4.1 Cenário e ambiente de simulação.....                               | 40 |
| 4.1.1 Métricas de desempenho.....                                      | 44 |
| 4.2 RWA Cego.....  | 45 |
| 4.3 Proposta IA-RWA Egoísta e Ético.....                               | 46 |
| 4.3.1 Resultados.....  | 49 |
| 4.4 Proposta IA-RWA Integrada.....                                     | 51 |
| 4.4.1 Resultados.....  | 54 |
| 4.5 Sumário.....   | 60 |
| <br>   |    |
| Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros.....                       | 61 |
| <br>   |    |
| Referências bibliográficas.....  | 63 |
| <br>   |    |
| Apêndice A – Algoritmo de Dijkstra.....                                | 69 |
| A.1 Exemplo.....   | 70 |
| <br>   |    |
| Apêndice B – Algoritmo de Yen.....                                     | 74 |
| B.1 Exemplo.....   | 75 |
| <br>   |    |
| Apêndice C – Artigos publicados e submetidos a publicação.....         | 79 |

## Lista de Siglas

|         |  |
|---------|--|
| ASE     | Ruído de Emissão Espontânea Amplificada                |
| ASON    | Automatically Swiched Optical Networks                 |
| BER     | Taxa de Erro de Bit                                    |
| CAC     | Controle de Admissão de Chamadas                       |
| CVP     | Probabilidade de Violação Crítica                      |
| CW      | Canais Contínuos                                       |
| DSF     | Fibras de Dispersão Deslocada                          |
| DWDM    | Multiplexação por Comprimento de Onda Densa            |
| EDFA    | Amplificadores Ópticos à Fibra Dopada com Érbio        |
| FWM     | Mistura de Quatro Ondas                                |
| GMPLS   | Generalized Multiprotocol Label Switching              |
| IA-RWA  | Impairment Aware – Routing and Wavelength Assignment   |
| NLSE    | Equação Não-Linear de Schrödinger                      |
| NZDF    | Fibras com Dispersão Não-Nula                          |
| OADM    | Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação         |
| O-E-O   | Conversão Óptica-Elétrica-Óptica                       |
| OLT     | Terminais Ópticos de Linha                             |
| OSLA    | Contrato de Serviço Óptico                             |
| OSNR    | Relação Sinal Ruído Óptica                             |
| OSPF-TE | Open Shortest Path First – Traffic Engineering         |
| OXC     | Chaves ou Comutadores Ópticos                          |
| PMD     | Dispersão de Modo de Polarização                       |
| QoS     | Qualidade de serviço                                   |
| QoT     | Qualidade de Transmissão                               |
| RSVP-TE | Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering    |
| RWA     | Algoritmo de Alocação de Rota e de Comprimento de Onda |
| SBS     | Espalhamento Estimulado de Brillouin                   |
| SPM     | Auto Modulação de Fase                                 |

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| SRS  | Espalhamento Estimulado de Raman      |
| STDF | Fibra Óptica Padrão                   |
| TVP  | Probabilidade de Violação de Limiar   |
| WDM  | Multiplexação por Comprimento de Onda |
| XPM  | Modulação Cruzada de Fase             |

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1.1: Classificação das técnicas de algoritmos IA-RWA.....                           | 04 |
| Tabela 4.1: Parâmetros das fibras especificados nas simulações.....                        | 43 |
| Tabela A.1: Valores apresentados na Matriz de estados quando $v = a$ .....                 | 71 |
| Tabela A.2: Valores apresentados na matriz de estados quando $v = r$ .....                 | 72 |
| Tabela B.1: Novo caminho mais curto encontrado pelo Yen, utilizando $dv = a$ .....         | 76 |
| Tabela B.2: Novo caminho mais curto encontrado pelo Yen, utilizando $dv = r$ .....         | 77 |
| Tabela B.3: Caminhos encontrados com o algoritmo de Yen, usando o caminho<br>Dijkstra..... | 78 |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1: Estrutura de uma fibra ótica.....   | 10 |
| Figura 2.2: Longa faixa espectral de comprimento de onda das fibras de espectro completo.....   | 11 |
| Figura 2.3: Espaçamento entre canais.....   | 12 |
| Figura 2.4: Rede totalmente ótica interligando redes clientes.....  | 15 |
| Figura 2.5: Fluxograma do algoritmo RWA tradicional.....  | 16 |
| Figura 2.6: Plano de controle interligando as redes clientes com a rede ótica.....  | 17 |
| Figura 2.7: Exemplos de diagramas de olho.....  | 25 |
| Figura 3.1: Método de caracterização bomba-sonda.....   | 29 |
| Figura 3.2: Sistema WDM com compensação por dispersão.....  | 32 |
| Figura 3.3: Dispersão de modo de polarização.....   | 36 |
| Figura 3.4: Cálculo da penalidade provocada pelo efeito PMD em duas rotas.....  | 38 |
| Figura 4.1: Topologia de rede utilizada nas simulações, contendo 19 nós.....  | 44 |
| Figura 4.2: Algoritmo RWA Distância.....  | 46 |
| Figura 4.3: Fluxograma do algoritmo IA-RWA Ético.....   | 49 |
| Figura 4.4: a) Probabilidade de bloqueio com $k = 1$ . b) Probabilidade de bloqueio com $k = 2$ .....   | 50 |
| Figura 4.5: Fluxograma do algoritmo IA-RWA integrado.....   | 52 |
| Figura 4.6: simulações realizadas com algoritmo IA-RWA Integrado, utilizado um espaçamento entre canais de 50GHz (a) e de 100 Ghz (b).....          | 53 |
| Figura 4.7: Comparativo entre as diferentes propostas de algoritmos.....  | 57 |
| Figura 4.8: Gráfico da quantidade de conexões bloqueadas pelo tamanho dos caminhos no algoritmo IA-RWA Ético. (a) $P = 0$ dBm e (b) 10 dBm.....     | 58 |
| Figura 4.9: Gráfico da quantidade de conexões bloqueadas pelo tamanho dos caminhos no algoritmo IA-RWA Integrado. (a) $P = 0$ dBm e (b) 10 dBm..... | 59 |
| Figura A.1: Grafo utilizado para achar o caminho Dijkstra.....  | 70 |
| Figura A.2: Calculando o custo dos nós diretamente conectados ao nó $v$ .....   | 71 |
| Figura A.3: Calculando os novos custos com $v = r$ .....  | 72 |
| Figura A.4: Cálculo dos custos dos nós vizinho diretos do nó $v$ , sendo $v = k$ .....  | 73 |
| Figura A.5: Caminho Dijkstra.....   | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Figura B.1: Novo caminho mais curto encontrado, usando $dv = a$ .....    | 76 |
| Figura B.2: Novo caminho mais curto encontrado, usando $dv = r$ .....    | 76 |
| Figura B.3: Com $dv = k$ , o Yen não pode encontrar um novo caminho..... | 77 |



# Capítulo 1

## Introdução

Atualmente, a Internet fornece diversas aplicações que são importantes para a sociedade, como e-mail, comunicação instantânea, e-commerce, e-gov, ensino à distância e vídeo sobre demanda. A demanda crescente pelo suporte a esses diversos serviços implica que as redes da próxima geração devem estar preparadas para um tráfego heterogêneo de dados, fornecendo uma Qualidade de Transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) satisfatória para cada aplicação [1].

As redes óticas fornecem uma infra-estrutura adequada para essa demanda crescente de tráfego, sendo o meio de transmissão mais utilizado atualmente para suportar altas taxas de transmissão de dados, vídeo e voz. Inicialmente, as redes óticas foram utilizadas apenas como um meio físico para transmissão de dados entre redes, fornecendo uma transmissão com taxa mais elevada e confiável que os cabos de cobre [2]. O crescimento acelerado do tráfego de dados está motivando a realização de pesquisas para a obtenção de novas arquiteturas de redes óticas que funcionem de um modo mais inteligente, flexível e eficiente [3].

As Redes Óticas Transparentes (TON - *Transparent Optical Networks*) baseadas em uma tecnologia de IP sobre Multiplexação por Divisão de Comprimento

de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) são indicadas como fortes candidatas a suportar esta nova demanda de tráfego [4]. Nesse tipo de rede, nenhum dispositivo de conversão Óptica-Eletró-Óptica (O-E-O) é utilizado, e os sinais são transmitidos em forma de luz da origem até o destino, por isso as conexões entre redes clientes são chamadas de caminhos de luz. Esse tipo de abordagem gera uma economia no projeto da rede por causa da ausência de regeneradores, que são dispositivos utilizados para regenerar o sinal transmitido entre nós da rede, quando a distância nodal interfere na qualidade do sinal. A maior vantagem desta abordagem é o aumento na capacidade de transmissão [5].

Por causa dessa transparência, sinais digitais e analógicos podem ser transmitidos normalmente, e também sinais de diferentes tipos de redes clientes, como IP/MPLS, ATM, SONET/SDH [6]. Esse novo paradigma de rede ótica normalmente utiliza Multiplexação por Divisão do Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), fornecendo os caminhos de luz, nos quais os dados de diferentes tipos de redes clientes como Rede Óptica Síncrona e/ou Hierarquia Síncrona Digital (SONET/SDH – *Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy*) trafegam de modo transparente.

Para se estabelecer uma conexão numa rede ótica é utilizado um algoritmo que é chamado de Algoritmo de Alocação de Rota e Comprimento de Onda (*RWA – Routing and Wavelength Assignment*). Um algoritmo RWA pode ser dividido em duas etapas: i) algoritmo para a escolha da rota; ii) algoritmo para a escolha do comprimento de onda. Para escolher a rota existem várias alternativas: roteamento fixo, roteamento fixo-alternado e roteamento adaptativo. No roteamento fixo, rotas são calculadas de maneira *off-line*, onde a conexão entre um nó origem e um nó destino sempre será a mesma, fornecida por uma tabela de rotas é criada. Já no Fixo-alternado o que muda é que são calculadas rotas alternativas entre um nó origem e destino, para serem utilizadas quando a rota principal estiver ocupada, diminuindo assim, a probabilidade das conexões serem bloqueadas. No Adaptativo, também chamado de dinâmico, a alocação de rotas com menor custo é feita de maneira *on-line*, verificando os recursos disponíveis na rede, sendo esta alternativa a que fornece uma menor probabilidade de bloqueio e uma melhor tolerância à falhas. A outra classe de algoritmos é a de alocação de comprimento de onda que

podem utilizar várias heurísticas, como: First-fit, Most-used, Aleatória e MaxSum.

Contudo, fatores como a tecnologia empregada no chaveamento ótico, a distribuição de tráfego na rede, o projeto da arquitetura de rede e a distribuição dos dispositivos totalmente óticos, podem influenciar negativamente na eficiência das TONs [7]. A distribuição de tráfego tem uma relação direta com o projeto eficiente de algoritmos RWA, ao qual são utilizados pelo sistema de gerenciamento da rede (NMS) como uma forma de melhorar a utilização dos recursos da rede [2].

Apesar da economia gerada pela não utilização de regeneradores em uma rede totalmente ótica, os caminhos óticos ficam expostos a degradação física que pode comprometer a qualidade do sinal transmitido ao ponto de não poder diferenciar a informação do ruído. Recentemente, estão sendo investigados algoritmos RWA mais sofisticados, que levam em consideração as imperfeições na camada física, são chamados de algoritmos RWA's conscientes de limitações da camada física (IA-RWA - Impairments Aware RWA) [8-37].

## 1.1 Trabalhos Relacionados

A utilização de IA-RWA auxilia na alocação de rotas e comprimentos de onda com um impacto mínimo das imperfeições provocadas pelo meio físico de transmissão fornecendo uma Qualidade de Transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) nas TONs. Alguns estudos foram realizados para investigar a influência de efeitos degradantes como o Ruído de Emissão Espontânea (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) sobre uma Taxa de Bit de Erro em uma TON [8], [14-16], o impacto de efeitos não-lineares como Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four Wave Mixing*), Modulação Cruzada de Fase (XPM – *Cross-Phase Modulation*) [9-11] e Automodulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*) [12] e a influência da Dispersão de Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*) em redes óticas dinâmicas e estáticas [13],[17],[19].

A Tabela 1.1 mostra uma classificação de diversos trabalhos relevantes de algoritmos IA-RWA encontrados na literatura. O procedimento do IA-RWA pode ser centralizado ou distribuído e as limitações são avaliadas coletando informações de um servidor (centralizado) ou por protocolos ou monitoramento (coletado *on-line*).

Tabela 1.1 : Classificação das técnicas de algoritmos IA-RWA. **Legenda:** Dispersão de Velocidade de Grupo (GVD - *Group Velocity Dispersion*), Chaves Óticas (OXC - *Optical Crossconnect*), Primeiro Caminho Mais Curto Disponível com Engenharia de Tráfego (OSPF-TE - *Open Shortest Path First with Traffic Engineering extensions*), Penalidade de Abertura do Diagrama de Olho (ECP - *Eye Closer Penalty*), Protocolo de Reserva de Recurso-Engenharia de Tráfego (RSVP-TE - *Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*), Espalhamento Estimulado de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*).

| Autor e referência                                     | Limitações consideradas   | Métricas utilizadas  | Algoritmos RWA  | Escopo das Limitações   | Escopo da rede |
|--|---|--|---|-------------------------|----------------|
| Ramamurthy <i>et al.</i> [8]                           | ASE, <i>crosstalk</i>   | Taxa de Erro de Bits   | 2 passos:<br>1) Camada de rede;<br>2) Viabilidade ótica.  | Centralizado            | Centralizado   |
| Huang <i>et al.</i> [19]                               | ASE, <i>crosstalk</i> , PMD   | Relação sinal ruído ótica, PMD (separadamente)                 |   |                         |                |
| Cardillo <i>et al.</i> [20]                            | PMD, ASE, SPM, XPM, FWM   | Relação sinal ruído ótica                                      |   |                         |                |
| Martins-Filho <i>et al.</i> [14]                       | ASE, saturação do ganho do amplificador e ganho e perda dependente do comprimento de onda | Taxa de Erro de Bits   | 2 passos:<br>1) Rota baseada nas menores degradações físicas / Fator Q;<br>2) Taxa de Erro de Bits viável.  | Centralizado            | Centralizado   |
| Markidis <i>et al.</i> [21]                            | SPM, XPM, FWM, GVD, filtro ótico e degradação sofrida pelo jitter                         |  |   |                         |                |
| Kulkarni <i>et al.</i> [17], Tomkos <i>et al.</i> [22] | ASE, Dispersão Cromática, PMD, <i>crosstalk</i> , Concatenação de filtros                 | Fator Q  | 3 passos:<br>1) Computação do custo do enlace;<br>2) Caminho mais curto;<br>3) Viabilidade ótica.   | Centralizado            | Centralizado   |
| Duhovnikov <i>et al.</i> [23]                          | ASE, PMD, Dispersão Cromática, SRS, SPM, XPM, FWM   |  | 3 passos:<br>1) Fator Q para $\lambda$ ;<br>2) Limitações lineares;<br>3) Algoritmo modificado do caminho mais curto.   |                         |                |
| Martnez <i>et al.</i> [24]                             | ASE, Dispersão Cromática, PMD   | –  | 1 passo:<br>1) Cálculo distribuído da rota e do comprimento de onda, a partir das informações atualizadas dos efeitos degradantes   | Coletado <i>on-line</i> | Distribuído    |
| Li <i>et al.</i> [25]                                  | ASE, dispersão da fibra e PMD   | Fator Q  | 3 passos:<br>1) Métrica dos enlaces usando ECP estimado;<br>2) Encontrar o caminho mais curto utilizando o algoritmo de Bellman-Ford;<br>3) Viabilidade ótica baseada no fator Q. | Coletado <i>on-line</i> | Distribuído    |
| Pinart <i>et al.</i> [26]                              | ASE, PMD  | Relação sinal ruído ótica, PMD e Relação sinal ruído ótica/PMD | 2 passos:<br>1) Monitoramento do parâmetro dos enlaces da camada ótica;<br>2) Cálculo do roteamento ciente das imperfeições da camada física.                                     | Coletado <i>on-line</i> | Distribuído    |
| Pavani <i>et al.</i> [27]                              | ASE   | Potência do sinal min/max                                      | 3 passos:<br>1) Roteamento fixo-alternado;<br>2) Alocação de comprimento de onda utilizando a heurística <i>First-Fit</i> ;<br>3) Checagem de limite de potência min/max.         | Centralizado            | Centralizado   |

Tabela 1.1 (continuação) : Classificação das técnicas de algoritmos IA-RWA. **Legenda:** Dispersão de Velocidade de Grupo (GVD - *Group Velocity Dispersion*), Chaves Óticas (OXC - *Optical Crossconnect*), Primeiro Caminho Mais Curto Disponível com Engenharia de Tráfego (OSPF-TE - *Open Shortest Path First with Traffic Engineering extensions*), Penalidade de Abertura do Diagrama de Olho (ECP - *Eye Closer Penalty*), Protocolo de Reserva de Recurso-Engenharia de Tráfego (RSVP-TE - *Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*), Espalhamento Estimulado de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*).

| Autor e referência               | Limitações consideradas   | Métricas utilizadas  | Algoritmos RWA  | Escopo das Limitações             | Escopo da rede             |
|----------------------------------|---|--|---|-----------------------------------|----------------------------|
| Papadimitriou <i>et al.</i> [28] | SPM, XPM, FWM   | Deslocamento de fase não linear  | OSPF-TE utilizado para distribuir o deslocamento de fase não linear e calcular rotas. RSVP-TE é usado para encontrar os caminhos de luz.  | Distribuído                       | Distribuído                |
| McNeill <i>et al.</i> [29]       | ASE, Dispersão Cromática, PMD, SPM, XPM, FWM  | Fator Q  | 2 passos:<br>1) Seleção de rota;<br>2) Seleção de comprimento de onda.  | Distribuído                       | Distribuído                |
| Tomkos <i>et al.</i> [30]        | ASE, <i>crosstalk</i> , FWM, XPM  | Fator Q  | 3 passos:<br>1) Coleta toda as informações sobre a rede/demanda de tráfego e atribui o fator Q como custo dos enlaces;<br>2) Um problema de otimização com as k rotas mais curtas é apresentado;<br>3) Viabilidade do limite imposto pelo fator Q é avaliada. | Centralizado                      | Centralizado               |
| Politi <i>et al.</i> [31]        | FWM, XPM, Relação sinal ruído ótica   | Fator Q  | 2 passos:<br>1) Seleção de caminho baseada no menor congestionamento;<br>2) Seleção do comprimento de onda baseada na melhor performance física.  | Centralizado                      | Centralizado               |
| Politi <i>et al.</i> [32]        | FWM, XPM, Relação sinal ruído ótica   | Fator Q  | 2 passos:<br>1) Cálculo do caminho com menor custo para cada comprimento de onda;<br>2) Seleção do caminho com menor custo e checar se o fator Q é aceitável.   | Centralizado                      | Centralizado               |
| Castoldi <i>et al.</i> [33]      | ASE, PMD, Dispersão Cromática, SPM e usando deslocamento de fase não-linear   | Taxa de Erro de Bits + Fator Q com relação à Relação sinal ruído ótica | Dois métodos diferentes:<br>1) Sinalização baseada em método distribuído;<br>2) Elemento de computação de caminho baseado em método centralizado.   | Centralizado e distribuído        | Centralizado e distribuído |
| Deng <i>et al.</i> [15]          | ASE, atenuação da fibra, inserção da perda por OXC e degradação pela Relação sinal ruído ótica, e flutuações do ganho do amplificador | Potência recebida, Relação sinal ruído ótica, Taxa de Erro de Bits     | É proposto um algoritmo de alocação de dinâmica de potência no transmissor. É utilizado o roteamento fixo.  | Centralizado                      | Centralizado               |
| Deng <i>et al.</i> [34]          | ASE, <i>crosstalk</i> linear <i>in-band</i> no OXC, penalidade de Relação sinal ruído ótica devido aos efeitos não lineares da fibra  | Fator Q e Taxa de Erro de Bits   | São propostos 2 algoritmos de roteamento adaptativo:<br>1) Método do Mensuramento do Q;<br>2) Algoritmo do QoS adaptativo baseado no mensuramento do Q.   | Fator Q é coletado <i>on-line</i> | Centralizado               |

Tabela 1.1 (continuação) : Classificação das técnicas de algoritmos IA-RWA. **Legenda:** Dispersão de Velocidade de Grupo (GVD - *Group Velocity Dispersion*), Chaves Óticas (OXC - *Optical Crossconnect*), Primeiro Caminho Mais Curto Disponível com Engenharia de Tráfego (OSPF-TE - *Open Shortest Path First with Traffic Engineering extensions*), Penalidade de Abertura do Diagrama de Olho (ECP - *Eye Closer Penalty*), Protocolo de Reserva de Recurso-Engenharia de Tráfego (RSVP-TE - *Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering*), Espalhamento Estimulado de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*).

| Autor e referência                    | Limitações consideradas  | Métricas utilizadas | Algoritmos RWA   | Escopo das Limitações             | Escopo da rede |
|---------------------------------------|--|---------------------|--|-----------------------------------|----------------|
| Pointurier <i>et al.</i> [35]         | ASE, <i>crosstalk</i> , penalidade não linear, dispersão cromática | Fator Q             | Calcular o caminho mais curto para cada comprimento de onda e checar se o fator Q é viável. Seleciona um caminho viável através de 4 heurísticas propostas.                | Fator Q é coletado <i>on-line</i> | Centralizado   |
| Fonseca <i>et al.</i> [9], [36], [37] | FWM  | BER                 | 2 passos:<br>1) Escolha do caminho mais curto sendo o peso a quantidade de enlaces do caminho.<br>2) Alocação de comprimento de onda levando em consideração o efeito FWM. | Centralizado                      | Centralizado   |

A maioria dos trabalhos sobre algoritmos IA-RWA se preocupam com o desenvolvimento de estratégias e modelos de inclusão das limitações da camada física. Além disso, pouco se tem explorado sobre o fato de que pode-se classificar os efeitos da camada física em duas categorias, (i) Efeitos relacionados à escolha da rota pelo IA-RWA, como por exemplo, PMD e ASE; (ii) Efeitos relacionados com a escolha do comprimento de onda pelo IA-RWA, como por exemplo, FWM, XPM/SPM. Neste trabalho de dissertação pretende-se preencher estas duas lacunas, como será detalhado a seguir.

A partir do modo como um efeito degradante pode influenciar na QoT de uma TON, este pode influenciar na escolha da rota (como os efeitos PMD e ASE) e/ou na escolha do comprimento de onda (como FWM e XPM), sendo útil a diferenciação na implementação de algoritmos IA-RWA. Atualmente, os trabalhos realizados não estão considerando esta característica dos efeitos degradantes da camada física ótica em seus estudos.

## 1.2 Proposta de pesquisa

O objetivo deste trabalho é a implementação de mecanismos que permitem provimento de QoT em redes óticas, para realizar a escolha de rota e comprimentos

de onda adequadamente, levando em consideração as limitações da camada física. A exatidão dessa implementação depende não somente do algoritmo IA-RWA, mas também do modelo da camada física da rede utilizado para estimar os efeitos da acumulação de falhas [38], pois são elas que determinam os limites impostos aos caminhos óticos.

Novos algoritmos e modelos de relacionamento entre camadas para escolha da melhor rota podem fornecer estimativas mais precisas da situação real, levando a rotas e comprimentos de onda mais adequados que satisfaçam a certos requisitos de QoT impostos pelas aplicações, assegurando uma melhor utilização dos caminhos óticos e a redução da taxa de erro na transmissão dos dados na rede.

A partir desta nova abordagem de implementação de algoritmos IA-RWA que utiliza efeitos degradantes específicos na atribuição de rota e comprimento de onda, neste trabalho é proposto a implementação de um algoritmo IA-RWA que leve em consideração o efeito PMD na escolha da rota, e os efeitos XPM/SPM na alocação do comprimento de onda.

Além do algoritmo IA-RWA proposto anteriormente, onde as etapas de alocação de rota e de comprimento e onda são realizadas levando em consideração diferentes efeitos degradantes da camada física, foi também mostrado neste trabalho uma abordagem integrada da influência dos mesmos efeitos degradantes utilizados no algoritmo IA-RWA, sendo a escolha da rota e do comprimento de onda feita ao mesmo tempo. Simulações realizadas em diferentes cenários de redes apontam bons resultados desta abordagem integrada quando comparada a proposta de algoritmo IA-RWA que realiza as tarefas de forma independente.

O resto desta dissertação está organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2 descreve sobre as fibras óticas, os tipos mais comuns e algumas características levadas em consideração no projeto de redes óticas. Além disso, será detalhado o funcionamento de um algoritmo RWA e efeitos degradantes da camada física que podem influenciar na alocação de rotas e de comprimentos de onda em algoritmos IA-RWA. O Capítulo 3 trata sobre os modelos de inclusão dos efeitos PMD e XPM, que são utilizados pelos algoritmos IA-RWA. No Capítulo 4 é descrito o cenário utilizado nas simulações e são mostradas duas propostas de algoritmo IA-RWA que levam em consideração o efeitos PMD e XPM, além dos resultados encontrados

através das simulações numéricas. O Capítulo 5 contém as conclusões sobre este trabalho e a proposta de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Qualidade de Transmissão em Redes Óticas

As fibras óticas fornecem um meio de transmissão de sinais com qualidade melhor que fios de cobre, propiciando o envio de sinais em distâncias maiores e com menor degradação e com menores Taxas de Erros de Bits (BER – *Bit Error Rate*), além de trabalhar com altas taxas de transferência de dados.

O uso de fibras óticas em redes de telecomunicações somente se popularizou após o surgimento de fibras óticas feitas com sílica, com uma atenuação de 0,2 dB/km na região de comprimento de onda de 1,55  $\mu\text{m}$ , sendo chamadas de Fibra Padrão (SF – *Standard Fiber*). Atualmente as fibras óticas são utilizadas em diversos tipos de redes de telecomunicações, porém ainda não se popularizou o seu uso em redes de acesso residencial, por causa do seu custo de implementação [2] e do surgimento de tecnologias com a xDSL e serviços de transmissão de dados para telefonia móvel 3G e 4G.

Uma fibra ótica serve como um Guia de Onda (*Waveguide*) para que ondas

de luz, confinadas em um meio geométrico previamente conhecido, sejam transmitidas. Na Figura 2.1 pode-se observar as partes que constituem uma fibra ótica normalmente utilizada na área de telecomunicações. O sinal é transmitido através de um núcleo, localizado no centro da estrutura.

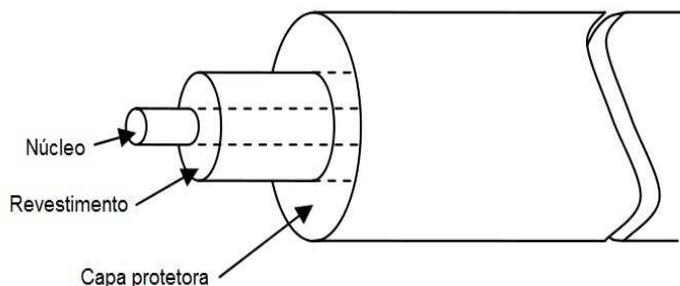


Figura 2.1: Estrutura de uma fibra ótica.

O revestimento serve para confinar o sinal no núcleo da fibra ótica, refletindo o sinal. Isso é possível porque o índice de refração do núcleo é maior que o índice de refração da casca, além do sinal ser transmitido em um ângulo que não ocorra refração. Além dessas duas partes, existe uma terceira camada que serve para proteger as outras partes contra danos físicos, além de fornecer um melhor manuseio pelo usuário instalador. Na prática, em um único cabo de fibra ótica existem várias fibras óticas.

Fibras óticas feitas com sílica podem transmitir sinais em três regiões de baixa perda no espectro de comprimentos de onda, que são nas regiões de  $0,8 \mu\text{m}$ ,  $1,3 \mu\text{m}$  e  $1,55 \mu\text{m}$ . O nível de perda destas regiões é limitado principalmente pelo processo fundamental de espalhamento de Rayleigh.

O ITU (*International Telecommunications Union*), órgão responsável pela padronização dos comprimentos de onda utilizados em um sistema WDM, define a banda S com valores entre 1460 e 1530 nm, da banda C com valores entre 1530 e 1560 nm e da banda L com valores entre 1560 e 1630 nm. Além disso, existe a faixa de transmissão na região dos 1310 nm que também tem baixa perda e dispersão. Estas bandas de transmissão são utilizadas por fibras convencionais desenvolvidas para o uso em aplicações da área de telecomunicações [39].

Inicialmente as primeiras fibras eram chamadas de multi-modo, por possuírem

mais de um modo de propagação. Um sinal é transmitido por vários raios de luz que viajam em diferentes velocidades, e conseqüentemente, em diferentes caminhos, sendo que cada um destes caminhos é chamado de modo de propagação [2] .

Apesar de na prática não existir fibras verdadeiramente monomodo [40], as fibras ditas monomodo possuem a vantagem de não sofrerem dispersão intermodal, podendo transmitir sinais a distâncias maiores. O fenômeno da dispersão será explicado na seção 2.2. A principal diferença física entre uma fibra monomodo para uma multi-modo é que as fibras monomodo possuem um núcleo menor, limitando a quantidade de modos de propagação que são transmitidos [41].

Os principais tipos de fibras utilizadas em redes óticas e especificadas por recomendações do ITU são: Fibra Óptica Padrão (STDF - *Standard Fiber*), Fibra de Dispersão Deslocada (DSF - *Dispersion Shifted Fiber*) e Fibra de Dispersão Não-Nula (NZDF- *Non Zero Dispersion Fiber*), descritas nas recomendações G.652 [42], G.653 [43] e G.655 [44] do ITU-T, respectivamente. Estas fibras diferem nos seus perfis de dispersão e atenuação ao longo das bandas de transmissão especificadas pelo ITU .

Um novo tipo de fibra que trabalha em todo espectro (*full-spectrum fiber*) está sendo considerada como uma importante evolução para produção industrial, pois fornece mais largura de banda do que as fibras monomodo padrões. São chamadas de fibra de Pico de Água Baixo (*Low-Water-Peak*), podendo transmitir em regiões consideradas de alta atenuação para as fibras convencionais, como a banda E e a banda U. A Figura 2.2 mostra que este novo tipo de fibra pode transmitir em uma faixa espectral maior que as fibras convencionais.



Figura 2.2: Longa faixa espectral de comprimento de onda das fibras de espectro completo.

Na área de telecomunicações, existem sempre a necessidade de transmissão de dados em taxas de transferências cada vez maiores, levando ao uso de técnicas

de multiplexação para maximizar o uso das fibras óticas. O uso da multiplexação é baseado no fundamento de que sai mais barato transmitir vários sinais multiplexados em uma fibra com altas taxas de transmissão, do que utilizar várias fibras para transmitir sinais em baixas taxas de transmissão.

A multiplexação por divisão do tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*) se baseia no princípio que um meio físico como a fibra ótica, trabalhando a altas taxas de transferência, pode dividir o acesso à transmissão de dados em pequenos pedaços de tempo (*timeslots*) que são repetidos periodicamente, sendo utilizados por diferentes sinais para transmitir em partes a informação. A transmissão de vários sinais aparenta estar sendo realizada simultaneamente, pois os sinais que são transmitidos possuem uma taxa de transferência menor que o seu pedaço de tempo.

Com a utilização da técnica de Multiplexação por Comprimento de Onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), um enlace de fibra ótica não ficou limitado a apenas uma conexão. Utilizando-se de canais com diferentes comprimentos de onda, um único enlace de fibra pode suportar diversas conexões transmitindo sinais simultaneamente. Para que um canal não seja interferido por outro, é necessário que exista um certo Espaçamento entre Canais (CS – Channel Spacing) vizinhos, normalmente especificado em Hertz (Hz) ou em nanômetros. Na Figura 2.3 pode-se visualizar melhor o CS de um enlace com N comprimentos de onda e com 25GHz de espaçamento entre canais. Existe uma padronização do valor do CS, feita pela ITU que recomenda a utilização dos valores 100GHz (0,8 nm) e 50GHz (0,4 nm) referenciados a uma frequência de 193,1 THz (1552,524 nm) [45].

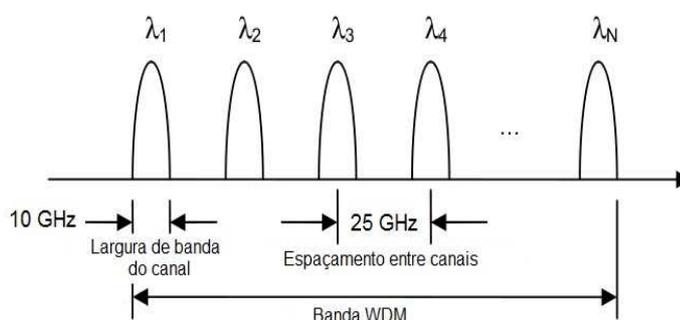


Figura 2.3: Espaçamento entre canais.

Com a utilização do WDM, houve um aumento considerável na taxa de transferência de dados, porém a potência que os sinais são transmitidos deve ser limitada a um valor que não provoque interação entre canais, levando a degradação de sinais [46].

## 2.1 A camada ótica e a camada cliente

Nos primeiros anos de uso das fibras óticas na área de telecomunicações, todas as tarefas de roteamento, chaveamento de sinais e outras funções ditas inteligentes na área de redes de computadores, eram feitas por dispositivos eletrônicos que convertiam os sinais óticos em sinais elétricos, realizava(m) a(s) tarefa(s) desejada(s) e convertiam novamente o sinal elétrico para ótico, para que fosse transmitido pela rede através de outro enlace de fibras ótica. Estes dispositivos eletrônicos acabam limitando a taxa de transferência de dados máxima que uma rede ótica pode trabalhar [2].

Um marco histórico da evolução das comunicações óticas foi com o surgimento dos amplificadores óticos que não exigiam que o sinal ótico fosse convertido para sinal elétrico, para realizar a amplificação do sinal. Os amplificadores óticos possuem também as vantagens de amplificar vários canais ao mesmo tempo, não limitar à taxa de bits e o formato da modulação, além de diminuir os custos de implementação de sistemas WDM.

Os Amplificadores Óticos à Fibra Dopada com Érbio (EDFA - *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*) são bastante utilizados atualmente, realizando a amplificação de sinais na banda C do espectro eletromagnético, embora já exista EDFA que funcione na banda L [47].

Além dos amplificadores óticos do tipo EDFA, que não necessitam de conversão eletro-ótica para realizar o trabalho de amplificar os sinais transmitidos por uma fibra ótica, o surgimento de outros três dispositivos foram essenciais para a consolidação das redes óticas. Os nomes e uma pequena descrição destes dispositivos é encontrada a seguir:

- Terminais Óticos de Linha (OLT – *Optical Line Terminals*): São utilizados para multiplexação de vários comprimentos de onda em uma única fibra e também servem para separação (demultiplexação) de sinais transmitidos em

uma única fibra, para serem transmitidos por fibras separadas. Normalmente eles possuem *transponders*, dispositivos utilizados para realizar a conversão dos sinais elétricos em óticos e vice-versa (O-E-O), normalmente necessária para a comunicação entre as redes clientes e a camada ótica.

- Multiplexadores Ópticos de Entrada e Derivação (OADM – *Optical Add/Drop Multiplexers*): O OADM pode retirar sinais de comprimentos de onda específicos, sem afetar a transmissão dos sinais de outros comprimentos de onda. Ele pode também adicionar novos sinais aos comprimentos de onda disponíveis. O OADM opera em uma única fibra, sendo útil em redes com topologia simples, podendo ter a capacidade de conversão de comprimento de onda.
- Chaves Óticas (OXC - *Optical Crossconnect*) : Um OXC realiza função similar ao OADM, porém em proporções maiores, e também pode ter a capacidade de conversão de comprimento de onda. O OXC é utilizado em topologias mais complexas, onde é exigida a opção de roteamento de comprimentos de onda entre várias fibras. Os OXCs pode degradar os sinais da rede, através de um ruído chamado “*Cross-Talk*”, causada pelo acoplamento entre os canais que se propagam em diferentes comprimentos de onda .

Com a utilização destes dispositivos, foi possível realizar o projeto das redes totalmente óticas, onde os sinais são transmitidos através de conexões óticas chamadas de caminhos de luz, pois não existe conversão eletro-ótica dentro da rede ótica, apenas sinais luminosos. Em um caminho de luz pode existir conversão de comprimento onda, e diferentes enlaces da rede ótica podem utilizar um mesmo comprimento de onda para transmitirem sinais, otimizando a utilização de uma quantidade limitada de comprimentos de onda. As redes totalmente óticas funcionam como uma camada ótica servidora de conexões entre redes clientes, chamadas de caminhos de luz. Na Figura 2.4, pode-se ver diferentes redes clientes interligadas por uma rede totalmente ótica [1].

Para que a qualidade fim-a-fim das conexões seja satisfatória em diferentes aplicações que estão sendo transportadas por tais conexões, é necessário um mecanismo de Controle de Admissão de Chamadas (CAC – *Connection Admission*



tradicional, o algoritmo RWA só se preocupa com a disponibilidade de um caminho de luz entre o nó origem e destino, sem levar em consideração os efeitos degradantes que podem afetar o QoT da conexão. A Figura 2.5 mostra um fluxograma mostrando as etapas de um algoritmo RWA tradicional.

Recentemente, tem sido mostrado na literatura que é necessário que exista um mecanismo de CAC/RWA para gerenciar o atendimento de novas requisições na rede, visando níveis de QoT adequados para as novas conexões, e também para as conexões já presentes na rede. Um nova conexão não deve afetar nos níveis de QoT das outras conexões ao ponto dele não ser mais satisfatório.

Por causa da necessidade de estimar a qualidade dos caminhos de luz para fornecer um QoT satisfatório é que surge a necessidade da implementação de um algoritmo de Alocação de Rota e Comprimento de onda que leve em conta a Imperfeições da camada física (IA-RWA), alocando uma rota e comprimento de onda que satisfaçam o QoT exigido pela rede cliente.

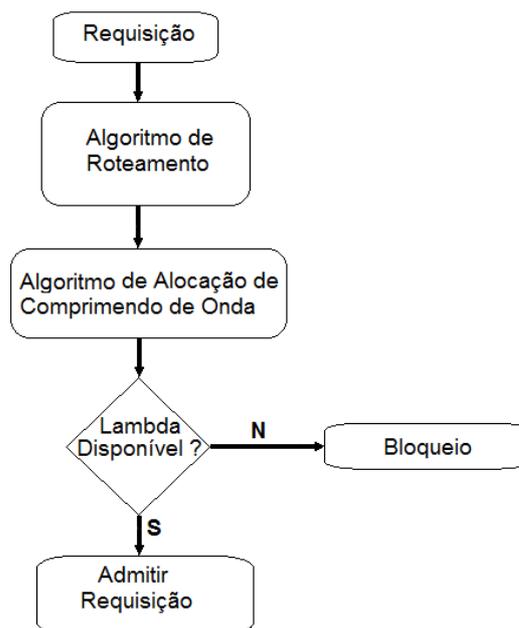


Figura 2.5: Fluxograma do algoritmo RWA tradicional.

É o plano de controle que guarda o estado de disponibilidade de cada enlace e comprimento de onda. Por esse motivo que o mecanismo CAC/RWA deve funcionar integrado ao plano de controle. A Figura 2.6 mostra que as redes clientes

realizam pedidos de conexão à camada ótica através de um plano de controle.

Para realizar a implementação de um algoritmo IA-RWA é necessário saber quais efeitos afetam a escolha da rota e quais afetam a escolha do comprimento de onda. A Seção 2.2 abordará este assunto.

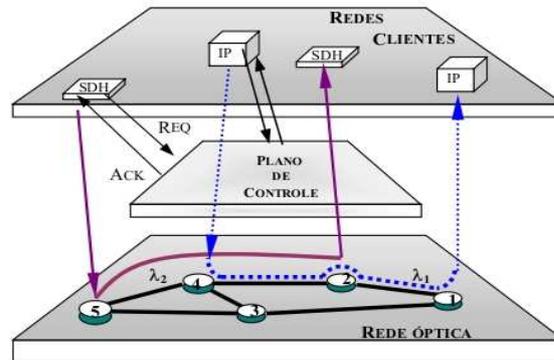


Figura 2.6: Plano de controle interligando as redes clientes com a rede ótica.

## 2.2 Limitações da camada física

Pode-se dividir os efeitos que degradam os sinais transmitidos em uma fibra ótica monomodo em duas categorias:

- Efeitos Lineares
  - Atenuação;
  - Dispersão Cromática;
  - Dispersão de Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*).
- Efeitos Não-Lineares
  - Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*);
  - Modulação Cruzada de Fase (XPM – *Cross-Phase Modulation*);
  - Auto Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*);
  - Instabilidade Modulacional (MI – *Modulation Instability*);
  - Espalhamento Estimulado de Raman (SRS – *Stimulated Raman Scattering*);
  - Espalhamento Estimulado de Brillouin (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*);
  - Auto-Desvio de Frequência;
  - *Self-Steepening*.

Um projeto de rede ótica deve ser realizado levando em consideração as características físicas da fibra ótica escolhida. Portanto, as limitações da camada física são importantes para o projeto e desenvolvimento dos algoritmos IA-RWA. A seguir será descrito alguns pontos importantes na transmissão de sinais em uma fibra e detalhes sobre as limitações da camada física.

## 2.2.1 Equação Não-Linear de Schrödinger

A propagação de pulsos óticos em fibras óticas está sujeita a efeitos não-lineares degradantes que influenciam na qualidade do sinal recebido. A equação Não-linear de *Schrödinger* (NLSE - *Nonlinear Schrödinger Equation*) descreve a transmissão de pulsos curtos em fibras óticas monomodo em sistemas de um único canal (ou campo resultante de canais) de maneira bastante satisfatória, e é dada por [41],[48]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \frac{\alpha}{2}A = i\bar{\gamma}|A|^2 A \quad , \quad (2.1)$$

onde  $A=A(t, z)$  é a amplitude complexa do pulso ótico,  $z$  é a coordenada longitudinal ao longo da fibra,  $t$  é o tempo medido,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  é a dispersão de velocidade de grupo de primeira ordem e de segunda ordem, respectivamente,  $\gamma$  é o coeficiente não-linear da fibra (também chamado de parâmetro de não-linearidade) e  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação da fibra. A NLSE leva em consideração os efeitos de dispersão por velocidade de grupo e auto-modulação de fase. O coeficiente de não-linearidade da fibra é definido como

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_o}{c A_{eff}} \quad (2.2)$$

e

$$\beta_n = \left( \frac{d^n \beta}{df^n} \right)_{f=f_i} \quad , \quad (2.3)$$

onde  $\beta_2$  se relaciona com a dispersão cromática da fibra ótica monomodo por

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda_i^2} \beta_2 \quad . \quad (2.4)$$

Para o caso de dois pulsos óticos sendo transmitidos ao mesmo tempo em uma fibra ótica, considerando que os campos óticos dos diferentes comprimentos de onda são polarizados linearmente ao longo do eixo principal de uma fibra que os campos mantêm a polarização durante a propagação. Além disso, supondo que, em cada canal, o espectro está centrado em uma frequência  $\omega_o$  e que possui uma largura espectral  $\Delta\omega$  de modo que a condição  $\Delta\omega \ll \omega_o$  seja satisfeita. Estas considerações são necessárias para a inclusão do efeito XPM. A equação de propagação resultante para  $A(t, z)$  em um sistema com dois canais j e k, é

$$\frac{\partial A_j}{\partial z} + \beta_{1j} \frac{\partial A_j}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2j} \frac{\partial^2 A_j}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \beta_{3j} \frac{\partial^3 A_j}{\partial t^3} + \frac{\alpha_j}{2} = \frac{in_2\omega_j}{c} (f_{jj}|A_j|^2 + 2f_{jk}|A_k|^2) \quad (2.5)$$

em que o canal k sempre será diferente que o canal j, e o termo  $f_{jk}$  é definido por

$$f_{jk} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 |F(x, y)|^2 dx dy}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right] \cdot \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right]}, \quad (2.6)$$

em que  $F(x, y)$  é a distribuição modal.

## 2.2.2 Efeitos inerentes à escolha da rota

### 2.2.2.1 Ruído de Emissão Espontânea Amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*)

A atenuação, medida em dB/km, limita a distância máxima que uma fibra pode transmitir em uma determinada potência de transmissão, sem a utilização de amplificadores. O custo dos amplificadores leva a necessidade da utilização de

fibras óticas de baixa atenuação para longas distâncias.

Em uma rede totalmente ótica, amplificadores óticos adicionam ruídos aos sinais amplificados. A emissão espontânea do amplificador interage com sinal, podendo ocorrer um grande espalhamento do espectro, através de fenômenos não-lineares como Modulação Cruzada de Fase e Mistura de Quatro Ondas. O impacto deste ruído na rede pode ser reduzido com a utilização de filtros óticos.

O ruído ASE é provocado por amplificadores óticos que usam como meio de amplificação algum tipo de fibra dopada [49], como é o caso dos EDFAs. Quando um sinal ótico passa por um EDFA, novos fótons com mesma energia, direção, polarização e fase que os fótons do sinal ótico original são gerados. Esses fótons gerados viabilizam a amplificação ótica. Este processo de amplificação é chamado de emissão estimulada.

Simultaneamente ao processo de amplificação por emissão estimulada ocorre a emissão espontânea de um sinal na mesma frequência, mas com fase, polarização, energia e direção aleatórios, provocando ruído nos sinais amplificados. A escolha de uma rota será afetada negativamente por este efeito [7],[50-52], pois um rota com uma quantidade maior de EDFAs possuirá uma maior degradação do sinal, afetando o QoT deste caminho de luz. Existem métodos para calcular, a potência do ruído ASE, podendo este valor ser utilizado em algoritmos de alocação de rotas [53].

### 2.2.2.2 Dispersão Cromática

Outro efeito linear é a dispersão, pois provoca o espalhamento do pulsos óticos individuais ao longo do enlace, podendo tornar impossível a recuperação do sinal original. A popularidade do uso das fibras óticas monomodo em projetos de redes óticas é devido a elas não sofrerem dispersão intermodal, que só é encontrada em fibras multi-modo.

A dispersão cromática provoca o alargamento temporal do pulso causado pelas diferentes velocidades das componentes espectrais do sinal, sendo dependente de fatores como taxa de transferência, formato de modulação, tipo de fibra e o uso de fibras DCF.

A estrutura das fibras e o perfil do índice de refração entre a casca e o núcleo

da fibra determina o valor do coeficiente de dispersão. Sabendo o valor do coeficiente de dispersão cromática da fibra monomodo, podemos estimar o alargamento temporal de um determinado pulso. Para que a dispersão seja tolerável, o alargamento temporal do pulso tem que ser bem menor que o período de transmissão de um bit de informação. Existem diversos tipos de fibra com nível de dispersão que variam no espectro.

As fibras monomodo padrões apresentam uma dispersão cromática mínima na região de 1300 nm. Fibras monomodo com dispersão deslocada a dispersão mínima na região de 1500 nm, porém possuem a desvantagem de gerar mais *crosstalk* entre canais adjacentes nas redes WDM [46]. As fibras com Dispersão Plana (*Dispersion Flattened Fiber*) proporciona um valor quase constante sobre uma ampla faixa de comprimento de onda, na banda C.

Existe um tipo de fibra que tem um valor de dispersão com sinal oposto ao das fibras padrões. Elas são utilizadas junto com as fibras padrões, compensando a dispersão ocorrida nas fibras padrões, e por isso são chamadas de Fibras de Compensação de Dispersão (DCF – *Dispersion Compensating Fiber*). Normalmente as DCFs são implementadas com um núcleo com diâmetro muito pequeno, podendo ocasionar efeitos não-lineares quando transmitidos sinais em alta potência. Esse tipo de fibra é fabricado utilizando como base o efeito da dispersão de guia de onda, este sendo provocado pelo fato de que em fibras monomodo, parte da propagação da energia do sinal de luz é feita no revestimento da fibra ótica. Pelo fato do revestimento possuir índice de refração menor que o do núcleo, essa porção do sinal move mais rápido que a parte do sinal propagado pelo núcleo.

A velocidade de grupo associada ao modo propagante é dependente de forma não linear da frequência das componentes espectrais do pulso. A variação da velocidade de grupo das componentes espectrais do sinal durante a propagação pela fibra ótica, fará com que o sinal sofra um alargamento temporal, diminuindo em sua amplitude. Este efeito, chamado dispersão de velocidade de grupo ou dispersão intramodal da fibra. O espalhamento temporal do pulso pode ser obtido em [46]

$$\tau = DBL \quad , \quad (2.7)$$

onde  $\tau$  (dado em ps) é o atraso total introduzido entre as componentes da frequência do sinal, B é a largura espectral do sinal (dado em nm), L é a distância que o pulso propagou e D é o coeficiente de dispersão, expressado em  $(ps/(nm \cdot km))$  .

A dispersão é considerada tolerável quando o atraso total é muito menor que período de duração de um bit de informação transmitido ( $\tau \ll T_B$ ) .

### 2.2.2.3 Dispersão de Modo de Polarização (PMD – *Polarization-Mode Dispersion*)

Um pulso ótico pode ser composto de diferentes componentes (ou estados) de polarização. Índice de refração das fibras óticas é levemente variável, ocasionando que diferentes estados de polarização se propagam em diferentes índices de refração, levando a propagação em diferentes velocidades. Este efeito é chamado de dispersão de modo de polarização (PMD).

A PMD é ocasionada por fatores físicos como a assimetria do formato do núcleo (que não é perfeitamente circular), tensão externa provocada durante a instalação dos cabos e temperatura. Em sistemas WDM com grandes quantidade de canais, a PMD é um fator limitante da taxa de transmissão. O efeito PMD será detalhado no próximo capítulo.

## 2.2.3 Efeitos inerentes à escolha do comprimento de onda

### 2.2.3.1 Modulação Cruzada de Fase (XPM – *Cross-Phase Modulation*)

O XPM é um efeito que acontece quando a variação de intensidade de um canal provoca a modulação de fase em outro canal. Em sistemas WDM, por causa do XPM, a mudança de fase não-linear em um canal específico dependerá de sua potência e também das potências dos outros canais. O efeito XPM sempre ocorre em conjunto com o efeito da Auto-Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), pois este influencia na intensidade do canal interferente, além de degradar o sinal do canal interferido.

O XPM é um dos efeitos utilizado neste trabalho para o desenvolvimento de

algoritmos IA-RWA, e por causa disso, este efeito será examinado mais detalhadamente no próximo capítulo.

### 2.2.3.2 Automodulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*)

A auto-Modulação de Fase (SPM – Self-Phase Modulation) é um efeito não-linear ocasionada pela potência do sinal ótico transmitido que provoca um aumento do índice de refração das fibras fabricadas com sílica, levando a um surgimento de uma mudança da fase no canal devido sua própria intensidade. O deslocamento de fase provocado pelo SPM após a transmissão de um sinal ao longo de um enlace de fibra de distância  $L$ , é dado por [48]

$$\Delta \phi_{SPM} = \gamma P L_{eff} , \quad (2.8)$$

onde  $\gamma$  é o coeficiente não-linear da fibra,  $P$  é a potência ótica do sinal e  $L_{eff}$  é o comprimento efetivo que leva em consideração as perdas na fibra e é definido por

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} . \quad (2.9)$$

Além disso, o efeito SPM resulta em uma variação da frequência instantânea ao longo do percurso de transmissão do sinal (*chirp*), sendo calculada pela seguinte derivada em função do tempo

$$\Delta \omega = -\frac{d \phi_{SPM}}{dt} = -\gamma \frac{dP}{dt} L_{eff} . \quad (2.10)$$

A modulação de fase provocada pelo efeito SPM pode ser convertida em modulação de intensidade no sinal que esta sendo propagado, sendo possível assim, avaliar o quanto um sinal foi atenuado por conta deste efeito.

Por se tratar de um efeito não-linear degradante ocasionado pela intensidade do próprio sinal que foi influenciado e estar relacionado apenas com a potência de transmissão do sinal e as características físicas da fibra ótica, o SPM é classificado

como um efeito que pode influenciar apenas na escolha das rotas em um algoritmo IA-RWA, sendo desprezível na escolha do comprimento de onda quando os canais dos segmentos de fibras de uma rede ótica são transmitidos na mesma intensidade de potência.

Efeitos degradantes relacionado a escolha do comprimento de onda normalmente atuam como uma interferência entre canais, sendo por isso, influenciados pela quantidade de canais que estão sendo transmitidos e pela intensidade dos sinais que estão transmitindo. Por isso, efeitos degradantes inerentes a escolha do comprimento de onda, como o efeito XPM, por exemplo, devem levar em consideração atenuação sofrida por SPM pelos canais interferentes, antes de calcular a degradação provocada pelo efeito XPM em um canal interferido [54].

### 2.2.3.3 Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*)

A mistura de quatro ondas é um fenômeno que surge através da interação das frequências dos diferentes canais que estão sendo transmitidos, ocasionando a geração de novos sinais em novas frequências. Parte da energia de transmissão dos canais é transferida para outras frequências. Este efeito é maior quando os canais que estão sendo transmitidos estão perto do comprimento de onda em que a dispersão é nula.

Por causa da natureza deste efeito, o sistema sofrerá atenuação nos canais transmitidos, devido a transferência de energia, geração de ruído provocado por este novo sinal transmitido. Se a potência dos canais for alta, quanto maior a distância a ser transmitida, mais energia é trocada entre os canais. Este é um dos efeitos que mais afeta redes com grandes quantidades de canais sendo transmitidos em regiões com baixa dispersão.

### 2.2.4 Penalidade de potência e diagrama de olho

O diagrama de olho é um método simples, utilizado para avaliar qualitativamente o desempenho de um sistema de transmissão digital, e é obtido observando-se o trem de pulsos que chega ao receptor em uma janela de tempo fixa. Ele pode ser utilizado para avaliar a degradação sofrida quando os sinais foram

transmitidos por um enlace de fibra ótica.

Para medir a performance de sistemas com esta técnica, sinais de dados são gerados com uma taxa de transferência uniforme e de uma maneira não-sequencial. Este fluxo de bits gerados é chamado de Sequência Binária Pseudo Não-Sequencial (PRBS - *Pseudorandom Binary Sequence*), pois a sequência de uns e zeros não será perfeitamente aleatória, porém poderá ser utilizada para propósitos de testes de forma satisfatória. Desta forma, pode-se avaliar através do diagrama de olho, um fluxo de dados parecido ao encontrado na prática.

Normalmente os bits de valor “1” são transições de subida de nível, e os bits de valor “0” são transições de descida de nível. A sobreposição desses pulsos leva a um gráfico com uma forma parecida a um olho, como mostrado na Figura 2.7.

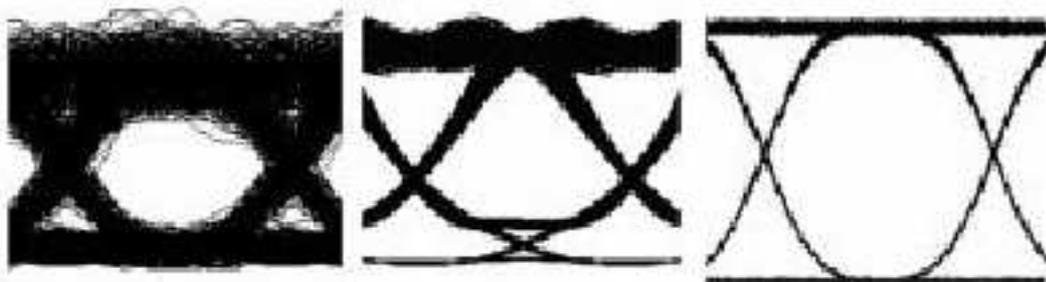


Figura 2.7: Exemplos de diagramas de olho.

A partir do formato do diagrama de olho, pode-se avaliar as penalidades sofridas pelos bits ao longo da propagação do sinal. As seguintes características no diagrama são importantes:

- O local de maior altura do diagrama de olho é o melhor local para amostrar o sinal recebido. Esta abertura vertical indica a diferença entre os níveis 1 e 0. Esta altura é afetada por distorções no sinal dos dados;
- A medição da largura da abertura do olho fornece o intervalo de tempo em que o sinal recebido pode ser amostrado sem sofrer erro de interferência entre símbolos, indicando a quantidade de *jitter* presente no sinal;

Efeitos degradantes que dependem da intensidade do sinal, como o XPM, provocam assimetrias sobre os níveis “0” e “1” observados no diagrama de olho. Neste trabalho, a partir do fechamento vertical do olho, será medida uma penalidade (em dB). A penalidade também poderá ser obtida através da intensidade relativa da

interferência causada pela XPM sobre um canal específico. O valor de penalidade de potência obtido, é definido como o acréscimo de potência de recepção necessário para a manutenção de uma dada taxa de erro de bit [40],[54].

# Capítulo 3

## Modelos de Inclusão da Modulação Cruzada de Fase/ Automodulação de Fase e Dispersão de Modo de Polarização

Este capítulo descreve os modelos de inclusão da Modulação Cruzada de Fase, Automodulação de Fase e da Dispersão de Modo de Polarização, pois estes efeitos degradantes serão utilizados no desenvolvimento de algoritmos IA-RWA.

Na Seção 3.1 deste capítulo é descrito o efeito XPM, discutindo um método de caracterização baseado em uma solução para pequenos sinais da equação não-

linear de Schrödinger, descrevendo posteriormente um modelo analítico simplificado que tem por objetivo obter uma função de transferência linear entre os diversos canais, utilizada para o cálculo das penalidades por Modulação Cruzada de Fase (XPM) nos algoritmos IA-RWA. A última seção deste capítulo descreve o efeito PMD e seu respectivo modelo de inclusão nos algoritmos IA-RWA.

### 3.1 O efeito XPM e o impacto na BER

O efeito XPM ocorre quando é transmitido mais de um sinal em uma mesma fibra. Em sistemas WDM, é permitida a propagação simultânea de diversos canais, ocorrendo o efeito XPM. A fase de cada canal é modulada pela modulação de intensidade dos outros canais, sendo assim uma espécie de interferência entre canais, que depende da potência dos sinais transmitidos pelos canais e do espaçamento entre os canais. O deslocamento de fase induzido em um canal 's' pelo canal 'p' devido ao XPM, quando propagados a uma distância  $\Delta z$ , é dado por [48]

$$\Delta \phi_{XPM} = 2\gamma P_p \Delta z \quad , \quad (3.1)$$

levando em consideração que os canais estão linearmente polarizados, em que  $P_p$  é a potência do canal interferente p e  $\gamma$  é o coeficiente não-linear da fibra no comprimento de onda do canal sonda s, que esta sofrendo a interferência.

Para avaliar o impacto do efeito XPM em sistemas WDM, foi desenvolvido uma técnica chamada de método de caracterização bomba-sonda (*pump-probe characterization*), que serve para entender melhor este efeito, sem a interferência de outros efeitos não-lineares, auxiliando na definição de um método para quantificar uma penalidade de potência sofrida pelas conexões que são afetadas pelo XPM.

O método consiste na transmissão de sinais em dois canais. Em um canal, é transmitida uma onda contínua, e este é chamado de canal sonda (*probe*). No outro canal, chamado de bomba (*pump*), é enviado um sinal modulado por intensidade. O efeito XPM fará com que o canal sonda mude o formato do seu sinal transmitido, induzindo uma modulação de fase no canal sonda, que pode ser convertida em modulação de intensidade pela GVD e SPM. A Figura 3.1 mostra os sinais de

entrada e saída na fibra dos canais sonda e bomba.

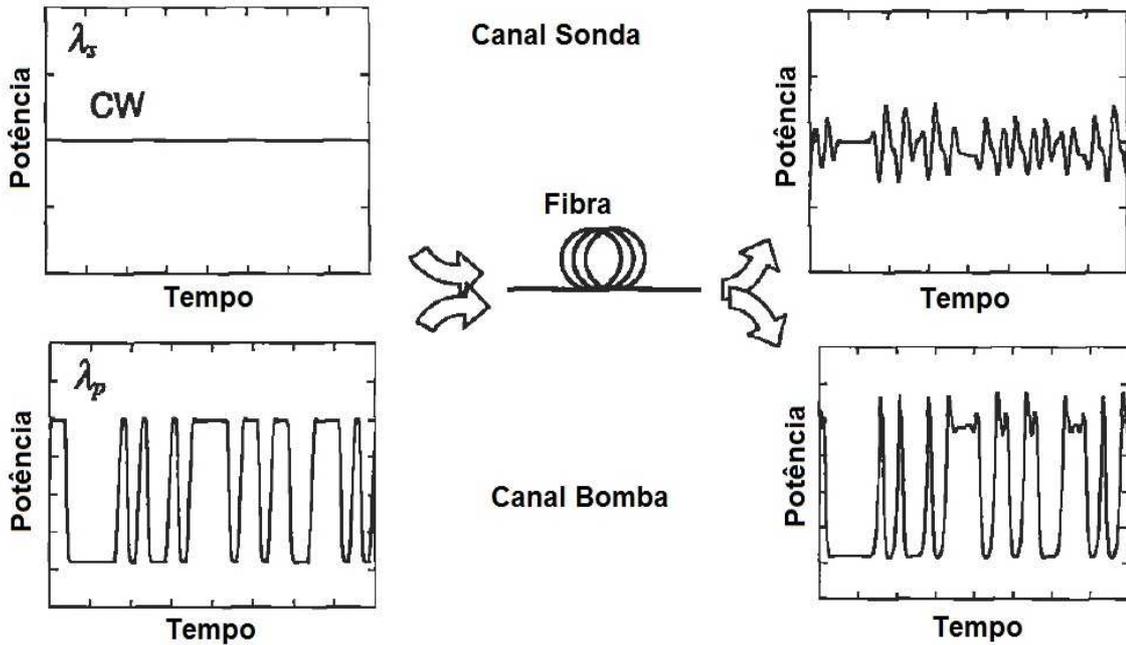


Figura 3.1: Método de caracterização bomba-sonda.

Para estimar a qualidade de um sinal transmitido, é utilizada a variância normalizada da Modulação de Intensidade (IM – Intensity Modulation) induzida pelo XPM como referência. A variância mostra a dispersão estatística da penalidade de potência induzida por XPM, indicando o quão longe os seus valores se encontram do valor esperado. O valor de referência da variância normalizada é de  $2,6 \times 10^{-3}$ , que dá uma penalidade de potência de 1 dB [54]. Em um sistema WDM com  $M + 1$  canais sonda, a variância normalizada de um sinal transmitido em um canal é dada por [54]

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{\bar{P}_s^2} \sum_{i=1}^{M+1} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{p,i}(f) \cdot |H_{XPM,P,i}(f)|^2 \cdot |H_r(f)|^2 \cdot df, \quad (3.2)$$

onde  $\bar{P}_s^2$  é a potência média do canal sonda,  $S_{p,i}(f)$  é a densidade espectral de potência do canal bomba  $i$ -ésimo na entrada da fibra,  $H_{XPM,P,i}(f)$  é a função de transferência do modelo linear equivalente da IM induzida pelo XPM relativa ao canal bomba  $i$ -ésimo e  $H_r(f)$  é a função de transferência do filtro elétrico do canal sonda. A seção 3.1.1 descreverá os passos para o cálculo da Equação 3.1.

A qualidade do sinal afeta na quantidade de bits transmitidos sem erro. A taxa

de erro de bits (BER) é a razão entre o número de bits recebidos com erro pelo número de total de bits transmitidos. Levando em consideração um ruído com função densidade de probabilidade gaussiana e que a probabilidade de transmitir o símbolo “1” errado é igual a probabilidade de transmitir o símbolo “0” errado, a BER pode ser calculada por

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (3.3)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2) dy \quad (3.4)$$

O fator-Q (Q) , influenciará na especificação da relação sinal-ruído (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*) exigida para se conseguir um determinado valor de BER. O fator Q é dado por

$$Q = \frac{2k \cdot \bar{P} \cdot (r-1) / (r+1)}{\sqrt{\frac{2k_{sp} \cdot r \cdot \bar{P}}{r+1} + \left( \frac{2k \cdot r \cdot \bar{P}}{r+1} \right)^2 \cdot \sigma_n^2} + \sqrt{\frac{2k_{sp} \cdot \bar{P}}{r+1}}} \quad (3.5)$$

onde  $\bar{P}$  é a potência ótica média na entrada do receptor,  $r = P_1 / P_0$  é a taxa de extinção (*extinction ratio*), sendo obtida através da razão entre a potência de transmissão do nível lógico “1”, pela potência de transmissão do nível lógico “0”, e k e  $k_{sp}$ . são constantes dependentes dos parâmetros do receptor. O BER terá valor  $10^{-12}$  quando  $Q = 7$ .

### 3.1.1 Modelo de inclusão do XPM

Para utilização do efeito XPM em algoritmos IA-RWA é necessário quantificar a degradação induzida pelo XPM ao sinal transmitido, especificando um valor penalidade de potência máxima permitida. Em [54], foi especificado um método para o cálculo da penalidade de potência induzida pelo XPM em sistemas de modulação por intensidade e detecção direta, medido em dB, dado por

$$P_p = -20 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{r-1}} \cdot \sqrt{1 - \frac{r}{r-1} \sigma_n^2 \cdot Q^2} - \frac{1}{\sqrt{r-1}} \right\} . \quad (3.6)$$

Para o cálculo realizado pelos algoritmos IA-RWA, especificou-se  $r = 10$  dB e  $Q = 7$ .

Para cálculo da variação normalizada especificado na Equação 3.2, é necessário a determinação da função de transferência do filtro elétrico e do modelo linear equivalente da IM induzida pelo XPM, além do cálculo da densidade espectral de potência.

A função de transferência do filtro elétrico no receptor é representada por um filtro de Bessel, que é um tipo de filtro eletrônico, bastante utilizado em aplicações de áudio. Sua resposta de frequência é dada por

$$H(s) = \frac{1}{\sum_{k=0}^N a_k s^k} , \quad (3.7)$$

onde  $N$  é a ordem do filtro de Bessel, e  $a_k$  é definido por

$$a_k = \frac{(2N-k)!}{2^{N-k} \cdot k! \cdot (N-k)!} , \quad (3.8)$$

sendo  $k = 0, 1, 2, \dots, N$ .

Para o cálculo da densidade espectral de potência do  $i$ -ésimo canal bomba, é considerado que o formato de modulação de bit é do tipo não retorna pra zero (NRZ – *Non-Return to Zero*), sendo dada por

$$P(f) = \frac{V^2 T_b}{2} \left| \text{sinc} \left( \frac{f}{f_b} \right) \right|^2 , \quad (3.9)$$

onde  $V$  é tensão,  $T_b$  a duração do bit e  $f_b$  é taxa de transmissão dos bits.

O modelo analítico para a caracterização do XPM em sistemas com multi-enlaces apresentado neste trabalho é o mesmo utilizado em [40], onde o mesmo

leva em consideração impacto do SPM, necessário para realizar uma avaliação precisa do efeito degradante do XPM [54]. Além disso é levado em conta o GVD.

Este modelo leva em consideração que todos os enlaces pertencentes ao sistema WDM são compostos por um segmento de Fibra de Transmissão (TF) mais um segmento de Fibra de Compensação por Dispersão (DCF), além de possuírem um amplificador óptico na saída de cada enlace, como mostrado na Figura 3.2.

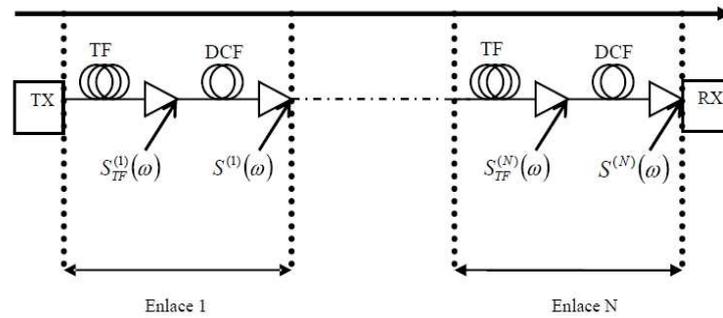


Figura 3.2: Sistema WDM com compensação por dispersão.

Além disso, é considerado que os amplificadores em cada enlace possuem um ganho que compensa totalmente as perdas nesse enlace, é considerado também uma potência baixa na entrada do segmento DCF de cada enlace, para que se possa considerar um funcionamento em regime linear, e que a potência média na entrada dos canais de qualquer enlace é idêntica, independente de ser um canal sonda ou bomba. A função de transferência do modelo linear equivalente da IM induzida pelo XPM é dada por [40]

$$H_{i,k,s}(\omega) = \left[ H_{i,k}^{(s)}(\omega) \cdot C_{eq}^{(s)}(\omega) \cdot C_{XPM}^{(s)}(\omega) \cdot C_{k,eq}^{(s)}(\omega) \right]_{(1,1)} \Big|_{(1)} \quad , \quad (3.10)$$

onde  $H_{i,k}^{(s)}(\omega)$  é o produto dos atrasos relativos entre o canal bomba k e o canal sonda i, dos N enlaces compartilhados,  $C_{eq}^{(s)}(\omega)$  é um vetor coluna com dois elementos, que são a matriz de conversão devido à transmissão no segmento TF e a matriz de conversão devido à transmissão no segmento DCF,  $C_{XPM}^{(s)}(\omega)$  é um vetor coluna com dois elementos, que são funções de transferência para a intensidade e

fase do modelo linear de XPM, e  $C_{k,eq}^{(s)}(\omega)_{(1,1)}$  especifica uma matriz (2x2) que inclui os efeitos de GVD e SPM no percurso do canal bomba.

A notação encontrada na Equação 3.5 utiliza o sobrescrito  $^{(s)}$  para indicar as variáveis correspondentes ao enlace  $s$ . O subscrito  $_{(1)}$  representa o primeiro elemento do vetor resultante de dois elementos, e o subscrito  $_{(1,1)}$  representa o elemento da primeira linha e primeira coluna de uma matriz.

O produto dos atrasos relativos é dado por

$$H_{ik}^{(s)}(\omega) = \prod_{i=s}^N h_{ik}^{(l)}(\omega) \quad , \quad (3.11)$$

onde  $h_{ik}^{(l)}(\omega)$  é o atraso relativo entre o canal bomba  $k$  e o canal sonda  $i$ , no enlace  $l$ , dado por

$$h_{ik}^{(l)}(\omega) = \exp\left[-j\omega(d_{ik}^{(l)}L^{(l)} + d_{ik}^{C(l)}L^{C(l)})\right] \quad , \quad (3.12)$$

onde  $L^{(l)}$  e  $L^{C(l)}$  são os comprimentos dos segmentos de fibra TF e DCF, respectivamente e no enlace  $l$ , e  $d_{ik}^{(l)}$  e  $d_{ik}^{C(l)}$  são os parâmetros de walkoff dos segmentos de fibra TF e DCF, respectivamente e no enlace  $l$ , calculados por  $d_{ik}^{(l)} = D_i^{(l)}\Delta\lambda_{ik} - S_i^{(l)}\Delta\lambda_{ik}^2/2$  e  $d_{ik}^{C(l)} = D_i^{C(l)}\Delta\lambda_{ik} - S_i^{C(l)}\Delta\lambda_{ik}^2/2$ .

O vetor  $C_{eq}^{(s)}(\omega)$  é dado por

$$C_{eq}^{(s)}(\omega) = \begin{cases} \left( \prod_{l=s+1}^N [C^{C(l)}(\omega) \cdot C^{TF(l)}(\omega)] \right) \cdot C^{C(s)}(\omega) & s < N \\ C^{C(N)}(\omega) & s = N \end{cases} \quad , \quad (3.13)$$

onde  $C^{TF(s)}(\omega)$  é a matriz de conversão devido à transmissão no segmento TF do enlace  $s$ , e  $C^{C(N)}(\omega)$  é a matriz de conversão do segmento DCF do enlace  $s$ . O cálculo da matriz de conversão do segmento TF é obtido através da soma da contribuição devido à dispersão de velocidade de grupo com a contribuição devido à auto-modulação de fase [54], dado por

$$C^{TF(s)}(\omega) = C_{GVD}^{TF(s)} + C_{SPM}^{TF(s)} \quad , \quad (3.14)$$

onde a contribuição devido à dispersão de velocidade de grupo é dada por

$$C_{GVD}^{TF(s)} = \begin{bmatrix} \cos(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) & -2\bar{P}_{i,1}(0) \cdot \text{sen}(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) \\ \frac{1}{2\bar{P}_{i,1}(0)} \cdot \text{sen}(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) & \cos(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

e a contribuição devido à auto-modulação de fase é dada por

$$C_{SPM}^{TF(s)} = \begin{bmatrix} \frac{2\gamma^{(s)}\bar{P}_{i,1}(0)}{\sqrt{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2}} \left[ \text{sen}(b^{(s)} L^{(s)} - \theta^{(s)}) + \text{sen}(\theta^{(s)} \cdot e^{-\alpha^{(s)} L^{(s)}}) \right] \\ \frac{-\gamma^{(s)}}{\sqrt{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2}} \left[ \cos(\theta^{(s)} - b^{(s)} L^{(s)}) + \cos(\theta^{(s)}) \cdot e^{-\alpha^{(s)} L^{(s)}} \right] \\ \frac{4b^{(s)}\gamma^{(s)}\bar{P}_{i,1}^2(0)}{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \left\{ \text{sen}(2\theta^{(s)} - b^{(s)} L^{(s)}) - e^{-\alpha^{(s)} L^{(s)}} \left[ \sqrt{\alpha^2 + b^2} L^{(s)} \text{sen}(\theta^{(s)}) + \text{sen}(2\theta^{(s)}) \right] \right\} \\ \frac{2b^{(s)}\gamma^{(s)}\bar{P}_{i,1}(0)}{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \left\{ \cos(2\theta^{(s)} - b^{(s)} L^{(s)}) - e^{-\alpha^{(s)} L^{(s)}} \left[ \sqrt{\alpha^2 + b^2} L^{(s)} \cos(\theta^{(s)}) + \cos(2\theta^{(s)}) \right] \right\} \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Nas Equações 3.10 e 3.11,  $b = \omega^2 \lambda_i^2 D_i^{(s)} / (4 \cdot \pi \cdot c)$  e  $\theta = \arctan(b^{(s)} / \alpha^{(s)})$ , onde  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação da fibra,  $\gamma$  é o coeficiente de não-linearidade da TF no comprimento de onda do canal sonda e  $c$  a velocidade da luz no vácuo.  $\bar{P}$  é a potência média em cada canal e  $\bar{P}_{i,1}$  é a potência média do nível lógico "1" do canal sonda, na entrada da conexão, sendo utilizado um valor igual ao dobro da potência média de cada canal, como valor aproximado.

A matriz de conversão do segmento de fibra DCF leva em consideração que transmissão é linear e é dada por

$$C^{C(s)}(\omega) = \begin{bmatrix} \cos(b^C \cdot L^C) & -2\bar{P}_{i,1}(0) \cdot \text{sen}(b^C \cdot L^C) \\ \frac{1}{2\bar{P}_{i,1}(0)} \cdot \text{sen}(b^C \cdot L^C) & \cos(b^C \cdot L^C) \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

onde os elementos (1x1), (1x2), (2x1) e (2x2), são os fatores de conversão IM-IM,

PM-IM, IM-PM e PM-PM, respectivamente [54],[55].

No vetor  $C_{XPM}^{(s)}(\omega)$ , as funções de transferência para a intensidade (elemento (1x1)) e fase (elemento (2x1)) do modelo linear de XPM, são obtidas através do somatório das contribuições da dispersão da velocidade de grupo e da auto-modulação de fase, onde a contribuição da GVD é para a função de transferência para a modulação de intensidade é dada por

$$H_{XPM,P}^{GVD(s)}(\omega) = \frac{4\gamma^{(s)} \bar{P}_{i,1}(0)}{(a_{ik}^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \left\{ a_{ik}^{(s)} \cdot \text{sen}(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) + b^{(s)} \cdot \left[ e^{-a_{ik}^{(s)} L^{(s)}} - \cos(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) \right] \right\}, \quad (3.18)$$

e a contribuição da SPM para a função de transferência para a modulação de intensidade é dada por

$$H_{XPM,P}^{SPM(s)}(\omega) = -\frac{8 \cdot b^{(s)}}{(\alpha^{(s)})^2 (b^{(s)})^2} \cdot (\gamma^{(s)})^2 \bar{P}_{i,1}(0) \cdot \left\{ \frac{1}{(c_{ik}^{(s)})^2 (b^{(s)})^2} \left[ b^{(s)} \cdot \cos(b^{(s)} L^{(s)} - 2\theta^{(s)}) - c_{ik}^{(s)} \cdot \text{sen}(b^{(s)} L^{(s)} - 2\theta^{(s)}) - e^{-c_{ik}^{(s)} L^{(s)}} \cdot (b^{(s)} \cdot \cos(2\theta^{(s)}) + c_{ik}^{(s)} \cdot \text{sen}(2\theta^{(s)})) \right] - e^{-\alpha^{(s)} L^{(s)}} \left[ \text{sen} \frac{(2\theta^{(s)}) \cdot 1 - e^{-a_{ik}^{(s)} L^{(s)}}}{a_{ik}^{(s)}} - \sqrt{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \text{sen}(\theta^{(s)}) \cdot \frac{1 - e^{-a_{ik}^{(s)} L^{(s)}} - a_{ik}^{(s)} L^{(s)}}{(a_{ik}^{(s)})^2} \right] \right\}. \quad (3.19)$$

As contribuições associadas a GVD e SPM do enlace s para a função de transferência da intensidade induzida por XPM no canal sonda são dadas por

$$H_{XPM,\phi}^{GVD(s)}(\omega) = -\frac{2\gamma^{(s)}}{(a_{ik}^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \left\{ b^{(s)} \cdot \text{sen}(b^{(s)} L^{(s)}) - a_{ik}^{(s)} \cdot \left[ e^{-a_{ik}^{(s)} L^{(s)}} - \cos(b^{(s)} L^{(s)}) \right] \right\} \quad (3.20)$$

e

$$H_{XPM,\phi}^{SPM} = -\frac{4 \cdot b^{(s)}}{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot (\gamma^{(s)})^2 \bar{P}_{i,1}(0) \cdot \left\{ \frac{1}{(c_{ik}^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \left[ c_{ik}^{(s)} \cos(b^{(s)} L^{(s)} - 2\theta^{(s)}) + b^{(s)} \cdot \text{sen}(b^{(s)} L^{(s)} - 2\theta^{(s)}) - e^{-c_{ik}^{(s)} L^{(s)}} \cdot (c_{ik}^{(s)} \cdot \cos(2\theta^{(s)}) \cdot \text{sen}(2\theta^{(s)})) \right] - e^{-\alpha^{(s)} L^{(s)}} \left[ \cos(2\theta^{(s)}) \cdot \frac{1 - e^{-a_{ik}^{(s)} L^{(s)}}}{a_{ik}^{(s)}} - \sqrt{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \cos(\theta^{(s)}) \cdot \frac{1 - e^{-a_{ik}^{(s)} L^{(s)}} - a_{ik}^{(s)} L^{(s)}}{(a_{ik}^{(s)})^2} \right] \right\} \quad (3.21)$$

A matriz é obtida através do produto das matrizes equivalentes aos segmentos de fibra (TF e DCF) que o canal bomba já percorreu, calculada através da equação

$$C_{k,eq}^{(s)}(\omega) = \prod_{l=1}^{s-1} [C_k^{C(l)}(\omega) \cdot C_k^{TF(l)}(\omega)] \quad (3.22)$$

### 3.2 - A Dispersão de Modo de Polarização

O efeito da Dispersão de Modo de Polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*) ocorre quando diferentes componentes da polarização de um sinal óptico trafegam pela fibra que possui pequenas variações do índice de refração ao longo do percurso, ocasionando a propagação destes modos de polarização em diferentes velocidades, causando o espalhamento do pulso e a dispersão. A Figura 3.3 mostra o espaçamento ( $\Delta\tau$  ou DGD) provocado pelo efeito PMD.

Diversos fatores influenciam nesta variação, como tensões sofridas pela fibra durante o processo de instalação, entortamento de partes da fibra e pequenas variações na composição e/ou geometria da fibra.

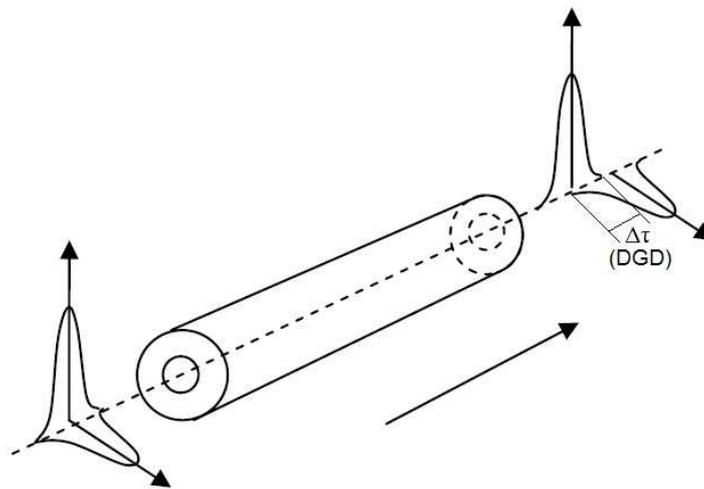


Figura 3.3: Dispersão de modo de polarização.

Este efeito dispersivo difere dos outros por ser um processo aleatório, normalmente variando no tempo, devido a fatores como temperatura e tensão da

fibra, que causam birrefringência e normalmente fornecem valores não fixos e precisos [46].

Deve-se notar que o efeito PMD é normalmente pequeno em baixas taxas de transmissão, porém em sistemas com taxas de transmissão de dados a partir de 10Gbps, o efeito PMD é considerado significativo.

A dispersão provocada pelo efeito PMD deve ser quantificada na forma de penalidade de potência (em dB, por exemplo), para que os algoritmos IA-RWA que estejam cientes deste efeito degradante e avaliem a influência deste efeito na transmissão de sinais pela fibra, especificando se um determinado caminho fornece um QoT mínimo para a realização de uma nova conexão. A Seção 3.2.1 descreverá um modelo para inclusão do PMD em algoritmos IA-RWA.

### 3.2.1 - Modelo de inclusão do PMD

O modelo de inclusão utilizado neste trabalho é o mesmo utilizado em [19], onde o efeito PMD é avaliado através do cálculo do Atraso Médio Diferencial de Grupo (DGD - *Differential Group Delay*) entre dois estados de polarização ortogonais, que pode ser aproximado por

$$DGD = D_{PMD} \sqrt{L} \quad (3.23)$$

onde  $D_{PMD}$  é o coeficiente de dispersão de modo de polarização (em  $ps/\sqrt{km}$ ) e L o comprimento do enlace da fibra (em km). O valor do  $D_{PMD}$  esta relacionado ao modo de construção da fibra, sendo especificado pelo fabricante, e determina o nível de sensibilidade de uma fibra ao efeito PMD. Atualmente são encontrados valores de  $D_{PMD}$  entre 0,1 e 1  $ps \cdot km^{-1/2}$  nas fibras. O DGD é (dado em ps) é uma variável. Penalidade de potência (dB) utilizada neste trabalho é dada por [56],[57]

$$P = 26 \cdot \left[ \frac{DGD^2}{T^2} \right] \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma) \quad , \quad (3.24)$$

onde T é o tempo necessário para transmitir um bit,  $\gamma$  é a fração da potência

transmitida em cada modo de polarização. Pela Equação 3.24, pode-se notar que o efeito PMD é mais significativo em sistemas com altas taxas de transmissão.

Em um caminho ótico, o cálculo da penalidade de potência total induzida pelo efeito PMD é realizado a partir do somatório das penalidades de potência sofridas por todos os enlaces deste caminho, realizando o cálculo da Equação 3.24 para todos os enlaces de um caminho ótico e somando os resultados. Logo, pode-se definir a penalidade total provocada pelo PMD em um caminho especificado entre um nó origem 'i' e um nó destino 'j', por [19]

$$Penalidade_{ij}(dB) = \sum_{k=1}^H P^k(dB) \quad , \quad (3.25)$$

em que H é quantidade de saltos (*hops*) entre do caminho e k o enlace que esta sendo calculado o PMD. Na Figura 3.4, pode-se observar o cálculo da penalidade total de dois caminhos óticos, onde a penalidade do caminho que usa o  $\lambda_1$  é encontrada através do somatório das penalidades dos enlaces AD, DG e GL, e a penalidade do caminho com  $\lambda_2$  resulta do somatório das penalidades dos enlaces FG, GL, LM, MC.

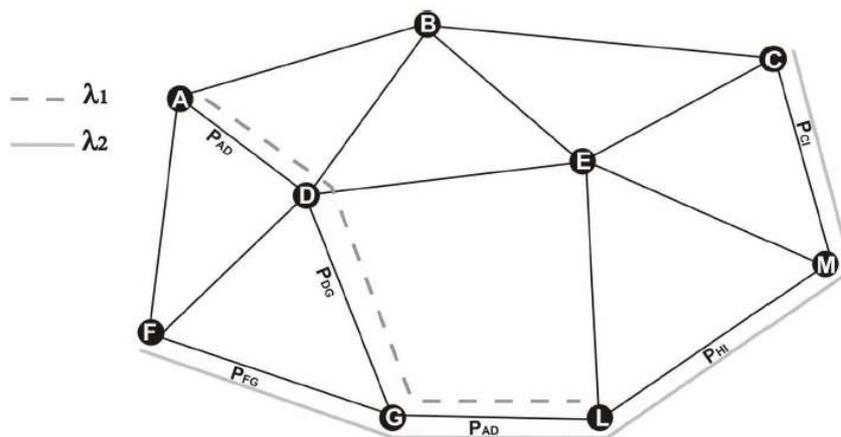


Figura 3.4: Cálculo da penalidade provocada pelo efeito PMD em duas rotas.

### 3.3 – Sumário do capítulo

Em sistemas WDM, o XPM provoca interferência entre canais, onde a intensidade de modulação de um canal provoca um deslocamento de fase em outro canal. Já o efeito PMD é provocado pelas características físicas e geométricas da fibra e por influências ambientais da birrefringência, provocando o espalhamento do pulso e dispersão [46].

Neste capítulo foram descritos modelos de inclusão dos efeitos XPM e PMD, para serem utilizados em algoritmos IA-RWA. O modelo de inclusão do efeito XPM apresentado leva em consideração os efeitos GVD e SPM, propiciando uma avaliação mais precisa da degradação do sinal sofrida pelo XPM. O efeito PMD pode ser utilizado na escolha de rotas com a menor penalidade de potência entre dois nós, porém devido a natureza deste efeito, o mesmo não afeta na escolha do melhor comprimento de onda disponível em uma rota. Devido ao efeito XPM se comportar como uma interferência entre canais, o mesmo pode ser utilizado na alocação de rotas como também na escolha do comprimento de onda com menor degradação, na rota previamente alocada.

# Capítulo 4

## Proposta de Algoritmos IA-RWA e Resultados Numéricos

### 4.1 Cenário e Ambiente de Simulação

O ramo de estudo de redes óticas é bastante amplo, possuindo diversos tópicos que podem ser investigados, que influenciam no projeto da construção, assim como, na simulação dos algoritmos CAC/RWA. Os itens em destaque classifica uma gama de tópicos de investigação em redes óticas e descreve quais as características escolhidas para fazer parte do ambiente de simulação utilizado neste trabalho.

1. *Gerenciamento*: No Capítulo 2 foi visto que em uma rede totalmente ótica, existe uma entidade que gerencia as ações de estabelecimento e encerramento de requisições originadas pelas redes clientes, chamada de plano de controle. Existe duas abordagens de planos de controle que podem ser implementadas: a centralizado e a distribuído, com diversos trabalhos da literatura

descrevendo vantagens e desvantagens de cada uma [58-60]. Por motivos de simplificação, as simulações realizadas neste trabalho foram implementadas levando em consideração um plano de controle centralizado.

2. *Dinâmica das rotas*: Os caminhos óticos estabelecidos entre redes clientes podem ser concebidos de maneira estática ou dinâmica. Apesar das primeiras redes óticas WDM utilizarem uma abordagem estática, atualmente existe uma tendência de que o tráfego gerado seja bastante dinâmico [61], onde os caminhos óticos são estabelecidos e finalizados ao longo do tempo. Por este motivo, as simulações apresentadas neste trabalho levam em consideração uma rede ótica com demanda dinâmica de caminhos óticos. Assume-se que o modelo de geração de tráfego na rede é Poissoniano e que o tráfego entre nós é uniforme.
3. *Roteamento*: Para as alocações de rotas feitas pelos algoritmos RWA e IA-RWA, é utilizado o algoritmo de Yen [62] O algoritmo de Yen encontra os k caminhos mais curtos, levando em consideração um custo proporcionado pelos enlaces da rede. É utilizado o algoritmo Dijkstra [63], como algoritmo padrão, necessário para a implementação do algoritmo de Yen. Os apêndices A e B dão mais detalhes sobre estes algoritmos. Nos algoritmos IA-RWA implementados neste trabalho, o custo de um caminho escolhido é a penalidade de potência (em dB) que uma rota sofre, e no algoritmo RWA tradicional o custo é o comprimento dos enlaces (em km).
4. *Atribuição de comprimento de onda*: na literatura, pode-se encontrar diversas heurísticas para seleção de comprimento de onda em uma requisição de um caminho ótico, como First-fit [64], Aleatória [65], Most-Used [66] e MaxSum [67]. A heurística First-fit aloca o primeiro comprimento de onda disponível da rota mais curta (Dijkstra) ou o primeiro comprimento de onda disponível dentre as k rotas mais curtas (Yen), sendo de fácil implementação, e por este motivo, foi a heurística utilizada na escolha de comprimento de onda no algoritmo RWA tradicional mostrado neste trabalho. Em algoritmos IA-RWA, a atribuição de comprimentos de onda é realizada levando em consideração o níveis de QoS acordados entre a rede ótica e as redes clientes, e especificados em um Contrato de Serviço Óptico (OSLA). A escolha de um

comprimento de onda para um caminho ótico é feita dentre os que estão disponíveis e que podem um nível de QoS satisfatório. Neste trabalho, os algoritmos IA-RWA alocam o comprimento de onda que sofre a menor degradação, dentre os comprimentos de onda que podem fornecer um QoT satisfatório.

5. *Transparência*: É considerado neste trabalho uma rede totalmente ótica, dita transparente, por não sofrer conversão O-E-O ao longo da rede, diferenciando das redes opacas, que utilizam de conversão O-E-O para regeneração do sinal. Para fins de simplificação, é considerada uma rede transparente que não realiza conversões de comprimentos de onda ao longo do caminho de luz.
6. *Efeitos degradantes do QoT ótico*: os algoritmos IA-RWA implementados neste trabalho levam em consideração a degradação sofrida pelo caminho ótico por conta dos efeitos PMD e XPM/SPM. Durante as simulações foram consideradas as seguintes configurações de rede:
7. *Redes com diferentes valores de  $D_{PMD}$* : redes atuais possuem um valor menor de  $D_{PMD}$ , levando a uma menor degradação gerada pelo efeito PMD nos enlaces da rede [2]. Por isso, são consideradas redes com  $D_{PMD} = 0,2$  ps/km; 1,8 ps/km e uma rede mista, onde 50% dos enlaces da rede têm  $D_{PMD} = 0,2$  ps/km e os outros 50% têm  $D_{PMD} = 1,8$  ps/km, selecionados de forma aleatória.
8. *Espaçamento entre canais*: o espaçamento entre canais influencia diretamente o resultado da interferência entre canais provocada pelo efeito XPM. Neste trabalho, foram simuladas redes com espaçamento entre canais de 50GHz e de 100GHz.
  - a) *Potência de transmissão ótica*: sinais óticos transmitidos com uma maior potência provocam uma maior influencia do efeito XPM. Foram simuladas redes óticas com potência de transmissão de 0 dBm (cenário com baixa potência) e 10 dBm (cenário com alta potência), para todos os canais.
  - b) *Quantidade de comprimentos de onda*: quanto maior o número de canais interferentes, maior será a degradação sofrida pelo efeito XPM

por um caminho ótico. Por isso, para uma melhor análise do efeito XPM, foram simuladas redes com 10 canais e com 3 canais, em cada enlace.

- c) *Taxa de transmissão*: foi considerado em todas as simulações que, todos os comprimentos de onda de todos os enlaces, possuem a mesma taxa de transmissão, de valor 10 Gbps. Foi considerado apenas este valor por motivos de redução do número de simulações e de variáveis para serem analisadas.

Durante as simulações realizadas para analisar o impacto da utilização de algoritmos RWA cientes dos efeitos degradantes que podem influenciar na qualidade dos caminhos óticos, foram requisitados 100.000 (cem mil) pedidos de conexão, possuindo uma distribuição de tráfego uniforme entre os nós da rede, tendo duração com distribuição exponencial (média = 1s). No início de cada simulação, é considerado que o tráfego é nulo (nenhuma conexão disponível).

É considerado que cada enlace da rede ótica é formado por um trecho de Fibra Padrão SMF (SSMF – *Standard Single Mode Fiber*) seguindo de um trecho de Fibra de Compensação de Dispersão (DCF – *Dispersion Compensation Fiber*). Foram utilizados os parâmetros das fibras padrão SMF e DCF especificados na Tabela 4.1.

| Parâmetro      | SSMF                                    | DCF                                     |
|----------------|---|---|
| $\alpha$       | 0,22 dB/km                              | 0,22 dB/km                              |
| $\gamma$       | 1,37 W <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> | 1,37 W <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> |
| D <sub>s</sub> | 17 ps/(nm · km)                         | -85 ps/(nm · km)                        |
| Slope          | 70 fs/(km · nm <sup>2</sup> )           | 90 fs/(km · nm <sup>2</sup> )           |

Tabela 4.1: Parâmetros das fibras especificados nas simulações.

A rede ótica utilizada nas simulações apresentadas neste trabalho é representada a partir de um grafo não-direcionado (bi-direcional) sem enlaces paralelos, laços e pesos negativos. A Figura 4.1 mostra a topologia da rede ótica utilizada nas simulações, sendo este o modelo real da rede ótica americana, que é bastante utilizada por pesquisadores da área de redes óticas.

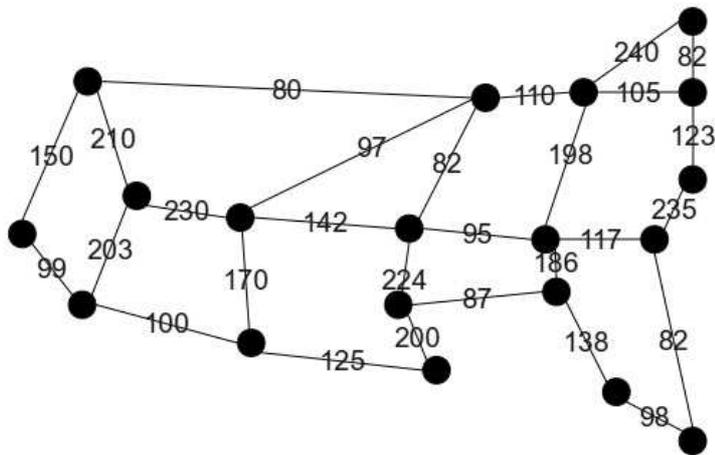


Figura 4.1: Topologia de rede utilizada nas simulações, contendo 19 nós. Foi especificado na figura o valor do comprimento (em km) de cada enlace. Note que a figura não está em escala.

Para a realização das simulações apresentadas neste trabalho, não foi utilizado nenhum simulador (*software*) comercial ou aberto, como o Network Simulator (NS), por exemplo. O simulador de redes óticas utilizado neste trabalho foi desenvolvido utilizando as linguagens de programação C e C++, onde parte do código foi implementado usando o paradigma da programação estruturada e outra parte usando programação orientada a objetos. Para a implementação do código, foi utilizado o editor do Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE – *Integrated Development Environment*) Qt creator versão 1.2.1 e o compilador gcc versão 4.4.1.

A maior parte das simulações apresentada neste trabalho foi realizada em computadores com a processador Pentium D 2,8 GHz, com 512 MB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu Linux versão 9.10, com exceção das simulações feitas com o algoritmo RWA-Integrado, que foram realizadas em um computador com processador Core 2 Quad de 2,5 GHz, com 4 GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu Linux versão 9.10.

### 4.1.1 Métricas de Desempenho

Durante a comparação de diferentes propostas de algoritmos de alocação de

rota e comprimento de onda, é necessário a utilização de alguma métrica que auxiliem na avaliação do desempenho dos algoritmos. A seguir, algumas métricas de desempenho são descritas.

1) Probabilidade de bloqueio: é a relação entre a quantidade de pedidos de conexão bloqueados e a quantidade total de pedidos de conexão simulados. Esta métrica fornece a porcentagem de conexões que foram bloqueadas por indisponibilidade de rota e comprimentos de onda, assim como as conexões que foram bloqueadas por não fornecerem um nível de QoS acordado no OSLA entre as redes clientes e a rede ótica.

2) Equidade da rede: esta relacionado com a capacidade da rede fornecer probabilidades de bloqueio uniforme em caminhos óticos com diferentes tamanhos (quantidade de enlaces). Os efeitos degradantes da camada física ótica influenciam na equidade da rede, apresentando uma maior probabilidade de bloqueio nos caminhos mais longos.

3) Probabilidade de Violação de Limiar (TVP – *Threshold Violation Probability*): é a probabilidade de pelo menos uma conexão ativa em toda a rede ter a sua BER acima de um valor limiar, após a mudança do estado de um caminho ótico na rede, como a ativação de uma nova conexão ou o encerramento de uma conexão [9].

4) Probabilidade de Violação Crítica (CVP – *Critical Violation Probability*): similar ao TVP, o CVP fixa o valor de limiar das flutuações do BER em  $10^{-3}$  para todos os caminhos óticos. O normal é que a rede apresente um valor de CVP menor que 0,01%.

Neste trabalho é utilizada a probabilidade de bloqueio para avaliar o desempenho dos algoritmos, sendo útil para analisar a influência da utilização de efeitos degradantes iguais em diferentes abordagens de algoritmo IA-RWA.

## 4.2 RWA Cego

O algoritmo RWA tradicional visto no Capítulo 2 pode ser chamado de algoritmo RWA Cego, pois ele não “enxerga” nenhum efeito degradante na rede ótica, durante a alocação de rotas e comprimentos de onda para os caminhos óticos. Como o algoritmo RWA Cego implementado neste trabalho utiliza o comprimento

dos enlaces (km) como peso para cálculo dos caminhos com menor custo, ele será chamado de RWA Distância. A complexidade do Algoritmo cego é  $\approx O(K \cdot W)$ , uma vez que a alocação do caminho de luz será obtida a partir da escolha de uma rota dentre um conjunto de K melhores rotas, e da escolha de um comprimento de onda W.

Os resultados encontrados durante as simulações realizadas com o RWA Distância são importantes para comparar com os resultados obtidos das simulações com os algoritmos IA-RWA. Através da Figura 4.2, pode-se concluir que, especificando o valor de  $k = 2$  no algoritmo de Yen, proporciona uma pequena melhora no desempenho do RWA Distância, porém o que mais influencia no aumento da probabilidade de bloqueio é a quantidade de canais fornecida pelos enlaces da rede. No algoritmo RWA Distância, quanto maior for o número de canais, menor a probabilidade de bloqueio, independente da quantidade de canais ocupados nos mesmos enlaces do caminho ótico. Em algoritmos IA-RWA com efeitos não-lineares como XPM/SPM, estes canais ocupados influenciaram na escolha da rota e do comprimento de onda das futuras conexões.

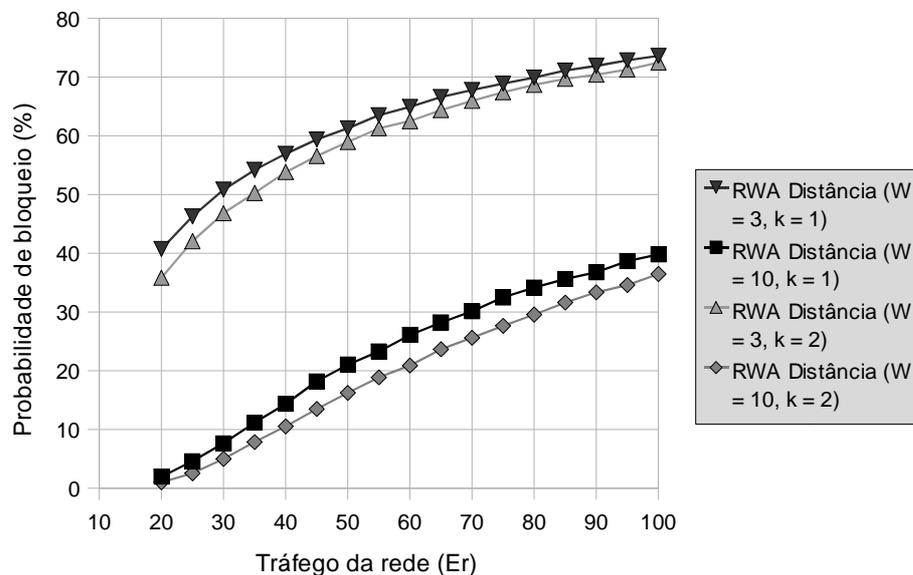


Figura 4.2: Algoritmo RWA Distância.

### 4.3 Proposta IA-RWA Egoísta e Ético

Anteriormente foi visto que uma abordagem comum de se implementar um algoritmo RWA tradicional é dividindo o problema em duas etapas que são: alocação de uma rota e alocação de um comprimento de onda disponível nesta rota. Estas duas etapas são realizadas sem se preocupar com as degradações sofridas pela camada física ótica.

Uma proposta de algoritmo apresentada neste trabalho segue a mesma linha de raciocínio, porém levando em consideração efeitos degradantes que afetam somente na escolha da rota e os que afetam a alocação do comprimento de onda.

O efeito PMD já foi utilizado em outros trabalhos para a alocação de rotas com que forneçam um QoS satisfatório [68-70], utilizando somente a heurística *first-fit* para alocação do comprimento de onda. Como já foi visto anteriormente, este efeito está relacionado a condições ambientais, de instalação das fibras óticas e das características físicas da fibra, sendo assim, um efeito que não influencia na escolha do comprimento de onda.

Diferente do efeito PMD, o efeito XPM está totalmente relacionado com a quantidade de canais que estão sendo transmitidos simultaneamente nos enlaces de uma rota, pois ele se comporta como uma interferência entre canais, afetando a modulação de fase dos canais e, conseqüentemente, a potência do sinal transmitido. Deve-se também levar em consideração que uma nova conexão alocada possivelmente afetará no nível de QoS das conexões que compartilham pelo menos um enlace com esta nova conexão, porque cada canal alocado provoca e sofre interferência por causa do efeito XPM.

Um algoritmo IA-RWA que não leva em consideração os efeitos que uma nova conexão alocada provoca nos caminhos óticos anteriormente alocados pode ser chamado de algoritmo IA-RWA Egoísta, pois ele só se preocupa com o nível de QoS acordado para esta nova conexão, sem se preocupar com as conexões antigas. A complexidade do Algoritmo Egoísta é  $\approx O(K \cdot L \cdot W \cdot XPM)$ , diferenciando da complexidade do algoritmo cego por levar em consideração o efeito PMD durante a escolha da melhor rota dentre um conjunto de K melhores rotas, e o efeito XPM durante a escolha do melhor comprimento de onda. O cálculo do PMD não foi levado em consideração, pois a penalidade provocada por este efeito é especificada na forma de uma matriz de penalidades, utilizada como peso dos enlaces no algoritmo

para achar as K rotas mais curtas. O algoritmo que realiza o cálculo do efeito XPM tem complexidade  $\approx O((W-1) \cdot L \cdot NFreq)$ , onde W é a quantidade comprimentos de onda utilizada em uma rota com L enlaces, e NFreq é a quantidade de frequências de modulação utilizada no cálculo.

Uma proposta completa de algoritmo IA-RWA apresentada aqui, é chamada de Algoritmo IA-RWA Ético, pois além de avaliar se o nível de QoT das rotas e comprimentos de onda encontrados satisfazem ao exigido pelo OSLA acordado entre as redes clientes e a rede ótica, é avaliado o impacto desta nova conexão no QoT exigido pela conexões previamente alocadas.

A utilização do algoritmo IA-RWA Egoísta possui a vantagem de ser mais fácil de ser implementado e possuir um tempo de execução menor que o IA-RWA Ético, porém ele peca no fato de não se preocupar com as conexões já alocadas.

Na etapa de funcionamento do IA-RWA Ético (alocação de rota), inicialmente são encontradas as k menores rotas através do algoritmo de Yen (ver Apêndice B). O custo de cada enlace que é utilizado pelo algoritmo de Yen é a penalidade de potência (dB) provocado pelo efeito PMD em cada enlace, que é calculado de acordo com as equações (3.23) – (3.24). A rota escolhida é a rota com o menor custo total que satisfaça o nível de QoT exigido, calculado de acordo com (3.25). Se não existir rota entre o nó origem e o nó destino, então o pedido de conexão foi bloqueado por falta de rota (bloqueio por caminho), porém se existir k caminhos, mas nenhum que possa fornecer o nível de QoT satisfatório, o pedido de conexão é bloqueado por falta de nível de QoT suficiente (bloqueio por QoT\_PMD).

Durante a segunda etapa do algoritmo IA-RWA são checados os comprimentos de onda disponíveis em todo o percurso do caminho ótico, sendo que a indisponibilidade do comprimento de onda em um enlace do caminho ocasiona o bloqueio por comprimento de onda. O comprimento de onda escolhido será aquele que sofra a menor penalidade de potência provocada pelo efeito XPM e que satisfaça o nível de QoT exigido, senão ocorrerá um bloqueio por falta de nível de QoT suficiente (bloqueio por QoT\_XPM).

O algoritmo IA-RWA Ético irá alocar o comprimento de onda escolhido somente após checar se o efeito desta nova conexão nas conexões antigas, sendo esta a grande diferença entre o IA-RWA Ético e o IA-RWA Egoísta. Se após

alocação desta nova conexão, pelo menos uma das conexões antigas sofrer interferência ao ponto da penalidade de potência provocada pelo efeito XPM for maior que o nível de QoT exigido, ocorrerá um bloqueio por QoT\_XPM.

O funcionamento do algoritmo IA-RWA Ético apresentado neste trabalho é apresentado no fluxograma da Figura 4.3. A complexidade deste algoritmo é  $\approx O((K \cdot L \cdot W \cdot XPM) + (X \cdot XPM))$ , uma vez que o cálculo da penalidade provocada pelo XPM é realizado em cada enlace L de uma rota escolhida dentre um conjunto de K rotas encontradas. Além disso, é realizado o cálculo da penalidade sofrida pelas X conexões anteriores. O cálculo do PMD não foi levado em consideração, pois a penalidade provocada por este efeito é especificada na forma de uma matriz de penalidades, utilizada como peso dos enlaces no algoritmo para achar as K rotas mais curtas.

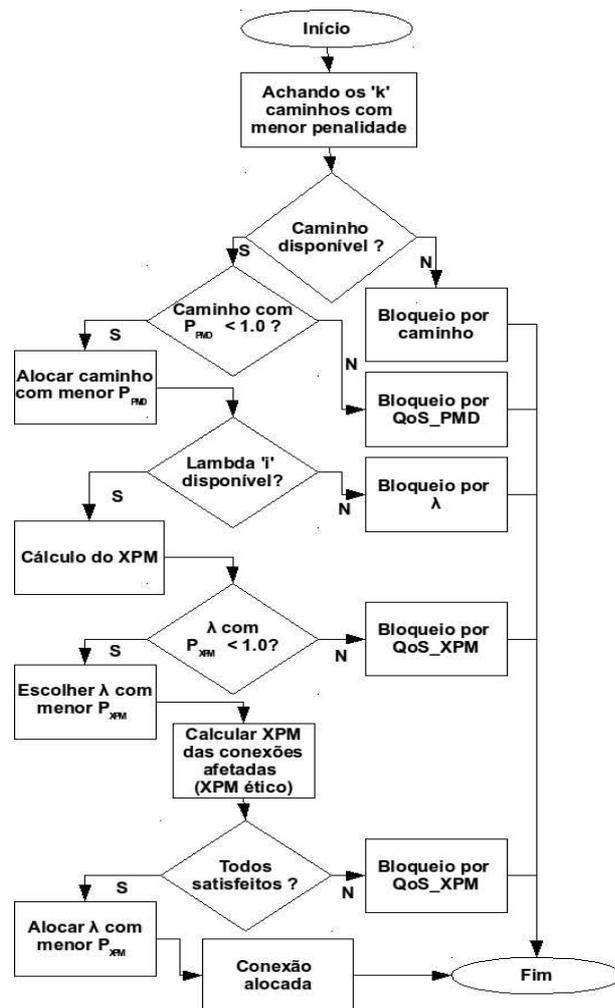
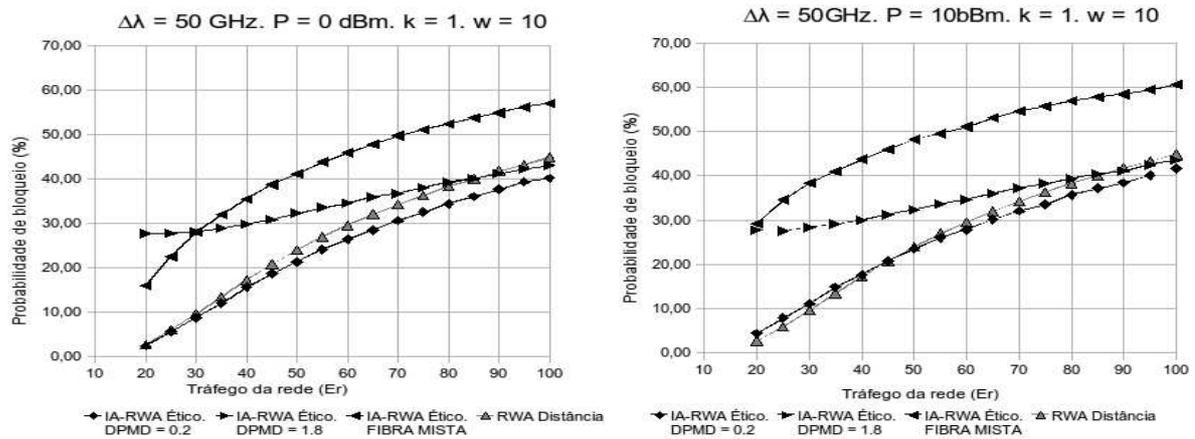


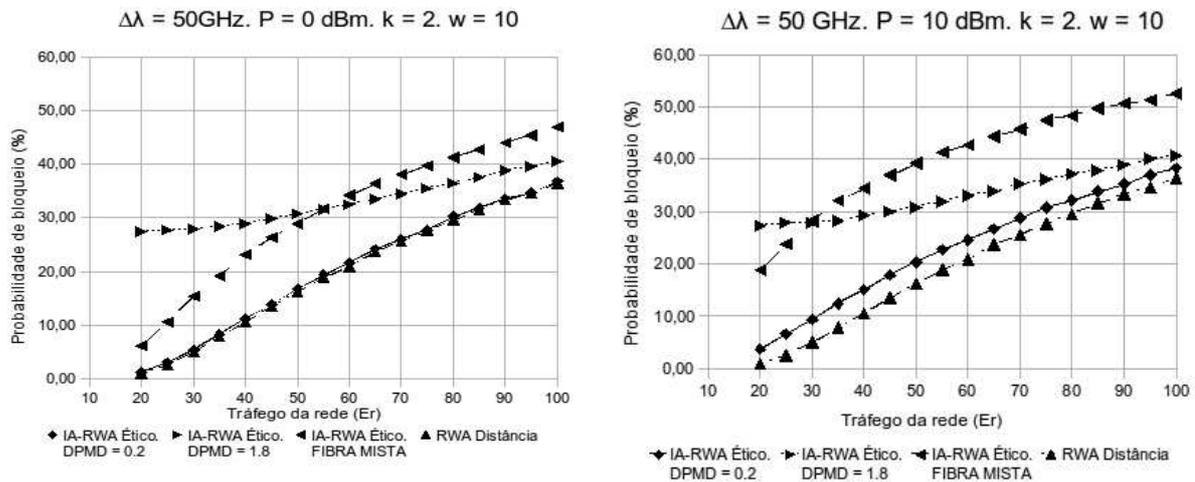
Figura 4.3: Fluxograma do algoritmo IA-RWA Ético.

### 4.3.1 Resultados

Através das simulações realizadas com o algoritmo IA-RWA Ético, pode-se observar novamente que o valor de  $k$  influencia na probabilidade de bloqueio, possuindo valores ligeiramente menores quando o  $k = 2$ . Quanto maior a potência de transmissão dos sinais, maior será a interferência provocada pelo efeito XPM, gerando assim, valores  $(E_r)$  maiores de probabilidade de bloqueio. A Figura 4.4 mostra os gráficos dos resultados das simulações.



a)



b)

Figura 4.4: a) Probabilidade de bloqueio com  $k = 1$ . b) Probabilidade de bloqueio com  $k = 2$ .

Nota-se que a probabilidade de bloqueio do IA-RWA Ético simulado com valores de  $D_{\text{PMD}}$  menores (fibras mais atuais) as vezes é menor que do algoritmo

RWA Distância. Isto se deve ao fato destes algoritmos utilizarem diferentes custos para escolha da rota e também pelo fato das fibras mais recentes possuírem um  $D_{PMD}$  bastante baixo, propiciando uma probabilidade de bloqueio por QoT\_PMD quase nula.

O efeito PMD mostrou-se influenciar na probabilidade de bloqueio por QoT na escolha da rota, assim como na escolha do comprimento de onda, pois apesar da simulação com fibra mista possuir apenas 50% dos enlaces com  $D_{PMD} = 1,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ , foi a que se mostrou com maior probabilidade de bloqueio. A partir destes resultados, pode-se concluir que talvez uma abordagem que analise o QoT fornecido por um caminho ótico possa ser visto de uma maneira que a alocação de rota e comprimento de onda seja feita de uma forma integrada, já que a escolha de um influencia diretamente da escolha do outro.

A influência do uso de uma rota alternativa também pode ser vista na Figura 4.4. Perceba que para nos casos onde use-se  $k=2$  no algoritmo de Yen, ou seja, tem-se uma rota alternativa, o desempenho da rede é melhor, principalmente nos casos onde o efeito XPM/SPM é dominante.

## 4.4 Proposta IA-RWA Integrada

Os algoritmos anteriores possuem a desvantagem de avaliar em separado os efeitos degradantes da rede ótica. O efeito XPM afeta não somente a escolha do comprimento de onda, mas também na escolha da rota, pois enlaces escolhidos com um menor número de comprimentos de onda ocupados, irá proporcionar uma menor degradação por causa do XPM.

A proposta do algoritmo IA-RWA Integrado é a de utilizar um custo nos enlaces da rede ótica quando for achar o melhor caminho ótico, que seja calculado através do somatório das penalidades de potência provocadas pelos efeitos PMD e XPM em cada enlace de acordo com as equações (3.6), (3.23) – (3.25). Ao contrário do algoritmo IA-RWA Ético, ele não acha as  $k$  rotas mais curtas, em vez disso, encontra a rota e o comprimento de onda que proporciona um menor custo para esta nova conexão.

Como pode ser visto no Apêndice A, o algoritmo padrão Dijkstra pode não visitar todos os enlaces para ter que achar a rota com menor penalidade, e como

visto anteriormente, o efeito XPM depende dos canais que estão ocupados em cada enlace.

Sendo assim, para minimizar os cálculos realizados, o algoritmo Dijkstra utilizado no IA-RWA Integrado utiliza pesos dos enlaces que são calculados somente quando estes enlaces são visitados.

A Figura 4.5 mostra um fluxograma do funcionamento do algoritmo IA-RWA Ético. A etapa de seleção da melhor rota pelo algoritmo Dijkstra é executada  $n$  vezes, sendo  $n$  a quantidade total de comprimentos de onda dos enlaces da rede. O caminho escolhido será aquele que proporcionar o menor custo e que tiver um nível de QoS satisfatório (menor que 1 dB). Se não existir nenhum comprimento de onda que trace um caminho do nó origem ao nó destino, a requisição de nova conexão será bloqueado por indisponibilidade de caminho (bloqueio por caminho). Se dos caminhos encontrados não existir nenhum com QoS satisfatório, o novo pedido de conexão será rejeitado por não possuir caminhos com QoS satisfatório (bloqueio por QoS\_PMD\_XPM).

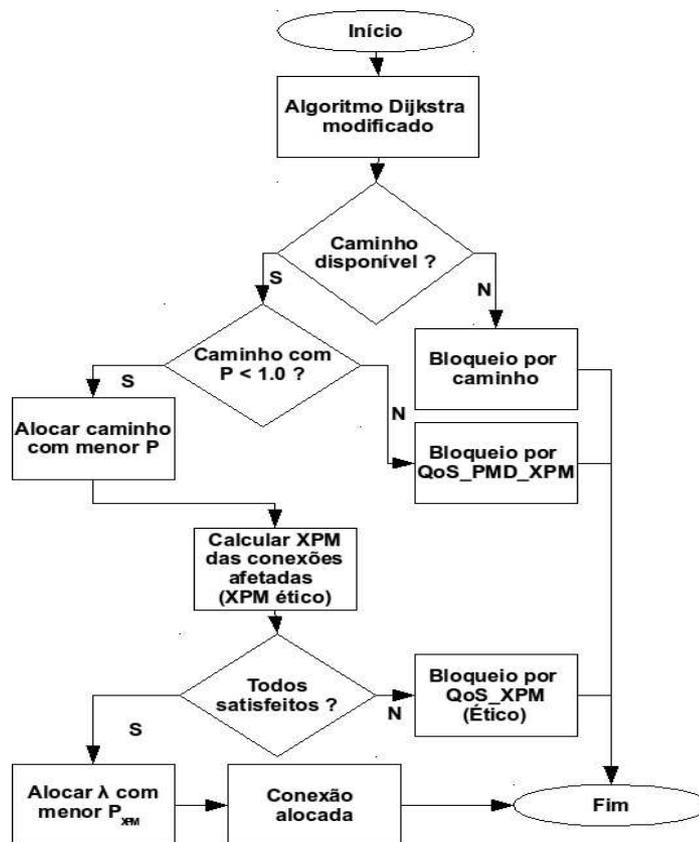
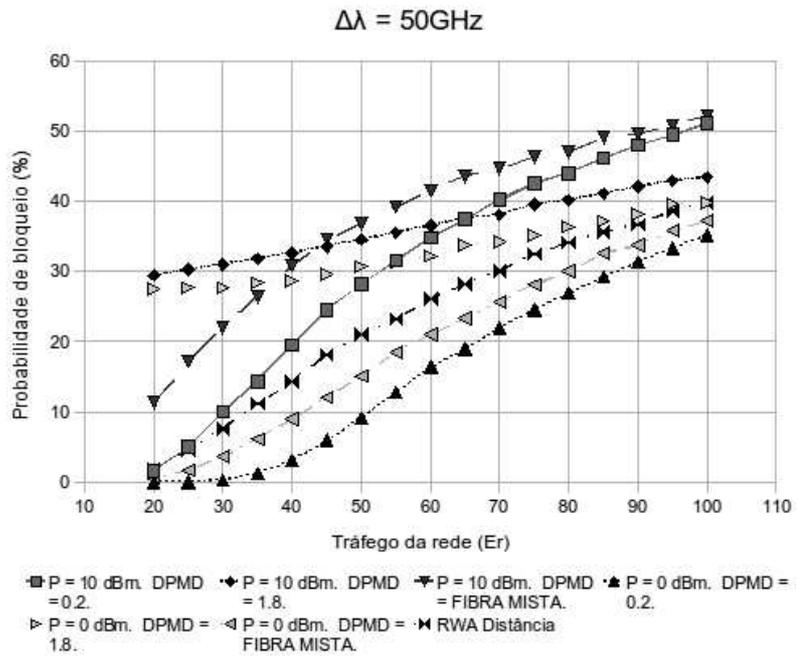
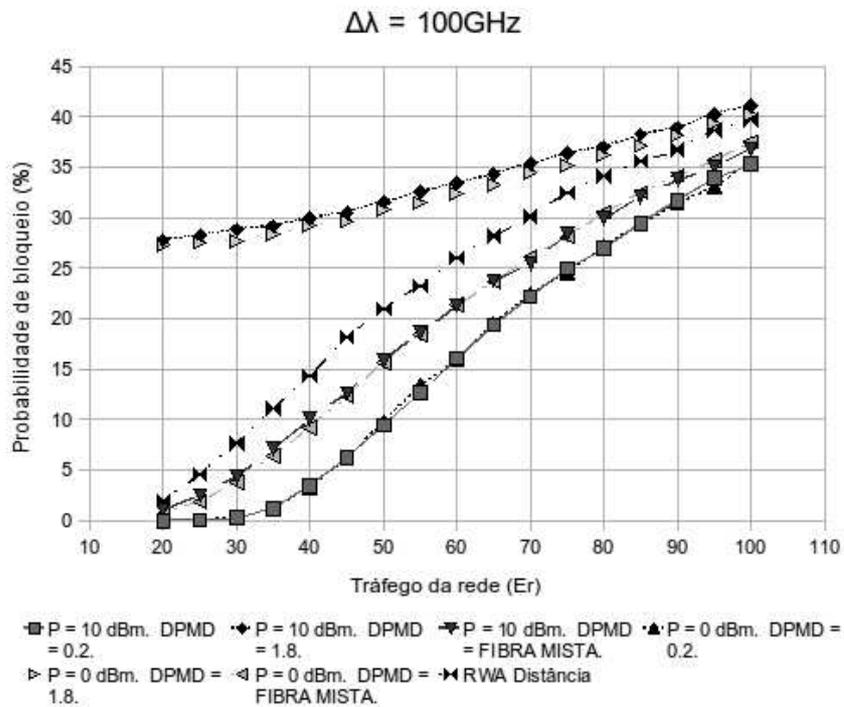


Figura 4.5: Fluxograma do algoritmo IA-RWA integrado.



(a)



(b)

Figura 4.6: Simulações realizadas com algoritmo IA-RWA Integrado, utilizado um espaçamento entre canais de 50GHz (a) e de 100 GHz (b).

Após a escolha da rota e do comprimento de onda, é necessário avaliar o impacto desta nova conexão nas conexões já disponíveis na rede e que compartilhem no mínimo um enlace com este novo caminho. Se nenhuma conexão anterior for degradada ao ponto de não poder mais fornecer QoT suficiente, esta nova conexão não será estabelecida (bloqueio por QoT\_XPM Ético).

A complexidade do Algoritmo Ético é  $\approx O((K \cdot L \cdot W^2 \cdot XPM) + (X \cdot XPM))$ , uma vez que o cálculo da penalidade provocada pelo XPM é realizado em cada enlace L de uma rota escolhida dentre um conjunto de K rotas encontradas. Além disso, é realizado o cálculo da penalidade sofrida pelas X conexões anteriores. Note que a diferença básica entre o algoritmo Ético e o Integrado é o modo como ele utiliza as penalidades provocadas pelos efeitos degradantes, sendo que o Ético utiliza em separado para a escolha da rota e do comprimento de onda, diferentemente do Integrado que utiliza o somatório das duas penalidades como peso nos canais dos enlaces, para achar a melhor rota e comprimento de onda simultaneamente.

O cálculo do PMD não foi levado em consideração, pois a penalidade provocada por este efeito é especificada na forma de uma matriz de penalidades, utilizada como peso dos enlaces no algoritmo para achar as K rotas mais curtas.

#### 4.4.1 Resultados

A utilização de uma abordagem que integre os dois efeitos degradantes PMD e XPM/SPM na alocação simultânea de rota e comprimento de onda pode ser analisada pelo nível de influência de cada efeito na simulação e pela comparação de desempenho entre esta abordagem, a proposta de algoritmo IA-RWA Ético e o algoritmo RWA Distância.

Na Figura 4.6, se compararmos as simulações com diferentes potências de transmissão e distribuição igualitária de valores de  $D_{PMD}$  dos segmentos de fibra da rede ótica, percebe-se que nas simulações realizadas com um espaçamento entre canais de 100GHz (b), o efeito XPM/SPM é praticamente desprezível, sendo o efeito PMD mais dominante, onde o único caso em que o desempenho do IA-RWA Integrado se mostrou pior que o RWA Distância foi nas simulações utilizando somente fibras antigas ( $D_{PMD} = 1,8$ ).

Nas redes óticas que utilizam menores espaçamentos entre canais (50GHz),

o efeito XPM/SPM se mostra mais atuante. O mesmo acontece em cenários com alta potência de transmissão (10 dBm). Na Figura 4.6, pode-se observar as diferentes probabilidades de bloqueio das simulações, resultando uma maior probabilidade de bloqueio do algoritmo IA-RWA Integrado em relação ao RWA Distância, na maioria dos casos, com exceção de dois casos onde o efeito XPM/SPM era menor, por causa da potência de transmissão (0 dBm).

Atualmente, é cada vez mais comum a utilização de um espaçamento entre canais cada vez menor, para acomodar um maior número de canais por fibra, ocasionando uma influencia cada vez maior do efeito XPM na escolha das rotas e dos comprimentos de onda.

A escolha do tipo de custo utilizado na execução do Dijkstra influencia diretamente na probabilidade de bloqueio, pois em alguns casos de configuração de rede se mostraram mais eficiente com a utilização do algoritmo IA-RWA Ético do que com o algoritmo RWA Distância.

Na Figura 4.7, podemos comparar as diferentes abordagens de algoritmos utilizadas na simulações. Note que, o fato do IA-RWA Integrado selecionar a rota e comprimento de onda ao mesmo tempo resulta em um melhor desempenho em quase todos os casos quando comparado com o IA-RWA Ético. Por exemplo, para o cenário com fibra fibra mostrado na Figura 4.7c, a probabilidade de bloqueio para a proposta Integrada se apresenta pelo menos 15% melhor do que o IA-RWA Ético. Em cenários onde o XPM/SPM não são relevantes, i.e. cenário com baixa potência de transmissão (0 dBm), o algoritmo IA-RWA Integrado também mostrou um desempenho melhor que o IA-RWA Ético nas simulações. A única situação onde a proposta Integrada apresenta desempenho ruim é onde o efeito XPM/SPM é dominante, como por exemplo no cenário da Figura 4.7 com  $P=10$  dBm e  $D_{PMD} = 0,2$  ps/(nm.km). Ou seja, nas simulações onde foi especificada uma potência de transmissão de 10 dBm, IA-RWA só mostrou uma probabilidade de bloqueio maior quando foram utilizadas redes mais atuais ( $D_{PMD} = 0,2$  ps/(nm.km)).

Outro importante comportamento sugerido pelas simulações numéricas é observado nas situações onde o efeito de PMD é dominante em relação ao XPM/SPM. Por exemplo, quando  $D_{PMD}$  aumenta ( $0,2 \rightarrow 1,8$  ps/(nm.km)) PMD se torna o efeito dominante se a potência de transmissão é baixa, i.e. 0 dBm. Nesta

situação, como apresentado na Figura 4.7b, as duas propostas apresentam desempenhos próximos, ao contrário do mostrado na Figura 4.7a em que IA-RWA Integrado apresenta melhor desempenho. Note também que, como IA-RWA Ético seleciona a rota de acordo com o efeito de PMD, bloqueio na Figura 4.7c ocorre na etapa de escolha da rota (veja Figura 4.3). Por outro lado, embora IA-RWA Integrado selecione rota e comprimento de onda ao mesmo tempo, comportamento similar acontece, já que os dois algoritmos têm desempenho semelhante. Em outras palavras, esta informação sugere que, do ponto de vista do desempenho da rede, uma limitação da camada física relacionada com a escolha da rota pode também influenciar na escolha do comprimento de onda. Finalmente, note que o mesmo comportamento acontece em cenários de rede onde XPM/SPM se tornam efeitos dominantes, como por exemplo no cenário com alta potência da Figura 4.7b.

Estes resultados levam a crer que a avaliação dos efeitos degradantes é mais precisa quando se utiliza uma abordagem integrada para alocação de rota e comprimento de onda por um algoritmo IA-RWA. A etapa de escolha de uma ou mais rotas limita a escolha do melhor canal apenas neste caminhos achados. O algoritmo IA-RWA Integrado se sobressai dos outros por escolher o melhor canal durante a escolha da melhor rota, possuindo a vantagem de selecionar somente rotas que possuem canais disponíveis e com a menor penalidade de potencia total dos enlaces do caminho.

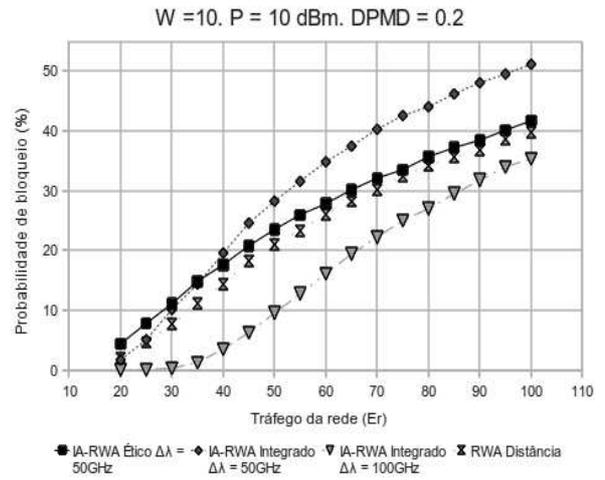
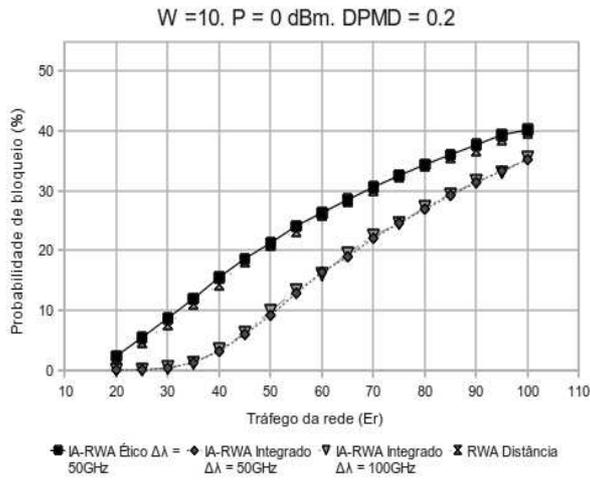
Além na probabilidade de bloqueio, a utilização de uma abordagem integrada IA-RWA afeta no tamanho (quantidade de saltos) de um caminho ótico. As Figuras 4.8 e 4.9 mostram gráficos da quantidade de conexões bloqueadas pelo tamanho dos caminhos nos algoritmos IA-RWA Ético e IA-RWA Integrado, respectivamente.

O algoritmo IA-RWA Ético teve uma quantidade consideravelmente maior de bloqueio em rotas com caminhos com tamanho maior que 6 saltos, diferente do algoritmo IA-RWA Integrado que mostrou um bloqueio insignificante nesta mesma faixa. Isto ocorre devido a integração dos efeitos na escolha da rota e do comprimento de onda, pois o efeito XPM é maior em rotas com maior número de saltos, se levarmos em consideração uma quantidade proporcional de canais interferentes em cada enlace.

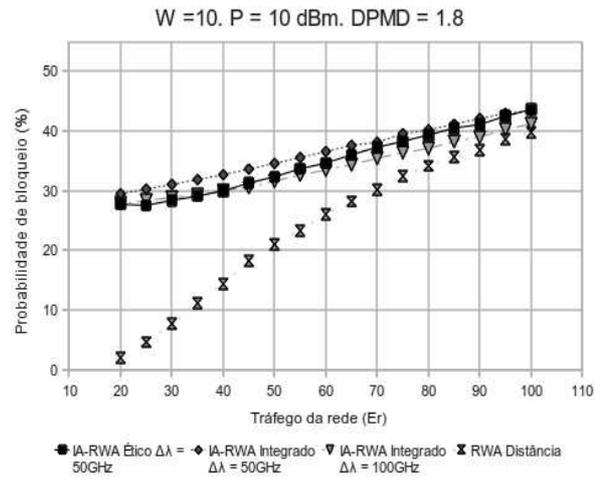
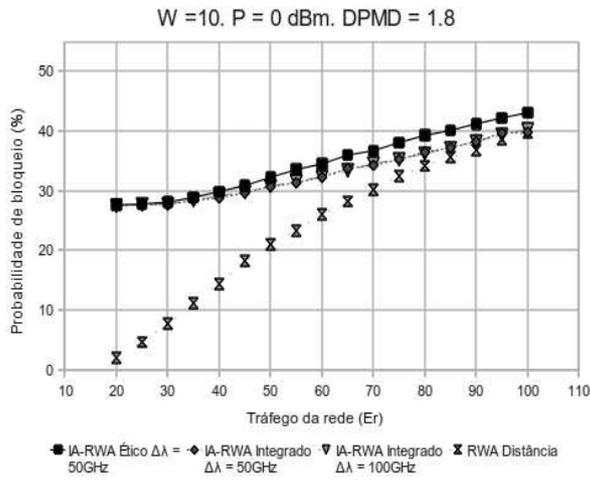
Apesar dos caminhos com uma menor quantidade de saltos levarem a uma

menor influência do efeito XPM, nem sempre o menor caminho é o que tem a menor penalidade, pois depende da quantidade de canais ocupados em cada enlace e do efeito PMD. Na Figura 4.9 pode-se observar uma menor quantidade de bloqueio em caminhos de no máximo 2 saltos, mostrando novamente que o efeito XPM influencia na escolha das rotas utilizando o algoritmo IA-RWA Integrado.

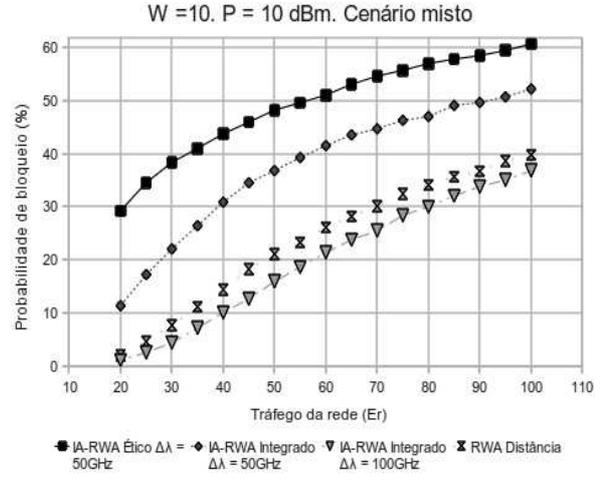
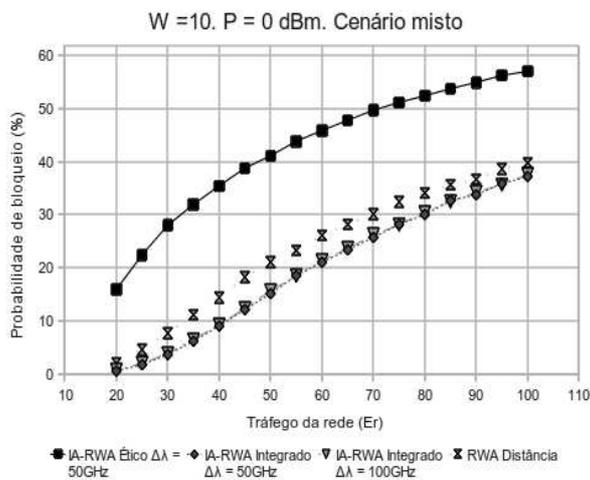
Levando em consideração que a quantidade de  $k$  menores rotas encontradas pelo Algoritmo Ético é igual a um e que a quantidade de comprimentos de onda especificada na rede simulada é igual a dez, pode-se concluir que as simulações realizadas com o Algoritmo Integrado exigiram muito mais tempo para serem concluídas. Apesar disso, a abordagem integrada consegue uma probabilidade de bloqueio menor, gerenciando melhor a alocação de rotas e comprimentos de onda.



(a)

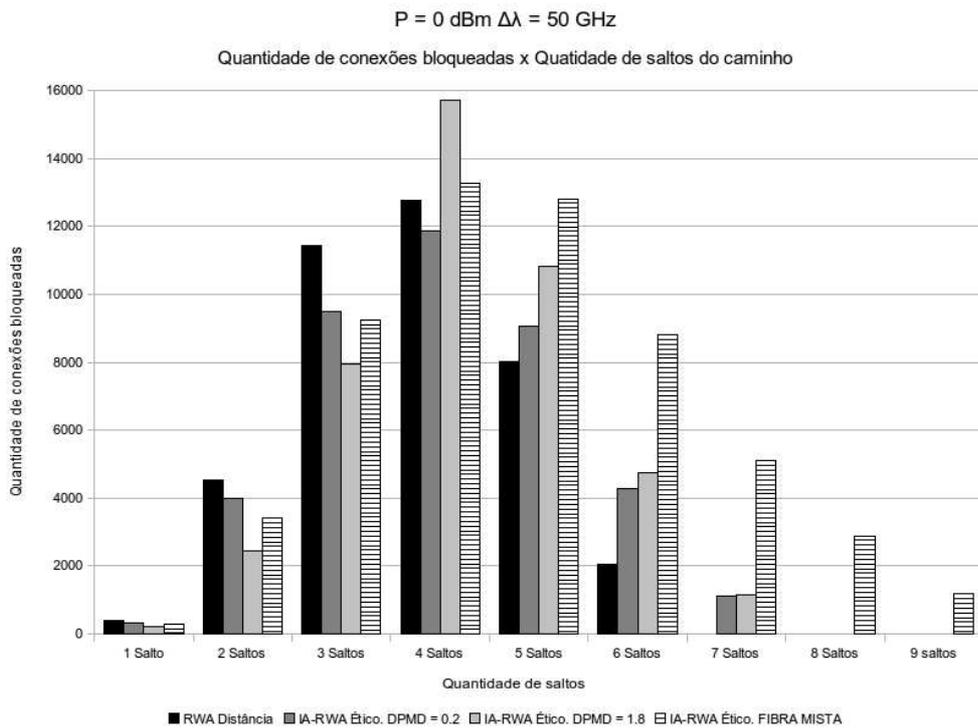


(b)

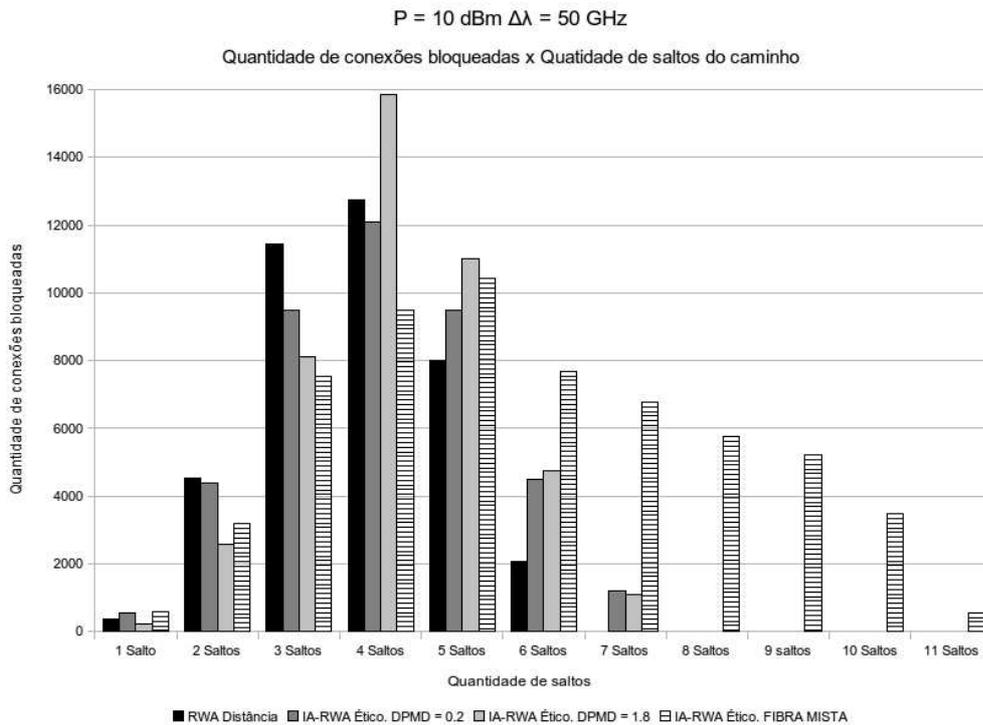


(c)

Figura 4.7: Comparativo entre as diferentes propostas de algoritmos.

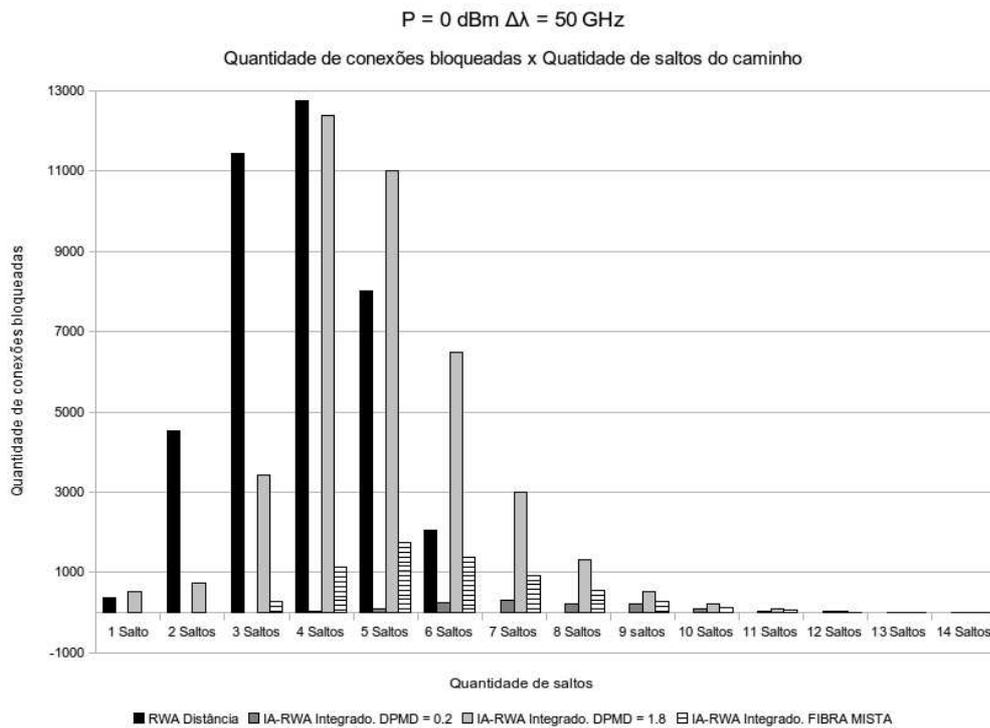


(a)

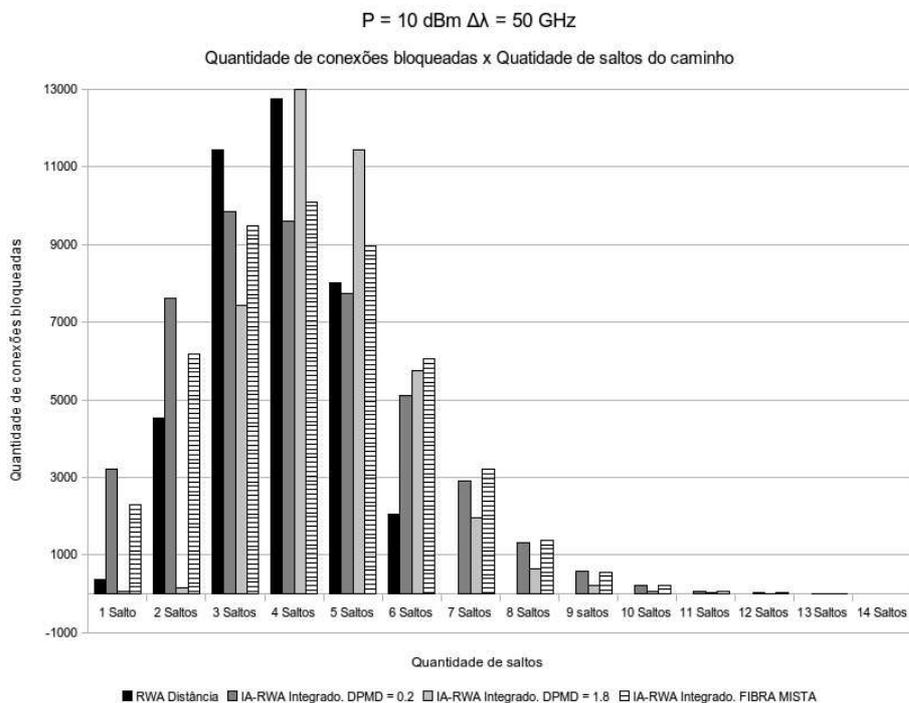


(b)

Figura 4.8: Gráfico da quantidade de conexões bloqueadas pelo tamanho dos caminhos no algoritmo IA-RWA Ético. (a) P = 0 dBm e (b) 10 dBm.



(a)



(b)

Figura 4.9: Gráfico da quantidade de conexões bloqueadas pelo tamanho dos caminhos no algoritmo IA-RWA Integrado. (a) P = 0 dBm e (b) 10 dBm.

## 4.5 Sumário

Neste capítulo foi descrito as características do ambiente de simulação utilizado pelos algoritmos IA-RWA propostos, de forma que possam ser comparados levando em consideração a potência dos sinais transmitidos e o valor do  $D_{PMD}$ , e a probabilidade de bloqueio como métrica de avaliação de desempenho. Além disso, foi detalhado o funcionamento de cada algoritmo proposto, descrevendo quais as etapas de execução dos mesmos.

A partir das simulações realizadas foram comparadas as diferentes abordagens, que mostraram o quanto é importante a integração dos efeitos degradantes na escolha das rotas e comprimentos de onda, levando muitas vezes a uma probabilidade de bloqueio menor.

# Capítulo 5

## Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou duas propostas de algoritmos IA-RWA que levam em consideração três efeitos degradantes: PMD, SPM e XPM. A abordagem para desenvolvimento destes algoritmos foi inspirada na proposta de algoritmo RWA tradicional, que não leva em consideração os efeitos degradantes da camada física, onde o funcionamento pode ser classificado em duas etapas: alocação de rota e alocação de comprimento de onda.

A proposta de algoritmo IA-RWA Ético levou em consideração a classificação dos efeitos degradantes em função da sua influência nas tarefas de alocação de rotas e comprimentos de onda, sendo que o efeito PMD foi utilizado na alocação das rotas e o efeito XPM na alocação de comprimentos de onda, onde eram escolhidos as rotas e comprimentos de onda com a menor penalidade sofrida por estes efeitos.

A proposta de algoritmo IA-RWA Integrado foi realizada com o intuito de saber se existe alguma influência entre o efeito inerente à escolha das rotas com os efeitos utilizados na escolha dos comprimentos de onda, sendo que o mesmo mostrou que apesar do efeito PMD influenciar somente na escolha de rotas, a integração do

mesmo com o efeito XPM influenciou não somente na probabilidade de bloqueio, mas também no tamanho das conexões bloqueadas.

O uso de uma abordagem integrada para alocação de rotas e comprimentos de onda utilizada pelo IA-RWA mostrou-se ser mais eficiente, onde apesar de serem utilizados os mesmos efeitos degradantes, a probabilidade de bloqueio na maioria do cenários de simulação utilizado foi menor que a do algoritmo IA-RWA Ético.

A partir desta dissertação pode-se realizar novos trabalhos na área de provimento e QoT em redes óticas transparentes, sendo que novos algoritmos IA-RWA podem ser propostos a partir da adição de novas características aos que foram apresentados neste trabalho.

Aponta-se os seguintes itens como prováveis trabalhos futuros:

- Utilizar diferentes abordagens para o cálculo do PMD;
- Implementar um algoritmo IA-RWA Integrado que avalie uma nova rota/canal quando a escolhida interferir as conexões anteriores ao ponto de não poder fornecer o nível de QoT exigido;
- Modificar a implementação da simulação utilizando técnicas de programação *multi-core*, para diminuir o tempo de execução das simulações, com isso avaliando novas técnicas de desenvolvimento de software;
- Implementar uma Interface Gráfica do Usuário (GUI - *Graphical User Interface*) para auxiliar na realização de futuras implementações, assim como análise e coleta dos dados;
- Implementar um algoritmo IA-RWA que faça alocação de rotas e comprimentos de onda levando em consideração a distribuição de tráfego na rede;
- Utilizar novas métricas de desempenho para avaliar algoritmos propostos.

## Referências Bibliográficas

- [1] FONSECA, I. E. **Uma abordagem para provisionamento e diferenciação de QoS óptico na presença de FWM em redes ópticas transparentes**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- [2] RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. **Optical networks: a practical perspective**. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [3] HARAI, H. Optical packet & path integration for energy savings toward new generation network. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATIONS AND THE INTERNET. Base de dados IEEE. 2008, Turku, Finland, 2008. p. 389-392. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4604618>>. Acesso em: 01 jul. 2010.
- [4] TOMKOS, I.; AZODOLMOLKY, S.; KLONIDIS, D.; AGGELOU, M.; MARGARITI, K. Dynamic impairment aware networking for transparent mesh optical networks: Activities of EU project DICONET. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), 10. 2008, Athens, Greece, **Proceedings...**, Athens, Greece: 2008. p. 6-12.
- [5] YUANG, M.; CHAO, I F.; LO, B.; TIEN, P. L.; CHEN, J.; WEI, C.; LIN, Y. M.; LEE, S. W.; CHIEN, C.Y. HOPSMAN: an experimental testbed system for a 10-Gb/s optical Packet-Switched WDM metro ring network. **IEEE Communications Magazine**, V. 46, n.7, p.158-166, 2008.
- [6] CHOA, F.; JONATHAN, H. All-optical packet routing – architecture and implementation. **Photonic Network Communications**, v. 1, n. 4, p. 302-311, 1999.
- [7] ABBADE, M. L. F.; MARCONI, J. D.; CASSIOLATO, R. L.; ISHIZUCA, V.; FONSECA, I. E.; FRAGNITO, H. L. Field-Trial evaluation of Cross-Layer effect caused by All-Optical wavelength converters on IP network applications. **Journal of Lightwave Technology**, v. 27, n. 12, p. 1816-1826, 2009.
- [8] RAMAMURTHY, B.; DATTA, D. ; FENG, H.; HERITAGE, J.P.; MUKHERJEE, B. Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks. **Journal of Lightwave Technology**, v. 17, n. 10, p. 1713-1723, Oct. 1999.
- [9] FONSECA, I. E.; RIBEIRO, M. R. N.; ALMEIDA, R. C.; WALDMAN, H. Preserving global optical QoS in FWM impaired dynamic networks. **Electronics Letters**, v. 40, n. 3, p. 191, Feb. 2004.
- [10] FONSECA, I. E.; ALMEIDA, R. C.; WALDMAN, H.; RIBEIRO, M. R. N. Meeting

optical QoS requirements with reduced complexity in dynamic wavelength assignment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BROADBAND NETWORKS. Oct. 2004, San Jose, CA, USA. **Proceedings...**, San Jose: Oct. 2004. p. 331-333.

[11] ALMEIDA JR., R.; CAMPELO, D.; CARTAXO, A. T.; GUILD, K.; WALDMAN, H. Efficient wavelength assignment policy for XPM-Impaired WDM networks. **IEEE Communications Letters**, v. 12, n. 10, p. 791-793, Oct. 2008.

[12] FILHO, U. S. P.; RIBEIRO, M. R. N.; MAIOLI, C. P.; FREITAS, M.; FONSECA, I. E. Cost functions for CAC/RWA in dynamic optical networks under GVD, SPM and XPM. **Journal of Microwave and Optoelectronics**, v. 6, n. 1, p. 249-262, June 2007. Disponível em: <[http://www.sel.eesc.usp.br/jmo/issues/vol\\_6/v6\\_n1/v6\\_n1\\_paper\\_pdf/momag2006/V6n1a21.pdf](http://www.sel.eesc.usp.br/jmo/issues/vol_6/v6_n1/v6_n1_paper_pdf/momag2006/V6n1a21.pdf)>. Acesso em: 01 Jul. 2010.

[13] ALI, M.; TANCEVSKI, L. Impact of polarization-mode dispersion on the design of wavelength-routed networks. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 14, n. 5, p. 720-722, 2002. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.5.8416&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 01 Jul 2010.

[14] MARTINS-FILHO, J. F.; BASTOS-FILHO, C. J. A.; ARANTES, E. A. J.; OLIVEIRA, S. C.; COELHO, L. D.; DE OLIVEIRA, J. P. G.; DANTE, R. G.; FONTANA, E.; NUNES, F. D. Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier saturation. In: SBMO/IEEE MTT-S INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE – IMOC. Sept. 2003, Foz do Iguacu, Brazil. **Proceedings...**, Foz do Iguacu, Brazil. v. 2, p. 919-923.

[15] DENG, T.; Subramaniam, S. Source power management in transparent wavelength-routed mesh networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), 4. June 2004, DC, USA. **Proceedings...**, DC, USA: June 2004. v. 3, p. 1664-1668.

[16] LIMA, M. A. C.; ARAÚJO, A. F. R.; CÉSAR, A. C. Agregação dinâmica de tráfego em redes ópticas WDM utilizando algoritmo genético". In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROONDAS (SBMO), 11, CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 6 – MOMAG. 2004, São Paulo – SP. **Anais...**, São Paulo: 2004.

[17] KULKARNI, P.; TZANAKAKI, A.; MACHUKA, C. M.; TOMKOS, I. Benefits of q-factor based routing in WDM metro networks. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATION (ECOC), 31. Sept. 2005, Greece. **Proceedings...**, Greece: Sept. 2005. v. 4, p. 981-982.

[18] MARTINEZ, R.; PINART, C.; COMELLAS, J.; JUNYENT, G. Routing issues in transparent optical networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON), 6. June 2006, Nottingham, **Proceedings...**, Nottingham: June 2006. v. 3, p. 189-194.

[19] GOMES, A. F. **Estratégias de roteamento para provimento de QoS em redes ópticas limitadas por dispersão de modo de polarização**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), Universidade Federal da Região do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró - RN, 2009.

[21] CARDILLO, R.; CURRI, V.; MELLIA, M. Considering transmission impairments in wavelength routed networks. In: CONFERENCE ON OPTICAL NETWORK DESIGN AND MODELING (ONDM). Feb. 2005, Milan, Italy, **Proceedings...**, Milan: Feb. 2005. p. 421-429.

[22] MARKIDIS, G.; SYGLETOS, S.; TZANAKAKI, A.; TOMKOS, I. Impairment constraint based routing in ultra long haul optical networks employing 2R regeneration. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). June 2006, Nottingham, **Proceedings...**, Nottingham: June 2006. v. 3, p. 173-176.

[23] TOMKOS, I.; VOGIATZIS, D.; MAS, C.; ZACHAROPOULOS, I.; TZANAKAKI, A.; VARVARIGOS, E. Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing. **IEEE Communications Magazine**, v. 42, n. 8, p. S40-S47, Aug. 2004.

[24] SVETOSLAV DUHOVNIKOV, DOMINIC A SCHUPKE, GOTTFRIED LEHMANN, THOMAS FISCHER, AND FRANZ RAMBACH. Dynamic RWA for all optical networks using linear constraints for optical path feasibility assessment. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATIONS (ECOC). Sept. 2006, Munich, Germany. **Proceedings...**, Munich: Sept. 2006. p. 1-2.

[25] MARTÍNEZ, R.; PINART, C.; COMELLAS, J.; JUNYENT, G. On-line ICBR in a transparent GMPLS network: a reality check. In: WORKSHOP IN G/MPLS NETWORKS (WGN5), 5. Mar. 2006, Girona, Spain. **Proceedings...**, Girona: Mar. 2006.

[26] LI, J. C.; HINTON, K.; DODS, S. D.; FARRELL, P. M. Enabling ASON routing via novel signal quality metrics. In: CONFERENCE ON OPTICAL FIBER COMMUNICATION AND THE NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE (OFC/NFOEC). Mar. 2007. Anaheim, CA. **Proceedings...**, Anaheim: 2007. p. 1-3.

[27] PINART, C.; HARAI, H. On using optical-layer link information parameters in distributed impairment constraint-based routing. In: CONFERENCE ON OPTICAL FIBER COMMUNICATION AND THE NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE (OFC/NFOEC). Mar. 2007. Anaheim, CA. **Proceedings...**, Anaheim: 2007.p. 1.

[28] PAVANI, G. S.; WALDMAN, H. Dynamic routing and wavelength assignment with power constraints. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (SBT'04), 21. Set. 2004. BELÉM, PA. Disponível

em:<[http://www.optinet.fee.unicamp.br/files/sbrt2004\\_PW.pdf](http://www.optinet.fee.unicamp.br/files/sbrt2004_PW.pdf)>. Acesso em: 01 Jul. 2010.

[29] PAPANIMITRIOU, D.; FAURE, J.; AUDOUIN, O. **Non-linear routing impairments in wavelength switched optical networks**. [S.l.], July 2001. Disponível em: <<http://tools.ietf.org/html/draft-papadimitriou-ipo-non-linear-routing-impairm-01>>. Acesso em: 01 Jul. 2010.

[30] McNeill, K. M. et. al. "Supporting optical impairment constrained path selection in the intelligent transparent optical networking".

[31] TOMKOS, I.; SYGLETOS, S.; TZANAKAKI, A.; MARKIDIS, G. Impairment constraint based routing in mesh optical networks. In: CONFERENCE ON OPTICAL FIBER COMMUNICATION AND THE NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE (OFC/NFOEC). Mar. 2007. Anaheim, CA. **Proceedings...**, Anaheim: 2007. p. 1-3.

[32] C. Politi, V. Anagnostopoulos, C. Matrakidis, and A. Stavdas. Physical layer impairment aware routing algorithms based on analytically calculated q-factor. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE (OFC), NATIONAL FIBER OPTIC ENGINEERS CONFERENCE. Mar. 2006. Greece. **Proceedings...**, Greece, p. 3.

[33] CASTOLDI, P.; CUGINI, F.; VALCARENCHI, L.; SAMBO, N.; LE ROUZIC, E.; POIRRIER, M. J.; ANDRIOLLI, N.; PAOLUCCI, F.; GIORGETTI, A. Centralized vs. distributed approaches for encompassing physical impairments in transparent optical networks. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 4534, p. 68-77, Berlin, Heidelberg, 2007.

[34] DENG, T.; SUBRAMANIAM, S. Adaptive QoS routing in dynamic wavelength-routed optical networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BROADBAND NETWORKS, 2. 2005, [S.l.], **Proceedings...**, [S.l.]: 2005. v. 1, p. 184-193, 2005.

[35] POINTURIER, Y.; BRANDT-PEARCE, M.; DENG, T.; SUBRAMANIAM, S. Fair QoS-Aware adaptive routing and wavelength assignment in All-Optical networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS. 2008, Istanbul, **Proceedings...**, Istanbul: 2006. v. 6, p. 2433-2438.

[36] FONSECA, I. E.; ALMEIDA, R. C.; RIBEIRO, M. R. N.; WALDMAN, H. Algorithms for FWM-aware routing and wavelength assignment. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC). 2003, Stockholm, Sweden, **Proceedings...**, Stockholm: 2003. v. 2, p. 707-712.

[37] FONSECA, I. E.; RIBEIRO, M. R. N.; ALMEIDA JR., R. C.; WALDMAN, H. Meeting optical qos requirements with reduced complexity. In: EUROPEAN CONFERENCE ON OPTICAL COMMUNICATION (ECOC'04), 30. 2004, Stockholm, Sweden, **Proceedings...**, Stockholm: 2004.

- [38] PINART, C.; LE ROUZIC, E.; MARTINEZ, I. Physical-layer considerations for the realistic deployment of impairment-aware connection provisioning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS (ICTON '07), 9. July 2007, Rome, **Proceedings...**, Rome: 2007. v. 3. p. 134.
- [39] MUKHERJEE, B. **Optical WDM networks**. Davis, USA: Springer, 2006.
- [40] FILHO, U. S. P. **Influência da modulação cruzada de fase em algoritmos para CAC/RWA dinâmicos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil, 2007.
- [41] AGRAWAL, G. P. **Nonlinear fiber optics**. 4th ed. Burlington, USA: Academic Press, 2007.
- [42] ITU. **ITU-T Rec. G.652**: characteristics of single-mode optical fiber cable. [S.I.], 2000.
- [43] ITU. **ITU-T Rec. G.653**: characteristics of dispersion shifted-fiber single-mode optical cable. [S.I.], 2000.
- [44] ITU. **ITU-T Rec. G.655**: characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable. [S.I.], Mar. 2003.
- [45] ITU. **ITU-T Rec. G.694.1**: spectral grids for wdm application: dwdm frequency grid. [S.I.], June 2002.
- [46] AZADEH, M. **Fiber Optics Engineering (Optical Networks)**. Davis, CA, USA: Springer, 2009.
- [47] FLOOD, F. A. L-band erbium-doped fiber amplifiers. In: OPTICAL FIBER COMMUNICATION CONFERENCE (OFC). 2000. Baltimore, MD, USA. **Proceedings...**, Baltimore. v. 2, p. 102.
- [48] KAMINOW, I. P. (Ed.) **Optical fiber telecommunications IVB**: systems and impairments. San Diego, California, USA: Academic, 2002.
- [49] DESURVIRE, E. **Erbium-doped fiber amplifiers** : device and system developments. New York: J. Wiley & Sons, 2002.
- [50] RAZAVI, M.; SALEHI, J. A. Performance of optical bit rate limiters with pre- or post-optical amplification. **Journal of Lightwave Technology**, v. 20, n. 10, p. 1797-1804, 2002.
- [51] OLSHANSKY, R. Noise figure for erbium-doped optical fibre amplifiers. **Electronics Letters**, v. 24, p. 1363-1365, 1988.
- [52] LAMING, R. I.; PAYNE, D. N. Noise characteristics of erbium-doped fiber amplifier pumped at 980 nm. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 2, n. 6, p. 418-

421, 1990.

[53] CHAVES, D. A. R. **Algoritmos rápidos de IRWA para redes totalmente ópticas. Dissertação** (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife – PE, 2008.

[54] LUIS, R.S.; CARTAXO, A. V. T. 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, 2005.

[55] CARTAXO, A. V. T. Small-signal analysis for nonlinear and dispersive optical fibres and its application to design of dispersion supported transmission systems with optical dispersion compensation. **IEE Proceedings - Optoelectronics**, v. 146, n. 5, p. 213, 1999.

[56] LIU, X.; XIE, C.; VANWIJNGAARDEN, A. J. Multichannel PMD mitigation and outage reduction through FEC with Sub-Burst-Error-Correction period PMD scrambling. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, n. 9, p. 2183-2185, 2004.

[57] RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. Routing and wavelength assignment in all-optical networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 3, n. 5, p. 489-500, Oct. 1995.

[58] MEI, Y.; QIAO, C. Efficient distributed control protocols for WDM all-optical networks. In: International Conference on Computer Communications and Networks, 6. 1997, Las Vegas, NV, USA, **Proceedings...**, Las Vegas: 1997. p. 150-153.

[59] MEY, Y.; QIAO, C. Distributed control schemes for dynamic lightpath establishment in WDM optical networks. In: OPTICAL NETWORK WORKSHOP. Jan. 1999, [S.I.], **Proceedings...**, [S.I.]: Jan. 1999.

[60] SHEN, L.; RAMAMURTHY, B. Centralized vs. distributed connection management schemes under different traffic patterns in wavelength-convertible optical networks. In: IEEE International Conference on Communications (ICC 2002). 2002, New York, NY, USA, **Proceedings...**, New York: 2002. p. 2712-2716.

[61] SUBRAMANIAM, S.; AZIZOGLU, M.; SOMANI, A. K. All-optical networks with sparse wavelength conversion. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 4, n. 4, p. 544-557, Aug. 1996.

[62] YEN, J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. **Management Science**, v. 17, n. 11, p. 712-716, 1971.

[63] GROSS, J. L.; YELLEN, J. **Graph theory and its applications**. 2nd ed. [S.I.]: Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2006.

[64] CHLAMTAC, I.; GANZ, A.; KARMI, G. Lightpath communication: an approach to high bandwidth optical WAN's. **IEEE Transactions on Communications**. v. 40, p.

1171, Jul. 1992.

[65] KOVACEVIC, M.; ACAMPORA, A. Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 14, n. 5, p. 868, June 1996.

[66] MOKHTAR, A.; AZIZOGLU, M. Adaptive wavelength routing in all-optical networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 6, n. 2, p. 197-206, 1998.

[67] SUBRAMANIAM, S.; BARRY, R. A. Wavelength assignment in fixed routing WDM networks. In: International Conference on Communications (ICC'97). 1997, Montreal, Que., Canada, **Proceedings...**, Montreal: 1997. p. 406-410.

[68] GOMES, A. F.; FERNANDES, C. E. M.; OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E. Routing techniques in dynamic optical networks impaired by PMD. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC). 2009, Belém – PA, Brazil, **Proceedings...**, Belém: 2009. p. 412-416.

[69] GOMES, A. F.; FERNANDES, C. E. M.; OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E. Estratégia de roteamento em algoritmos IA-RWA para redes ópticas: uma avaliação de dispersão de modo de polarização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (SBrT 2009), 27. 2009, Blumenau – SC, **Proceedings...**, Blumenau: 2009.

[70] GOMES, A. F.; FERNANDES, C. E. M.; OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E. Roteamento em algoritmos IA-RWA em redes ópticas limitas por dispersão de modo de polarização. In: ESCOLA POTIGUAR DE COMPUTAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES (EPOCA 2009). Nov. 2009. Natal – RN, **Proceedings...**, Natal – RN: 2009.

## Apêndice A

### Algoritmo de Dijkstra

O Algoritmo Dijkstra é utilizado para encontrar um caminho mais curto a partir de um vértice (nó) origem do grafo, para cada um dos vértices do grafo, produzindo uma árvore de Dijkstra de caminhos mais curtos [63], porém ele pode ser utilizado para apenas encontrar um caminho mais curto entre um nó origem e um destino (para alocar rotas). Para a utilização do mesmo é necessário que os pesos dos enlaces não tenham valores negativos e que o grafo conectado não possua laços. Este algoritmo possui complexidade  $O(n^2)$ .

A implementação do algoritmo de Dijkstra realizada para este trabalho utilizou uma matriz de adjacências para representar um grafo G da rede e uma matriz de estados para auxiliar o algoritmo. A matriz de estados guarda a informação se um nó já foi visitado, o custo do menor caminho entre este nó e o nó origem, e o valor do nó anterior a este e que faz parte do menor caminho que vai do nó origem até o nó especificado.

O algoritmo Dijkstra realiza as seguintes etapas:

1- Definir um custo inicial de valor muito grande para todos os nós na matriz de estados.

2- Definir o nó origem s como nó que esta atualmente sendo visitado (v) e marcar como visitado na matriz de estados (ME), e armazenar o valor zero como custo para o nó origem (não existe custo nem caminho entre o nó origem e ele mesmo).

3- Enquanto existir algum nó que ainda não foi definido como visitado e enquanto o nó destino não for marcado como visitado, o algoritmo realizará as seguintes etapas:

- Calcular novos custos dos k nós que têm ligação direta com o nó v. Utilizando as seguintes funções que acessam e manipulam valores da matriz de estado: CUSTO(x) para determinar o custo atual de um nó x, PESO(x, y) para determinar o peso do enlace entre os nós x e y, NOVO\_CUSTO(x, 'valor') para atribuir um novo custo para o nó x, e

NOVO\_ANTERIOR(x, y) para atribuir um novo nó anterior ao nó x, pode-se calcular os novos custos seguindo os passos do pseudocódigo seguinte

```

SE( (CUSTO(v)+ PESO(v, jk)) < CUSTO(jk), ENTÃO
    NOVO_CUSTO(jk, CUSTO(v)+ PESO(v, jk )
    NOVO_ANTERIOR(jk, v)
FIM_SE

```

- Escolher um nó que tenha ligação com o nó v, com o menor custo e que ainda não tenha sido visitado, para ser o próximo nó v.
- Definir o novo nó v como visitado na matriz de estados.

## A.1 Exemplo

O grafo utilizado neste exemplo é apresentado na Figura A.1.

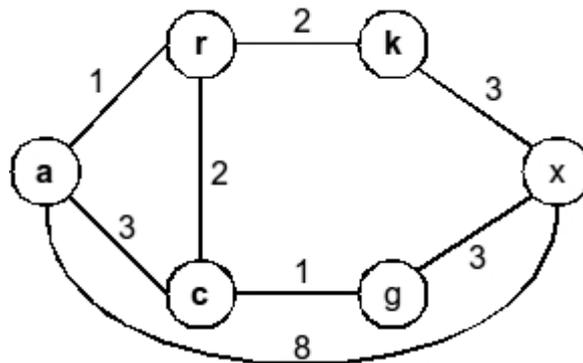


Figura A.1: Grafo utilizado para achar o caminho Dijkstra.

O primeiro nó a ser visitado é o nó origem a ( $v = a$ ), como mostrado na Figura A.2. Calcula-se então os novos custos dos nós que são vizinhos diretos do nó v. Como  $v = a$  (o nó que está sendo visitado é o nó origem), os novos custos dos nós ligados ao nó v serão os pesos do enlaces (aresta) que ligam estes nós ao nó v.

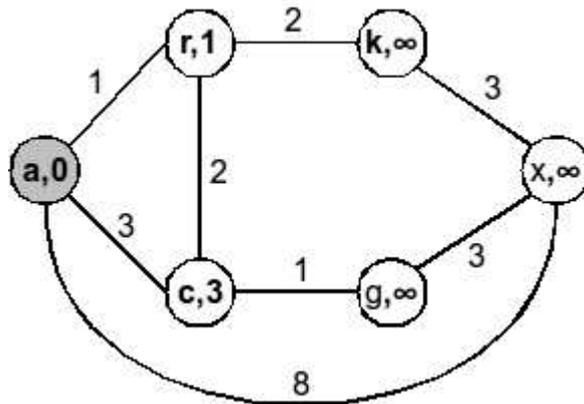


Figura A.2: Calculando o custo dos nós diretamente conectados ao nó v.

Após o cálculo dos novos custos, a matriz de estados (ME) será modificada como mostrado na Tabela A.1. Nota-se que os custos especificados nos nós que ainda não foram visitados, são apenas custos temporários (como no caso do custo infinito especificado no nó k). Apenas quando o nó for marcado como visitado é que o valor do custo será o valor final, que determina o custo total do menor caminho entre este nó e o nó origem.

| nó       | a        | r            | k            | x            | c            | g            |
|----------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| custo    | 0        | 1            | $\infty$     | $\infty$     | 3            | $\infty$     |
| anterior | -        | a            | -            | -            | a            | -            |
| estado   | Visitado | Não Visitado |

Tabela A.1: Valores apresentados na Matriz de estados quando v = a.

O próximo nó a ser visitado será o nó r, pois ele é o vizinho direto do nó v que possui o menor custo e ainda não foi visitado.

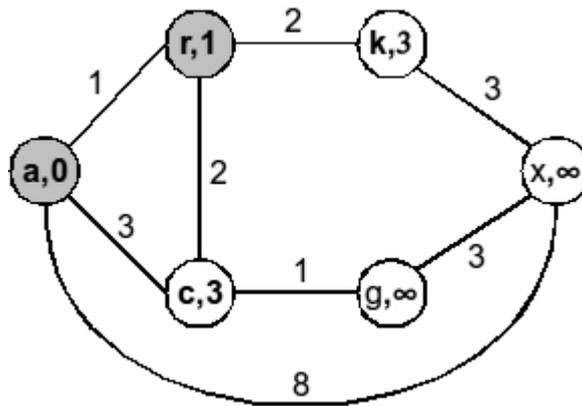


Figura A.3: Calculando os novos custos com  $v = r$ .

Após o cálculo dos novos custos dos nós vizinhos diretos a  $v$  (sendo  $v = r$ ), a matriz de estados conterá os valores especificados na Tabela A.2.

| nó       | a        | r        | k            | x            | c            | g            |
|----------|----------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| custo    | 0        | 1        | 3            | $\infty$     | 3            | $\infty$     |
| anterior | -        | a        | r            | -            | a            | -            |
| estado   | Visitado | Visitado | Não Visitado | Não Visitado | Não Visitado | Não Visitado |

Tabela A.2: Valores apresentados na matriz de estados quando  $v = r$ .

Como os custos dos nós que estão conectados diretamente com o nó  $v$ , que ainda não foram visitados, possuem valor igual (3), o algoritmo pode selecionar qualquer um dos dois como próximo nó a ser visitado. Neste exemplo, foi escolhido o nó  $k$  como o próximo nó a ser visitado.

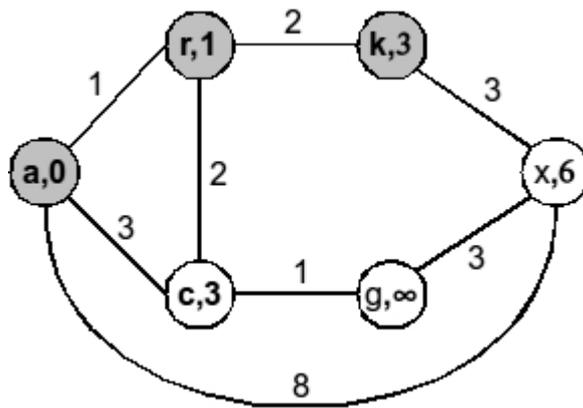


Figura A.4: Cálculo dos custos dos nós vizinho diretos do nó v, sendo  $v = k$ .

O próximo nó a ser visitado será o nó destino, satisfazendo assim uma das condições de parada do algoritmo (a outra condição de parada é quando o algoritmo visitar todos os nós do grafo). A rota mais curta ou caminho Dijkstra, entre o nó origem a e o nó destino x é  $r_1 = a, r, k, x$ ; com custo  $c_1 = 6$ . A Figura A.5 mostra o caminho encontrado pelo algoritmo Dijkstra.

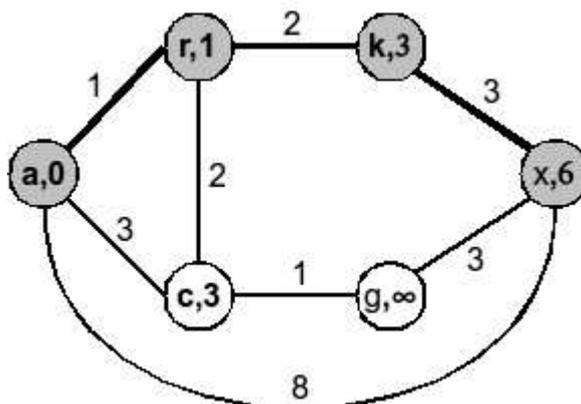


Figura A.5: Caminho Dijkstra.

## Apêndice B

### Algoritmo de Yen

O algoritmo de Yen é serve para encontrar  $k$  caminhos mais curtos em um grafo [62], a partir de um nó origem, podendo ser utilizado para se encontrar as  $k$  rotas mais curtas entre nós origem e destino. Ele pode ser utilizado em grafos direcionados ou não e que não tenha laços, contendo somente pesos não negativos nas arestas (enlaces da rede), e possui uma complexidade  $O(kn^3)$ .

Para a utilizar o algoritmo de Yen, é necessário utilizar um algoritmo padrão para achar uma rota mais curta, como o algoritmo Dijkstra, por exemplo. A partir deste caminho encontrado, são encontradas as  $k - 1$  rotas mais curtas utilizando a abordagem de usar nós de desvio (*deviation node*), sendo que os nós de desvio podem ser todos os nós do caminho mais curto a ser percorrido, com exceção do último nó, sendo utilizados para provocar um desvio intencional na rota mais curta.

Após encontrar o caminho Dijkstra entre dois nós conhecidos, o mesmo é adicionado a lista A. Para se encontrar as  $k - 1$  rotas mais curtas utilizando o algoritmo de Yen, deve-se seguir as seguintes etapas:

1. Estabelecer o caminho Dijkstra como caminho a ser percorrido.
2. Enquanto não encontrar as  $k - 1$  rotas mais curtas, repetir as etapas:
  - I. O nó origem é especificado como nó de desvio ( $dv$ )
  - II. Remover o enlace entre o nó  $dv$  e o próximo nó no caminho Dijkstra, especificado na matriz de adjacências.
  - III. Utilizar o algoritmo Dijkstra entre os nós origem e destino.
  - IV. Adicionar o novo caminho mais curto encontrado em uma lista dos caminhos mais curtos encontrados.
  - V. O nó seguinte ao  $dv$  no caminho que está sendo percorrido, é utilizado como novo  $dv$ .
  - VI. Enquanto o nó  $dv$  não for o nó destino, realizar as seguintes etapas:
    - Armazenar a sub-rota entre os nós origem e  $dv$  em um vetor  $P_{sv}$ .
    - Remover o enlace entre o  $dv$  e o nó seguinte do caminho que está sendo percorrido.

- Remover todos os enlaces da sub-rota do caminho que esta sendo percorrido.
- Utilizar o algoritmo Dijkstra entre o nó  $dv$  e o nó destino do caminho que está sendo percorrido.
- Adicionar o novo caminho mais curto encontrado em uma lista dos caminhos mais curtos, após ser verificado se este novo caminho não é igual a nenhuma outro na lista.
- Adicionar os caminhos da lista dos caminhos mais curtos, na lista A, levando em consideração se é mesmo um caminho mais curto novo, e se ainda não foram adicionados  $k$  caminhos mais curtos à lista A.

Os caminhos encontrados são adicionados a uma lista de resultados (lista A), onde o caminho Dijkstra é o primeiro da lista. A condição de parada do algoritmo de Yen é quando não existir mais caminhos para serem percorridos ou quando terminar de percorrer um caminho, o número de  $k$  caminhos mais curtos encontrados for maior ou igual ao especificado, descartando os caminhos adicionais encontrados.

## B.1 Exemplo

Utilizando o grafo da Figura A.1, os nós  $a$  e  $x$  como origem e destino, respectivamente, e o algoritmo de Dijkstra como padrão, encontramos o primeiro caminho mais curto (caminho Dijkstra) da lista A, mostrado na Figura A.5.

O primeiro nó de desvio será o nó origem ( $dv = a$ ). Para encontrar um caminho usando o primeiro nó de desvio, é necessário apenas remover o enlace entre o nó  $dv$  e o nó seguinte do caminho Dijkstra, na matriz de adjacências, e executar o algoritmo Dijkstra novamente. Utilizando  $dv = a$ , tem-se o seguinte caminho

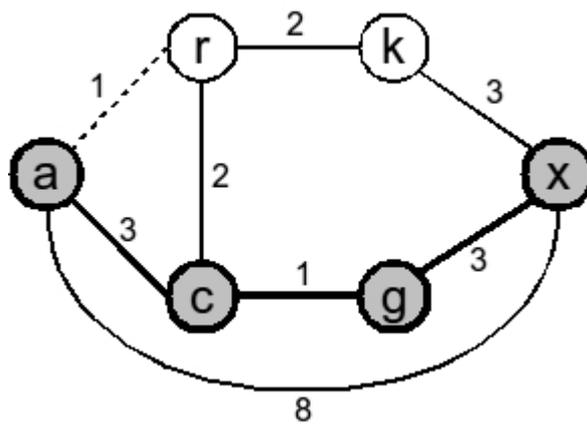


Figura B.1: Novo caminho mais curto encontrado, usando  $dv = a$ .

A Tabela B.1 mostra que o novo caminho mais curto encontrado não usou uma sub-rotas do caminho percorrido (caminho Dijkstra), pois o  $dv$  era o primeiro nó do caminho.

| $dv$ | rota $P_{sv}$ | rota $P_{vt}^*$ | $P_{sv} \oplus P_{vt}^*$ | custo |
|------|---------------|-----------------|--------------------------|-------|
| a    | -             | a, c, g, x      | a, c, g, x               | 7     |

Tabela B.1: Novo caminho mais curto encontrado pelo Yen, utilizando  $dv = a$ .

Utilizando  $dv = r$ , é encontrado o seguinte caminho

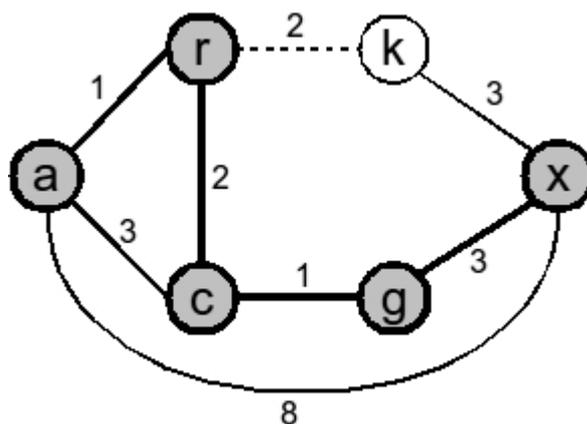


Figura B.2: Novo caminho mais curto encontrado, usando  $dv = r$ .

A Tabela B.2 mostra que este novo caminho é obtido através da concatenação da sub-rota do caminho que está sendo percorrido formada entre os nós origem e  $dv$ , com a nova rota encontrada entre  $dv$  e o nó destino.

| $dv$ | rota $P_{sv}$ | rota $P_{vt}^*$ | $P_{sv} \oplus P_{vt}^*$ | custo |
|------|---------------|-----------------|--------------------------|-------|
| a    | -             | a, c, g, x      | a, c, g, x               | 7     |
| r    | a, r          | r, c, g, x      | a, r, c, g, x            | 7     |

Tabela B.2: Novo caminho mais curto encontrado pelo Yen, utilizando  $dv = r$ .

Para achar esta nova rota é necessário remover na matriz de adjacências todos os enlaces que se ligam aos nós que estão na sub-rota que está sendo percorrida e remover também o enlace localizado entre o  $dv$  e o próximo nó do caminho que esta sendo percorrido.

O último nó de desvio ( $dv$ ) será o nó  $k$  e este não fornecerá nenhuma nova rota mais curta, pois após a remoção do enlace entre o  $dv$  e o próximo nó do Dijkstra, e da remoção dos enlaces da sub-rota do caminho que está percorrido, não existirá mais nenhuma rota entre os nós  $dv$  e destino.

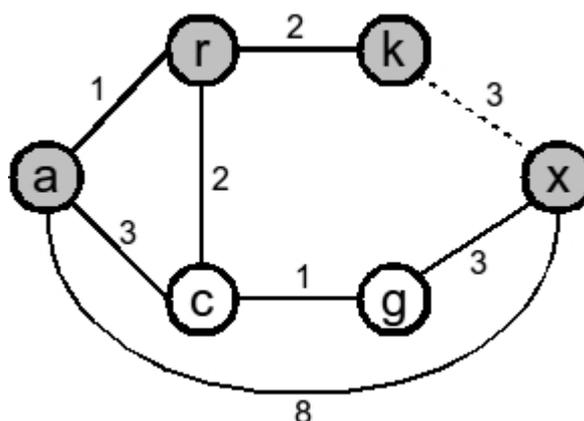


Figura B.3: Com  $dv = k$ , o Yen não pode encontrar um novo caminho.

A Tabela B.3 mostra três caminhos encontrados através algoritmo de Yen,

quando o caminho que está sendo visitado for o caminho Dijkstra. Se for especificado que o algoritmo de Yen deve encontrar os 5 caminhos mais curtos, todos os caminhos da Tabela B.3 são adicionados a lista A, e com exceção da execução inicial do algoritmo de Dijkstra, todos os passos anteriores deve realizados novamente, utilizando o segundo caminho mais curto da lista A como caminho a ser percorrido. É necessário que o caminho que for visitado, seja percorrido por completo, pois nem sempre o primeiro caminho mais curto encontrado será o caminho mais curto de todos os achados pelo Yen ao percorrer este caminho.

| k caminhos mais curtos |               |   |
|------------------------|---------------|---|
| 1                      | a, r, k, x    | 6 |
| 2                      | a, c, g, x    | 7 |
| 3                      | a, r, c, g, x | 7 |

Tabela B.3: caminhos encontrados com o algoritmo de Yen, usando o caminho Dijkstra.

## Apêndice C

### Artigos publicados e submetidos a publicação

- GOMES, A. F.; FERNANDES, C. E. M.; OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E. Routing techniques in dynamic optical networks impaired by PMD. In: INTERNATIONAL MICROWAVE AND OPTOELECTRONICS CONFERENCE (IMOC). 2009, Belém – PA, **Anais...**, Belém – PA: 2009.
- GOMES, A. F.; FERNANDES, C. E. M.; OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E. Estratégia de roteamento em algoritmos IA-RWA para redes ópticas – uma avaliação da dispersão de modo de polarização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (SbrT). 2009, Blumenau – SC, **Anais...**, Blumenau – SC: 2009.
- GOMES, A. F.; FERNANDES, C. E. M.; OLIVEIRA, V. A. P.; FONSECA, I. E. Roteamento em algoritmos IA-RWA em redes ópticas limitadas por dispersão de modo de polarização. In: ESCOLA POTIGUAR DE COMPUTAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES (EPOCA). 2009, Natal – RN, **Proceedings...**, Natal – RN: 2009.
- FERNANDES, C. E. M.; GOMES, A. F.; FONSECA, I. E.; FILHO, U. S. P.; RIBEIRO, M. R. N. Relationship between XPM/SPM and PMD in dynamics optical networks. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROONDAS E OPTOELETRÔNICA (SBMO), 14, e CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO (CBMag), 9. 2010, Vila Velha – ES, **Anais...**, Vila Velha – ES: 2010.