



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**ESTRATÉGIA DE PROJETO DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO  
DE ONDA COM RESTRIÇÃO DE CAMADA FÍSICA EM REDES WDM**

**ANDRÉ MOACIR LAGE MIRANDA**

**TD – 02/2014**

**BELÉM/PA**

**2014**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANDRÉ MOACIR LAGE MIRANDA**

**ESTRATÉGIA DE PROJETO DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO  
DE ONDA COM RESTRIÇÃO DE CAMADA FÍSICA EM REDES WDM**

Tese de doutorado apresentada como exigência para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, elaborada sob a orientação do Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa.

**BELÉM/PA**

**2014**

**ESTRATÉGIA DE PROJETO DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA  
COM RESTRIÇÃO DE CAMADA FÍSICA EM REDES WDM**

**ANDRÉ MOACIR LAGE MIRANDA**

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, e aprovada na sua forma final, pela banca examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal do Pará, em 28 de março de 2014.

---

**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa (PPGEE-UFPA) – Orientador**

---

**Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto (PPGEE -UFES) – Coorientador**

---

**Prof. Dra. Maria José Pontes (PPGEE -UFES) – Membro Externo**

---

**Prof. Dra. Maria Thereza M. Rocco Giraldi (PGED-IME) – Membro Externo**

---

**Prof. Dra. Maria Aparecida G. Martinez (PPEEL-CEFET/RJ) – Membro Externo**

---

**Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês (PPGEE-UFPA) – Membro Interno**

**VISTO:**

---

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes – Coordenador do PPGEE/CT/UFPA**

**BELÉM/PA**

**2014**

*“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine. E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria”.*

São Paulo

*“O impulso de nosso conhecimento exige relacionar a ordem do universo com Deus”.*

Max Planck

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre me iluminar e guiar, e por ter colocado cada pessoa listada abaixo no meu caminho.

À minha esposa e ao meu filho, pelo incentivo e compreensão dos momentos ausentes, além do amor e do carinho sempre presentes.

Aos meus pais e minhas irmãs, que sempre me incentivaram e apoiaram em todos os momentos de minha vida.

A todos os meus familiares: avós, tios e tias, primos e primas pelo apoio e pela companhia nos momentos de descontração.

Ao Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa, por sua dedicada orientação, confiança, paciência e incentivo, além do apoio financeiro e grande amizade demonstrada em diversos momentos.

A todos os professores que contribuíram na minha formação. Em especial aos professores/amigos: Carlos Renato L. Francês, Marcelo Eduardo V. Segatto e Eduardo Coelho Cerqueira pelo apoio financeiro e pelas valiosas contribuições que foram essenciais para elaboração desta tese.

Aos meus amigos pessoais e todo grupo do LEA, do LPRAD e do LABTEL (UFES), pelo companheirismo, pelas inúmeras contribuições na elaboração desse trabalho e pela companhia nos momentos de descontração.

Ao IFPA/Campus Castanhal, em especial aos professores: Francisco Edinaldo Feitosa Araújo, Luis Nery Rodrigues, Márcia Brito da Silva Vieira, José Alcimar dos Santos e Danileno Meireles do Rosário por terem dado o apoio necessário para a participação no curso de doutorado.

Ao **CNPq**, ao **PROCAD/CAPES** e à **FAPESPA**, pelo apoio financeiro dado a este trabalho, que foi de grande importância para sua conclusão.

# ÍNDICE

LISTAS DE FIGURAS .....	ix
LISTAS DE TABELAS .....	xi
LISTAS DE ABREVIATURAS .....	xii
RESUMO .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
1. INTRODUÇÃO .....	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	16
1.2. TRABALHOS CORRELATOS .....	18
1.3. DEFINIÇÃO DE HIPÓTESE .....	22
1.4. OBJETIVOS .....	22
1.4.1. GERAL .....	22
1.4.2. ESPECÍFICOS .....	23
1.5. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES .....	23
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	24
2. PROJETO DE REDES ÓPTICAS .....	25
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	25
2.2. CONCEITOS GERAIS .....	25
2.3. O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA .....	27
2.4. ABORDAGENS HEURÍSTICAS PARA RESOLVER O SUBPROBLEMA DE ROTEAMENTO .....	28
2.4.1. ROTEAMENTO COM ROTA FIXA (FR) .....	28
2.4.2. ROTEAMENTO COM ROTA FIXA ALTERNATIVA (FAR) .....	29
2.4.3. ROTEAMENTO ADAPTATIVO (AR) .....	29
2.5. ABORDAGENS HEURÍSTICAS PARA RESOLVER O SUBPROBLEMA DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA .....	30
2.5.1. ATRIBUIÇÃO RANDOM .....	30
2.5.2. ATRIBUIÇÃO FIRST-FIT (FF) .....	30
2.5.3. ATRIBUIÇÃO MOST-USED (MU) .....	31
2.5.4. ATRIBUIÇÃO LEAST-USED (LU) .....	31
2.6. ALGORITMO RWA COM RESTRIÇÃO DE CAMADA FÍSICA .....	31
2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	32
3. RESTRIÇÕES DA CAMADA FÍSICA EM REDES ÓPTICAS WDM .....	33
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	33
3.2. RESTRIÇÕES LINEARES .....	33
3.2.1. ATENUAÇÃO .....	34
3.2.2. EMISSÃO ESPONTÂNEA AMPLIFICADA .....	35
3.2.3. DISPERSÃO CROMÁTICA .....	36

3.2.4. DISPERSÃO DO MODO DE POLARIZAÇÃO .....	37
3.3. RESTRIÇÕES NÃO LINEARES.....	38
3.3.1. MISTURA DE QUATRO ONDAS.....	38
3.3.2. AUTO MODULAÇÃO DE FASE .....	39
3.3.3. MODULAÇÃO DE FASE CRUZADA .....	41
3.4. MODELAGEM DO EFEITO XPM ATRAVÉS DA TÉCNICA PUMP-PROBE.....	42
3.4.1. VARIÂNCIA NORMALIZADA POR ENLACE.....	48
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
4. METODOLOGIA HÍBRIDA PARA PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA.....	52
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	52
4.2. METODOLOGIA PROPOSTA.....	53
4.2.1. ALGORITMO DE ROTEAMENTO.....	54
4.2.2. PRÉ-PROCESSAMENTO .....	55
4.2.3. ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS .....	56
4.2.3.1. CODIFICAÇÃO DO CROMOSSOMO .....	59
4.2.3.2. CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL.....	59
4.2.3.3. AVALIAÇÃO.....	60
4.2.3.4. SELEÇÃO DO MELHOR CROMOSSOMO E GERAÇÃO MÁXIMA.....	61
4.2.3.5. CRUZAMENTO.....	62
4.2.3.6. MUTAÇÃO .....	63
4.2.3.7. <i>CICLO MÁXIMO</i> .....	64
4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
5. DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E RESULTADOS NUMÉRICOS.....	66
5.1. <i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS</i> .....	66
5.2. <i>DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO DE REDES ÓPTICAS</i> .....	66
5.2.1. FRONT-END DA FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO .....	68
5.2.2. KERNEL DA FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO E MÓDULO COLORAÇÃO .....	69
5.2.3. MÓDULO OTIMIZAÇÃO.....	70
5.2.4. MÓDULO RESTRIÇÃO NÃO LINEAR .....	70
5.3. <i>CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES</i> .....	71
5.4. ANÁLISE DO IMPACTO DAS PENALIDADES FÍSICAS .....	74
5.4.1. RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A REDE NSFNET.....	74
5.4.2. RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A REDE GEANT2 .....	78
5.4.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS REDES NSFNET E GEANT2.....	80
5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
6. CONCLUSÃO.....	82
6.1. CONSIDERAÇÕES DA TESE .....	82
6.2. CONTRIBUIÇÕES E COMPROVAÇÃO DA HIPÓTESE .....	83
6.3. DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	84

6.4. DESDOBRAMENTO E TRABALHOS FUTUROS .....	85
6.5. ARTIGO COMPLETO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO EM PERIÓDICO.....	85
6.6. PATICIPAÇÃO EM PROJETO DE PESQUISA.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Restrições lineares e não lineares .....	33
Figura 3.2 – Atenuação das fibras ópticas e suas causas.....	34
Figura 3.3 – Dispersão sofrida por um pulso à saída da fibra .....	36
Figura 3.4 – Sistemas WDM com compensação de dispersão .....	44
Figura 3.4 – Rede WDM para exemplificar as contribuições de enlaces sem a presença de canais de bombeio .....	49
Figura 4.1 – Fluxograma geral da metodologia proposta.....	53
Figura 4.2 – Processo de coloração de grafo: (a) Matriz de demanda e (b) Grafo colorido. ....	55
Figura 4.3 – Passos básicos de um algoritmo genético. ....	57
Figura 4.4 – Fluxograma do algoritmo genético proposto .....	58
Figura 4.5 – Cromossomo representando uma grade com 6 comprimentos de onda.....	59
Figura 4.6 – Representação da população inicial .....	60
Figura 4.7 – Algoritmo do método de seleção por roleta .....	61
Figura 4.8 – Exemplo da operação de cruzamento .....	62
Figura 4.9 – Exemplo da operação de mutação.....	63
Figura 5.1 – Módulos da Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas desenvolvidas no LabTel/UFES.....	67
Figura 5.2 – Arquitetura Atual da Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas.....	68
Figura 5.3 – Tela inicial do Front-End.....	69
Figura 5.4 – Melhores soluções em termos de ativação dos canais ópticos, para atender 30 requisições de conexão através de uma grade com 10 comprimentos de onda.....	70
Figura 5.5 – Topologia da Rede NSFNET .....	71
Figura 5.6 – Topologia da Rede GEANT2.....	72
Figura 5.7 – Configuração do enlace de fibra óptica .....	73
Figura 5.8 – Probabilidade de bloqueio em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede NSFNET para o cenário S1 .....	75
Figura 5.9 – Probabilidade de bloqueio em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede NSFNET para o cenário S2.....	75
Figura 5.10 – Comprimentos de onda em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, a topologia de rede NSFNET para os cenários S1 e S2.....	76

Figura 5.11 – Probabilidade de bloqueio em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede GEANT2 para o cenário S1 ..... 78

Figura 5.12 – Probabilidade de bloqueio em função do número de requisições de conexão para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede GEANT2 para o cenário S2 ..... 79

Figura 5.13 – Comprimento de onda em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede GEANT2 para os cenários S1 e S2 ..... 79

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 5.1 – Descrição das Redes NSFNET e GEANT2.....	62
Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados nas simulações .....	74
Tabela 5.3 – Redução da probabilidade de bloqueio entre os algoritmos.....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACO	<i>Ant Colonã Optimization</i>
AFFwSS	<i>Adaptive wavelength assignment using wavelength spectrum separation</i>
AG	<i>Algoritmo Genético</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DDO	Dimensionamento dos Dispositivos Ópticos
DGD	<i>Diferencial Group Velocity</i>
DWRONs	<i>Distributed Wavelength-Routed Optical Networks</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
FAWA	<i>FWM-aware</i>
FF	<i>First-Fit</i>
FFwO	<i>First-Fit with wavelength ordering</i>
FFwSS	<i>First-Fit using wavelength spectrum separation</i>
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i>
IA	<i>Inteligência Artificial</i>
IA-RWA	<i>Impairment Aware RWA</i>
IM	<i>Intensity Modulation</i>
IM-DD	<i>Intensity Modulation - Direct Detection</i>
IM-IM	<i>Intensity Modulation to Intensity Modulation</i>
IM-PM	<i>Intensity Modulation to Phase Modulation</i>
iWA	<i>Intelligent Wavelength Assignment</i>
LAPS	Laboratório de Processamento de Sinais
LEA	Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado
LPRAD	Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho
MU	Most-Used
NP-Completo	<i>Nondeterministic Polynomial Time</i>
OEO	<i>Optical-to-Electrical-to-Optical</i>
OSNR	<i>Optical Signal-to-Noise Ratio</i>
OTN	<i>Optical Transport Network</i>

OXC	<i>Optical Cross-Connect</i>
PABR	<i>Physically Aware Backward Reservation protocol</i>
PAR	<i>Physically Aware Routing algorithm</i>
PLI	<i>Physical Layer Impairment</i>
PM	<i>Phase Modulation</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PM-IM	<i>Phase Modulation to Intensity Modulation</i>
PM-PM	<i>Phase Modulation to Phase Modulation</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PTD	<i>Physical Topology Design</i>
QFF	<i>Quality - aware Fit-Fit wavelength assignment algorithm</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>
R	<i>Routing</i>
RA	<i>Regenerator Assignment</i>
ROADMs	<i>Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SBS	<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
SRS	<i>Stimulated Raman Scattering</i>
TON	<i>Transparent Optical Networks</i>
WA	<i>Wavelength Assignment</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WRON	<i>Wavelength-Routed Optical Network</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>

## RESUMO

O sistema WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é considerado como uma tecnologia madura para ser usada no *backbone* de redes ópticas. Entretanto, encontrar uma solução ótima para o algoritmo de atribuição de comprimento de onda no projeto e operação destas redes, ainda é uma questão em aberto. A pesquisa realizada nesta tese aborda os principais aspectos relacionados ao processo de atribuição de comprimento de onda em sistemas WDM, e como resultado foi proposta uma metodologia que minimiza a degradação do sinal óptico gerada pela modulação de fase cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*). Esta proposta é composta por uma metodologia híbrida baseada em Coloração de Grafo e Algoritmo Genético (AG), sendo que o primeiro tem a função de reduzir o número de comprimentos de onda necessários para atender a matriz de tráfego (que é fornecida *a priori*) e o último tem a função de encontrar a ordem de ativação de canais na grade de comprimentos de onda, com o objetivo de reduzir o efeito XPM. A proposta foi comparada com o algoritmo *First-Fit* em diferentes cenários e topologias de redes, e demonstrou uma considerável redução na probabilidade de bloqueio.

**Palavras-chave:** Algoritmos de Atribuição de Comprimento de Onda, Computação Evolucionária, Modulação de Fase Cruzada, Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda, Redes Ópticas Translúcidas, Restrições de Camada Física.

## ABSTRACT

*The system based on Wavelength Division Multiplex (WDM) has been considered as a mature technology to be used in the backbone of optical networks. However, finding an optical solution for Routing and Wavelength Assignment (RWA) algorithm in the design and operation of the networks remains an open issue. The research conducted in this thesis, addresses the main issues regarding the process of Wavelength Assignment (RWA) in WDM systems, and as result a methodology that minimizes the degradation of the optical signal generated by Cross-Phase Modulation (XPM), has been proposed. This proposal consists of a hybrid methodology based on Graph-Coloring and Genetic Algorithm (GA), where the first has the function of reducing the number of necessary wavelengths to meet the traffic matrix (known a priori), and the latter will find the channels activation order on the wavelengths grid with the aim of reducing the XPM effect. This proposal was compared with the First-Fit algorithm in different scenarios and network topologies, and has shown a significant reduction in blocking probability.*

***Keywords: Cross-Phase Modulation, Evolutionary Computation, Physical Layer Impairments, Routing and Wavelength Assignment Algorithms, Translucent Optical Networks, Wavelength Division Multiplex.***

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Um enorme crescimento do volume de tráfego da Internet tem sido observado nos últimos anos, principalmente devido ao aumento de usuários, juntamente com uma implantação massiva de redes de acesso de banda larga e o desenvolvimento de novas aplicações para Internet que demandam grande largura de banda. Com os avanços das aplicações web disponíveis para usuários comerciais e residenciais, tais como os serviços eletrônicos e multimídia, bem como as emergentes redes sociais, espera-se que esta tendência de crescimento do tráfego continue no futuro. Além disso, o baixo preço dos serviços móveis, que vem tornando possível o acesso a aplicativos on-line em qualquer lugar e a qualquer momento, também impulsiona o incremento da demanda atual [1].

Entre as diferentes tecnologias de redes de telecomunicações, as redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) podem ser consideradas como a principal tecnologia de rede de transporte capaz de suportar o crescimento acelerado da demanda por banda larga. Estas redes podem ser classificadas como opacas ou como transparentes, dependendo se o sinal propagante é convertido ou não do domínio óptico para o elétrico e vice-versa. Em redes ópticas opacas, o sinal óptico é eletricamente regenerado em cada nó da rede, eliminando qualquer penalidade que possa tê-lo degradado no decorrer da transmissão.

Em redes ópticas transparentes (TON – *Transparent Optical Networks*), o sinal permanece no domínio óptico desde o nó origem até o nó destino, ou seja, não é convertido para o domínio elétrico. A ausência de regeneradores neste tipo de rede pode fazer com que o acúmulo de penalidades geradas na camada óptica, degrade a comunicação a um ponto em que a qualidade do sinal recebido seja inaceitável.

Em [2] foi proposta uma terceira forma de se implementar redes ópticas, denominada de Redes Ópticas Translúcidas. A proposta é de combinar as vantagens das redes opacas e transparentes reduzindo as desvantagens de ambas. As redes ópticas translúcidas consistem

em uma rede TON acrescida de certa quantidade de regeneradores 3R<sup>1</sup>, os quais são estrategicamente posicionados. Desta forma pode-se ter um aumento de desempenho na rede, tendo em vista que se consegue uma qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) satisfatória para os sinais que trafegam na rede. A regeneração do sinal óptico será realizada toda vez que a sua QoT cair abaixo de um limiar aceitável pré-definido.

Por mais que as redes translúcidas possuam alguns pontos de regeneração do sinal, ainda é necessário analisar a degradação sofrida pelo sinal ao longo do caminho de transmissão, devido às limitações da camada física. Estas limitações podem ser classificadas em lineares e não lineares: as lineares afetam individualmente cada canal e não dependem da potência do sinal; já as não lineares não somente impactam em cada canal individualmente, mas também interferem nos canais que partilham a mesma fibra óptica e/ou componente. O efeito não linear é crucial para taxas acima de 10 Gbit/s [1].

O aumento de desempenho das redes translúcidas em comparação com as TON, fizeram com que elas fossem largamente utilizadas atualmente, principalmente para implementação de redes de grande porte (tipicamente redes com áreas de cobertura da ordem de centenas a milhares de quilômetros quadrados). Porém, um dos desafios fundamentais no projeto e operação destas redes é encontrar a solução ótima para o problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*)

Embora os métodos da programação inteira mista assegurem que pode ser encontrada a solução ótima para o problema RWA, isto pode não ser apropriado, pelo fato de ser um problema computacionalmente bastante complexo para ser solucionado de forma exata em um tempo aceitável. Por outro lado, do ponto de vista prático, existe a necessidade de se visualizar diversas soluções que podem estar próximas da solução ótima, mas que traduzem restrições subjetivas do problema. Portanto, a ênfase atual para o tratamento do problema de RWA consiste menos na exatidão da solução e mais na flexibilidade de se encontrar e analisar soluções sub-ótimas que podem ser obtidas em um tempo computacional aceitável, proporcionando um auxílio efetivamente inteligente ao processo de tomada de decisão dos operadores de redes de transporte [3].

Neste sentido, a alternativa interessante é a utilização algoritmos metaheurísticos. Estes algoritmos podem lidar de forma relativamente rápida com o problema, mesmo aqueles

---

<sup>1</sup> Regenerador capaz de realizar os processos dereamplificação, reformatação e reajuste temporal do pulso.

que são formulados de forma mais complexa, e ao mesmo tempo, suas soluções tendem a ser bem melhores do que as geradas pelas heurísticas conhecidas. Estas técnicas utilizam buscas aleatórias no espaço de soluções do problema e podem ser aplicadas para vários tipos de problemas diferentes. Muitos destes algoritmos metaheurísticos são inspirados em processos de otimização realizados na natureza por sistemas vivos. Por isso, também são chamados de algoritmos bio-inspirados, como exemplo tem-se: AG (Algoritmo Genético), PSO (*Particle Swarm Optimization*), ACO (*Ant Colony Optimization*), redes neurais, entre outros [4].

Os algoritmos metaheurísticos realizam otimização de forma iterativa avaliando diversas soluções candidatas para um determinado problema. Dependendo da avaliação feita, um conjunto de heurísticas são aplicadas às soluções avaliadas para que estas sejam alteradas na interação seguinte do processo. Ou seja, o algoritmo metaheurístico só precisa ter uma forma objetiva (numérica ou analítica) para avaliar se uma solução é boa ou ruim [5].

As aplicações de computação inteligente e algoritmos bio-inspirados para se otimizar redes de comunicação vêm ganhando força nos últimos anos. As publicações especializadas em redes vêm reservando edições especiais, completamente dedicadas ao tema [6], [7].

Sendo assim, esta pesquisa aborda os principais aspectos relacionados ao processo RWA considerando as restrições impostas pela camada física em redes ópticas WDM, sendo proposta uma metodologia para resolver o problema RWA que visa a minimização do efeito de modulação de fase cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*) entre sinais propagantes. A proposta é composta por uma metodologia híbrida baseada em Coloração de Grafo e Algoritmo Genético, podendo ser aplicada em redes estáticas onde a topologia física e a matriz de tráfego são conhecidas *a priori*.

## 1.2. TRABALHOS CORRELATOS

Os trabalhos destacados nesta seção sintetizam o atual “estado-da-arte” da linha de pesquisa desta tese e servirão como base para o seu desenvolvimento.

Em se tratando da XPM, diversos trabalhos apresentam modelos analíticos que calculam seus efeitos. Em [8], é apresentado um modelo generalizado de degradação da XPM em enlaces de fibra constituído por vários segmentos de fibra com características diferentes e amplificadores ópticos. Também é demonstrado que o total de modulação de intensidade

induzida por XPM é menor em sistemas que empregam compensação de dispersão distribuída do que em sistemas que empregam compensação de dispersão concentrada no final do enlace.

Em [9], é apresentada uma abordagem para minimizar os tempos de configuração a partir de um paradigma de provisionamento on-line através da utilização de bandas de guarda, isto é, deixando comprimentos de onda não utilizados entre os caminhos ópticos estabelecidos, a fim de reduzir o efeito da XPM. Em [10], um modelo que inclui a estimativa estatística da XPM é usado no lugar do modelo analítico. Este modelo acelera o tempo de cálculo da variância normalizada induzida pelo efeito XPM, porém obtém um erro de até 6%. Embora o modelo analítico ofereça maior tempo de computação que o modelo de estimativa estatística, em certas situações onde o tempo não é um fator crucial, como no caso do projeto de redes, é preferível utilizar o modelo analítico, pelo fato de ser mais preciso.

Em relação aos algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda, diversos trabalhos utilizam algum modelo matemático para representar as deficiências da camada física. Esses algoritmos são conhecidos como *Impairment Aware RWA* (IA-RWA). Em [11], os autores propõem um arcabouço capaz de tratar as questões de QoS e engenharia de tráfego para TON. Para isto foram desenvolvidos novos algoritmos que avaliam a influência do ruído ASE e alguns efeitos não lineares (XPM, FWM – *Four-Wave Mixing*, por exemplo) sobre caminhos ópticos. O arcabouço é composto de três partes: o PAR (*Physically Aware Routing Algorithm*), o PABR (*Physically Aware Backward Reservation protocol*) e o QFF (*Quality - aware Fit-Fit wavelength assignment algorithm*).

No PAR, as principais deficiências da camada físicas (ruído ASE, por exemplo) são consideradas para escolher os caminhos candidatos na fase de roteamento. O objetivo do PAR é distribuir o tráfego e evitar enlaces congestionados, garantindo apenas os caminhos que satisfaçam os requisitos de QoS. O PABR é uma extensão do *Backward Reservation Protocol* [12] que leva em conta as deficiências físicas. Este protocolo envia uma mensagem de verificação do nó origem ao nó destino, sendo que cada nó intermediário registra quais comprimentos de onda já foram utilizados. Além disso, ele verifica se o estabelecimento de um novo caminho óptico pode causar degradação do sinal a um nível inaceitável para os caminhos ópticos existentes.

Com base nas informações recebidas pela mensagem de verificação, o nó destino executa o algoritmo de QFF para estimar a qualidade do sinal dos possíveis caminhos ópticos

(mesmo caminho, mas diferentes comprimentos de onda) e construir um caminho óptico candidato usando o primeiro comprimento de onda livre com qualidade de sinal satisfatória. No caso de múltiplas mensagens de verificação, um conjunto de caminhos ópticos candidatos serão construídos para cada caminho verificado. No entanto, o estudo não realizou nenhuma análise sobre a forma de ativação dos canais na grade de comprimento de onda, fato que provavelmente minimizaria os efeitos não lineares.

Em [13], é apresentado um modelo analítico que estima a potência acumulada produzida pelo efeito FWM no fim de cada caminho óptico em uma WRON (*Wavelength-Routed Optical Network*), em seguida também são calculados a potência acumulada do ruído ASE e os valores de OSNR para cada caminho óptico. Os valores de OSNR e de potência acumulada produzida pelo efeito FWM para cada caminhos ópticos, estimados pelo modelo analítico, ajudarão na criação de caminhos ópticos em uma WRON, pois será possível prever se eles oferecerão um desempenho desejável. Caso não ofereça, uma nova configuração de caminho óptico pode ser explorada para atingir o desempenho desejado.

O foco deste trabalho é o projeto de topologia de caminho óptico, o qual é constituído em dois passos. No primeiro, é feita uma estimativa do comprimento médio do caminho óptico em termos do número de enlaces de fibra concatenados, que são atravessados pelo conjunto de caminhos ópticos. Posteriormente esta estimativa é utilizada como limiar de comprimento de caminho óptico para classificá-los como longos ou curtos.

Já no segundo passo são consideradas duas diferentes configurações de WRON baseadas nos seguintes algoritmos de atribuição de comprimento de onda (WA): (i) FWM-*unaware* e (ii) FWM-*aware*. No algoritmo de WA FWM-*unaware* são usadas algumas técnicas tradicionais, como *first-fit*, *random* etc. Já no FWM-*aware* (FAWA) foi usada uma nova forma de atribuição, na qual os comprimentos de onda a partir das extremidades da janela de transmissão da fibra são atribuídos para os caminhos ópticos longos, e os comprimentos de onda a partir do meio da janela de transmissão são atribuídos aos caminhos ópticos curtos. A estratégia proposta pelo algoritmo FAWA apresenta um desempenho superior aos algoritmos de WA que não consideram o efeito FWM. Sua desvantagem é não considerar outros efeitos não lineares que degradam o sinal óptico (XPM, por exemplo). Além dos trabalhos apresentados anteriormente, outros também apresentam diferentes propostas para tentar resolver o problema IA-RWA [14], [15].

Encontra-se também na literatura alguns trabalhos que utilizam técnicas bio-inspiradas para otimizar as soluções apresentadas pelos algoritmos de IA-RWA. Em [16] é apresentado um algoritmo de atribuição de comprimento de onda que considera alguns efeitos de camada física (FWM e dispersão residual), chamado *Intelligent Wavelength Assignment* (iWA). A ideia principal é determinar uma ordem de ativação dos comprimentos de onda, para então ser aplicado o algoritmo *first-fit*. Esta ordem de ativação busca reduzir o impacto dos efeitos de camada física.

O algoritmo proposto foi baseado nos conceitos de algoritmo evolucionário, e é composto de duas fases: a de treinamento e a operacional. Na fase de treinamento, o algoritmo tem a função de encontrar uma lista com a ordem de ativação dos comprimentos de onda, de forma que otimize o desempenho da rede; ou seja, uma lista que minimize a probabilidade de bloqueio. Já na fase operacional, o algoritmo *first-fit* usa a lista otimizada para atribuir dinamicamente os comprimentos de onda na rede.

O iWA utiliza um arquivo externo que é composto por uma população de indivíduos, onde cada indivíduo é uma potencial solução para o problema. Neste caso, cada indivíduo é uma possível lista com a ordem de ativação de comprimento de onda, sendo que cada comprimento de onda é rotulado com um número de 1 a  $W$  de acordo com a sua posição na grade de comprimento de onda.

Para cada indivíduo é atribuída uma função de aptidão, que é a probabilidade de bloqueio obtida a partir da simulação, portanto o indivíduo mais apto da lista é aquele que possui menor probabilidade de bloqueio. Desta forma, o arquivo externo armazena as melhores soluções obtidas pelo algoritmo evolutivo durante o processo de otimização. O iWA também apresenta como desvantagem o fato de não considerar outros efeitos não lineares como o XPM.

Em [17] foram propostos dois algoritmos genéticos para resolver o problema IA-RWA, os quais contabilizam o impacto das deficiências da camada física sobre o sinal óptico, utilizando um processo de otimização. O primeiro usa o comprimento da rota e o número de saltos, inseridos como entrada no vetor multiobjetivo, em um processo de otimização de forma conjunta. Desta forma será possível a escolha de rotas mais curtas e com menor número de saltos, sendo reduzidos então alguns efeitos da camada física, como: atenuação, ruído ASE, Dispersão do Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*), dispersão

cromática (CD – *Chromatic Dispersion*) e outros. Isto permite calcular uma solução ótima global, que é um conjunto de rotas disponíveis para atender as conexões requeridas.

O segundo é um algoritmo genético de objetivo único, que utiliza o fator-Q para avaliar a viabilidade das soluções de RWA. O fator-Q (estimado pelo simulador) é usado em cada iteração do algoritmo em um modo de autoaprendizagem, a fim de avaliar a aptidão de cada solução para o problema RWA e disparar a evolução da população. Tal abordagem exige um elevado esforço computacional, mas é útil para resolver o problema IA-RWA *offline*. Através de simulações foi verificado que o segundo algoritmo supera o primeiro, entretanto há um aumento significativo no tempo de execução. Vale ressaltar que neste trabalho não é levada em conta nenhuma deficiência não linear inerente na fibra óptica.

Além dos trabalhos apresentados acima, encontra-se ainda na literatura outros que também usam a metaheurística para tentar resolver o problema da atribuição de encaminhamento e de comprimento de onda [18]-[23]. Entretanto, ainda não estão muito bem definidas na literatura as soluções de IA-RWA que utilizem algoritmos bio-inspirados e considerem o efeito XPM durante o processo de avaliação e otimização das diversas soluções candidatas.

### *1.3. DEFINIÇÃO DE HIPÓTESE*

A hipótese desta tese é de que a metodologia híbrida proposta seja utilizada para fins de planejamento de rede óptica de transporte (OTN – *Optical Transport Network*), e possa auxiliar na tomada de decisão dos operadores destas redes, no que concerne à sequência de atribuição de comprimentos de onda em um determinado cenário de rede, objetivado a redução do efeito XPM.

### *1.4. OBJETIVOS*

#### *1.4.1. GERAL*

Desenvolver uma metodologia híbrida baseada em Coloração de Grafo e Algoritmo Genético para ser utilizada na fase de planejamento de redes ópticas de transporte, cujo o propósito é solucionar o problema de atribuição de comprimento de onda considerando penalidades impostas pelos efeitos da camada física na transmissão de sinais ópticos. Esta metodologia oferecerá embasamento aos operadores de redes TON's para a escolha da ordem de ativação dos canais na grade de comprimentos de onda, de forma que seja reduzido o efeito XPM.

### ***1.4.2. ESPECÍFICOS***

São objetivos específicos desta tese:

- Propor uma metodologia que resolva o problema de atribuição de comprimentos de onda em redes ópticas WDM, levando em conta o efeito XPM.
- Realizar simulações para encontrar o conjunto de variáveis de domínio, juntamente com seus valores, que mais influenciam o efeito XPM.
- Realizar testes de desempenho em diferentes topologias de redes e matrizes de tráfego.
- Aplicar um modelo analítico para estimar a variância normalizada induzida pelo efeito XPM.
- Aplicar um método metaheurístico para identificar a melhor configuração da grade de comprimentos de onda que minimize o efeito XPM.
- Demonstrar a validade da metodologia proposta a partir de estudos de caso.
- Avaliar os resultados alcançados, comparando-os com bibliografias de referência da área.

### ***1.5. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES***

Como principais contribuições desta tese, destacam-se:

- Concepção de uma estratégia inovadora para planejamento e avaliação de desempenho de redes ópticas, a partir de um processo de otimização baseado em métodos analíticos e metaheurísticos para apoio ao processo de tomada de decisão.
- Inclusão do modelo analítico que estima a variância normalizada induzida pelo efeito XPM na Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas, tornando-a capaz de ser utilizada em cenários onde os efeitos não lineares estão presentes.
- Desenvolvimento de um algoritmo genético capaz de encontrar a ordem de ativação na grade de comprimentos de onda que atenda a restrição de variância normalizada do efeito XPM, proporcionando a descoberta de cenários otimizados para fins de planejamento.

- Desenvolvimento do *Front-End* da Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas, propiciando a utilização de diferentes topologias de rede, assim como facilitando a configuração dos parâmetros da fibra óptica, a geração de demandas e a criação de portfólios de equipamentos;
- Realização de simulações em cenários próximos da situação real em termos de distância entre nós, para validação dos preceitos fundamentais da proposta.
- Auxiliar os operadores de redes ópticas de transporte para que possam planejar/antever o comportamento dos serviços que serão oferecidos sobre a infraestrutura de rede existente, evitando assim, possíveis gargalos nos mais variados cenários.
- Divulgação dos resultados a partir de publicações em periódicos e conferências internacionais.

#### 1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para um melhor entendimento dos temas aqui tratados, esta tese está organizada da seguinte forma: o primeiro capítulo apresenta uma breve introdução, expondo a contextualização do trabalho, alguns trabalhos correlatos, a definição da hipótese, os objetivos, suas principais contribuições e sua respectiva organização.

No segundo capítulo, são apresentados os principais elementos relacionados ao projeto de redes ópticas, destacando-se as principais abordagens heurísticas para resolver o problema de RWA. No terceiro capítulo, são ressaltadas as principais restrições da camada física que degradam o sinal óptico ao longo do caminho de transmissão, sendo feita uma abordagem especial sobre o efeito XPM, pelo fato de ser um dos principais objetos desta pesquisa.

O quarto capítulo apresenta a metodologia proposta neste trabalho, denotando a metodologia utilizada para resolver o problema de atribuição de comprimento de onda. No quinto capítulo apresenta-se a ferramenta de planejamento utilizada, assim como os estudos de caso usados para validar esta pesquisa, juntamente com os resultados numéricos obtidos.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, bem como são relacionados possíveis trabalhos futuros.

## **2. PROJETO DE REDES ÓPTICAS**

### *2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS*

Neste capítulo serão tratados os principais tópicos relacionados ao projeto de redes ópticas, abordando-se especialmente os principais aspectos do algoritmo de roteamento e atribuição de comprimento de onda. Espera-se criar um arcabouço de conhecimento para contextualizar os principais pontos que serão apresentados na sequência deste documento.

### *2.2. CONCEITOS GERAIS*

Foi visto no capítulo anterior que as redes ópticas compõem uma importante tecnologia para implementar redes de telecomunicações capazes de atender as demandas atuais da nossa sociedade. Tendo por base essa premissa, a engenharia agora tenta responder a pergunta de como seria a melhor forma de implementar tais redes, cujo objetivo quase sempre é otimizar a relação custo-desempenho envolvida na implementação (diminuir os custos e aumentar o desempenho). Em relação ao desempenho, vários parâmetros podem ser utilizados como alvo, sendo o mais comum se medir o número de comunicações efetivas que uma rede pode estabelecer com sucesso [5].

Para um determinado problema de projeto de redes podem existir soluções de baixo custo e baixo desempenho, assim como soluções de alto custo e alto desempenho, além de uma gama de soluções entre estes dois extremos que resultam em um parâmetro custo-desempenho otimizado. Todas estas soluções são igualmente otimizadas e portanto são igualmente boas, ou seja, em geral, uma não pode ser dita melhor que a outra. Desta forma, a maneira mais geral de fazer o projeto de uma rede de forma mais flexível possível é buscar não somente uma solução única para o problema, mas um conjunto de soluções que otimizem o parâmetro custo-desempenho [5].

Segundo [5], os elementos que influenciam de forma mais preponderante o custo e o desempenho da rede óptica são: o dimensionamento das características dos dispositivos

ópticos empregados na rede (DDO – Dimensionamento dos Dispositivos Ópticos); o projeto da topologia física da rede (PTD – *Physical Topology Design*); o algoritmo utilizado para se fazer o roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*); o algoritmo utilizado para a colocação de regeneradores (RP – *Regenerator Placement*) e o algoritmo de utilização destes regeneradores (RA – *Regenerator Assignment*). Em seguida, será descrito de forma resumida cada um destes elementos listando suas principais características.

**Dimensionamento dos Dispositivos Ópticos (DDO)** – a soma dos custos dos dispositivos ópticos a serem empregados em uma rede óptica, tais como: fontes e receptores ópticos, fibras ópticas, regeneradores, ROADM, OXC, EDFA e outros, constituem um número preponderante na composição do custo da rede. Além disso, seus parâmetros determinam como o sinal óptico será degradado pelas penalidades da camada óptica (PLI – *Physical Layer Impairments*).

**Projeto de Topologia Física (PTD)** – decide como os nós da rede óptica devem ser conectados, ou seja, quais enlaces devem ser instalados na rede. Quanto maior o número de enlaces a serem instalados, maior é o custo da rede, e possivelmente melhor também é seu desempenho. O PTD é conhecido por ser um problema de tempo polinomial não determinístico (NP-Completo) [24].

**Colocação de regeneradores (RP)** – esta é uma decisão apenas aplicável às redes translúcidas, pois consiste em decidir quais nós da rede terão regeneradores 3R e quantos destes elementos devem ser colocados em cada nó. O algoritmo de RP tem impacto no custo e no desempenho da rede, e também é um problema NP-Completo [25].

**Atribuição de regeneradores (RA)** – uma vez que se resolveu o RP os regeneradores estão disponíveis para uso em determinados nós da rede. A decisão de como usar esse recurso cabe ao algoritmo de RA, sendo assim, um caminho óptico pode seguir da origem até o destino totalmente no domínio óptico ou ser regenerado em algum nó da rede.

**Roteamento e atribuição de comprimentos de onda (RWA)** – o algoritmo de RWA tem como objetivo selecionar uma rota e um comprimento de onda, através dos nós de uma rede óptica, com o intuito de estabelecer um caminho de comunicação entre dois nós da rede. Uma rota e um comprimento de onda ligando um dado nó fonte e um dado nó destino é conhecido na literatura por caminho óptico [26]. O algoritmo de RWA tem forte impacto no

desempenho da rede, mas tem pouco impacto no seu custo, pois mudar o RWA de uma rede consiste, em geral, em uma mudança apenas de software. O algoritmo de RWA é conhecido por ser um problema NP-completo [27], [28].

Como o objetivo principal deste trabalho é propor uma estratégia de projeto de atribuição de comprimento de onda com restrição na camada física, então a partir deste ponto serão tratados somente os aspectos relacionados a RWA, por ser um elemento que possui alta influência no desempenho de redes ópticas.

### 2.3. O PROBLEMA DE ROTEAMENTO E ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

O problema de RWA possui uma alta complexidade computacional, especialmente quando este algoritmo é capaz de executar os processos de roteamento e alocação de comprimentos de onda em conjunto, denominado JWR (*Joint Wavelength-Route*). Por este motivo, em grande parte das propostas encontradas na literatura o RWA é dividido em dois subproblemas: (i) roteamento (R), e (ii) atribuição de comprimento de onda (WA).

Dependendo do objetivo, o problema RWA pode ser resolvido de forma off-line (caso estático) para um conjunto de caminhos ópticos que são conhecidos previamente, ou on-line (caso dinâmico) na chegada de cada pedido de caminho óptico. O caso estático é referido como o projeto da rede e baseia-se nas previsões de tráfego. Em outras palavras, dada uma certa topologia física, um objetivo comum da estratégia de RWA no cenário estático é minimizar os recursos de rede necessários para suportar uma matriz de tráfego, por exemplo, o número de comprimentos de onda utilizados, ou o número de fibras atravessadas pelos caminhos ópticos [1].

Por outro lado, o problema RWA resolvido durante a operação de rede (caso dinâmico) é referido como provisionamento de rede. Neste caso, os pedidos de caminho óptico que chegam à rede seguem um processo estocástico e são configurados no momento da chegada (uma vez que há recursos disponíveis suficientes) e liberado após o tempo de conexão assegurado. Ao contrário do caso estático, um dos objetivos mais comuns de uma estratégia de RWA no cenário dinâmico é minimizar a probabilidade de bloqueio de conexões, definida como a relação entre o número de caminhos ópticos provisionados sobre o número total de pedidos de ligação que chegam à rede durante certo período de tempo [1].

Em ambos os casos, estático ou dinâmico, a restrição de comprimento de onda deve ser considerada no momento de sua atribuição. Ou seja, caminhos ópticos compartilhando o mesmo enlace de fibra devem ser atribuídos em diferentes comprimentos de onda. Além disso, se a rede não possui capacidade de conversão de comprimento de onda, a restrição de continuidade de comprimento de onda tem que ser satisfeita também, isto é, no caminho óptico inteiro deve ser atribuído o mesmo comprimento de onda em cada segmento de fibra que conecta os nós de origem e destino.

#### *2.4. ABORDAGENS HEURÍSTICAS PARA RESOLVER O SUBPROBLEMA DE ROTEAMENTO*

Normalmente o problema de roteamento é resolvido da seguinte maneira: 1) representa-se a topologia da rede por um grafo, 2) calcula-se o custo de cada enlace (aresta do grafo) utilizando-se alguma métrica (custo) pré-estabelecida e, 3) utiliza-se um algoritmo que encontra a rota de menor custo total entre os nós que desejam realizar uma conexão [27], [29]. Com relação às métricas para se calcular o custo relativo a cada enlace, diversas medidas podem ser usadas e várias delas já foram propostas na literatura [30]-[32]. A forma com que o custo do enlace é calculado e os parâmetros que são levados em conta durante este cálculo, dá origem a três classificações para os algoritmos de roteamento: roteamento com rota fixa, roteamento com rota fixa alternativa e roteamento adaptativo [27].

##### *2.4.1. ROTEAMENTO COM ROTA FIXA (FR)*

A forma mais simples de rotear uma conexão é sempre escolher a mesma rota para um dado par de nós fonte-destino. Neste caso, o custo relativo a cada enlace independe do estado atual da rede, ou seja, é fixo. Este depende de algum parâmetro pertinente ao dado enlace (tamanho físico do enlace, por exemplo). Por isso, a rota para cada par fonte-destino é escolhida antes da rede entrar em operação num processo off-line que monta uma tabela fixa de roteamento. Uma vez escolhido o custo do enlace, o algoritmo de *Dijkstra* [33] ou de *Bellman-Ford* [34], [35] pode ser usado para a determinação desta tabela. Em tempo de operação, cada vez que uma conexão é requisitada, a rede consulta a tabela de roteamento e determina a rota que deve ser usada para atender a requisição [27], [36], [37].

#### **2.4.2. ROTEAMENTO COM ROTA FIXA ALTERNATIVA (FAR)**

Este é um esquema de roteamento que considera múltiplas rotas fixas para cada par fonte destino. No roteamento fixo-alternativo, cada nó da rede mantém uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada de várias possíveis rotas para cada nó de destino [27], [37]. Por exemplo, estas rotas poderiam incluir a rota mais curta, a segunda rota mais curta, a terceira rota mais curta, e assim por diante [27].

O conjunto das possíveis rotas ligando um par fonte-destino também é calculado antes da operação da rede. Uma rota alternativa entre origem e destino é qualquer rota que não compartilhe nenhum enlace com a rota primária (rotas disjuntas) [27]. Quando um pedido de conexão chega, o nó fonte tenta estabelecer a conexão com a rota mais curta presente em sua tabela de roteamento, e caso não seja possível, as demais rotas serão verificadas em sequência, até que uma rota disponível seja encontrada.

O roteamento fixo alternativo provê simplicidade de controle para admissão e retirada de chamadas e também alguma tolerância à falha em enlaces, pois rotas alternativas (rotas disjuntas) são utilizadas nas tabelas de roteamento. Outra vantagem do roteamento fixo alternativo é que ele pode reduzir significativamente a probabilidade de bloqueio de chamadas quando comparado com o esquema de roteamento fixo, pelo fato de existirem várias opções de rotas possíveis para uma determinada requisição [27].

#### **2.4.3. ROTEAMENTO ADAPTATIVO (AR)**

No esquema de roteamento adaptativo, a rota escolhida para atender uma requisição de conexão entre um par fonte-destino é determinada dinamicamente, dependendo do estado atual da rede [27], [37], que é determinado pelo conjunto de todas as conexões em progresso no momento. Quando um pedido de conexão chega à rede, o caminho de menor custo entre o nó fonte e o nó destino é determinado, e para cada nova chamada, um novo caminho é encontrado. Um possível custo adaptativo para um enlace seria o seu número de canais ativos, de forma que um algoritmo que utilizasse esta métrica encontraria rotas passando por enlaces pouco carregados, distribuindo assim, a carga na rede [5].

Uma dificuldade na implementação de roteamentos adaptativos é o fato de requerer extenso apoio dos protocolos de gerência e controle, para continuamente ser atualizado com o estado atual da rede. Uma vantagem do esquema adaptativo é a capacidade de fornecer uma

baixa probabilidade de bloqueio de chamadas quando comparado ao roteamento fixo e ao roteamento fixo alternativo, além de ser altamente resistente a falhas nos enlaces [5].

## 2.5. ABORDAGENS HEURÍSTICAS PARA RESOLVER O SUBPROBLEMA DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

Cada enlace de uma rede óptica WDM possui diversos comprimentos de onda, cada um podendo transportar uma informação diferente. Sendo assim, além de encontrar uma rota, é preciso também definir qual comprimento de onda será utilizado para se estabelecer a chamada. O algoritmo responsável pela escolha do comprimento de onda é chamado de algoritmo de atribuição de comprimento de onda (WA). Diversos algoritmos de WA foram propostos na literatura, dentre eles os mais simples e mais utilizados são: *Random*, *First-Fit* (FF), *Most-Used* (MU) e *Least-Used* (LU) [27], [37].

### 2.5.1. ATRIBUIÇÃO RANDOM

Neste algoritmo primeiro procura-se o conjunto de todos os comprimentos de onda que estão disponíveis para a rota encontrada, i.e., os comprimentos de onda que não estão ativos no momento. Em seguida, um deles é escolhido aleatoriamente seguindo uma distribuição de probabilidade uniforme. A vantagem deste esquema é que ele não requer nenhuma informação global sobre o estado atual da rede.

### 2.5.2. ATRIBUIÇÃO FIRST-FIT (FF)

Neste esquema todos os comprimentos de onda são numerados e dispostos numa lista. Ao ser requisitado um comprimento de onda o algoritmo fornece o primeiro da lista, e se este não puder ser usado, então será tentado o segundo comprimento de onda da lista, e assim sucessivamente, até que seja encontrado um disponível. Este esquema também não requer informação global sobre o estado atual da rede.

Na maioria dos casos o desempenho do FF supera o desempenho do esquema de atribuição aleatória [27]. A ideia do *first-fit* é empacotar todos os comprimentos de onda em uso na rede nos menores índices da lista, de forma que os comprimentos de onda com maiores índices fiquem livres para um possível estabelecimento de rotas mais longas [5].

### **2.5.3. ATRIBUIÇÃO MOST-USED (MU)**

A ideia do MU é tentar compactar o uso dos comprimentos de onda de forma ainda mais rigorosa que a feita pelo *first-fit*. Entretanto, devido o MU sempre tentar atribuir o comprimento de onda mais usado, ele consegue uma compactação melhor que o FF. Por isso, em geral, o MU é ligeiramente superior ao FF em termos de desempenho, porém o MU tem a necessidade de informação global da rede para saber qual o comprimento de onda mais utilizado [5].

### **2.5.4. ATRIBUIÇÃO LEAST-USED (LU)**

Ao contrário do *Most-Used*, este algoritmo seleciona o comprimento de onda menos utilizado na rede. Em geral ele tem desempenho superior aos algoritmos *Random* e *First-Fit*, porém inferior ao MU. Este algoritmo também tem a necessidade de informação global da rede para saber qual o comprimento de onda menos utilizado, introduzindo sobrecarga de comunicação.

## **2.6. ALGORITMO RWA COM RESTRIÇÃO DE CAMADA FÍSICA**

Os algoritmos de RWA apresentados neste capítulo não levam em conta as penalidades geradas na camada física, portanto podem ser considerados inadequados para serem usados em redes ópticas transparentes ou translúcidas. Para superar esse problema, foram desenvolvidos os algoritmos IA-RWA, cujo objetivo é encontrar uma rota e um comprimento de onda para o estabelecimento de uma conexão óptica levando em consideração as degradações da camada física [38]. Para tal, os algoritmos IA-RWA devem incorporar os vários efeitos da camada física da rede que degradam o sinal óptico, isso pode ser feito associando-se a cada efeito uma determinada função-custo. Idealmente, estes algoritmos devem se preocupar em encontrar caminhos ópticos nos quais os sinais ópticos sejam menos degradados pela camada física.

Como existem muitos tipos de penalidades geradas na camada física, a decisão de quais delas devem ser levadas em conta no processo de IA-RWA pode variar consideravelmente dependendo de aspectos como: detalhes de projeto de equipamento de cada fornecedor, características da fibra óptica utilizada, características de serviço (por exemplo, taxa de transmissão requerida), tamanho e topologia da rede, engenharia do operador de rede e estratégias aplicada [5].

Toda essa pesquisa em torno do desenvolvimento de IA-RWA leva a algoritmos cada vez mais elaborados e com desempenho de rede muito superior aos conseguidos pelas abordagens clássicas [5]. Estes tipos de algoritmos geralmente possuem elevada complexidade computacional, pois em geral usam complexos modelos analíticos para estimar as penalidades sofridas pelo sinal propagante devido as diversas restrições de camada física (especialmente quando se trata de efeitos não lineares). Mesmo assim, a utilização de IA-RWA se justifica pelo ganho de performance na rede.

## *2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS*

Neste capítulo foram apresentados os principais elementos relacionados ao projeto de redes ópticas, destacando-se o projeto de RWA e suas diversas abordagens heurísticas para resolver o subproblema de roteamento e o subproblema de atribuição de comprimento de onda, além do algoritmo IA-RWA que tem demonstrado ser a melhor opção para redução das penalidades sofridas pelo sinal óptico. No próximo capítulo serão abordadas as principais restrições impostas pela camada física em uma rede óptica.

### 3. RESTRIÇÕES DA CAMADA FÍSICA EM REDES ÓPTICAS WDM

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sinais ópticos que se propagam, através de enlaces de fibra óptica, encontram muitas restrições que afetam o nível de intensidade do sinal, bem como as suas propriedades temporais, espectrais e de polarização. Portanto, neste capítulo serão abordadas as restrições da camada física mostradas na figura 3.1, as quais podem ser consideradas como as principais fontes de degradação do sinal óptico. Uma abordagem especial será dada a modulação de fase cruzada, por ser considerado o efeito não linear dominante no cenário de rede utilizado nesta tese (enlaces ópticos com fibras monomodo padrão) [8].

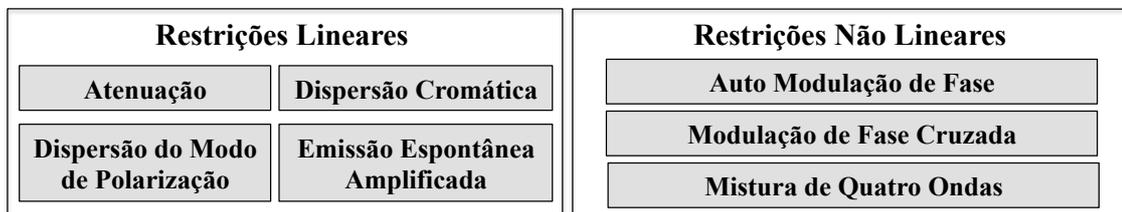


Figura 3.1 – Restrições lineares e não lineares

#### 3.2. RESTRIÇÕES LINEARES

Como visto anteriormente, os efeitos lineares são aqueles em que a degradação causada por um elemento óptico não depende da potência dos sinais transportados e podem ser avaliados de forma independente para os diferentes canais ópticos. A tendência é que esses efeitos sejam cada vez menores devido a processos mais elaborados na produção de cabos de fibra óptica e o surgimento de novos materiais. Porém, atualmente a degradação do sinal causada por estes efeitos ainda são significativos para grandes distâncias.

### 3.2.1. ATENUAÇÃO

Um sistema de comunicação em fibra óptica está sujeito aos efeitos da atenuação do sinal, que aumenta a medida que o sinal se propaga pela fibra, possuindo uma variação de acordo com o comprimento de onda utilizado, conforme é mostrado na figura 3.2. O sinal é acoplado na fibra com uma determinada potência e ao percorrer a distância total do enlace, o sinal de saída terá uma amplitude menor do que o sinal originalmente transmitido [39].

Como consequência, o efeito da atenuação limita o comprimento total de um enlace óptico de longa distância. A atenuação tem diferentes componentes e pode ser causada pela absorção material da fibra de sílica, pelas imperfeições na forma cilíndrica da própria fibra (como por exemplo pequenas variações do raio do núcleo), e pelo espalhamento *Rayleigh* que é fortemente dependente do comprimento de onda e ocorre devido à variação na densidade do material (ou do índice de refração) que compõe a fibra [39].

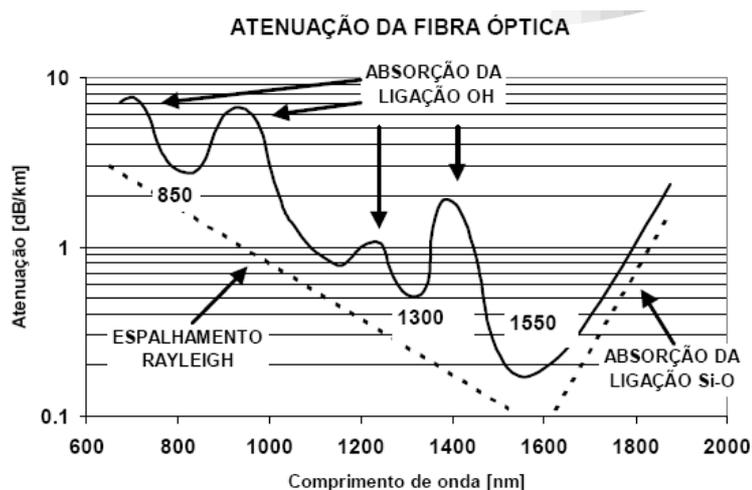


Figura 3.2 – Atenuação das fibras ópticas e suas causas [26]

O fenômeno conhecido como absorção material pode ser considerado de natureza intrínseca ou extrínseca. No caso de absorção material intrínseca, parte do sinal óptico que se propaga na fibra é absorvida pelo material que compõe a fibra de sílica, normalmente utilizada em fibras ópticas empregadas em telecomunicações. Enquanto a absorção denominada como material extrínseca é causada pelas impurezas que são remanescentes do processo de fabricação [39].

O coeficiente de atenuação é a soma da contribuição da absorção material, do espalhamento *Rayleigh* e das imperfeições no núcleo da fibra, é dado em unidades de [dB/km]

e definido como a perda total do sinal para cada quilômetro propagado. Pode ser definido por [40]:

$$\alpha = \frac{-10}{L} \log \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (3.1)$$

Onde:  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação;  $L$  a distância do enlace;  $P_{out}$  a potência na saída do enlace e  $P_{in}$  a potência na entrada do enlace.

### 3.2.2. EMISSÃO ESPONTÂNEA AMPLIFICADA

Enlaces com fibras ópticas monomodo possuem atenuação em torno de 0,2 dB/km com largura de banda de vários THz. Entretanto, após longas distâncias de propagação, a atenuação na fibra reduz a potência do sinal abaixo do limiar detectável pelos receptores ópticos, tornando necessária a amplificação óptica. Esta amplificação evita o processo de conversão óptica-elétrica-óptica (OEO – *Optical-to-Electrical-to-Optical*) que vem se tornando cada vez mais complexo e caro com o aumento da taxa de transmissão.

A amplificação óptica usual é feita através de amplificadores com fibra dopada com érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*) [41], [42], espaçados em torno de 80 a 100 km, em sistemas terrestres de longa distância, e de 40 a 60 km, em sistemas submarinos.

A amplificação óptica distribuída, que fornece ganho ao longo da própria fibra de transmissão (amplificação Raman distribuída) tem despertado renovado interesse [43].

Os amplificadores ópticos introduzem o ruído denominado emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*). O efeito do ruído ASE é adicionar flutuações ao sinal amplificado, as quais são convertidas em flutuações de corrente durante a foto-detecção. A densidade espectral de potência do ruído ASE é relativamente constante (ruído branco) [44], [45], entretanto, as propriedades estatísticas da ASE podem ser modificadas pelas interações não-lineares durante a propagação da fibra.

Em sistemas amplificados, o ruído é amplificado junto com o sinal e degrada a relação sinal-ruído óptica (OSNR – *Optical Signal-to-Noise Ratio*). Embora outros dispositivos adicionem ruído ao sistema, o ruído proveniente do amplificador óptico é considerado a principal fonte de degradação da OSNR [45]. Em sistemas WDM com vários estágios de amplificadores cascateados, o ruído ASE torna-se um sério problema, já que a OSNR

degrada-se ao longo do enlace, devido aos efeitos cumulativos da figura de ruído de cada estágio do amplificador [45].

### 3.2.3. DISPERSÃO CROMÁTICA

A dispersão cromática expressa a dependência da velocidade de grupo de um pulso, propagando-se por uma fibra, em relação à frequência óptica, fazendo com que componentes espectrais diferentes viajem a velocidades diferentes. Após determinada distância de propagação, as diferentes componentes espectrais estarão atrasadas entre si e o pulso sofrerá um alargamento temporal, como mostrado na figura 3.3, dessa forma limitando a taxa de dados máxima pela qual a informação pode ser transmitida em uma fibra óptica [40]. O efeito da dispersão aumenta linearmente com a distância de transmissão e inversamente com o quadrado da taxa de bits [46]. A dispersão cromática tem dois principais fatores contribuintes: o material da fibra e a geometria do guia de onda [40].

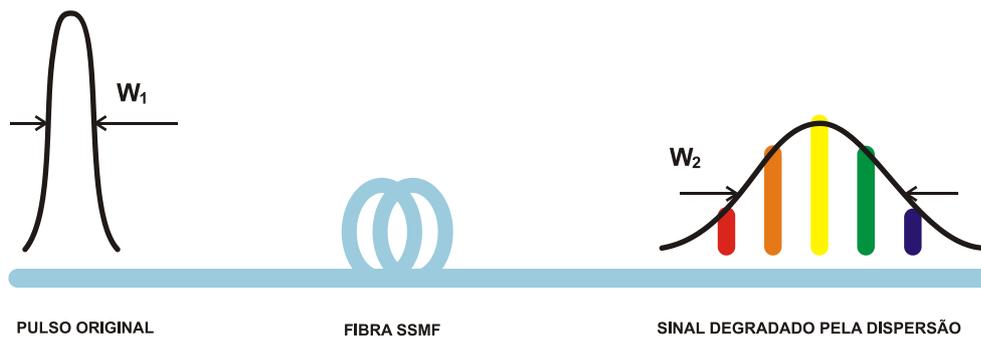


Figura 3.3 – Dispersão sofrida por um pulso à saída da fibra

A equação que representa um campo óptico  $E(z,t)$  propagando-se ao longo de uma fibra dispersiva na direção  $z$  é dada por [47]:

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2(z)\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{1}{6}\beta_3(z)\frac{\partial^3 E}{\partial t^3} + \frac{\alpha(z)}{2}E = 0 \quad (3.2)$$

Onde  $\alpha(z)$  representa o coeficiente de atenuação da fibra (ou ganho, se amplificação distribuída é usada). O parâmetro  $\beta_2(z)$  é denominado dispersão de velocidade de grupo (GVD – *Group Velocity Dispersion*) e representa a mudança na velocidade de grupo com a frequência angular  $\omega$ . A GVD é obtida através da constante de propagação  $\beta(\omega)$  através da relação  $\beta_2 \equiv [d^2\beta / d\omega^2]_{\omega=\omega_0}$ , onde  $\omega_0$  é frequência angular de referência para a qual a GVD está sendo analisada. O coeficiente  $\beta_3(z)$  representa a variação da GVD com a frequência

angular ( $\beta_3 \equiv [d\beta_2 / d\omega]_{\omega=\omega_0} \equiv [d^3\beta / d\omega^3]_{\omega=\omega_0}$ ), e é referido como parâmetro de dispersão cromática de terceira ordem.

Na comunidade científica costuma-se utilizar com mais frequência o parâmetro de dispersão  $D$ , dado em unidades de ps/km.nm, ao invés da GVD. O valor típico de  $D$  pode ser definido por [48]:

$$D = \frac{d}{d\lambda} \cdot \frac{1}{v_g} = \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{d\beta}{d\omega} \right) \approx -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (3.3)$$

Onde:  $D$  é o coeficiente de dispersão cromática;  $\lambda$  o comprimento de onda do sinal transmitido;  $v_g$  a velocidade de grupo;  $\beta$  a constante de propagação;  $c$  a velocidade da luz no vácuo e  $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ .

### 3.2.4. DISPERSÃO DO MODO DE POLARIZAÇÃO

A fibra óptica não é um guia de onda perfeitamente cilíndrico, podendo ser melhor descrita como um cilindro imperfeito. As variações na geometria cilíndrica advêm de diversos fatores, tais como imperfeições resultantes do processo de fabricação, stress imposto pelas vibrações mecânicas durante o cabeamento, o manuseio, as emendas ou as variações de temperatura [45], [49].

A assimetria da fibra introduz pequenas diferenças de índice de refração para os dois estados de polarização, fazendo com que a luz trafegue em diferentes velocidades nas polarizações vertical e horizontal, dando origem à velocidade diferencial de grupo (DGD – *Differential Group Velocity*), que se manifesta por um alargamento dispersivo do pulso. Segundo [40], [44], PMD é o alargamento do pulso decorrente do atraso de fase entre os dois modos de polarização ortogonais de uma fibra monomodo.

Se a DGD é constante sobre o comprimento de onda, refere-se a ela como PMD de primeira ordem. No caso da DGD variar com o comprimento de onda usa-se o termo PMD de mais alta ordem [49]. Um meio útil de se caracterizar a PMD para longos comprimentos de fibra é em termos do valor médio da DGD. Este pode ser calculado pela relação [40]:

$$\langle DGD \rangle \approx D_{PMD} \sqrt{L} \quad (3.4)$$

Onde:  $D_{PMD}$  é o parâmetro médio da PMD, medido em ps/(km)<sup>0,5</sup>. Os valores típicos de  $D_{PMD}$  de fibras já instaladas estão na faixa de 0,1 a 1,0 ps/(km)<sup>0,5</sup> [40].

### 3.3. RESTRIÇÕES NÃO LINEARES

Como visto anteriormente, os efeitos não lineares desempenham um papel de importante relevância na propagação de sinais em fibra óptica, e tornam-se mais significativos com o aumento do comprimento da fibra e/ou da potência do laser [50]. Para [51] as importantes restrições não lineares podem ser resumidas em Auto Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), Modulação de Fase Cruzada (XPM) e Mistura de Quatro Ondas (FWM). Os demais efeitos não lineares como Espalhamento Raman Estimulado (SRS – *Stimulated Raman Scattering*) e Espalhamento Brillouin Estimulado (SBS – *Stimulated Brillouin Scattering*) não serão abordados neste trabalho, mas podem ser vistos em [47].

#### 3.3.1. MISTURA DE QUATRO ONDAS

Quando o meio não linear está submetido a elevados níveis de potência e, se duas ou mais frequências distintas se propagam neste meio, há troca de energia entre as ondas incidentes, de maneira a ocorrer perda de energia das ondas para o meio, com a formação de novas componentes de frequências, caso haja casamento de fase entre elas. Este fenômeno é conhecido como mistura de quatro ondas [47].

A FWM é a interação não linear entre três frequências ópticas ( $f_i, f_j$  e  $f_k$ ) dando origem a uma quarta frequência ( $f_{ijk}$ ) onde:

$$f_{ijk} = f_i \pm f_j \pm f_k \quad (3.5)$$

Se a frequência  $f_{ijk}$  for igual ou próxima à frequência de um canal WDM tal que o ruído interferente resultante caia dentro da largura de banda do receptor, haverá penalidades na transmissão [52].

Esse efeito não depende somente do número de sinais propagantes, mas também do casamento de fase entre os sinais, da potência de cada sinal, do espaçamento em frequência, do coeficiente de dispersão e do comprimento de onda com valor de dispersão igual a zero. Cada potência produzida pelo efeito de FWM pode ser determinada utilizando-se a seguinte expressão proposta em [53]:

$$P_{FWM}(\lambda) = P_{ijk}(\lambda) = \frac{\eta}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha d} \left[ \frac{(1 - e^{-\alpha d})^2}{\alpha^2} \right] \quad (3.6)$$

Onde:  $\eta$  representa a eficiência do efeito de FWM,  $D$  o fator de degenerescência, que pode ser igual a 3 (caso degenerado) ou 6 (não degenerado),  $\gamma$  o coeficiente não linear,  $P_i$ ,  $P_j$  e  $P_k$  as potências de entrada para os sinais nas frequências  $f_i$ ,  $f_j$  e  $f_k$ , respectivamente,  $\alpha$  o coeficiente de atenuação e  $d$  o comprimento da fibra óptica.

Considerando as potências produzidas pelo efeito de FWM em um determinado comprimento de onda, tem-se [54]:

$$N_{FWM} = \sum_{j=1}^m P_{FWMj} \quad (3.7)$$

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

As penalidades geradas pela FWM contribuem para reduzir a qualidade da transmissão óptica, seja por perda de potência ou por inclusão de ruído. A combinação desses efeitos causa a redução da relação sinal-ruído (SNR) e afeta diretamente a taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*), devido à baixa qualidade do sinal óptico [55].

### 3.3.2. AUTO MODULAÇÃO DE FASE

É um efeito que provoca a mudança da fase óptica de um determinado sinal devido a sua própria intensidade, sendo extremamente dependente do índice de refração da fibra e da intensidade do sinal. O índice de refração da sílica é fracamente dependente da intensidade do sinal, de tal forma que é dado por [48]:

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_e} \quad (3.8)$$

Onde:  $n_0$  é o índice de refração linear;  $n_2$  índice de refração não-linear;  $P$  a potência do sinal;  $A_e$  a área efetiva da fibra.

O  $n_2$ , para fibras de sílica, é tipicamente igual a  $2,6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ . A contribuição do índice de refração resulta numa mudança de fase para um feixe de luz propagante na fibra de [48]:

$$\phi_{NL} = \gamma P L_e, \text{ onde } \gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_e} \text{ e } L_e = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (3.9)$$

Em que  $\gamma$  é o coeficiente não linear da fibra;  $L_e$  é o comprimento efetivo da fibra;  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal;  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação;  $L$  é o comprimento real da fibra.

Nota-se que para um alto valor de potência do sinal o índice de refração da sílica aumenta, levando-se, assim, a uma baixa velocidade de grupo. A mudança de fase se torna significativa quando a potência multiplicada pelo comprimento efetivo do sistema atinge  $1 \text{ W-km}$  [48].

Se as perdas da fibra são compensadas periodicamente usando amplificadores ópticos, a  $\phi_{NL}$  deve ser multiplicada pelo número de amplificadores, porque a fase induzida por SPM se acumula sobre eles.

A SPM é um fenômeno onde a fase de um sinal óptico submete-se a uma variação não linear no tempo e na distância, e ocorre quando um sinal modulado em intensidade percorre uma fibra óptica. A SPM induz uma mudança de fase no sinal propagante, o qual depende da intensidade do campo e aumenta com a distância de propagação. Isso acarreta num alargamento espectral do sinal óptico propagante na fibra. Esse alargamento espectral ocorre como resultado da dependência temporal da fase do sinal, e geralmente depende do formato do pulso. Devido ao índice de refração não linear, o pico do pulso se propaga mais lentamente que as extremidades laterais. Isso resulta em um comprimento de onda sendo esticado na extremidade dianteira e comprimido na extremidade traseira [48].

Esse alargamento pode resultar em penalidades devido à largura de banda do filtro ou distorção do pulso resultante da dispersão cromática. Em regime de dispersão normal, onde a dispersão cromática é negativa, correspondente ao decréscimo do atraso de grupo com o comprimento de onda, a extremidade dianteira do pulso se propaga mais rápido e se move para longe do centro do pulso. A extremidade traseira se propaga mais devagar e também se move para fora do centro do pulso. Então, o pulso é alargado pela combinação de efeitos não lineares e dispersão [48].

Em regime de dispersão anômala, correspondente ao aumento do atraso de grupo com o comprimento de onda e dispersão cromática positiva, a extremidade dianteira se propaga mais devagar e se move em direção ao centro do pulso. Similarmente, a extremidade traseira do pulso se propaga mais rápido e também se move em direção ao centro do pulso. Logo, o pulso se estreita. Esse estreitamento do pulso em regime de dispersão anômala sugere que a SPM pode ser usada para compensar a dispersão [48].

O efeito não linear da SPM pode ser usado para várias aplicações. A combinação dele com a dispersão de velocidade de grupo (GVD) pode, por exemplo, gerar “sólitons” e chaveamento óptico, o qual pode conduzir a uma compressão do pulso [56].

### 3.3.3. MODULAÇÃO DE FASE CRUZADA

Em sistemas WDM, as flutuações de potência de um sinal óptico propagando-se em uma fibra óptica podem modular a fase de outro sinal co-propagante através da Modulação de Fase Cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*) [47]. A modulação de Fase Cruzada é outra forma de variações de intensidade afetarem a fase do sinal. Nesse caso, a responsabilidade das flutuações de intensidade surge da modulação dos outros canais presentes no sistema WDM. A XPM é uma limitação mais severa que a SPM em sistemas WDM, porque o efeito é duas vezes maior para cada canal interferente e existem muitos outros canais para gerar essa interferência. Nesses sistemas, a mudança de fase não linear para um canal específico depende não só de sua potência, como também das potências dos outros canais. Logo, a mudança de fase não linear para um canal  $i$  é [40]:

$$\phi_j^{NL} = \gamma L_e \left( P_i + 2 \sum_{m \neq i} P_m \right) \quad (3.10)$$

Onde a somatória se estende sobre o número de canais presentes. O primeiro termo do lado direito da equação se refere à SPM, enquanto que o segundo termo se refere à XPM.

A dispersão cromática desempenha um papel muito significativo no impacto da XPM no sistema. Como no caso da SPM, não há impacto no espalhamento espectral introduzido pela XPM se não existir dispersão cromática para transformar esse espalhamento espectral em espalhamento de pulso. Contudo, já que a XPM é uma interação entre canais distintos, a presença de dispersão cromática também significa que pulsos em canais interferentes não permanecerão sobrepostos, em geral, aos pulsos no canal de interesse [48].

É difícil estimar o impacto da XPM no desempenho de sistemas WDM. A razão é que as discussões apresentadas até agora têm, implicitamente, assumido que a XPM atua isoladamente sem efeitos dispersivos e válidos somente para feixes de luz CW. A mudança de fase induzida por XPM só pode ocorrer quando dois pulsos se sobrepõem no tempo. Para canais extremamente espaçados eles se sobrepõem por um tempo muito curto de tal forma que o efeito da XPM é negligenciado. Por outro lado, pulsos em canais vizinhos irão se sobrepor o suficiente para acumular os efeitos da XPM [56].

Em sistemas WDM com Modulação de Intensidade e com Detecção Direta (IM-DD), a XPM pode limitar a distância e a capacidade, porque a dispersão por velocidade de grupo (GVD) converte a Modulação de Fase (PM) induzida por XPM em Modulação em Intensidade (IM). Na verdade, a GVD pode levar a dois efeitos opostos na IM induzida por XPM. Por um lado, ela pode reduzir a influência da XPM devido ao efeito de *walkoff*, dependendo da frequência de modulação e do espaçamento entre canais. Por outro lado, para frequências de modulação moderadas a influência da conversão de PM-IM aumenta com GVD e com o quadrado da frequência de modulação [57]. Mais ainda, conversões PM-PM, IM-IM e IM-PM podem resultar da interação SPM e XPM [58].

### 3.4. MODELAGEM DO EFEITO XPM ATRAVÉS DA TÉCNICA PUMP-PROBE

A técnica de *Pump-Probe* (bombeio-sonda) é utilizada no estudo da modulação em intensidade (IM) e de fase (PM) induzida por XPM. Esta técnica consiste na análise das modulações em intensidade e fase presentes à saída do sistema de transmissão do canal que está sendo analisado, i.e., o canal sonda, causadas por um ou mais canais interferentes, i.e., os canais de bombeio. O canal sonda deverá ser uma portadora não modulada à entrada do sistema de transmissão, e os canais de bombeio correspondem às portadoras moduladas. As modulações de fase induzidas pela XPM no canal sonda são convertidas em modulações em intensidade pela GVD e SPM [56].

Os modelos analíticos para a caracterização da IM induzida por XPM em sistemas com múltiplos enlaces com compensação de dispersão são apresentados em [8], [57], [58]. O modelo simplificado de pequenos sinais aqui utilizado leva em consideração o efeito de GVD e SPM, e está descrito em [59].

Para garantia da qualidade do sinal à saída da fibra, com relação à XPM, é necessário estipular uma referência. O parâmetro adotado como valor de referência em [58] foi a variância normalizada da IM induzida por XPM definida como:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{\bar{P}_i^2} \sum_{k=1}^M \int_{-\infty}^{+\infty} S_{p,k}(f) \cdot |H_{XPM,P,k}(f)|^2 \cdot |H_r(f)|^2 \cdot df \quad (3.11)$$

Onde:  $\bar{P}_i$  é a potência média do canal sonda;  $M$  o número de canais interferentes;  $S_{p,k}(f)$  a Densidade Espectral de Potência (PSD – *Power Spectral Density*) do  $k$ -ésimo canal de bombeio à entrada da fibra;  $H_{XPM,P,k}(f)$  a função de transferência do modelo linear equivalente associado ao  $k$ -ésimo canal de bombeio; e  $H_r(f)$  a função de transferência do filtro elétrico do receptor do canal interferido, representado por um filtro de Bessel.

A variância normalizada está relacionada com a penalidade de potência ( $P_p$ ), e de acordo com [58] o fator  $Q$  é uma figura de mérito importante para analisar a  $P_p$  induzida por XPM em sistemas com Modulação de Intensidade e com Detecção Direta. O fator  $Q$  é dado por [58]:

$$Q = \frac{2k \cdot \bar{P} \cdot (r - 1)/(r + 1)}{\sqrt{\frac{2k_{sp} \cdot r \cdot \bar{P}}{r + 1} + \left(\frac{2k \cdot r \cdot \bar{P}}{r + 1}\right)^2 \cdot \sigma_n^2} + \sqrt{\frac{2k_{sp} \cdot \bar{P}}{r + 1}}} \quad (3.12)$$

Onde:  $k$  e  $k_{sp}$  são constantes que dependem do tipo de receptor e  $r$  a razão de extinção, que é a relação entre as potências ópticas correspondentes aos símbolos “1” e “0” ( $r = P_1/P_0$ ).

Portanto, a penalidade de potência pode ser expressa em decibéis, de acordo com a Eq. (3.13) [58]:

$$P_p = -20 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{\sqrt{r}}{\sqrt{r-1}} \cdot \sqrt{1 - \frac{r}{r-1} \sigma_n^2 \cdot Q^2} - \frac{1}{\sqrt{r-1}} \right\} \quad (3.13)$$

A Eq. (3.13) quantifica a degradação induzida por XPM como função de  $Q$ ,  $r$  e  $\sigma_n^2$ . E o valor de referência da variância normalizada adotado foi  $\sigma_{n,max}^2 = 2,6 \times 10^{-3}$ , o que dá uma penalidade de potência de 1 dB para o caso de  $r = 10$  dB e  $Q = 7$ , correspondendo a uma BER de  $10^{-12}$ . A variância mostra a dispersão estatística de uma variável, nesse caso a penalidade de potência induzida por XPM, indicando o quão longe os seus valores se encontram do valor esperado [56].

Utilizando modelo analítico para a caracterização do efeito XPM em sistemas com múltiplos enlaces, apresentado nesta seção e, desenvolvido em [58], é possível calcular a degradação que o sinal transmitido sofre ao percorrer o caminho óptico, considerando os efeitos de XPM-GVD-SPM sobre o canal sonda. Este modelo leva em consideração que todos os enlaces pertencentes ao sistema WDM são compostos por um ou mais trechos ópticos, como mostrado na Figura 3.4. Sendo que cada trecho óptico é composto por um segmento de fibra monomodo padrão (*Single-Mode Fiber – SMF*) mais um segmento de fibra compensadora de dispersão (*Dispersion-Compensating Fiber – DCF*), além de possuírem um amplificador óptico na saída de cada segmento.

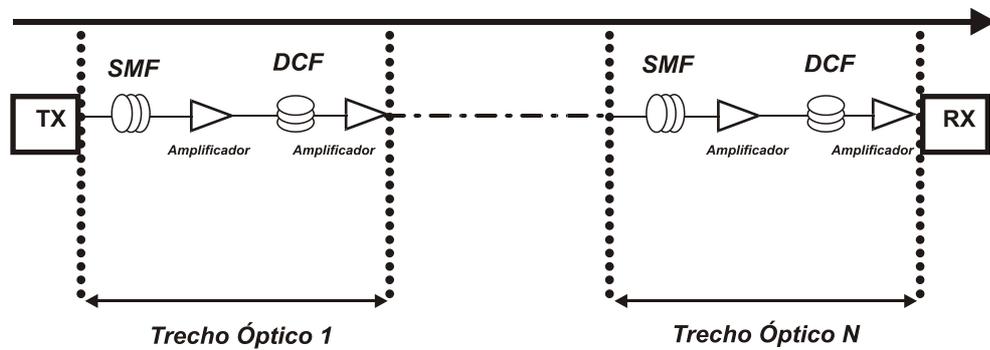


Figura 3.4 – Sistema WDM com compensação de dispersão

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 [56]:

$$H_{i,k,s}(\omega) = \left[ H_{i,k}^{(s)}(\omega) \cdot C_{eq}^{(s)}(\omega) \cdot C_{XPM}^{(s)}(\omega) \cdot C_{k,eq}^{(s)}(\omega) \right]_{(1,1)} \quad (3.14)$$

Onde: o sobrescrito <sup>(s)</sup> representa um trecho óptico s, o subscrito <sub>(1)</sub> representa o primeiro elemento do vetor resultante que possui duas posições, já o subscrito <sub>(1,1)</sub> representa o primeiro elemento da matriz.  $H_{i,k}^{(s)}(\omega)$  é o produto dos atrasos relativos entre o canal bomba k e o canal sonda i,  $C_{eq}^{(s)}(\omega)$  é a matriz que converte a fase e a intensidade induzida por XPM (devido ao canal de bombeio) em fase e intensidade no canal sonda,  $C_{XPM}^{(s)}(\omega)$  é um vetor coluna contendo as funções de transferência para intensidade e fase, e  $C_{k,eq}^{(s)}(\omega)$  é a matriz que

converte a fase e a intensidade do canal de bombeio (devido à SPM e GVD) ao longo do caminho óptico.

O produto dos atrasos relativos é dado por [56]:

$$H_{ik}^{(s)}(\omega) = \prod_{i=s}^N h_{ik}^{(l)}(\omega) \quad (3.15)$$

Onde  $h_{ik}^{(l)}(\omega)$  é o atraso relativo entre o canal bomba  $k$  e o canal sonda  $i$ , no enlace  $l$ , dado por [56]:

$$h_{ik}^{(l)}(\omega) = \exp \left[ -j\omega \left( d_{ik}^{(l)} L^l + d_{ik}^{c(l)} L^{c(l)} \right) \right] \quad (3.16)$$

Onde:  $L^{(l)}$  e  $L^{c(l)}$  são os comprimentos dos segmentos de fibra SMF 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 SMF 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:

$$C_{eq}^{(s)}(\omega) = \begin{cases} \left( \prod_{l=s+1}^N [C^{c(l)}(\omega) \cdot C^{SMF(l)}(\omega)] \right) \cdot C^{c(s)}(\omega) & s < N \\ C^{c(N)}(\omega) & s = N \end{cases} \quad (3.17)$$

Onde:  $C^{SMF(l)}(\omega)$  é a matriz de conversão devido à transmissão do segmento SMF 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 SMF é obtido através da soma da contribuição devido à dispersão de velocidade de grupo com a contribuição devido à automodelação de fase [58], dado por:

$$C^{SMF(s)}(\omega) = C_{GVD}^{SMF(s)} + C_{SPM}^{SMF(s)} \quad (3.18)$$

Onde a contribuição devido à dispersão de velocidade de grupo é dada por:

$$C_{GVD}^{SMF(s)} = \begin{bmatrix} \cos(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) & -2\bar{P}_{i,1}(0) \cdot \text{sen}(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) \\ \frac{1}{2\bar{P}_{i,1}(0)} \cdot \text{sen}(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) & \cos(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

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

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

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{4b^{(s)}\gamma^{(s)}\bar{P}_{i,1}^2(0)}{((\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2)^2} \left\{ \text{sen}(2\theta^{(s)} - b^{(s)}L^{(s)}) - e^{-\alpha^{(s)}L^{(s)}} \left[ \sqrt{\alpha^2 + b^2}L^{(s)} \text{sen}(\theta^{(s)}) + \text{sen}(2\theta^{(s)}) \right] \right\} \\ \frac{2b^{(s)}\gamma^{(s)}\bar{P}_{i,1}(0)}{((\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2)^2} \left\{ \cos(2\theta^{(s)} - b^{(s)}L^{(s)}) - e^{-\alpha^{(s)}L^{(s)}} \left[ \sqrt{\alpha^2 + b^2}L^{(s)} \cos(\theta^{(s)}) + \cos(2\theta^{(s)}) \right] \right\} \end{array} \right] \quad (3.20)$$

Nas equações 3.19 e 3.20,  $b = \omega^2 \lambda_i^2 D_i^{(s)} / (4 \cdot \pi \cdot c)$  e  $\theta = \arctan(b^{(s)} / \alpha^{(s)})$ , onde  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação da fibra,  $\gamma$  é o coeficiente de não-linearidade da SMF no comprimento de onda do canal 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, com valor aproximado.

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

$$C^{C(s)}(\omega) = \begin{bmatrix} \cos(b^{C(s)} \cdot L^{C(s)}) & -2\bar{P}_{i,1}(0) \cdot \text{sen}(b^{C(s)} \cdot L^{C(s)}) \\ \frac{1}{2\bar{P}_{i,1}(0)} \cdot \text{sen}(b^{C(s)} \cdot L^{C(s)}) & \cos(b^{C(s)} \cdot L^{C(s)}) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Onde os elementos (1x1), (1x2), (2x1) e (2x2), são os fatores de conversão IM-IM, PM-IM, IM-PM e PM-PM, respectivamente[58],[59].

No vetor  $C_{XPM}^{(s)}(\omega)$ , as funções de transferência para 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 as contribuições da GVD e SPM para a função de transferência da intensidade induzida por XPM no canal sonda são dadas por:

$$H_{XPM,P}^{GVD(s)}(\omega) = \frac{4\gamma^{(s)}\bar{P}_{i,1}(0)}{(\alpha_{ik}^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \left\{ \alpha_{ik}^{(s)} \cdot \text{sen}(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) + b^{(s)} \cdot \left[ e^{-\alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}} - \cos(b^{(s)} \cdot L^{(s)}) \right] \right\} \quad (3.22)$$

e

$$H_{XPM,P}^{SPM(s)}(\omega) = \frac{8 \cdot b^{(s)}}{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot (\gamma^{(s)})^2 \bar{P}_{i,1}^2(0) \cdot \left\{ \frac{1}{((c_{ik}^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2)} \left[ b^{(s)} \cdot \cos(b^{(s)}L^{(s)} - 2\theta^{(s)}) - c_{ik}^{(s)} \cdot \text{sen}(b^{(s)}L^{(s)} - 2\theta^{(s)}) - e^{-c_{ik}^{(s)}L^{(s)}} \cdot \left( b^{(s)} \cdot \cos(2\theta^{(s)}) + c_{ik}^{(s)} \cdot \text{sen}(2\theta^{(s)}) \right) \right] - e^{-\alpha^{(s)}L^{(s)}} \left[ \text{sen}(2\theta^{(s)}) \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}}}{\alpha_{ik}^{(s)}} - \sqrt{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \text{sen}(\theta^{(s)}) \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}} - \alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}}{(\alpha_{ik}^{(s)})^2} \right] \right\} \quad (3.23)$$

As contribuições associadas à GVD e SPM do enlace  $s$  para a função de transferência da modulação de fase do canal sonda, são dadas por:

$$H_{XPM,\phi}^{GVD(s)}(\omega) = -\frac{2\gamma^{(s)}}{(\alpha_{ik}^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \left\{ b^{(s)} \cdot \text{sen}(b^{(s)}L^{(s)}) - \alpha_{ik}^{(s)} \cdot \left[ e^{-\alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}} - \cos(b^{(s)}L^{(s)}) \right] \right\} \quad (3.24)$$

e

$$H_{XPM,\phi}^{SPM} = -\frac{4 \cdot b^{(s)}}{(\alpha_{ik}^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot (\gamma^{(s)})^2 \bar{P}_{i,1}(0) \cdot \left\{ \frac{1}{((c_{ik}^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2)} \cdot \left[ c_{ik}^{(s)} \cos(b^{(s)}L^{(s)} - 2\theta^{(s)}) + b^{(s)} \cdot \text{sen}(b^{(s)}L^{(s)} - 2\theta^{(s)}) - e^{-c_{ik}^{(s)}L^{(s)}} \cdot \left( c_{ik}^{(s)} \cdot \cos(2\theta^{(s)}) - b^{(s)} \cdot \text{sen}(2\theta^{(s)}) \right) \right] - e^{-\alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}} \left[ \cos(2\theta^{(s)}) \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}}}{\alpha_{ik}^{(s)}} - \sqrt{(\alpha^{(s)})^2 + (b^{(s)})^2} \cdot \cos(\theta^{(s)}) \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}} - \alpha_{ik}^{(s)}L^{(s)}}{(\alpha_{ik}^{(s)})^2} \right] \right\} \quad (3.25)$$

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

$$C_{k,eq}^{(s)}(\omega) = \prod_{l=1}^{s-1} \left[ C_k^{C(l)}(\omega) \cdot C_k^{SMF(l)}(\omega) \right] \quad (3.26)$$

De posse desse modelo analítico, pode-se estimar a degradação sofrida pelo sinal ao longo de um dado caminho óptico, assumindo-se que os canais de bombeio e sonda percorrem todo o caminho óptico, ou seja, ambos compartilham os mesmos enlaces. Isso é um agravante em se tratando de redes ópticas, pois pode acontecer de algumas conexões não partilharem

todo o caminho óptico ou até mesmo partilharem mais de um enlace da rota em análise que não sejam consecutivos [56].

Sendo assim, esse modelo foi adaptado em [56] para poder ser aplicado em redes ópticas. Na subseção seguinte serão apresentadas as alterações necessárias para que o modelo analítico possa calcular a XPM induzida à saída de um sinal ao longo de uma rede óptica e não apenas em enlaces compartilhados como mostrado anteriormente.

### **3.4.1. VARIÂNCIA NORMALIZADA POR ENLACE**

Para se conseguir separar as contribuições de cada enlace deve-se fazer algumas considerações. Pode acontecer de algumas seções do canal interferido  $i$  não gerar XPM devido à ausência de canais interferentes nessas seções. Contudo, esses enlaces influenciarão o valor da distorção de intensidade induzida por XPM caso haja seções compartilhadas anteriores a que está em análise. Isso ocorre porque o enlace em questão, que não é compartilhado, mas faz parte do caminho óptico do canal  $i$ , controla a magnitude da conversão de fase em intensidade (PM-IM). Por outro lado, se os primeiros enlaces da conexão do canal  $i$  não forem partilhados com outros canais, estes não influenciarão na distorção de intensidade induzida por XPM. Lembrando que no modelo bombeio-sonda, o canal sonda é considerado *continuous wave* (CW). Tais comportamentos são vistos na figura 3.5 [56].

Considere como canal sonda a conexão que utiliza o comprimento de onda  $\lambda_i$  e o canal de bombeio a conexão cujo comprimento de onda é  $\lambda_k$ . Logo, de acordo com o que foi descrito acima, o enlace que conecta os nós A e C não contribuirá em nada para as flutuações existentes ao fim da conexão. Já o enlace que conecta os nós E e G contribuirá para a distorção de intensidade induzida por XPM, já que no enlace anterior (nó C  $\rightarrow$  nó E) o canal sonda sofreu interferência do canal de bombeio [56].



receptor, neste caso é um filtro de Bessel de ordem 6 com frequência de corte a -3 dB de 65% da taxa de bits do canal interferido.

Para separar a contribuição de cada enlace é calculado um fator de correção (FC) que engloba os termos cruzados da Eq. (3.27) pegando-se duas seções por vez. Com isso, a contribuição de cada seção será proporcional ao peso que tem no caso de só existir um enlace partilhado. Assim, a variância normalizada da distorção de intensidade induzida no canal  $i$  por XPM devido ao canal  $k$  associada à seção  $s$  é [56]:

$$\sigma_{n,i,k,s}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{n,k}(f) |H_{i,k,s}(f)|^2 |H_r(f)|^2 df + FC_{n,i,k,s} \quad (3.29)$$

Sendo o fator de correção:

$$FC_{n,i,k,s} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{n,k}(f) \left[ \sum_{\substack{l=1 \\ (l \neq s)}}^S 2Re [H_{i,k,s}(f)H_{i,k,l}^*(f)] \frac{\hat{\sigma}_{n,i,k,s}^2}{\hat{\sigma}_{n,i,k,s}^2 + \hat{\sigma}_{n,i,k,l}^2} \right] |H_r(f)|^2 df \quad (3.30)$$

Logo, a variância normalizada total da distorção de intensidade induzida no canal  $i$  por XPM associada à seção  $s$  resulta da soma das contribuições de todos os canais interferentes como em:

$$\sigma_{n,i,s}^2 = \sum_{k=1}^{K_s} \sigma_{n,i,k,s}^2 \quad (3.31)$$

Em que  $K_s$  é o número de canais interferentes na seção  $s$ . Por fim, a variância normalizada total da conexão é calculada por:

$$\sigma_{n,i}^2 = \sum_{s=1}^S \sigma_{n,i,s}^2 \quad (3.32)$$

O objetivo do projeto de redes, que levam em consideração as limitações impostas por XPM, é garantir que todas as conexões da rede apresentem uma variância normalizada total da distorção de intensidade induzida por XPM que não exceda um dado valor máximo admitido ( $\sigma_{n,i}^2 < \sigma_{n,máximo}^2$ ) [56].

### 3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordadas as mais relevantes restrições lineares e não lineares impostas pela camada física em redes ópticas, foi tratado em especial o efeito XPM pelo fato de ser uma das principais fontes de degradação do sinal propagante. No que concerne ao efeito XPM, foi explorada a técnica *Pump-Probe* e utilizou-se a variância normalizada por enlace, tornando possível separar a contribuição de cada enlace que compõe uma rota. No próximo capítulo será abordada a metodologia para atribuição de comprimentos de onda em redes ópticas WDM proposta nesta tese.

## 4. METODOLOGIA HÍBRIDA PARA PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A disponibilidade de comprimento de onda é fortemente dependente do tipo de algoritmo de atribuição de comprimento de onda (WA) utilizado na comunicação entre nós de uma rede óptica [60]. Conforme apresentado anteriormente, os projetos de algoritmos de RWA, encontrados na literatura, apresentam diversas propostas de roteamento (R) que levam em consideração as penalidades da camada física, porém a maioria destas propostas utilizam o *first-fit* (FF) como algoritmo de WA.

Segundo [38], é de conhecimento geral que a probabilidade de bloqueio de comprimento de onda no algoritmo *Random* é maior que do algoritmo FF. No entanto, uma vez que o algoritmo *Random* tende a se espalhar geograficamente pela grade de comprimento de onda da rede, os efeitos de *crosstalk* podem ser reduzidos [60]. Já para [61], nas redes ópticas em anel o algoritmo FF apresenta baixo desempenho quando comparado a outros métodos de atribuição.

Outro ponto importante é o fato de que os algoritmos de WA tradicionais (*first-fit*, *random* e *most-used*, por exemplo) não consideram os efeitos indesejados gerados pela camada física da rede. Assim, existe uma grande probabilidade de serem estabelecidos alguns caminhos ópticos com baixa qualidade de transmissão, principalmente se for usado o *first-fit*.

Deste modo, é de fundamental importância a concepção de novas estratégias de atribuição de comprimento de onda, que levem em consideração as penalidades impostas pela camada física e proporcionem melhor qualidade na transmissão de sinais ópticos. Sendo assim, esta tese contempla o desenvolvimento de uma metodologia híbrida para resolver o problema de WA, que seja capaz de reduzir o efeito XPM e proporcione um desempenho superior aos algoritmos tradicionais.

## 4.2. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia híbrida proposta é composta por um Algoritmo de Coloração de Grafo (utilizado como técnica de pré-processamento), seguido por um Algoritmo Evolucionário (utilizado como técnica de otimização), sendo que o primeiro é usado para reduzir o número de comprimentos de onda (canais) necessários para atender a matriz de tráfego e o último tem a função de encontrar a ordem de ativação de canais na grade de comprimentos de onda, de forma que seja atendida a restrição de variância normalizada do efeito XPM.

Esta proposta será utilizada na fase de planejamento da rede óptica, porém deverá ser capaz de auxiliar na tomada de decisão dos operadores de redes ópticas de transporte, no que concerne à sequência de atribuição de comprimento de onda em um determinado cenário de rede óptica.

Esta metodologia é recomendada quando se tem o conhecimento *a priori* da topologia física da rede e de sua matriz de tráfego. Porém, ela deverá ser aplicada somente após as definições de rotas para cada demanda contida na matriz de tráfego da rede, podendo ser utilizado os algoritmos de roteamento fixo ou fixo-alternativo. A figura 4.1 mostra o fluxo de execução da metodologia proposta.

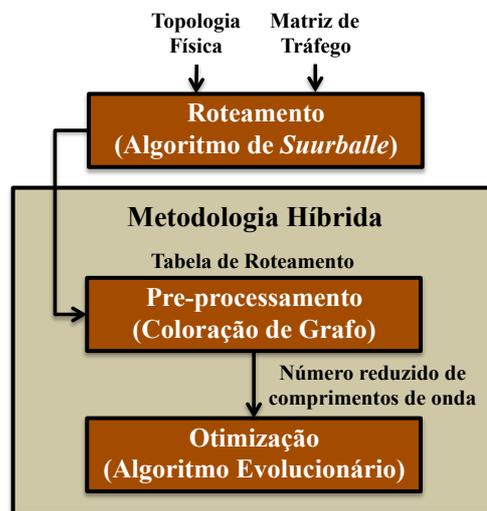


Figura 4.1 – Fluxograma Geral da Metodologia Proposta

É importante frisar que nas simulações realizadas nesta tese, utilizou-se uma grade com 40 comprimentos de ondas, sendo que o número de canais ativados variou de 3 a 8 canais, de acordo com a matriz de tráfego. Desta forma, o número de possibilidades de ativação de canais nesta grade é demasiadamente grande. Portanto, devido a escala combinatória, este

problema é classificado como um problema de otimização combinatória de complexidade computacional NP-Completo, sendo indicado o emprego de algoritmos metaheurísticos para a sua solução.

#### **4.2.1. ALGORITMO DE ROTEAMENTO**

Para a resolução do subproblema de roteamento, decidiu-se utilizar o algoritmo de *Suurballe* [62]. Este algoritmo se destina a encontrar caminhos arco-disjuntos (cuja soma das distâncias é mínima), com custo equivalente ao de duas rodadas do algoritmo de *Dijkstra*. Com este algoritmo, ainda é possível encontrar caminhos nó-disjuntos, sem modificar seu desempenho. Para isso, apenas é necessário introduzir nós e arestas auxiliares a um grafo  $G(N,V)$ , com  $N$  nós e  $V$  arestas. Esta modificação adiciona fatores lineares ao custo do algoritmo, mas não provoca alteração no seu custo assintótico [62].

Desta forma, este algoritmo de roteamento é capaz de prover a proteção de canais através de duas ou mais rotas distintas. Podendo estas rotas serem usadas simultaneamente, com o sinal sendo replicado em ambas e no final da transmissão, a rota que apresentar a melhor qualidade será selecionada; ou alternativamente, com uma delas sendo usada como canal de serviço e as outras como canal de proteção, esta última sendo ativada somente em caso de falha no canal de serviço. Em ambos é necessário que as rotas sejam mais disjuntas possíveis.

Porém, decidimos não utilizar rota de proteção, uma vez que o esquema de proteção tende a deixar mais canais acesos do que realmente seria necessário, e com isso, o efeito XPM possivelmente seria potencializado. Além de que, quanto maior o número de canais acesos na rede, maior será o custo de capital (*Capital Expenditure* – CapEx) e o custo operacional (*Operational Expenditure* – OpEx) e menor será a eficiência energética da proposta.

Outro aspecto que merece destaque, é o fato de que a escolha da rota com o menor caminho, possivelmente reduzirá alguns efeitos indesejáveis gerados na camada física, como por exemplo: atenuação, ruído ASE, dispersão cromática, PMD e outros. Isto acontece porque estes efeitos são diretamente proporcionais ao tamanho do enlace, e o algoritmo de *Suurballe* usa justamente a métrica distância física para avaliar o custo entre dois nós.

#### 4.2.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

Um ponto importante para minimizar os efeitos não lineares através do processo de WA é a redução do número de comprimentos de onda utilizados na rede, pois quanto menor for este número menor também será a interferência entre os canais ópticos. O algoritmo de Coloração de Grafo é uma forma eficiente de reduzir o número de comprimentos de onda. Portanto, este será o algoritmo empregado na fase de pré-processamento.

A Coloração de Grafo é um problema matemático convencional que consiste em colorir todos os nós (vértices) de um grafo, de modo que não haja dois nós adjacentes com a mesma cor [63]. Essa atribuição de cores particiona o conjunto de nós (vértices) do grafo em conjuntos independentes, cada um com uma cor distinta. Neste trabalho, cada cor definida pelo algoritmo irá representar um comprimento de onda distinto. O processo de coloração de grafo implementado é mostrado na figura 4.2.

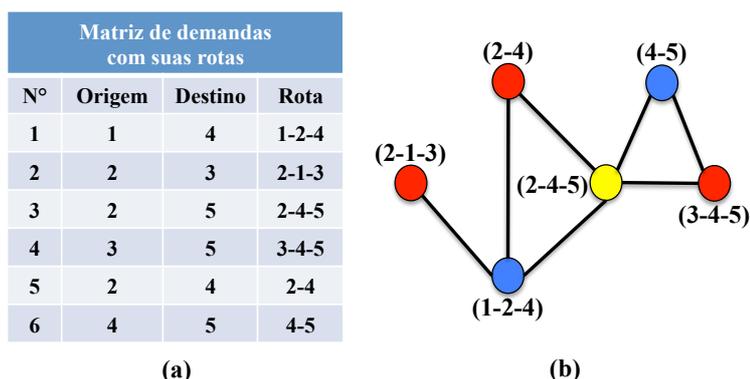


Figura 4.2 – Processo de coloração de grafo: (a) Matriz de demanda e (b) Grafo colorido.

Este processo começa logo após a definição da tabela de roteamento, mostrada na figura 4.2(a). Inicialmente o algoritmo de Coloração de Grafo cria um grafo  $G(V,E)$  em que cada vértice representa a rota criada para atender uma demanda, e cada aresta representa um enlace de fibra óptica compartilhada por duas rotas. Na etapa seguinte, serão coloridos todos os nós do grafo  $G(V,E)$ , usando cores distintas para nós adjacentes, conforme é mostrado na figura 4.2(b).

O número mínimo de cores necessário para colorir todos os nós do grafo  $G(V,E)$  designa-se por número cromático do grafo [64], e corresponde ao número mínimo de comprimentos de onda necessários para resolver o problema da atribuição de comprimentos de onda.

### **4.2.3. ALGORITMOS EVOLUCIONÁRIOS**

Os algoritmos evolucionários buscam reproduzir diferentes aspectos da inteligência humana (percepção, raciocínio, adaptação e aprendizado, por exemplo) em sistemas computacionais, isto pode ser obtido por intermédio de diferentes estratégias e metodologias. Esta é a área do conhecimento que lida com o projeto de algoritmos inspirados em fenômenos biológicos e que permitem através de inferências em seus modelos, antecipar possíveis problemas e/ou eventos, e com isso reduzir custos financeiros e computacionais, através de um processo de otimização. Este sistemas computacionais utilizam uma série de técnicas de Inteligência Artificial (IA), a saber:

- Algoritmos Genéticos;
- Redes Neurais;
- Redes Bayesianas;
- Enxame de Partícula.

Dentre as técnicas listadas, o Algoritmo Genético (AG) foi a escolhida para ser empregada no processo de otimização proposto, em virtude dos seguintes fatores:

- Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos, ou ainda com uma combinação dos mesmos;
- Realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- São também facilmente combinados com outras técnicas heurísticas.

As técnicas de AG resolvem problemas de otimização e de busca, onde os métodos tradicionais falham. As técnicas tradicionais, frequentemente, iniciam o processamento com um único candidato (indivíduo) manipulado, utilizando alguma heurística, na maioria das vezes estática, diretamente ligada ao problema a ser solucionado. No caso de AG, são realizadas operações em paralelo, sobre uma população de candidatos (vários indivíduos) e a busca é feita em diferentes áreas do espaço de solução, selecionando um número apropriado de membros para a busca, em várias regiões [65].

A ideia básica do funcionamento de um AG pode ser resumida pelos passos apresentados na figura 4.3 [65]:

- |   |
|---|
| <p><b>Início</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li><b>1. Gerar a população inicial de cromossomos.</b></li><li><b>2. Avaliar cada cromossomo e lhe atribuir uma nota (aptidão).</b></li><li><b>3. Selecionar os melhores indivíduos (cromossomos mais aptos).</b></li><li><b>4. Aplicar operações de cruzamento e mutação, gerando uma nova população (descendentes).</b></li><li><b>5. Repetir dos itens 2 a 4 até encontrar uma solução satisfatória.</b></li></ol> <p><b>Fim</b></p> |
|---|

**Figura 4.3 – Passos básicos de um algoritmo genético**

Analisando a figura 4.3, pode-se perceber que a base do funcionamento de um AG são os operadores genéticos de cruzamento e mutação, os quais são utilizados para gerar novas soluções (gerações da população), aumentando o espaço de busca para diferentes regiões, com o propósito de encontrar soluções cada vez melhores.

Conforme visto anteriormente, o algoritmo genético proposto nesta tese, será iniciado imediatamente após a redução do número de comprimentos de onda pelo algoritmo de coloração de grafo. O AG será utilizado para realizar uma otimização iterativa, avaliando as diversas soluções candidatas, e terá como resultado uma lista contendo as melhores soluções. As etapas do AG proposto são mostradas na figura 4.4.

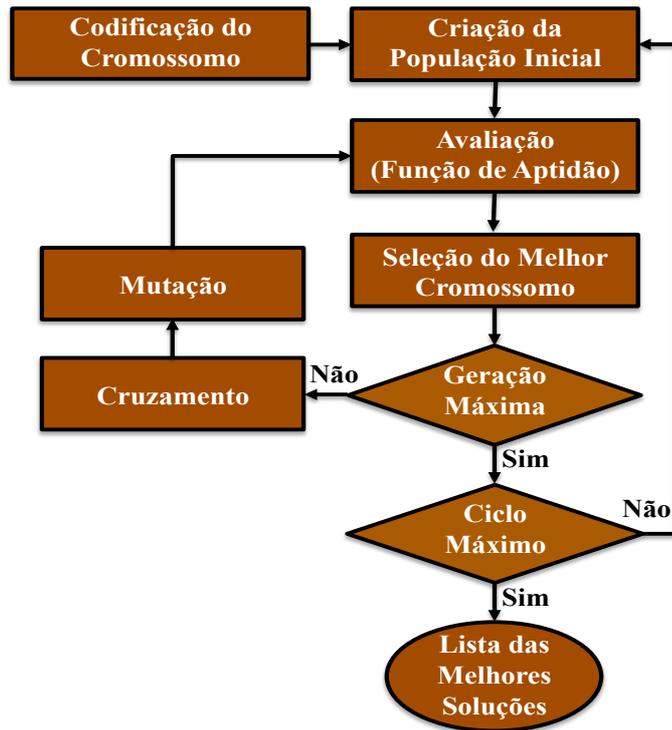


Figura 4.4 – Fluxograma do algoritmo genético proposto

A figura 4.4 mostra o passo a passo do AG, que inicia com a codificação binária do cromossomo, para logo em seguida ser gerada aleatoriamente a população inicial. Cada cromossomo desta população será avaliado por meio de uma função de aptidão, para que então seja selecionado o melhor cromossomo (possível solução). O próximo passo consiste em verificar se foi atingido o número máximo de gerações, estabelecido previamente e adotado como condição de parada para cada um dos ciclos do AG. Caso ainda não tenha sido atingido o número de gerações, serão executados os operadores de cruzamento e mutação, com o propósito de gerar novos cromossomos para compor uma nova população, a qual também passará pelos processos de avaliação e seleção.

No caso de o número de gerações ser alcançado, uma nova verificação será realizada, desta vez feita para avaliar se o número máximo de ciclos (número fixo, também determinado previamente) foi alcançado. Caso não tenha sido obtido esse número, será iniciado um novo ciclo do AG, gerando uma nova população inicial e, em seguida, os procedimentos de avaliação, seleção, cruzamento e mutação. Após alcançar o número máximo de ciclos, o processo de otimização é finalizado, sendo gerada uma lista de cromossomos composta pela melhor solução de cada um dos ciclos.

Nas subseções seguintes são apresentados os detalhes de implementação de cada etapa do AG.

#### 4.2.3.1. CODIFICAÇÃO DO CROMOSSOMO

A representação de um cromossomo pode ser de várias formas, sendo a mais usual a representação binária, na qual as informações são codificadas em cadeias de bits, facilitando a utilização dos operadores de cruzamento e mutação tradicionais. Entretanto, é possível empregar outras formas de representação, dependendo do tipo de aplicação desenvolvida [65].

Neste trabalho, o cromossomo é gerado aleatoriamente e representa uma versão codificada da ordem de ativação dos comprimentos de onda (canais) na grade de comprimentos de onda. A figura 4.5 mostra essa representação, onde os genes são bits que representam cada um dos canais na grade. Se o bit for definido como 1, então o comprimento de onda que ele representa será ativado, caso contrário, permanecerá desativado. O número total de genes que compõem o cromossomo é o mesmo que o número total de canais de um enlace óptico, entretanto, o número de canais que serão ativados é determinado pelo algoritmo de coloração de grafo. A cada cromossomo é atribuída uma aptidão, ou seja, uma nota para que se possa medir a qualidade da solução codificada.

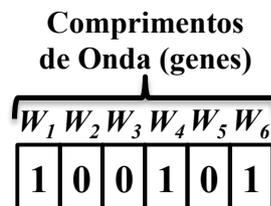


Figura 4.5 – Cromossomo representando uma grade com 6 comprimentos de onda

#### 4.2.3.2. CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL

A população inicial de um AG representa as estruturas de dados (conjunto de cromossomos) usados para encontrar uma ou mais possíveis soluções para o problema proposto. Cada cromossomo se encontra no espaço de busca de soluções, sendo que seu conjunto é capaz de representar uma enorme quantidade de possíveis configurações que os cromossomos podem assumir.

Como neste trabalho não se tem um conhecimento *a priori* sobre o espaço de busca, usou-se então uma população inicial aleatória, mas que procure representar todas as regiões

do espaço de busca. A figura 4.6 mostra a representação da população inicial, onde cada linha refere-se a um cromossomo (rotulado com um número de  $C_1$  até  $C_m$ ) e cada coluna refere-se a um comprimento de onda (rotulado com um número de  $W_1$  até  $W_n$ , de acordo com a sua posição na grade de comprimentos de onda).

		<i>Comprimentos de onda (genes)</i>				
		$W_1$	$W_2$	...	$W_{n-1}$	$W_n$
<i>Cromossomos</i>	$C_1$	1	1	...	0	1
	$C_2$	0	1	...	1	1
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	$C_{m-1}$	1	0	...	1	1
	$C_m$	1	1	...	1	0

Figura 4.6 – Representação da população inicial

#### 4.2.3.3. AVALIAÇÃO

O passo seguinte é aplicar a função de aptidão para avaliar cada solução candidata (cromossomo) pertencente à população. Dependendo do resultado desta avaliação, a solução poderá ser identificada como a melhor solução, caso possua a melhor avaliação pela função de aptidão entre todas da população; poderá ser selecionada para realizar operações de cruzamento e mutação; ou simplesmente ser desconsiderada (não ser selecionada). Vale ressaltar que a função de aptidão foi implementada conforme a formulação que calcula a degradação gerada pelo efeito XPM, apresentada na seção 3.4. Sendo considerado como limite máximo admitido para a variância normalizada ( $\sigma_{n,\max}^2$ ) o valor  $2,6 \times 10^{-3}$ , de acordo com [58].

Como resultado final, a função de aptidão retorna o número de canais que foram bloqueados por XPM, por dispersão residual ou por ambos. Em relação à dispersão residual, seus valores serão computados ao final de cada trecho óptico, para cada caminho óptico, sendo que esta dispersão residual será acumulada para os trechos ópticos seguintes, até o final da rota. Neste trabalho, serão considerados bloqueados todos os caminhos ópticos com valores de dispersão residual a partir de 1.175 ps/nm, de acordo com [66].

#### 4.2.3.4. SELEÇÃO DO MELHOR CROMOSSOMO E GERAÇÃO MÁXIMA

Após o processo de avaliação de cada cromossomo que compõe uma determinada população, o AG fará a seleção dos indivíduos mais aptos, para posteriormente gerar os cromossomos filhos (através dos operadores genéticos de cruzamento e mutação), estes novos cromossomos serão utilizados para compor uma população intermediária. Os indivíduos mais aptos são escolhidos, pelo fato de possuírem maior probabilidade de reproduzirem descendentes cada vez mais aptos. Este processo de seleção será repetido para cada geração pertencente a um mesmo ciclo. Porém, ao finalizar as gerações do ciclo, apenas será armazenada a melhor entre as melhores soluções.

Existem diversas formas de realizar a seleção, e uma das mais utilizadas é o Método da Roleta. Neste método, os cromossomos são escolhidos aleatoriamente, porém com probabilidade proporcional a sua aptidão, ou seja, quanto mais apto ele for, maior chance ele terá de ser escolhido. Este foi o método de seleção utilizado nesta tese, e o algoritmo utilizado para sua implementação, fundamentado em [67], é mostrado na figura 4.7.

```
Início  
  Ordenar os cromossomos por aptidão;  
   $T$  = soma dos valores de aptidão de todos os indivíduos da população;  
  Repetir  $N$  vezes para selecionar  $n$  indivíduos  
     $r$  = valor aleatório entre 0 e  $T$ ;  
    Percorrer sequencialmente os indivíduos da população, acumulando  
    em  $S$  o valor de aptidão dos indivíduos já percorridos;  
    Se  $S \geq r$  então  
      Selecionar o indivíduo corrente  
    Fim se;  
  Fim Repita;  
Fim.
```

Figura 4.7 – Algoritmo do método de seleção por Roleta

Entretanto, este método de seleção tende a causar convergência prematura do AG, pois a população intermediária pode ficar saturada de elementos com alta aptidão, mas não com a melhor aptidão, resultando em soluções não tão boas quanto o esperado [65]. Sendo assim, neste trabalho a convergência prematura foi evitada através da exclusão de cromossomos duplicados e aumentando-se a taxa de mutação, pois a diversidade dos indivíduos é proporcional à taxa de mutação.

O passo Geração Máxima foi empregado como critério de parada para cada um dos ciclos do AG. Nas simulações realizadas nesta tese, foi possível verificar que a partir de 20 gerações as aptidões dos cromossomos convergiam para valores muito próximos um dos outros, ou seja, a partir deste ponto as novas soluções candidatas apresentavam valores semelhantes em relação ao número de canais bloqueados. Por esse motivo, utilizou-se 20 gerações como limite máximo de repetição do processo de busca em cada ciclo do AG.

#### 4.2.3.5. CRUZAMENTO

O operador genético de cruzamento é responsável pela geração de novas populações, esse operador é aplicado a um par de cromossomos da população para gerar descendentes, o que permite a exploração do espaço de busca das soluções do problema tratado [65]. Esta operação executa a transferência de genes dos pais para seus filhos [68], procurando inserir nos filhos as melhores qualidades de seus pais.

Levando em consideração que inicialmente as melhores características dos indivíduos não são conhecidas, o melhor a fazer é combinar as características aleatoriamente. O AG trata estas características como blocos de construção e tenta combiná-los em melhores indivíduos via operação de cruzamento. Porém, algumas vezes, o cruzamento combina as piores qualidades dos indivíduos e, neste caso, seus descendentes provavelmente não sobreviverão muito tempo na população [65].

Neste trabalho,  $P-1$  operações de cruzamento são realizadas para reproduzir uma nova população com o mesmo tamanho da população inicial, onde  $P$  é o tamanho da população inicial, e  $-1$  é devido à manutenção do melhor cromossomo da população anterior. Os cromossomos pais são selecionados através do método de Roleta e são cruzados em pares, sendo que um cromossomo possui a melhor aptidão e o outro a pior aptidão. Estes novos cromossomos são chamados de filhos, e o processo de geração é mostrado na figura 4.8.

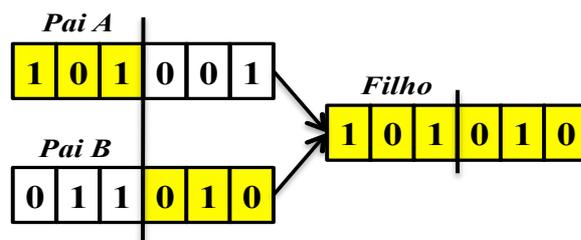


Figura 4.8 – Exemplo da operação de cruzamento



#### **4.2.3.7. CICLO MÁXIMO**

Uma vez atingido o número máximo de 20 gerações de um ciclo (passo Geração Máxima), será avaliado se foi alcançado o número de ciclos do AG (passo Ciclo Máximo). A função dessa etapa é repetir todo o processo de otimização proporcionado pelo AG. Assim, uma nova população inicial será gerada, bem como os procedimentos de avaliação, seleção, cruzamento e mutação, serão realizados por mais 20 gerações, em cada ciclo. Foram utilizados 30 ciclos nos estudos aqui apresentados.

Destaca-se que a principal motivação para o uso de ciclos é propiciar uma expansão no espaço de busca para diferentes regiões, aumentando assim a probabilidade de encontrar soluções ótimas. Ao final de cada ciclo será armazenada a melhor solução encontrada, e desta forma, o resultado final de todo o processo de otimização será uma lista contendo a melhor solução encontrada no processo de otimização de cada um dos 30 ciclos.

Conforme visto anteriormente, cada cromossomo desta lista representa uma ordem de ativação dos canais na grade de comprimento de onda, de forma que seja reduzida a degradação gerada pelo efeito XPM. Sendo assim, cabe ao operador da rede decidir qual destes cromossomos será empregado no processo de atribuição de comprimento de onda, e para isso ele deve considerar alguns aspectos funcionais da rede, como por exemplo, o funcionamento adequado de cada transponder que será utilizado.

A vantagem de possuir uma lista com vários cromossomos, está no fato de que em caso de falha do transponder, o operador da rede terá a possibilidade de escolher outro cromossomo da lista, de forma que não será ativado o canal que utilize o transponder com problema. Isto possivelmente manterá o mesmo nível de degradação do sinal óptico, pois os cromossomos da lista apresentam aptidões semelhantes.

#### **4.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foi apresentada a metodologia híbrida proposta nesta tese, detalhando principalmente o Algoritmo Evolucionário. Porém, um ponto importante que deve ser ressaltado é o fato de que na população intermediária sempre é mantido o cromossomo que apresenta o menor número de canais bloqueados por XPM, fazendo com que a lista contendo as melhores soluções seja composta por esses cromossomos. Sendo assim, o processo de otimização procura uma forma de ativar os comprimentos de onda na grade de canais, de

maneira que seja reduzido a XPM, mas sem se preocupar com os efeitos da dispersão residual. Mesmo assim, os valores de dispersão residual são calculados para cada comprimento de onda ativo na grade, o que permite uma avaliação do compromisso entre a XPM e a dispersão residual. No próximo capítulo serão apresentados os estudos de caso e os resultados numéricos que comprovam a eficácia da metodologia proposta.

## 5. DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E RESULTADOS NUMÉRICOS

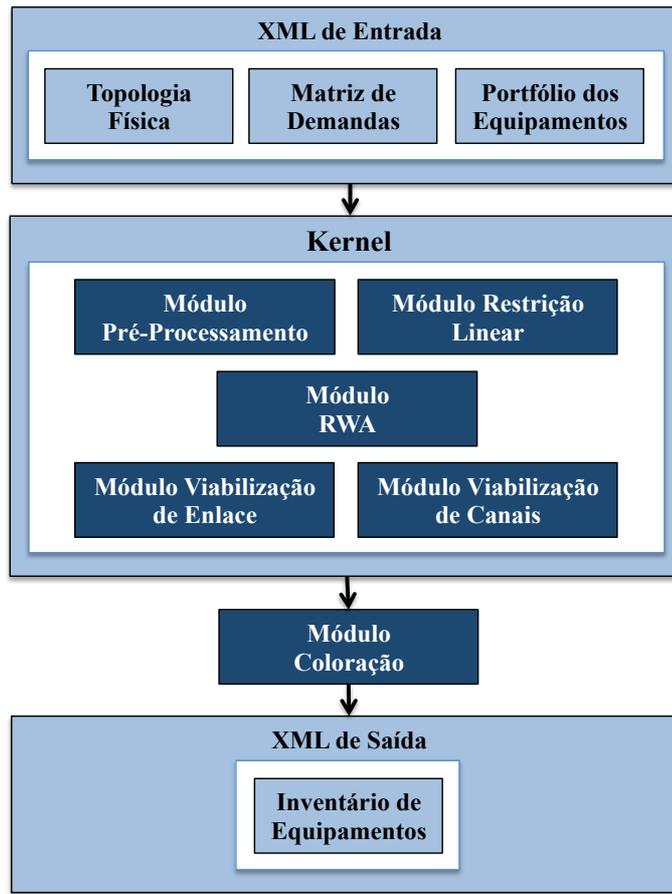
### 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com base na metodologia híbrida proposta, que foi apresentada em detalhes no capítulo anterior, foram realizadas diversas simulações em diferentes cenários e topologias de rede, com o propósito de avaliar e comprovar sua viabilidade. Desta forma, para uma melhor compreensão de todo processo de simulação, serão apresentadas nas seções seguintes: a Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas, os cenários e as topologias de rede utilizados em nossos testes, assim como os resultados numéricos obtidos.

### 5.2. DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO DE REDES ÓPTICAS

Para realização de nossas simulações, foi utilizada a Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas de Transporte, desenvolvida no Laboratório de Telecomunicações (LabTel) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Esta ferramenta é capaz de realizar o projeto da rede, a partir do conhecimento *a priori* da topologia física da rede, da sua matriz de tráfego e do portfólio de equipamentos disponíveis. O seu principal objetivo é alocar um conjunto de equipamentos ópticos, de forma que seja minimizado o custo total da rede, mas que seja garantida sua viabilidade técnica.

Conforme é mostrado na figura 5.1, esta ferramenta é dividida em quatro partes, a saber: (i) XML de entrada – conjunto de arquivos que possuem todos os dados de entrada necessários para execução do projeto; (ii) *kernel* – conjunto de módulos cuja função principal é realizar todas as operações de projeto, planejamento e geração de inventário da rede; (iii) Módulo Coloração – sua função é reduzir o número de canais, e realizar a atribuição dos comprimentos de onda através do método *First-Fit*; (vi) XML de saída – arquivo que possui o inventário de equipamentos da rede.



**Figura 5.1 – Módulos da Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas desenvolvida no LabTel/UFES**

Por mais que esta ferramenta seja capaz de realizar todo o projeto da rede óptica considerando as principais restrições lineares (atenuação, ruído ASE e dispersão cromática), existia ainda a necessidade de adicionar um módulo capaz de analisar as restrições não lineares e outro módulo que buscasse otimizar o processo de atribuição de comprimentos de onda, além do *Front-End* da ferramenta.

Diante desta necessidade, estabeleceu-se uma parceria entre o LabTel/UFES e o Laboratório de Eletromagnetismo Avançado (LEA) da Universidade Federal do Pará (UFPA) para o desenvolvimento destas novas funcionalidades. Desta forma, a arquitetura da Ferramenta de Planejamento foi atualizada, sendo adicionada os seguinte módulos: Módulo de Restrições Não Lineares, Módulo de Otimização e Módulo Front-End. Esta nova arquitetura é mostrada na figura 5.2.

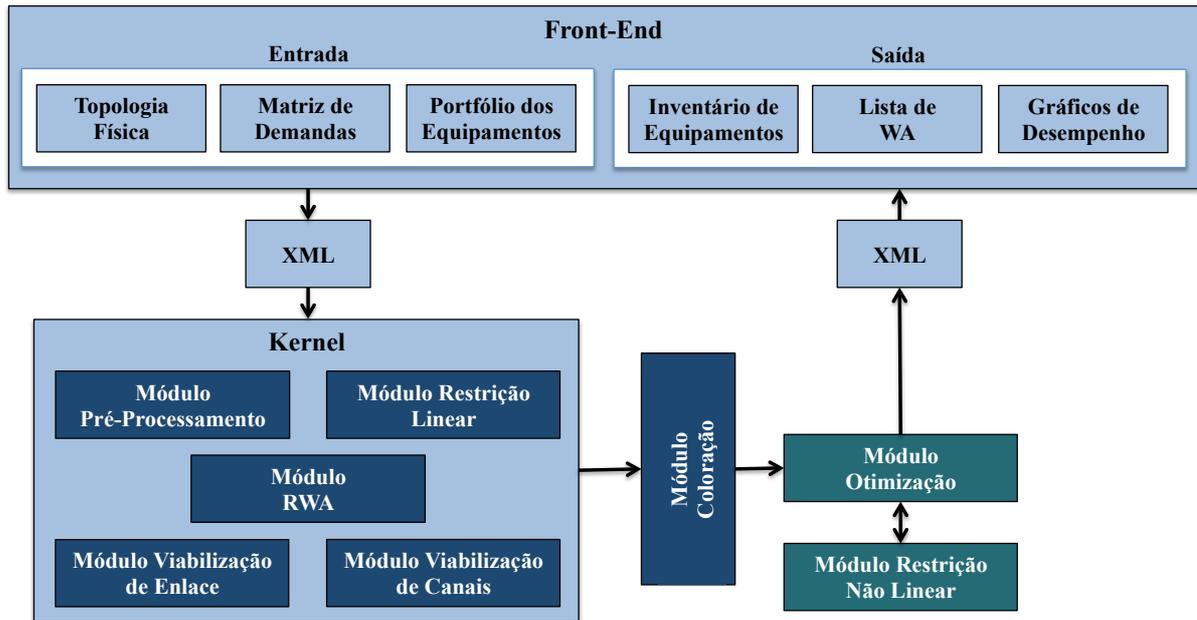
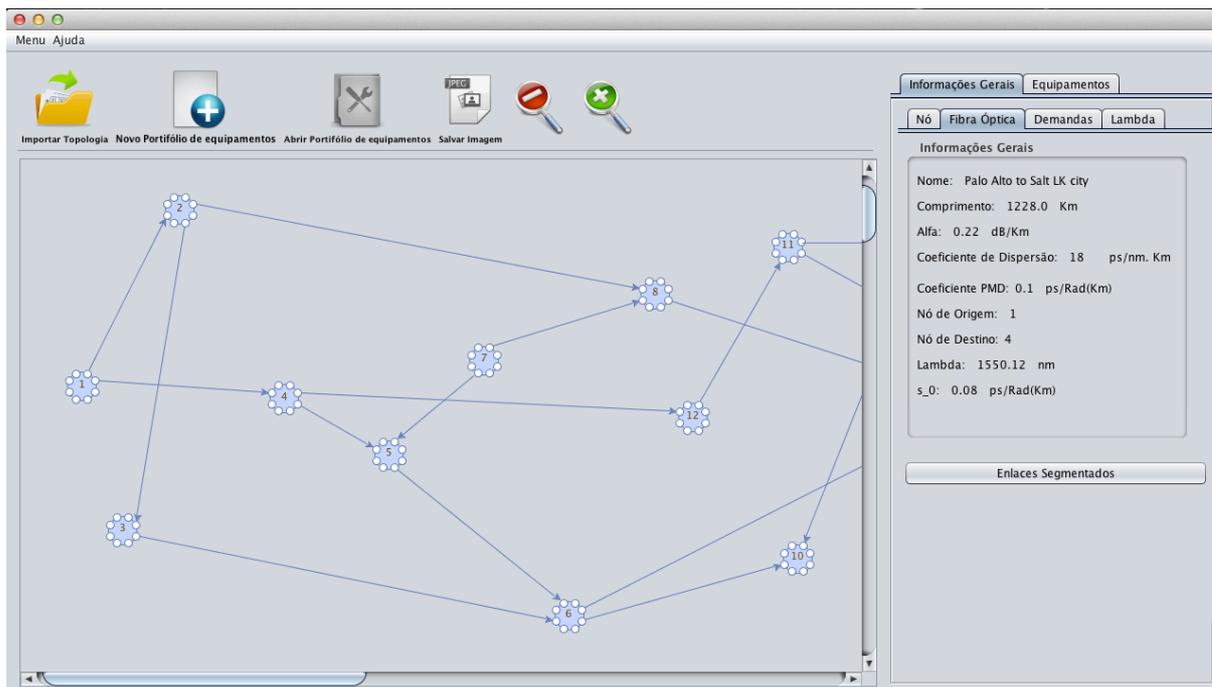


Figura 5.2 – Arquitetura Atual da Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas

Nas seções seguintes serão tratados em detalhe somente as funcionalidades desenvolvidos através da parceria entre LabTel/UFES e LEA/UFPA.

### 5.2.1. FRONT-END DA FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO

A principal função deste *Front-End* é preparar todos os arquivos de entrada (Topologia física da rede, Matriz de demandas e o Portfólio de equipamentos) e levados ao *Kernel* da Ferramenta para realização do projeto da rede. Através do *Front-End* é possível criar uma nova topologia física da rede ou importar uma topologia existente (com a possibilidade de excluir ou inserir nós e conectá-los por meio de enlaces ópticos), em seguida tem-se a opção de definir os parâmetros das fibras ópticas, e segmentar enlaces extensos (criando pontos intermediários de amplificação e/ou compensação de dispersão, ao longo do enlace), é possível ainda criar um Portfólio de Equipamentos ou importar um Portfólio existente. Tem-se também a opção de criar manualmente a Matriz de Demandas ou gerá-la automaticamente. Em ambos os casos, a escolha dos nós origem-destino de cada demanda é feita de forma aleatória. A tela inicial do *Front-End* é ilustrada na figura 5.3.



**Figura 5.3 – Tela inicial do Front-End**

Em relação às informações de saída já disponíveis, podemos citar: o inventário de equipamentos, as listas contendo a ordem de ativação dos comprimentos de onda e os gráficos de desempenho, todas são geradas pelo *Kernel*, com exceção dos gráficos que são gerados no *software* MatLab. Porém, ainda é necessário realizar algumas alterações no *Front-End*, para torná-lo capaz de exibir as informações de saída já disponíveis.

### **5.2.2. KERNEL DA FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO E MÓDULO COLORAÇÃO**

De posse dos arquivos de entrada, o *Kernel* realizará todo o projeto da rede óptica considerando somente algumas restrições lineares. Os módulos que compõem o *Kernel* são responsáveis por definir quais equipamentos ópticos serão utilizados na rede, e em que ponto eles serão alocados (nós da rede ou pontos intermediários), definindo-se ainda as configurações destes equipamentos e suas interconexões. Por fim, é executado o Módulo Coloração, que tem a função de reduzir o número de comprimentos de onda a serem utilizados na rede, ativando-os através do método *First-Fit*. O objetivo nestas fases é minimizar os custos do projeto da rede, atendendo o máximo de demandas de tráfego possíveis.

A construção do projeto da rede foi particionada através de módulos e solucionada sequencialmente, para que seu custo computacional seja diluído ao longo das etapas. Estes

módulos não serão detalhados nesta tese, pelo fato de terem sido desenvolvidos exclusivamente pelo LabTel/UFES.

### 5.2.3. MÓDULO OTIMIZAÇÃO

Conforme descrito na seção 4.2.3, o processo de otimização foi implementado através de um Algoritmo Genético, que somente deve ser iniciado após o Módulo Coloração conseguir reduzir o número de comprimentos de onda (canais) necessários para atender a matriz de demandas da rede. Este processo encontra uma forma de espalhar os canais ativos na grade de comprimentos de onda, reduzindo assim os efeitos indesejados gerados pela XPM. O Módulo Otimização apresenta como saída uma lista contendo as melhores soluções em termos de canais bloqueados, conforme é mostrado na figura 5.4.

		Grade de comprimento de onda										Bloqueados por XPM	Bloqueados por CD	Bloqueados por ambos
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Soluções	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0 canal	1 canal	1 canal
	2	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1 canal	3 canais	3 canais
	3	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	2 canais	2 canais	3 canais
	4	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	3 canais	4 canais	4 canais

Figura 5.4 – Melhores soluções em termos de ativação dos canais ópticos para atender 30 requisições de conexão através de uma grade com 10 comprimentos de onda

Analisando a figura 5.4 percebe-se que cada solução apresentada possui 5 canais ativos em uma grade com 10 comprimentos de onda. Assim, o número de soluções possíveis é 30.240, porém em nossas simulações usamos até 8 canais ativos em uma grade com 40 comprimentos de onda, o que eleva o número de possibilidades para 3 quatrilhões, caso permanecessem apenas com 5 canais ativos. Devido a este enorme espaço de busca por soluções, o Módulo Otimização poderá encontrar diversas soluções candidatas, entretanto, serão selecionadas apenas as soluções que apresentarem os melhores resultados. É importante frisar ainda que o espaço de busca por soluções varia de acordo com o número de canais ativos e com o tamanho da grade de comprimentos de onda.

### 5.2.4. MÓDULO RESTRIÇÃO NÃO LINEAR

Cada solução candidata (cromossomo) gerada através do processo de otimização precisa ser avaliada pelo Módulo Restrição Não Linear, o qual é justamente a função de aptidão do AG. Conforme dito anteriormente, o cromossomo é avaliado de acordo com a variância

normalizada do efeito XPM ( $\sigma_{n,max}^2$ ), sendo considerados bloqueados todos os caminhos ópticos com valores de variância a partir de  $2,6 \times 10^{-3}$ , de acordo com [58].

A formulação que estima o efeito XPM, apresentada na seção 3.4, foi implementada neste módulo, e os dados de entrada utilizados no cálculo da XPM são os seguintes: a solução candidata, a distância física de cada segmento de fibra que conecta os nós origem e destino, a potência de entrada do sinal óptico de cada canal ativo em cada segmento de fibra e a dispersão residual gerada por canal ativo em cada segmento de fibra. O resultado da avaliação de cada cromossomo apresenta o número de caminhos ópticos bloqueados por XPM, por dispersão residual ou por ambos.

### 5.3. CARACTERÍSTICAS DAS SIMULAÇÕES

Para definição das características das simulações, diversos artigos foram analisados durante o desenvolvimento deste trabalho, e desta forma foi possível perceber que grande parte deles foram implementados em um cenário regular, como por exemplo: potência dos canais ópticos igual em todos os enlaces, dispersão cromática e ruído ASE constante, e até mesmo enlaces ópticos de mesmo tamanho, com cerca de 100 km. A principal diferença nas simulações realizadas nesta tese, é que elas foram realizadas em uma rede óptica muito próxima da situação real, principalmente em termos de distância entre nós. Para avaliar a efetividade desta proposta, foram usadas duas topologias de rede bastante diferentes: (i) a rede *National Science Foundation (NSFNET)*, mostrada na figura 5.5, e (ii) a rede *Geant Backbone Topology (GEANT2)*, mostrada na figura 5.6.

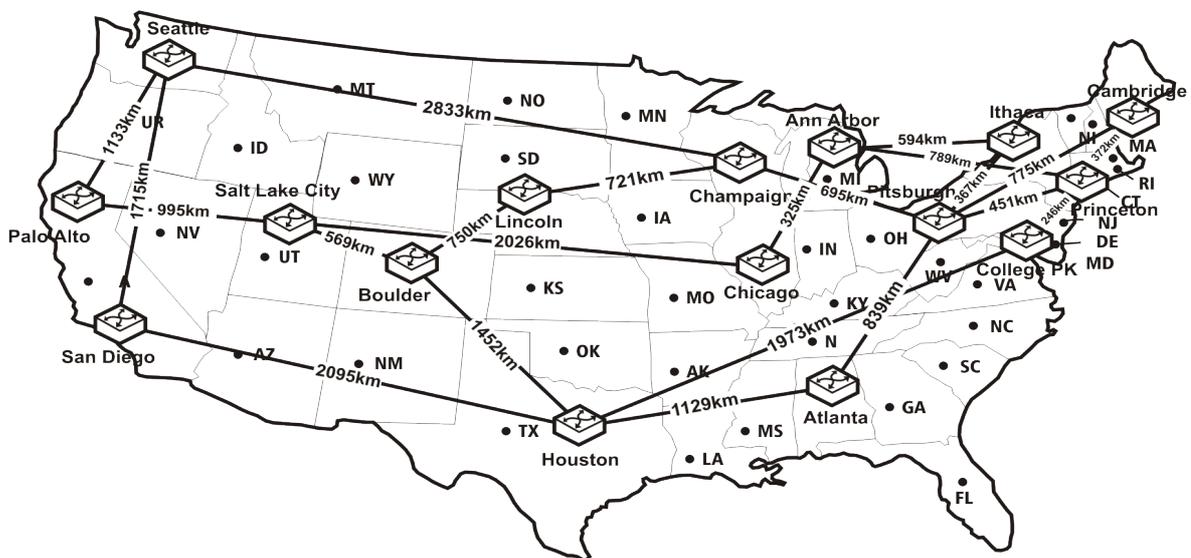


Figura 5.5 – Topologia da Rede NSFNET

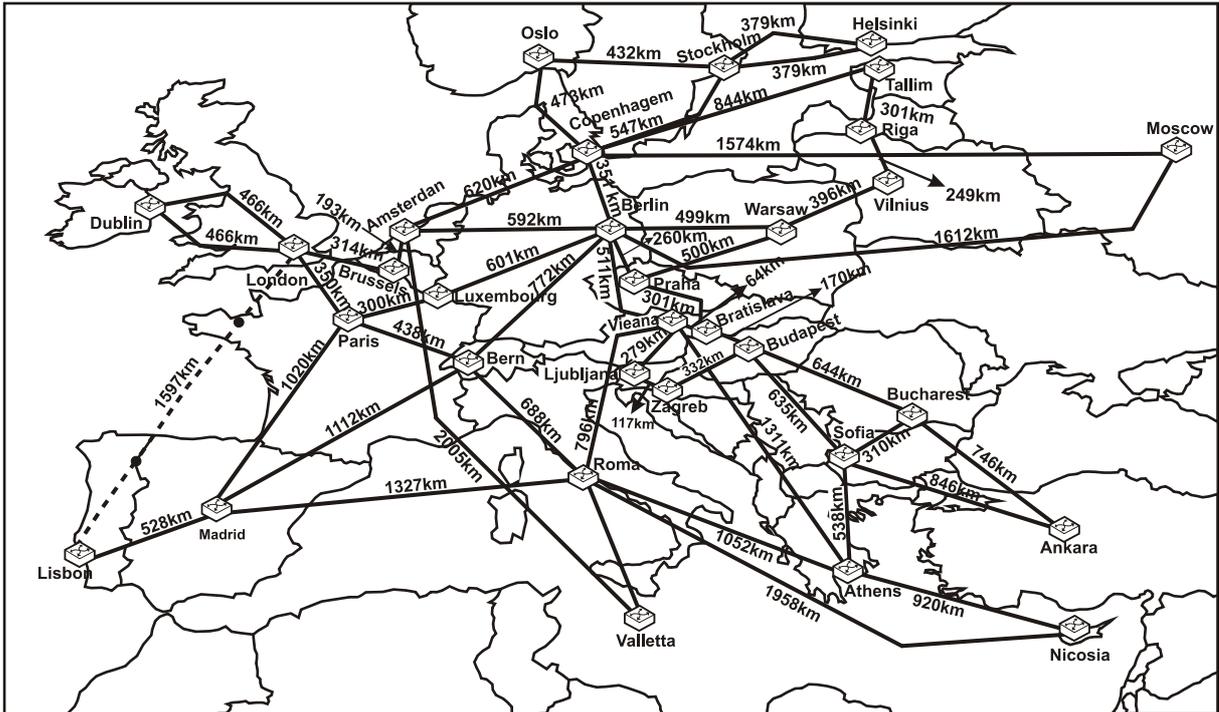


Figura – 5.6 Topologia da Rede GEANT2

Tanto na rede NSFNET quanto na GEANT2, todos os enlaces com distância superior a 100 quilômetros foram segmentados aleatoriamente, formando trechos ópticos com tamanho variando de 50 a 100 km, sendo que no final de cada trecho óptico foram criados nós de passagem, os quais podem ser utilizados para adicionar amplificadores e compensadores de dispersão. A tabela 5.1 mostra uma descrição das redes NSFNET e GEANT2.

Tabela 5.1 – Descrição das Rede NSFNET e GEANT2

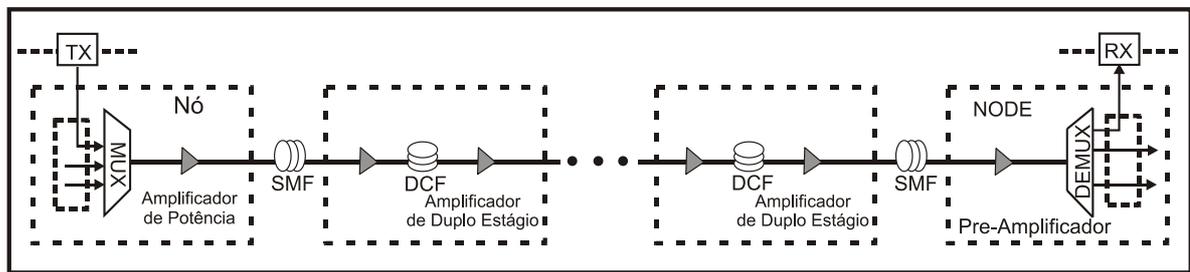
Descrição	NSFNET	GEANT2
Número de nós OXCs	16	32
Número de nós de passagem	302	465
Número de enlaces ópticos	22	52
Enlace com menor distância (km)	246	64
Enlace com maior distância (km)	2833	2005
Distância média dos enlaces (km)	1038,36	661,45
Grau médio de conexão dos nós <sup>2</sup>	2,75	3,25

Devido à grande extensão dos enlaces que compõem as redes NSFNET e GEANT2, grande parte das demandas de caminhos ópticos geradas nestas redes, possivelmente serão atendidas por rotas com o número de trechos ópticos muito acima do que o usado nas simulações realizadas em [58]. No entanto, os estudos sobre a degradação induzida por XPM, conduzidas por [70], foram realizados em um cenário com um elevado número de trechos

<sup>2</sup> Média de enlaces que conectam os nós da rede.

ópticos, poucos comprimentos de onda ativos e um gerenciamento de dispersão que tende a reduzir a XPM (dispersão residual negativa por trecho óptico). Isto comprova que a modelagem apresentada em [58] pode ser aplicada no cenário proposto nesta tese.

A configuração dos enlaces de fibra óptica utilizados nas simulações, segue o modelo apresentado na figura 5.7. Onde assumiu-se que cada trecho óptico é composto por um segmento de fibra monomodo padrão (SMF) mais um segmento de fibra de compensação de dispersão (DCF), bem como um conjunto de amplificadores que podem ser do tipo: *booster*, linha e/ou pré-amplificador.



**Figura 5.7 – Configuração do Enlace de Fibra Óptica**

As simulações foram realizadas com um número de requisições de conexão que variam de 10 a 40 para a rede NSFNET e de 50 a 120 para a rede GEANT2, em ambas as redes utilizou-se dois cenários diferentes. No primeiro cenário, denominado S1, considerou-se que as conexões poderão ser bloqueadas apenas pelo efeito XPM, ignorando os caminhos ópticos bloqueados por dispersão residual. No segundo cenário, denominado S2, considerou-se que as conexões poderão ser bloqueadas tanto pelo efeitos XPM quanto pela dispersão residual. É importante ressaltar que o limite máximo admitido para a variância normalizada ( $\sigma_{n,max}^2$ ) é o valor  $2,6 \times 10^{-3}$ , de acordo com [58], e para dispersão residual é 1.175 ps/nm, de acordo com [66].

Em ambas as redes e cenários foram utilizados os parâmetros listados na Tabela 5.2. Sendo que os canais ópticos em um determinado trecho óptico possuem valores de potência iguais, porém esses valores podem ser ajustados de -2 a 8 dBm dependendo do comprimento do trecho óptico, a fim de garantir um balanço de potência apropriado.

**Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados nas simulações**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>
Número máximo de comprimentos de onda por enlace	40
Espaçamento da Grade WDM	100 GHz
Menor comprimento de onda na grade	1529,55 nm
Taxa de dados por canal	10 Gbps
Comprimento do trecho óptico	50 km to 100 km
Potência dos canais bombeio e sonda	-2 to 8 dBm
Figura de ruído do amplificador	5,5 dB
Coefficiente de perda da fibra SMF	0,22 dB/km
Coefficiente de dispersão da fibra SMF para 1550.12 nm	17 ps/km.nm
Inclinação da dispersão da fibra SMF	0,08 ps/km.nm <sup>2</sup>
Coefficiente de perda da fibra DCF	0,5 dB/km [40]
Coefficiente de dispersão da fibra DCF para 1550.12 nm	-100 ps/km.nm [40]
Inclinação da dispersão da fibra DCF	-0,3 ps/km.nm <sup>2</sup> [40]
Coefficiente de não linearidade da fibra	1,37 (W.km) <sup>-1</sup>

#### **5.4. ANÁLISE DO IMPACTO DAS PENALIDADES FÍSICAS**

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia híbrida proposta, a qual é empregada com o propósito de minimizar o impacto da penalidade física XPM. Foram calculados os impactos gerados pela XPM em termos de probabilidade de bloqueio das chamadas para as redes e cenários descritos na seção 5.3. Nos gráficos a seguir, compara-se a probabilidade de bloqueio alcançada por nosso AG com a alcançada pelo algoritmo *First-Fit*, em função do número de requisições de conexão.

##### **5.4.1. RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A REDE NSFNET**

Analisando as figuras 5.8 e 5.9, é possível perceber que o algoritmo *First-Fit*, o qual é o algoritmo de WA mais utilizado na literatura, apresenta o pior desempenho para os dois cenários da topologia NSFNET. Este comportamento já era esperado, visto que tal algoritmo sempre aloca canais adjacentes, fato que potencializa o efeito XPM.

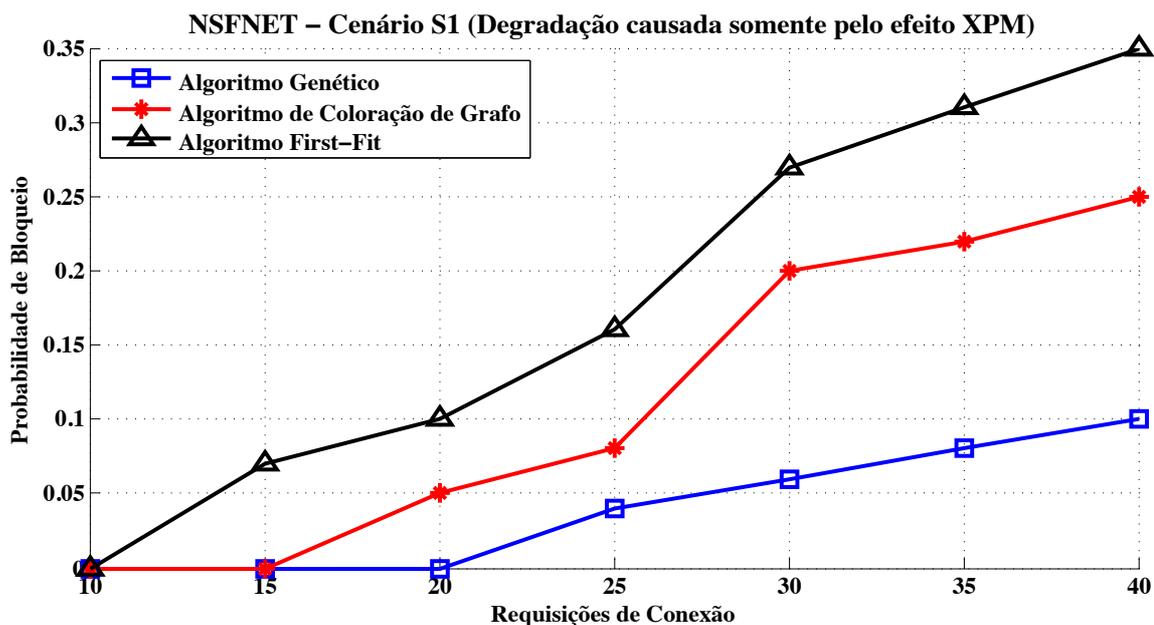


Figura 5.8 – Probabilidade de bloqueio em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede NSFNET para o cenário S1.

Comparando os resultados apresentados na figura 5.8, pode-se concluir que o AG apresenta uma redução na probabilidade de bloqueio de até 70% em relação ao algoritmo de Coloração de Grafo, e de até 77,78% em relação ao algoritmo *First-Fit*. Isto demonstra a viabilidade de nossa proposta, especialmente em cenários com elevado número de requisições de conexões.

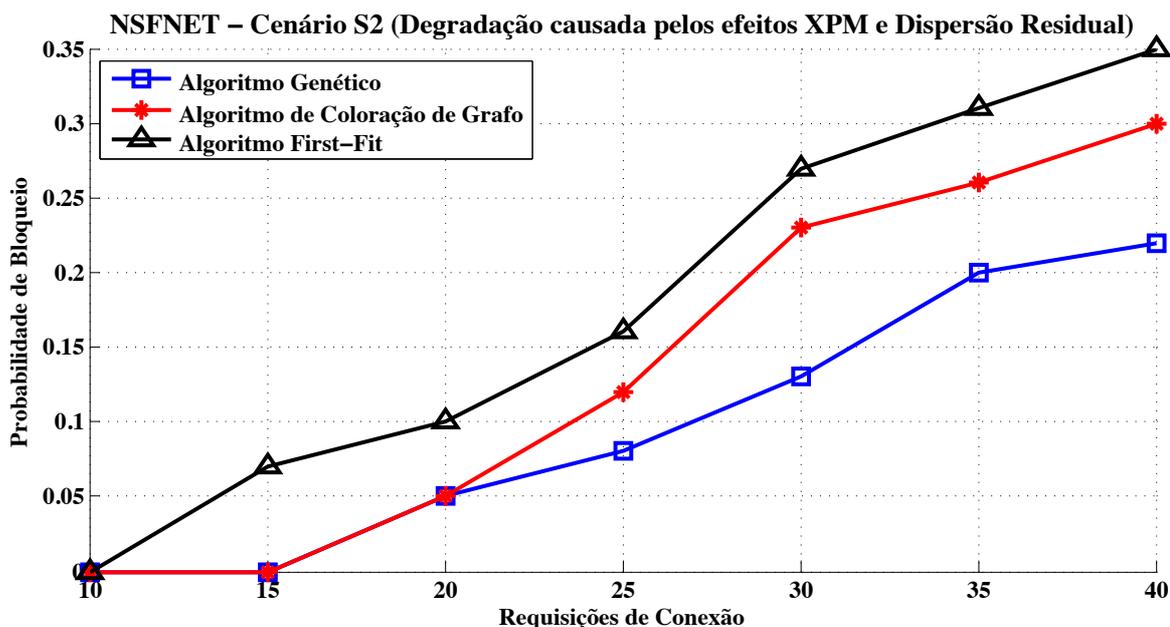
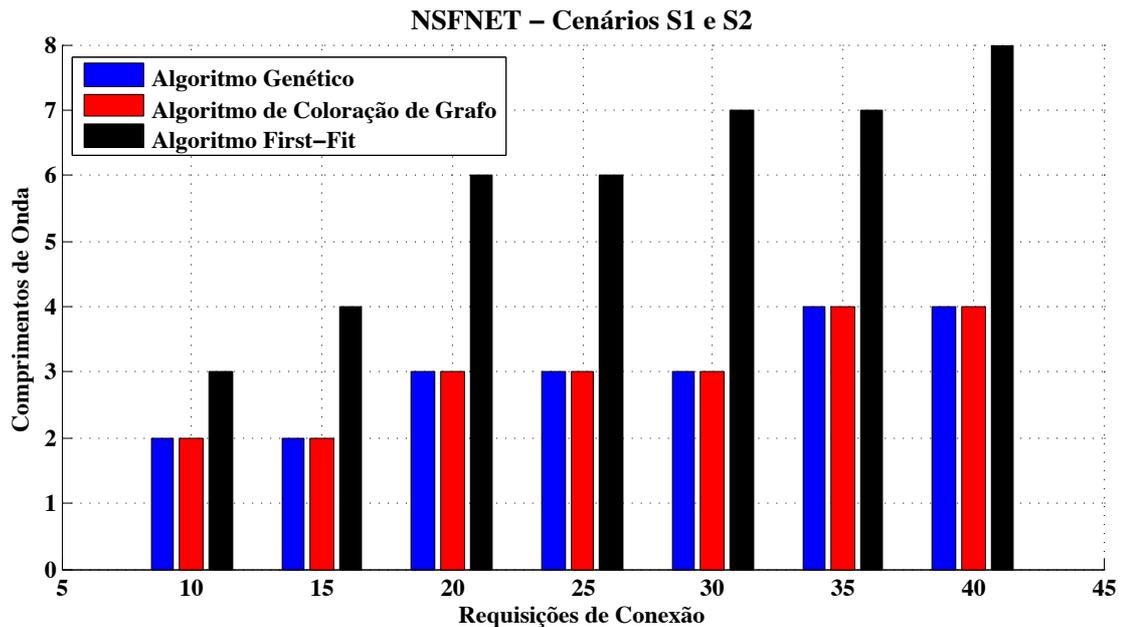


Figura 5.9 – Probabilidade de bloqueio em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede NSFNET para o cenário S2.

Pode ser notado ainda que o algoritmo de Coloração de Grafo apresenta um desempenho bastante superior ao tradicional algoritmo *First-Fit*, o que ocorre devido à redução do número de comprimentos de onda necessários para atender a matriz de tráfego (realizado na fase de Pré-processamento). Sendo assim, o algoritmo de Coloração de Grafo apresenta uma probabilidade de bloqueio aceitável quando o número de requisições de conexões for menor que 25, no caso do cenário S2 (figura 5.9). Neste caso especial não se faz necessária a utilização do AG, evitando assim o tempo que seria gasto em sua execução.

Como já era esperado, o Algoritmo Genético apresenta uma melhoria significativa na taxa de probabilidade de bloqueio, isto se deve ao fato de que o AG tende a espalhar os comprimentos de onda na grade de comprimento de onda. Desta forma, nossa proposta mostrou-se eficiente quando o número de requisições de conexão for menor que 40, considerando-se somente o efeito XPM (figura 5.8). Quando se considerou os efeitos XPM e dispersão residual conjuntamente (figura 5.9), nossa proposta apresentou bons resultados para até 27 requisições de conexão.

De acordo com o que foi apresentado em [71], logo estará disponível no mercado compensadores de dispersão sintonizáveis, o que poderá reduzir significativamente os efeitos gerados pela dispersão residual, e assim, os dados apresentados na figura 5.8 se tornarão mais próximos da realidade. Cabe frisar que o impacto dos efeitos XPM e FWM sobre o desempenho do sistema depende da escolha do mapa de dispersão entre outras coisas [40]. Desta forma, torna-se necessário encontrar um mapa de dispersão residual que busque equilibrar a degradação gerada pelos efeitos XPM e FWM, visto que valores baixos de dispersão residual minimizam o efeito XPM potencializando a FWM, e valores altos de dispersão residual produzem o efeito contrário.



**Figura 5.10 – Comprimentos de onda em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede NSFNET para os cenários S1 e S2.**

Observando a figura 5.10, nota-se uma grande diferença entre o número de comprimentos de onda usado pelo algoritmo *First-Fit*, e o usado pelos algoritmos de Coloração de Grafo/Genético, sendo que esta diferença chegou a 57,14% quando atendidas 30 requisições de conexão. Conforme visto anteriormente, o número de comprimentos de onda usado no Algoritmo Genético é definido pelo algoritmo de Coloração de Grafo, e a diferença de desempenho entre eles está no fato de que este último usa o *First-Fit* como um método de alocação.

Analisando as figuras 5.9 e 5.10, percebe-se que o algoritmo *First-Fit* atinge uma probabilidade de bloqueio de 7% com apenas 15 requisições de conexão, sendo estas conexões atendidas por 4 comprimentos de onda. Enquanto que o AG é capaz de atender praticamente o dobro do *First-Fit* (25 requisições), com aproximadamente a mesma probabilidade de bloqueio, porém com apenas 3 comprimentos de onda.

É importante ressaltar que o desempenho e a precisão da metodologia proposta são extremamente dependentes dos parâmetros de configuração do AG. Foram realizadas diversas simulações, a fim de descobrir os parâmetros que façam com que o GA alcance uma rápida convergência. Após estas simulações, decidimos pela seguinte configuração: população inicial de 10 indivíduos, 20 gerações e 30 ciclos. Para evitar a convergência prematura foram utilizadas operações de cruzamento e mutação com taxa de 80% e 1%, respectivamente. Em

relação ao tempo de execução do AG, percebeu-se um crescimento exponencial de acordo com o número de requisições de conexão. Para executar 10 requisições de conexão o processo de otimização levou cerca de 22 minutos, para 25 requisições de conexão cerca de 1 hora, e para 40 requisições de conexão cerca de 3 horas.

#### 5.4.2. RESULTADOS NUMÉRICOS PARA A REDE GEANT2

Os gráficos apresentados nesta seção servem para reafirmar a viabilidade de nossa proposta, pois foram gerados com base em uma topologia de rede bastante diferente da rede NSFNET. Avaliando as figuras 5.11 e 5.12, confirma-se que para ambos os cenários da topologia de rede GEANT2, o algoritmo *First-Fit* mostrou um baixo desempenho quando comparado ao algoritmo de Coloração de Grafo e ao Algoritmo Genético.

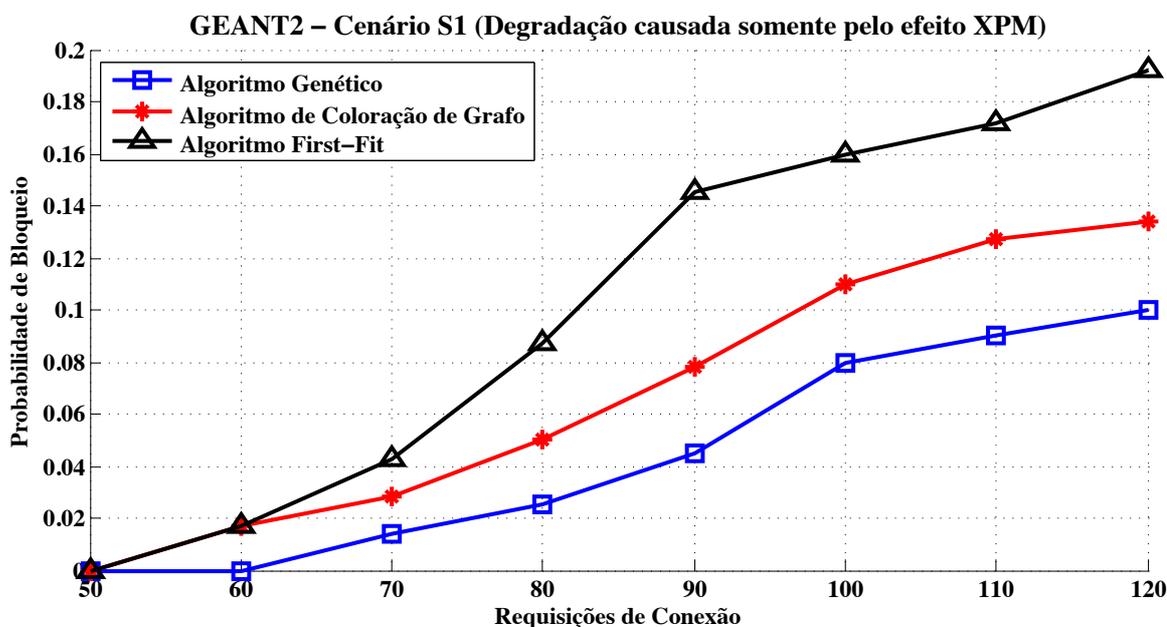


Figura 5.11 – Probabilidade de bloqueio em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede GEANT2 para o cenário S1.

Analisando os resultados da figura 5.11, nota-se que o AG é capaz de reduzir a probabilidade de bloqueio em até 50%, quando comparado com o algoritmo de Coloração de Grafo, e em até 71,43%, quando comparado com o algoritmo *First-Fit*.

Repetindo-se esta análise para o cenário S2 (figura 5.12), percebe-se que a superioridade do AG se manteve, porém com uma menor diferença, pois a probabilidade de bloqueio do AG chegou a 28,57%, quando comparado ao algoritmo de Coloração de Grafo, e a 66,67%, quando comparado ao algoritmo *First-Fit*.

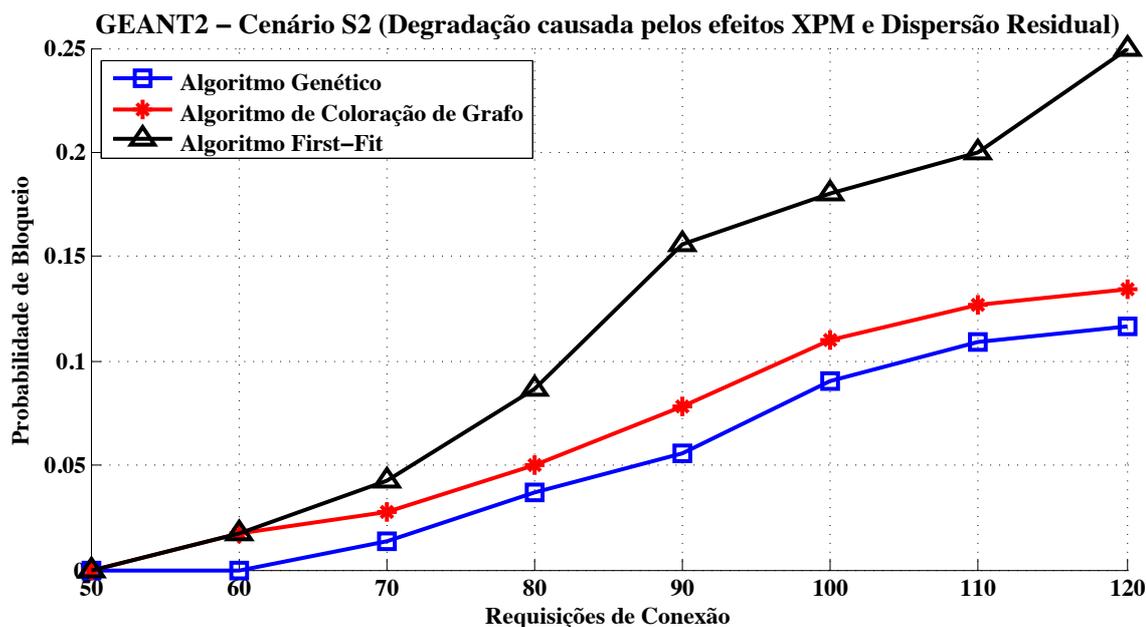


Figura 5.12 – Probabilidade de bloqueio em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede GEANT2 para o cenário S2.

Observando a figura 5.13, nota-se que também se manteve a grande diferença entre o número de comprimentos de onda usado pelo algoritmo *First-Fit*, e o usado pelos algoritmos de Coloração de Grafo/Genético, sendo que para maiores quantidades de requisições de conexão, esta diferença chegou a 60%.

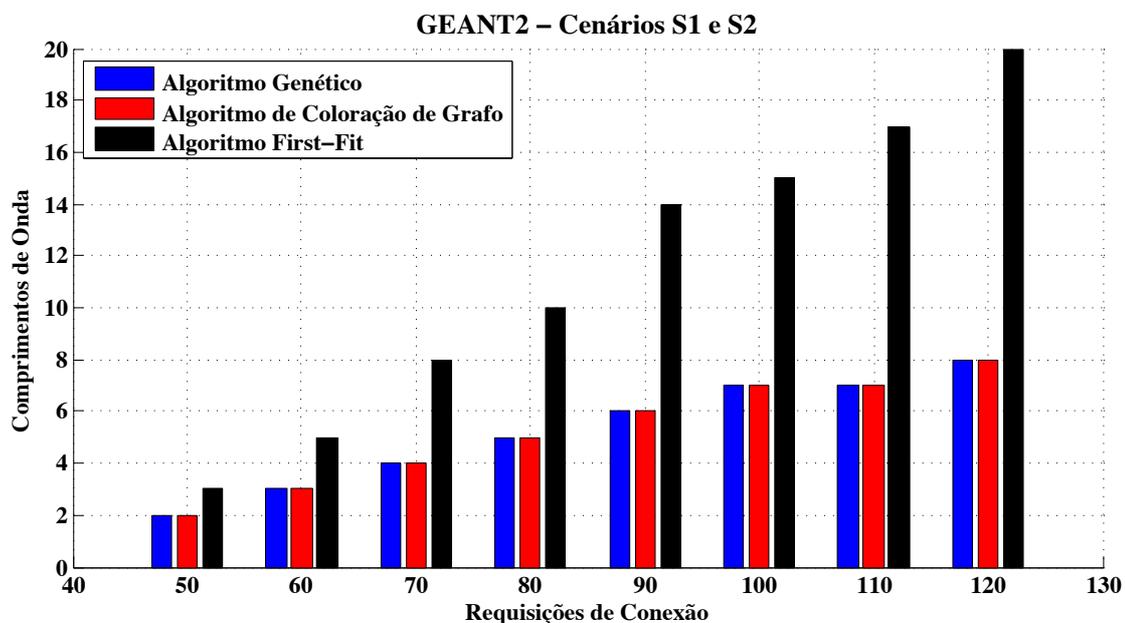


Figura 5.13 – Comprimentos de onda em função do número de requisições de conexão, para diferentes algoritmos de WA, considerando a topologia de rede GEANT2 para os cenários S1 e S2.

Analisando as figuras 5.12 e 5.13, percebe-se que o AG atinge uma probabilidade de bloqueio de 9% com 100 requisições de conexão, sendo estas conexões atendidas por apenas 7 comprimentos de onda. Enquanto que o algoritmo *First-Fit* é capaz de atender somente 80 requisições, com aproximadamente a mesma probabilidade de bloqueio, porém com o dobro de comprimentos de onda.

Em relação aos parâmetros de configuração do AG, empregaram-se os mesmos usados na simulação da rede NSFNET. No que concerne ao tempo de execução, constatou-se um grande aumento, porém isto era esperado já que o tempo de execução está diretamente ligado ao número de requisições de conexão. Para executar 50 requisições de conexão o processo de otimização levou cerca de 33 minutos, para 80 requisições de conexão cerca de 2 hora, e para 120 requisições de conexão cerca de 5 horas.

#### 5.4.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS REDES NSFNET E GEANT2

Após toda a pesquisa realizada nesta tese, comprovou-se que a grande extensão do enlace é um dos principais fatores que influenciam na degradação do sinal óptico gerada pelo efeito XPM, pois o comprimento do enlace influencia também em outros fatores, como: número de trechos ópticos, potência dos canais, dispersão residual etc.

Observa-se na tabela 5.1 que o comprimento médio dos enlaces na rede NSFNET é 36,30% maior que o da rede GEANT2. Em consequência disto é que na rede NSFNET obteve-se um resultado satisfatório para uma matriz de tráfego com apenas 40 requisições de conexão, enquanto que na rede GEANT2 atendeu-se satisfatoriamente uma matriz de tráfego com até 120 requisições de conexão (cenário S1 em ambas as redes – figuras 5.8 e 5.11).

**Tabela 5.3 – Redução da probabilidade de bloqueio entre os algoritmos**

Algoritmos	Rede NSFNET		Rede GEANT2	
	Cenário S1	Cenário S2	Cenário S1	Cenário S2
AG em relação a Coloração de Grafo	80%	43,48%	50%	28,57%
AG em relação ao <i>First-Fit</i>	85,71%	51,85%	71,43%	66,67%

Analisando-se a tabela 5.3, percebe-se que todos mantiveram o mesmo comportamento. Em função deste comportamento, conclui-se que em termos de probabilidade de bloqueio, para que não seja ultrapassado o limite aceitável (10%), o número máximo de requisições na matriz de tráfego varia de acordo com a topologia física da rede.

Analisando-se ainda as figuras 5.10 e 5.13, nota-se que a metodologia desenvolvida nesta tese proporciona uma redução no número de comprimentos de onda ativos de 57,14% e 60% para as redes NSFNET e GEANT2, respectivamente. Este é um fato bastante impactante não somente na redução do efeito XPM, mas também na redução dos custos com equipamentos (CapEx) e operacionais (OpEx), assim como no consumo energético da rede.

### *5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS*

Neste capítulo foi descrita a ferramenta de planejamento de redes ópticas, assim como os módulos implementados para a aplicação da estratégia metodológica proposta no capítulo 4. Foram descritos ainda os cenários utilizados nas simulações, estes cenários foram definidos de forma que representassem a situação real das redes ópticas de transporte, principalmente em termos de distância entre nós, e desta forma tornou-se possível obter resultados mais próximos da realidade. Foram apresentados também, dois estudos de caso para validação da metodologia proposta.

As contribuições da estratégia metodológica proposta nesta tese possuem um caráter de ineditismo, e efetivamente são propostas que vão no sentido de implementar uma estratégia de planejamento de redes ópticas, bem como ampliar a capacidade de aplicação em problemas do “mundo real”, utilizando modelos de inteligência computacional como métodos de otimização híbridos.

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1. CONSIDERAÇÕES DA TESE

Neste trabalho foram apresentados diversos estudos relacionados ao processo de roteamento e atribuição de comprimento de onda, em que foram propostos diferentes algoritmos de RWA que levem em consideração penalidades impostas pela camada física, a fim de garantir a qualidade do sinal óptico à saída da fibra óptica. Porém, nesta tese considerou-se que o processo de roteamento será resolvido pelo algoritmo de *Suurballe*, e desta forma a proposta resumiu-se em solucionar o processo de atribuição de comprimento de onda, o algoritmo de WA aqui proposto, considera a degradação do sinal óptico gerada pelo efeito XPM. Para estimar a variância normalizada induzida pelo efeito XPM, foi utilizado um modelo analítico conhecido com Bombeio-Sonda, desenvolvido em [58].

A metodologia híbrida proposta neste trabalho foi baseada em coloração de grafo e algoritmo genético, e apresenta uma solução próxima da ideal para o problema de WA. O processo de otimização desenvolvido tem a função de encontrar a ordem de ativação dos canais na grade de comprimentos de onda, de forma que seja reduzido o efeito XPM. Este processo de otimização é flexível e pode ser estendido para incorporar outras deficiências de camada física, fazendo com que o AG torne-se ainda mais eficiente.

Os resultados do AG mostraram a criação de várias listas contendo as melhores soluções em termos de probabilidade de bloqueio. Cada lista criada na fase *off-line* foi gerada por uma matriz de tráfego diferente, e podem ser utilizadas na fase de operação de rede, de acordo com o estado atual da rede. Em todos os casos apresentados no capítulo 5, verificou-se que a lista gerada pelo AG apresentou melhores resultados do que o algoritmo *First-Fit* e o algoritmo Coloração de Grafo. No entanto, em certas situações, o algoritmo Coloração de Grafo proporciona resultados satisfatórios sem a necessidade de execução do AG. Neste trabalho foi possível demonstrar a aplicabilidade da inteligência computacional e dos algoritmos bio-inspirados para solucionar diferentes problemas de otimização envolvidos no

projeto de redes.

## 6.2. CONTRIBUIÇÕES E COMPROVAÇÃO DA HIPÓTESE

A hipótese desta tese é de que a metodologia híbrida proposta seja utilizada para fins de planejamento de rede óptica de transporte, e possa auxiliar na tomada de decisão dos operadores destas redes, no que concerne à sequência de atribuição de comprimentos de onda em um determinado cenário de rede, objetivado a redução do efeito XPM.

Desta forma, são entendidas como principais contribuições desta tese, as quais comprovam e certificam as premissas da hipótese:

- Concepção de uma estratégia inovadora para planejamento e avaliação de desempenho de redes ópticas, a partir de um processo de otimização baseado em métodos analíticos e metaheurísticos para apoio ao processo de tomada de decisão;
- Inclusão do modelo analítico que estima a variância normalizada induzida pelo efeito XPM na Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas, tornando-a capaz de ser utilizada em cenários onde os efeitos não lineares estão presentes;
- Desenvolvimento de um algoritmo genético capaz de encontrar a ordem de ativação na grade de comprimentos de onda que atenda a restrição de variância normalizada do efeito XPM, proporcionando a descoberta de cenários otimizados para fins de planejamento;
- Desenvolvimento do *Front-End* da Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas, propiciando a utilização de diferentes topologias de rede, assim como facilitando a configuração dos parâmetros da fibra óptica, a geração de demandas e a criação de portfólios de equipamentos;
- Realização de simulações em cenários próximos da situação real em termos de distância entre nós, para validação dos preceitos fundamentais da proposta;
- Auxílio aos operadores de redes ópticas de transporte para que possam planejar/antever o comportamento dos serviços que serão oferecidos sobre a infraestrutura de rede existente, evitando assim, possíveis gargalos nos mais variados cenários.

### 6.3. DIFICULDADES ENCONTRADAS

Cabe ressaltar que ao longo do desenvolvimento da tese foram encontradas dificuldades para a realização deste trabalho, as quais serão apresentadas com o objetivo de orientar pesquisadores e estudantes que venham a utilizar os conhecimentos disponíveis neste trabalho.

As dificuldades encontradas foram decorrentes de diversos fatores, entre os quais se destacam:

- A existência de uma grande variedade de penalidades de camada física que degradam o sinal óptico ao longo do caminho de transmissão, como pôde ser observado na literatura. Portanto, foi necessário realizar um levantamento bibliográfico muito complexo, para que se pudesse embasar de forma satisfatória a proposta.
- O estudo do formalismo matemático próprio do método utilizado para estimar a degradação do sinal óptico.
- A compreensão da codificação de diversos simuladores de redes ópticas, como por exemplo, a Ferramenta de Planejamento de Redes Ópticas desenvolvida no LabTel/UFES.
- A pesquisa de diversas técnicas de Inteligência Artificial.
- A implementação e os testes dos módulos: Algoritmo Genético, Restrição Não Linear e *Front-End*, assim como algumas alterações na Ferramenta de Planejamento.
- A montagem dos cenários de simulação demandaram muito tempo, principalmente antes da criação do módulo *Front-End*, pois os arquivos de entrada eram construídos manualmente.
- Durante as simulações, os cenários montados consumiram bastante tempo de execução, pois o espaço de busca por soluções é muito extenso;

De forma geral, os obstáculos encontrados não estão limitados ao estudo do formalismo matemático, mas também, à implementação dos módulos e dos cenários.

Ao optar-se por trabalhar com uma metodologia híbrida para solução de um problema inerente ao processo de atribuição de comprimento de onda, de modo a definir propostas e objetivos em potencial a serem trabalhados, de imediato os seguintes aspectos são enfrentados: o estudo exaustivo da literatura e trabalhos dos grupos de pesquisa existentes; a conseguinte análise das tendências futuras da área e do mercado, identificando as necessidades existentes; e a necessidade de se propor e introduzir contribuições que sejam significativas em uma área tão abrangente.

#### *6.4. DESDOBRAMENTO E TRABALHOS FUTUROS*

A partir das contribuições e dificuldades aqui elencadas e pela própria natureza do processo de construção de um trabalho científico, há sempre margem para desdobramentos dos estudos executados, aprimoramentos e aplicações que transcendem o escopo das investigações realizadas. Por essas razões, alguns temas podem ser apontados como sugestões de trabalhos futuros às pesquisas que fundamentam esta tese, os quais são pontuados a seguir:

- Criar um algoritmo genético multiobjetivo capaz de otimizar conjuntamente a XPM e a dispersão residual;
- Utilizar diferentes tipos de Algoritmo Evolucionário, para obter melhores resultados e com menor esforço computacional;
- Adaptar o módulo Restrição Não Linear para que seja possível analisar de que forma a utilização da rota de proteção influencia na probabilidade de bloqueio, visto que os resultados apresentados anteriormente foram contabilizados levando em conta exclusivamente a rota principal;
- Adaptar o módulo Restrição Não Linear tornando-o capaz de analisar a degradação do sinal óptico gerada por outros efeitos não lineares, como por exemplo o efeito FWM;
- Otimizar o sistema de gerenciamento de dispersão, de forma que seja equilibrada a degradação gerada pelos efeitos XPM e FWM;
- Realizar uma nova análise do nível de qualidade dos caminhos ópticos existentes, sempre que um novo caminho óptico for estabelecido, pois a ativação de novos canais na grade de comprimento de onda pode tornar o valor de  $\sigma_{n,max}^2$  inaceitável para os caminhos ópticos existentes;

- Alterar o processo de WA, para que os comprimentos de onda que possuem menor dispersão residual (dentre aqueles que serão ativados na grade) sejam atribuídos para os caminhos ópticos longos, e os que possuem maior dispersão residual sejam atribuídos aos caminhos ópticos curtos.

#### *6.5. ARTIGO COMPLETO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO EM PERIÓDICO*

André M. L. Miranda, Fabio de O. Lima, Helder R. de O. Rocha, Nadamudi Vijaykumar, Carlos R. L. Francês, Marcelo E. V. Segatto and João C. W. A. Costa, “Wavelength Assignment Using a Hybrid Evolutionary Computation to Reduce Cross-Phase Modulation”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 13, n. 1, p. 1-15, June 2014.

#### *6.6. PARTICIPAÇÃO EM PROJETO DE PESQUISA*

Aplicação de Técnicas de Computação Inteligente e de Mineração de Dados para o Gerenciamento Dinâmico de Qualidade de Serviço em Redes Ópticas, cujo cerne se baseia nas ideias propostas nesta tese. Financiador: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Pará – FAPESPA. 2010 – 2014.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Jirattigalachote, **Provisioning Strategies for Transparent Optical Networks Considering Transmission Quality, Security, and Energy Efficiency**, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Mar. 2012.
- [2] B. Ramamurthy, H. Feng, D. Datta, J. Heritage, B. Mukherjee, **Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks**, in: Optical Fiber Communication Conference and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OFC/IOOC), v. 1, p. 59-61, Feb. 1999.
- [3] H. Leslie, M. Ruckelshaus, I. Ball, S. Andelman and H. Possingham, **Using Siting Algorithms in the Design of Marine Reserve Networks**. Journal of Ecological Applications, v. 13, n.1, p. 185-198, Feb. 2003.
- [4] S. Russell, P. Norvig, **Artificial Intelligence: A Modern Approach**, Prentice Hall, 2004.
- [5] D. A. R. Chaves, **Planejamento de Redes Ópticas de Alta Capacidade por Otimização Multiobjetiva**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Março de 2012.
- [6] F. Dressler, T. Suda, I. Carreras, J. Crowcroft, M. Murata, **Guest editorial bio-inspired networking**, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, v. 28, n. 4, p. 521-523, May 2010.
- [7] P. Lio, D. Verma, **Biologically inspired networking [guest editorial]**, IEEE Network, v. 24, n. 3, p. 6-13, May-June 2010.
- [8] A. Cartaxo, **Cross-phase modulation in intensity modulation-direct detection WDM systems with multiple optical amplifiers and dispersion compensators**, IEEE Journal of Lightwave Technology, v. 17, n. 2, p. 178-190, Feb. 1999.
- [9] N. Sambo, et al., **Modeling and distributed provisioning in 10–40–100-Gb/s multirate wavelength switched optical networks**, IEEE Journal of Lightwave Technology, v. 29, issue 9, p. 1248-1257, 2011.
- [10] L. Velasco, et al., **Statistical Approach for Fast Impairment-Aware Provisioning in Dynamic All-Optical Networks**, IEEE Journal of Optical Communications and Networking, v. 4, v. 2, Feb. 2012.
- [11] W. Lin, T. Hahn, R. S. Wolff, B. Mumey, **A distributed impairment aware QoS framework for all-optical networks**, Elsevier Journal of Optical Switching and Networking, p. 56-67, 2011.

- [12] F. Fang, X. Zheng, H. Zhang, **Performance study of distributed wavelength reservation protocols within both single and multi-fiber WDM networks**, *Photonic Network Communications*, v. 6, n. 2, p. 95-103, 2003.
- [13] A. Adhya, D. Datta, **Lightpath Topology Design for Wavelength-Routed Optical Networks in the Presence of Four-Wave Mixing**, *IEEE Journal of Optical Communications and Networking*, v. 4, n. 4, p. 314-325, Apr. 2012.
- [14] F. Fidler, P. J. Winzer, M. K. Thottan, K. Bergman, **Impairment-Aware Optical Networking Using Cross-Layer Communication**, *IEEE Journal of Optical Communications and Networking*, v. 5, n. 2, p. 144-158, Feb. 2013.
- [15] J. Zhao, S. Subramaniam, M. Brandt-Pearce, C. L. Brown, **Inter-domain QoT-aware RWA for Translucent Optical Networks**, *IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, San Diego, CA, USA, Jan. 2013.
- [16] C. J. A. Bastos-Filho, D. A. R. Chaves, F. S. F. e Silva, H. A. Pereira, J. F. Martins-Filho, **Wavelength Assignment for Physical-Layer-Impaired Optical Networks Using Evolutionary Computation**, *IEEE Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 3, p. 178-188, Mar. 2011.
- [17] D. Monoyios, K. Vlachos, **Multiobjective Genetic Algorithms for Solving the Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment Problem**, *IEEE Journal of Optical Communications and Networking*, v. 3, n. 1, p. 40-47, Jan. 2011.
- [18] U. Bhanja, S. Mahapatra, R. Roy, **FWM aware evolutionary programming algorithm for transparent optical networks**, *Photonic Network Communications*, v. 23, issue 3, p. 285-299, June 2012.
- [19] U. Bhanja, S. Mahapatra, R. Roy, **An evolutionary programming algorithm for survivable routing and wavelength assignment in transparent optical networks**, *Journal of Information Sciences* 222, p. 634-647, 2013.
- [20] A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, T. Wang, **A Naturally-Inspired Algorithm for Routing, Wavelength Assignment, and Spectrum Allocation in Flexible Grid WDM Networks**, *IEEE Globecom Workshop: Flexible Optical Networks*, 2012.
- [21] Y. S. Kavian, et al., **Routing and wavelength assignment in optical networks using Artificial Bee Colony algorithm**, *Optik - Int. J. Light Electron Opt.*, 2012.
- [22] C. Zhang, Z. L. Li, X. Zhang, and B. Zhang, **Two multi-objective genetic algorithms for the QoS based routing and wavelength allocation problem in WDM network**, *Optik - Int. J. Light Electron Opt.*, 2012.
- [23] A. Rubio-Largo, M. A. Vega-Rodríguez, J. A. Gómez-Pulido, J. M. Sánchez-Pérez, **A Comparative Study on Multiobjective Swarm Intelligence for the Routing and Wavelength Assignment Problem**, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, v. 42, n.6, p. 1644-1655, Dec. 2012.
- [24] C. S. Wang, C. T. Chang, **Integrated genetic algorithm and goal programming for network topology design problem with multiple objectives and multiple criteria**, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 16, n. 3, p. 680-690, June 2008.

- [25] G. Shen, R. S. Tucker, **Translucent optical networks: the way forward**, *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 2, p. 48-54, Feb. 2007.
- [26] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, **Optical Networks: A Practical Perspective**, 2a ed. Morgan Kaufmann, 2002.
- [27] H. Zang, J. P. Jue, B. Mukherjee, **A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks**, *Optical Networks Magazine*, v. 1, n. 1, p. 47-60, Jan. 2000.
- [28] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, **Lightpath Communications: An Approach to High-Bandwidth Optical WANs**, *IEEE Transactions on Communications*, v. 40, n. 7, p. 1171-1182, July 1992.
- [29] B. Mukherjee, **WDM optical communication networks: Progress and challenges**, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, v. 18, n. 10, p. 1810-1824, Oct. 2000.
- [30] B. Wen, R. Shenai, K. Sivalingam, **Routing, wavelength and time-slot-assignment algorithms for wavelength-routed optical WDM/TDM networks**, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 23, n. 9, p. 2598-2609, Sept. 2005.
- [31] N. M. Bhidé, K. M. Sivalingam, T. Fabry-Asztalos, **Routing mechanisms employing adaptive weight functions for shortest path routing in optical WDM networks**, *Photonic Network Communications*, v. 3, n. 3, p. 227-236, 2001.
- [32] Y. Huang, J. Heritage, B. Mukherjee, **Connection provisioning with transmission impairment consideration in optical WDM networks with high-speed channels**, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 23, p. 982-993, 2005.
- [33] Dijkstra, E. W. **A Note on Two Problems in Connection with Graphs**, in: *Numerische Mathematik*, v. 1, p. 269-271, 1959.
- [34] Bellman, R. **On a Routing Problem**, in: *Quarterly of Applied Mathematics*, v. 16, n. 1, p. 87-90, Abr. 1958.
- [35] Ford, L. R., Jr. **Network Flow Theory**, in: Report P-923. California: The Rand Corporation, 14 ago. 1956.
- [36] A. S. Tanenbaum, **Computer Networks**, 4a ed. Prentice Hall, 2003.
- [37] C. S. R. Murthy, M. Gurusamy, **WDM optical Networks - Concepts, Design, and Algorithms**, 1a ed. Prentice Hall, 2002.
- [38] S. Azodolmolky, M. Klinkowski, E. Marin, D. Careglio, J. S. Pareta, I. Tomkos, **A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks**, *Computer Networks*, v. 53, n. 7, p. 926-944, May 2009.
- [39] D. N. L. Fortes, **Estudo de Sistemas WDM Incluindo Compensação de Dispersão**, *Dissertação de Mestrado*, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
- [40] G. P. Agrawal, **Fiber-optic communication systems**, 3a ed. Wiley-Interscience, 2002.

- [41] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, **Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Fundamentals and Technology**, New York: Academic, 1999.
- [42] E. Desurvire, D. Bayart, B. Desthieux, S. Bigo, **Erbium-doped fiber amplifiers and device and system developments**, Wiley, 2002.
- [43] B. Chu, et al., **3.2 Tb/s (80 × 42.7 Gb/s) transmission over 20 × 100 km of non-zero dispersion fiber with simultaneous C + L band dispersion compensation**, in: Proceedings of Optical Fiber Communication Conferences, paper FC8, Mar. 2002.
- [44] G. Keiser, **Optical fiber communications**, 3a ed. McGrawHill International Editions, 2000.
- [45] V. Alwayn, **Optical network design and implementation**, CCIE No 2995. Cisco Press, 2004.
- [46] J. Zyskind, R. Barry, G. Pendock, M. Cahill, J. Ranka, **High-Capacity, ultra-long-haul networks**, in: Ivan Kaminow, Tingye Li, Optical Fiber Telecommunications IV B, Academic Press, p. 198-231, 2002.
- [47] G. P. Agrawal, **Nonlinear fiber optics**, Academic Press, 2001.
- [48] F. Forghieri, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, **Fiber Nonlinearities and Their Impact on Transmission Systems**, in: Ivan Kaminow, Tingye Li, Optical Fiber Telecommunications III A, San Diego, CA, Academic Press, p. 196-254, 1997.
- [49] H. Kogelnik, R. M. Jopson, L. E. Nelson, **Polarization-Mode Dispersion**, in: Ivan Kaminow, Tingye Li, Optical Fiber Communications IV B, Academic Press, p. 725-861, 2002.
- [50] P. M. A. Monteiro, **Redes Ópticas Avançadas Coerentes NG-PON2**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática - Instituto de Telecomunicações - Universidade de Aveiro, Aveiro - Portugal, 2010.
- [51] A. Marsden, A. Maruta, K. Kitayama, **Routing and wavelength assignment encompassing FWM in WDM lightpath networks**, in: Proceedings of IFIP ONDM 2008, Vilanova i la Geltrú, Spain, Mar. 2008.
- [52] P. Bayvel, R. Killey, **Nonlinear Optical Effects in WDM Transmission**, in: Ivan Kaminow, Tingye Li, Optical Fiber Telecommunications IV B, Academic Press, p. 611-641, 2002.
- [53] S. Song, C. Allen, K. Demarest, R. Hui, **Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers**, Journal of Lightwave Technology, v. 17, n. 11, p. 2285-2290, Nov. 1999.
- [54] H. A. Pereira, **Análise sistêmica das penalidades de ruído nas redes ópticas transparentes**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Novembro de 2007.

- [55] C. M. B. Lopes, T. C. M. de B. Carvalho, E. A. de Souza, **FWM Constraints Management for Lightpath Establishment in GMPLS Networks**, Journal of Lightwave Technology, v. 29, n. 18, p. 2774-2779, Sept. 2011.
- [56] U. de S. P. Filho, **Influência da Modulação Cruzada de Fase Em Algoritmos para CAC/RWA Dinâmico**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Dezembro de 2007.
- [57] A. Cartaxo, **Impact of modulation frequency on cross-phase modulation effect in intensity modulation-direct detection WDM systems**, IEEE Photon, Technol. Lett., v. 10, n. 9, p. 1268-1270, Sept. 1998.
- [58] R. S. Luís, A. Cartaxo, **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, March, 2005.
- [59] A. Cartaxo, **Small-signal analysis for nonlinear and dispersive optical fibers, and its application to design of dispersion supported transmission systems with optical dispersion compensation**, Proc. Inst. Elect. Eng. – Optoelectron, v. 146, p. 213-222, Oct. 1999.
- [60] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J.P. Heritage, B. Mukherjee, **Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks**, Journal of Lightwave Technology, v. 17, n. 10, p. 1713-1723, October 1999.
- [61] A. Singal, R. S. Kaler, **Performance Evaluation of Algorithms for Wavelength Assignment in Optical Ring Network**, in: Second International conference Advanced Computing & Communication Technologies (ACCT), p. 161-166, Jan. 2012.
- [62] J. W. Suurballe, R. E. Tarjan, **A Quick Method for Finding Shortest Pairs of Disjoint Paths**, Networks, v. 14, n. 2, p. 325-336, 1984.
- [63] E. Karami, S. Glisic, **Joint Optimization of Scheduling and Routing in Multicast Wireless Ad Hoc Networks Using Soft Graph Coloring and Nonlinear Cubic Games**, IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 60, n. 7, p. 3350-3360, Sept. 2011.
- [64] I. Méndez-Díaz, P. Zabala, **A cutting plane algorithm for graph coloring**, Journal of Discrete Applied Mathematics, v. 156, n. 2, p. 159-179, January 2008.
- [65] C. A. J. da Rocha, **Estratégia de Otimização para a Melhoria da Interpretabilidade de Redes Bayesianas: Aplicações em Sistemas Elétricos de Potência**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Pará (UFPA), Belém, Março de 2010.
- [66] International telecommunication union, **Optical fibers, cables and systems**, Geneva, 2009.
- [67] M. Melanie, **An Introduction to Genetic Algorithms**, Massachusetts: MIT Press, 1999.
- [68] El-Sayed M. El-Alfy, S. N. Mujahid, S. Z. Selim, **A Pareto-based hybrid multiobjective evolutionary approach for constrained multipath traffic engineering optimization in MPLS/GMPLS networks**, Journal of Network and Computer Applications, Feb. 2013.

- [69] O. S. Rezende, **Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações**, Manole, 2003.
- [70] N. Costa, A. Cartaxo, **Influence of the Channel Number on the Optimal Dispersion Map Due to XPM in WDM Links**, *Journal of Lightwave Technology*, v. 26, n. 22, p. 3640-3649, Nov. 2008.
- [71] K. Tanizawa, J. Kurumida, M. Takahashi, T. Yagi, S. Namiki, **In-Line Polarization-Insensitive Parametric Tunable Dispersion Compensator for WDM Signals**, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, v. 30, issue 11, p. 1750-1756, 2012.