

**MODELOS E ALGORITMOS PARA O PROJETO  
DE REDES ÓPTICAS WDM**



FILLIPE GUSTAVO BRANDÃO

**MODELOS E ALGORITMOS PARA O PROJETO  
DE REDES ÓPTICAS WDM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Ciência da Computação como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

ORIENTADOR: GERALDO ROBSON MATEUS

Belo Horizonte  
Setembro de 2010

© 2010, Fillipe Gustavo Brandão.  
Todos os direitos reservados.

Brandão, Fillipe Gustavo  
B817m Modelos e algoritmos para o projeto de redes  
ópticas WDM / Fillipe Gustavo Brandão. — Belo  
Horizonte, 2010  
xxii, 74 f. : il. ; 29cm

Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de  
Minas Gerais. Departamento de Ciência da  
Computação

Orientador: Geraldo Robson Mateus

1. Computação - Teses. 2. Otimização - Teses.  
3. Redes - Teses. I. Título. II. Orientador

CDU 519.6\*61(043)





UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Modelos e algoritmos para o projeto de redes ópticas WDM

**FILLIPE GUSTAVO BRANDÃO**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

PROF. GERALDO ROBSON MATEUS - Orientador  
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

PROF. RICARDO MARTINS DE ABREU SILVA  
Departamento de Ciência da Computação - UFLA

PROF. RODNEY REZENDE SALDANHA  
Departamento de Engenharia Elétrica - UFMG

Belo Horizonte, 10 de setembro de 2010.

*A meus pais, Francisco e Gilma, pelo amor e por tudo que me ensinam.*



# Agradecimentos

Agradecer a todos que ajudaram no desenvolvimento desta dissertação não é uma tarefa trivial. O maior perigo que se coloca para o agradecimento seletivo não é decidir quem incluir, mas decidir quem não mencionar. Então, a meus amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com sua amizade e com sugestões efetivas e não efetivas para a realização deste trabalho, gostaria de expressar minha profunda gratidão.

Se devo ser seletivo, então é melhor começar do início. Meu maior agradecimento é direcionado a minha família pelo apoio dado todos estes anos, desde a pré-escola até hoje. Agradeço aos meus pais por terem se esforçado ao máximo para que eu pudesse me dedicar totalmente aos estudos. As minhas irmãs que de uma forma ou de outra me fazia rir em momentos tristes e difíceis. Agradeço a minha AVÓ que veio a falecer no meio do meu Mestrado mas que mesmo não estando presente fisicamente pude sentir de certa que você estava ao meu lado em todos os momentos que precisei.

Agradeço também a minha querida namorada Aline por ter me apoiado em momentos muito difíceis durante a construção desta dissertação de Mestrado. Por ter me aguentado em momentos de estresse e por me dizer palavras que queria escutar e que me motivaram no término deste curso. Obrigado LINDA!

Agradeço ao Professor Dr. Geraldo Robson Mateus pelo qual tenho uma dívida de gratidão incalculável principalmente por me aceitar como orientado em um momento que estive por sair do Mestrado. Agradeço por ter a capacidade de me fazer novamente ter prazer em pesquisar. Foi uma honra poder ter sido seu orientado.

Por fim e não menos importante agradeço a Deus por tudo que tem acontecido em minha vida e ter colocado pessoas muito especiais a minha volta.



*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode  
começar agora e fazer um novo fim.”*

(Chico Xavier)



# Resumo

Dentre os principais problemas relacionados a redes ópticas WDM, neste trabalho tem-se o foco sobre o Problema de Roteamento e o Problema de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda (RWA). Em ambos os casos leva-se em conta a questão da sobrevivência da rede, ou seja, é adicionada uma proteção a rede afim de torná-la mais confiável em caso de falhas.

Para o Problema de Roteamento são inicialmente apresentados dois modelos e a diferença entre eles é basicamente o elemento que recebe a proteção, os enlaces ou nós da rede. Ainda de forma a adicionar novas métricas e características aos modelos, foram inseridas mais funções objetivo transformando-os em multi-objetivo. Mais especificamente os modelos contem três critérios a serem minimizados, sendo o primeiro o número de enlaces utilizados no transporte, o segundo é o número de requisições rejeitadas e o terceiro é balanceamento de carga na rede. Por ser um problema de elevada complexidade, neste trabalho é proposto um algoritmo genético Multi-objetivo baseado na meta-heurística NSGA-II.

Assim como no Problema de Roteamento, para o Problema de RWA são apresentados primeiramente dois modelos. O primeiro tenta resolver o problema de RWA aplicando uma proteção sobre os enlaces da rede. Já no segundo criou-se uma proteção sobre os nós. Por ser um problema de difícil solução devido à complexidade, foi também desenvolvido um algoritmo genético para tratar o problema de RWA com proteção nos enlaces e o resultado comparativo entre as soluções obtidas via heurística e CPLEX mostra que as soluções ficam bem próximas demonstrando assim a qualidade do algoritmo proposto. Por fim foi proposto um modelo multi-objetivo para o Problema de RWA, com o objetivo de agregar novas métricas e características ao modelo mono-objetivo.

**Palavras-chave:** Otimização, Redes Ópticas, Roteamento, Proteção, Alocação de comprimentos de onda, Algoritmos genéticos.



# Abstract

This work focuses on the Routing Problem and the Problem of Routing and Wavelength Assignment (RWA), both are among the main problems in WDM optical networks. They take the network survivability. A protection added to the network in order to make it more reliable in case of failures.

Initially, two models are presented for the Routing Problem. The difference between them is basically the element that receives the protection, links or network nodes. In order to add new metrics and features to the models, more objective functions are inserted transforming them into multi-objective. More specifically the models contain three criteria to be minimized, the first being the number of links used in the transportation, the second is the number of rejected requests and the third is the load balancing in the network. It is a problem of high complexity and this work proposes a multi-objective genetic algorithm based on a meta-heuristics NSGA-II.

For the RWA problem two models are also proposed. The first attempt is to solve the problem of RWA applying a protection on the links of the network. In the second, a protection is defined over nodes. Because it is a difficult problem due to complexity, a genetic algorithm is developed to treat the RWA problem with protection on the links and the comparisons between the solutions obtained via heuristic and CPLEX show that the solutions are very close. The results show the quality of the algorithm proposed. Finally a third model is proposed for the multi-objective RWA problem, with the goal of adding new features and metrics to the mono-objective model.

**Keywords:** Optimization, optical networks, Routing, Protection, Wavelength Assignment, Genetic Algorithms.



# Lista de Figuras

2.1	Rede WDM com seus caminhos ópticos . . . . .	8
2.2	Exemplo de estabelecimento de conexão com e sem conversão de comprimento de onda . . . . .	14
2.3	Proteção por rota, enlace e sub-rota, adaptada de [Lee & Mukherjee, 2004]	20
2.4	Espaço de valores das funções objetivos para os problemas de otimização mono-objetivo e multi-objetivo . . . . .	22
2.5	Conjunto de soluções de um problema multi-objetivo . . . . .	23
2.6	Conjunto de soluções do exemplo, explicitando os conflitos entre os dois objetivos existentes . . . . .	24
4.1	Algoritmo Genético clássico . . . . .	36
4.2	Ilustração do <i>crowding-distance-sorting</i> . . . . .	40
4.3	Definição dos indivíduos da próxima geração . . . . .	40
4.4	Ciclo da meta-heurística NSGA-II . . . . .	41
4.5	Exemplo - Topologia Mesh . . . . .	42
4.6	Representação genética utilizada no algoritmo . . . . .	43
4.7	Cruzamento do Algoritmo Genético proposto . . . . .	45
4.8	Cruzamento do Algoritmo Genético proposto . . . . .	46
5.1	Topologias das redes utilizadas nos testes . . . . .	50
5.2	Gráfico comparativo entre o valor da função $f_1$ obtida através do CPLEX e a obtida pelo Algoritmo Genético para o Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces . . . . .	55
5.3	Gráfico comparativo entre o valor da função $f_2$ obtida através do CPLEX e a obtida pelo Algoritmo Genético para o Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces . . . . .	57

5.4	Gráfico comparativo entre o valor da função $f_3$ obtida através do CPLEX e a obtida pelo Algoritmo Genético para o Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces . . . . .	58
5.5	Gráfico comparativo entre o valor obtido através do CPLEX e o obtido pelo Algoritmo Genético para o problema de RWA com proteção nos enlaces . .	66

# Lista de Tabelas

4.1	Requisições . . . . .	41
4.2	Possíveis valores de genes . . . . .	42
4.3	Valores de possíveis indivíduos . . . . .	43
5.1	Características das topologias . . . . .	50
5.2	Tabela de resultados para o Problema de roteamento com proteção nos enlaces	52
5.3	Tabela de resultados para o Problema de roteamento com proteção nos nós	54
5.4	Soluções utópicas do Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces obtidas via CPLEX e algoritmo genético respectivamente . . . . .	56
5.5	Resultados do modelo referente ao problema de RWA com proteção nos enlaces . . . . .	60
5.6	Resultados via CPLEX para o Problema de RWA com proteção nos nós . .	61
5.7	Tabela de resultados obtidos pela execução do modelo referente ao problema de RWA multi-objetivo com proteção nos enlaces . . . . .	62
5.8	Tabela de resultados obtidos pela execução do modelo referente ao problema de RWA multi-objetivo com proteção nos enlaces . . . . .	63
5.9	Tabela comparativa entre os resultados do CPLEX e o algoritmo genético para o problema de RWA com proteção nos enlaces . . . . .	65



# Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumo</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	3
1.2 Definição do Problema . . . . .	3
1.3 Objetivos . . . . .	3
1.4 Contribuições . . . . .	4
1.5 Organização do texto . . . . .	5
<b>2 Revisão de Literatura e Conceitos Básicos</b>	<b>7</b>
2.1 Tecnologia WDM . . . . .	7
2.2 Projeto de Redes Ópticas . . . . .	9
2.3 Roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA) . . . . .	10
2.3.1 Introdução . . . . .	10
2.3.2 Redes Ópticas Opacas e Transparentes . . . . .	13
2.3.3 Algoritmos de roteamento . . . . .	14
2.3.4 Algoritmos de Alocação de comprimento de onda . . . . .	16
2.3.5 Algoritmos para o Problema de RWA . . . . .	17
2.4 Proteção em Redes Ópticas WDM . . . . .	18
2.5 Conceitos Iniciais sobre Otimização Multi-Objetivo . . . . .	21
2.5.1 Conjunto Pareto-Ótimo . . . . .	22

<b>3</b>	<b>Modelos Matemáticos</b>	<b>25</b>
3.1	Problema de Roteamento com proteção . . . . .	25
3.1.1	Caracterização de Variáveis e parâmetros . . . . .	26
3.1.2	Formulações Matemáticas . . . . .	26
3.2	Problema de RWA com proteção . . . . .	29
3.2.1	Definições . . . . .	30
3.2.2	Formulações Matemáticas . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Abordagens Heurísticas</b>	<b>35</b>
4.1	Introdução . . . . .	35
4.2	Algoritmo Genético Multi-objetivo para o Problema de Roteamento com proteção nos enlaces . . . . .	37
4.2.1	NSGA-II . . . . .	37
4.2.2	Representação Genética . . . . .	41
4.2.3	População Inicial . . . . .	43
4.2.4	Seleção . . . . .	44
4.2.5	Cruzamento . . . . .	44
4.3	Algoritmo Genético Mono-objetivo para o Problema de RWA com pro- teção nos arcos . . . . .	45
4.3.1	Representação Genética e População Inicial . . . . .	46
4.3.2	Função <i>Fitness</i> . . . . .	47
4.3.3	Seleção e Cruzamento . . . . .	47
4.3.4	Mutação . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Resultados Numéricos</b>	<b>49</b>
5.1	Problema de Roteamento com proteção . . . . .	49
5.1.1	Resultados do modelo . . . . .	50
5.1.2	Resultado comparativo do Algoritmo Genético . . . . .	53
5.2	Problema de RWA com proteção . . . . .	57
5.2.1	Resultado do modelo mono-objetivo . . . . .	57
5.2.2	Resultado do modelo Multi-objetivo . . . . .	60
5.2.3	Resultado do Algoritmo Genético Mono-objetivo . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Considerações Finais e Trabalhos Futuros</b>	<b>67</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	68
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>69</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Observou-se nos últimos anos um grande crescimento da área de telecomunicações em geral. Em virtude disto assiste-se ao aumento do número de conexões e do tráfego de dados, de modo a oferecer uma gama de serviços; além de conexões velozes e de baixo custo de acesso. Sobre este contexto surgem as redes ópticas, um novo paradigma em telecomunicações, providas de uma grande largura de banda com baixa taxa de perda e custo reduzido.

Entre os benefícios das redes ópticas, destaca-se, a capacidade de comportar vários canais de transmissão em uma única fibra através da multiplexação por divisão de comprimento de onda - WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Na WDM, o espectro óptico de transmissão é dividido em várias faixas de comprimento de onda, de modo que cada uma delas funciona como um canal separado de comunicação capaz de operar na velocidade de "pico" do processamento eletrônico [Patrocínio, 2005]. Diante deste cenário e tecnologias surgem diversos desafios, principalmente para maior aproveitamento dessa largura de banda, culminando em um empenho em pesquisas a fim de desenvolver técnicas com o intuito de acomodar as demandas de tráfego sobre os canais.

Uma questão importante na implementação não apenas das redes ópticas, mas de qualquer rede de comunicação em geral é o conceito de SLA (*Service Level Agreement*) ou Acordo de Nível de Serviço . O SLA trata de um acordo, explícito ou não, que as redes devem oferecer para que as aplicações ou demandas da rede possam ser atendidas de forma adequada.

Diante da definição de SLAs, a qual exige que a rede de comunicação satisfaça requisitos mínimos para seu funcionamento, surge um conceito bastante utilizado, denominado QoS (*Quality of Service*). O QoS designa a capacidade de fornecer um serviço nas redes conforme às exigências em determinados quesitos como por exemplo:

requisições atendidas com sucesso, atraso na transmissão dos dados, disponibilidade da rede, entre outros. Com a implantação de QoS, é possível oferecer maior garantia e segurança para aplicações avançadas, uma vez que o tráfego destas aplicações passa a ter prioridade em relação a aplicações tradicionais. Assim pode-se observar que independentemente de quais e quantos indicadores são utilizados sobre uma rede de comunicação, a qualidade e confiabilidade da mesma depende diretamente da satisfação de tais indicadores.

Ligados ao problema da acomodação das demandas em uma rede usando sistemas WDM, pode-se citar os seguintes problemas e características:

- Problema de Roteamento: consiste em definir uma ou mais rotas para atender a demanda ou requisição de cada par origem-destino.
- Problema de Roteamento e Alocação dos Comprimentos de Onda: Este problema possui basicamente dois objetivos, (i) acomodar os caminhos ópticos provenientes do projeto da topologia virtual sobre a topologia física e (ii) alocar os comprimentos de onda a cada enlace, a fim de que um comprimento de onda não seja alocado a dois caminhos ópticos em um mesmo enlace.
- Projeto da Topologia Virtual - VTD (*Virtual Topology Design*): Consiste basicamente em uma escolha dos caminhos ópticos da rede. Estes são definidos como conexões ponto-a-ponto que são transparentes aos nós intermediários. Isto é, para estas conexões não é realizado processamento eletrônico para fins de roteamento em tais nós.
- Problema de *Grooming* de Tráfego - TGP (*Traffic Grooming Problem*): O TGP é definido como o problema de combinar demandas de baixa velocidade em canais de transmissão de alta capacidade. Em geral considera-se uma configuração de caminhos ópticos pré-estabelecidas e o TGP consiste em combinar o tráfego dentro destes caminhos [Patrocinio, 2005; Resendo, 2008].
- Sobrevivência da rede: Pode ser vista como a proteção às redes WDM contra possíveis falhas de um elemento das mesmas, o que pode ocasionar a perda de uma grande quantidade de tráfego [Resendo, 2008]. Existem basicamente dois mecanismos para se tratar falhas na rede, por proteção ou restauração. Se os recursos para a sobrevivência são pré-computados e reservados enquanto a conexão estiver ativa esse mecanismo é chamado de proteção. Por outro lado se a estratégia for calcular a rota para a sobrevivência da rede após a falha, é chamado de restauração [Lee & Mukherjee, 2004].

## 1.1 Motivação

As redes ópticas têm sido amplamente exploradas tanto em ligações de longa distância (*Wide Area Networks - WANs*) quanto em grandes áreas metropolitanas (*Metropolitan Area Networks - MANs*) principalmente na interligação das centrais das operadoras de telecomunicação. Contudo, a necessidade crescente de uma melhora na qualidade de serviço (Quality of Service – QoS ) prestado aos usuários finais – dada a ampla variedade de perfis de tráfego hoje existentes – leva a crer que, mesmo que não se adote em um futuro próximo o uso das fibras ópticas nas redes locais, elas estarão cada vez mais próximas dos usuários finais de modo a viabilizar o transporte do tráfego crescente que é gerado por estes. Deve-se, porém, mencionar problemas tais como a dificuldade de emenda das fibras, além do fato de não serem dobráveis, como fatores que não só contribuem para o aumento de seu custo de instalação, mas que também podem vir a inviabilizar sua implantação em determinados trajetos (principalmente em redes locais).

Então a motivação deste presente trabalho advém primeiro de fatores conjunturais como os citados anteriormente, os quais estão em um processo evolutivo acelerado visto a necessidade de se ter redes com grande banda e principalmente que forneçam elementos de qualidade de serviço.

## 1.2 Definição do Problema

Este trabalho trata basicamente dois problemas relacionados ao projeto de redes ópticas. O primeiro é o problema de roteamento em uma rede óptica com a adição de uma proteção, com a finalidade de reduzir a perda de dados ocasionadas por falha em algum enlace ou nó. O segundo problema é denominado RWA, no qual além de se rotear deve-se alocar os comprimentos de onda necessários para o transporte. Neste segundo também se aplica a proteção nos enlaces ou nos nós.

As requisições de comunicação na rede consistem de pares origem-destino, além de estar associado as mesmas um valor de banda requerida. Assim em ambos os problemas já citados, busca-se transmitir tais requisições de sua origem ao destino, através das rotas definidas, havendo a reserva de banda nos enlaces a serem utilizados.

## 1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor e avaliar modelos e algoritmos que tratam tanto o Problema de Roteamento em redes ópticas com proteção quanto o Problema de

RWA também com proteção. Entre os objetivos específicos do desenvolvimento deste trabalho, pode-se citar os seguintes:

- Propor e testar modelos para o Problema de Roteamento em redes ópticas com proteção.
- Desenvolver e testar um algoritmo Genético Multi-objetivo baseado na metaheurística NSGA-II, afim de resolver o Problema de Roteamento com proteção nos enlaces.
- Propor e testar modelos, um com proteção nos arcos e outro nos nós, para o Problema de RWA com proteção.
- Elaborar e testar um algoritmo genético para o Problema de RWA mono-objetivo com proteção nos enlaces.

## 1.4 Contribuições

A partir dos objetivos apresentados na seção anterior, cumpre destacar as principais contribuições geradas pela realização do presente trabalho. Sendo assim, pode-se citar as seguintes contribuições:

- (i) Para o Problema de Roteamento foram gerados e testados quatro modelos. O primeiro trata o problema com apenas um objetivo e insere uma proteção nos enlaces. O segundo é uma variação do primeiro no qual substitui-se a proteção nos enlaces pela proteção nos nós. O terceiro trata o problema de roteamento multi-objetivo com proteção nos enlaces e por fim o último modelo como no caso do segundo troca a proteção nos enlaces pela proteção nos nós.
- (ii) Foi desenvolvido um algoritmo genético multi-objetivo baseado na meta-heurística NSGA-II para o problema de roteamento em redes ópticas multi-objetivo com proteção nos enlaces. Foram feitos testes utilizando as mesmas instâncias do item (i).
- (iii) Proposição de três modelos para o Problema de RWA com proteção sendo dois deles mono-objetivo, um com proteção nos enlaces e outro nos nós. Por fim foi proposto um último modelo multi-objetivo com proteção nos enlaces. Todos os modelos foram testados via CPLEX.

- (iv) Foi desenvolvido um algoritmo genético para resolução do problema de RWA mono-objetivo com proteção nos enlaces. Os experimentos efetuados fizeram uso do mesmo conjunto de instâncias usado no item (iii).

## 1.5 Organização do texto

O texto deste trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo seguinte, apresenta-se a revisão de literatura dos principais problemas relacionados a Redes Ópticas. O Capítulo 3 apresenta os modelos propostos neste trabalho, referentes ao Problema de Roteamento em redes ópticas e Problema de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda. Já no Capítulo 4 são explicitadas as heurísticas implementadas, sendo a primeira relacionada ao Problema de Roteamento multi-objetivo com proteção nos enlaces e a segunda referente ao Problema de RWA mono-objetivo com proteção nos enlaces. No Capítulo 5 apresenta-se os resultados dos experimentos feitos tanto sobre os modelos quanto sobre as heurísticas implementadas. O último capítulo apresenta as conclusões obtidas durante a realização deste trabalho, juntamente com algumas propostas para trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## Revisão de Literatura e Conceitos Básicos

### 2.1 Tecnologia WDM

A Multiplexação pode ser definida como uma técnica que permite a transmissão de dois ou mais canais simultâneos por um mesmo meio de transmissão. Então em uma rede óptica, com a multiplexação, pode-se transmitir dados através de dois ou mais canais simultâneos por uma única fibra óptica.

Inicialmente, as redes ópticas utilizavam a Multiplexação por Divisão de Tempo(TDM) como técnica de multiplexação sub-utilizando assim, a enorme capacidade de transmissão das fibras ópticas. A técnica TDM divide o domínio de tempo da banda em intervalos de duração fixa. Utilizando a TDM, múltiplos sinais podem compartilhar uma determinada banda se eles não se sobrepõem no tempo [Barr & Patterson, 2001].

Com o objetivo de melhorar o aproveitamento da capacidade de transmissão das fibras ópticas, as redes ópticas passaram a usar a WDM, uma técnica de multiplexação que divide a fibra óptica em vários comprimentos de onda de diferentes frequências ópticas. Múltiplos sinais ópticos com diferentes comprimentos de onda são multiplexados, assim os sinais ópticos são combinados e transmitidos sobre a mesma fibra. A tecnologia WDM supera muitas dificuldades de implementação e restrições que limitam o desempenho dos sistemas TDM. Assim, ao invés de incrementar a taxa de dados para manipular mais informação, na WDM simplesmente transporta-se vários sinais ópticos, cada um deles em um comprimento de onda e na sua respectiva taxa de transmissão, todos eles sobre uma mesma fibra, demonstrando assim, portanto ser uma

técnica promissora para satisfazer as altas demandas por banda sem o enorme investimento necessário para se instalar fibras ópticas adicionais [Assi et al., 2001; Chaudhuri et al., 2000].

As redes ópticas que fazem uso da tecnologia WDM, conhecidas por suas altas taxas de transmissão, são formadas por pares de nós origem-destino que se comunicam através de enlaces ópticos, também chamados de segmentos de fibras ou apenas enlaces. Cada enlace é considerado bidirecional e atualmente consiste de um par de enlaces unidirecionais. Um caminho óptico (lightpath) entre duas estações é um sinal óptico que vai de um nó origem a um nó destino, envolvendo um ou mais nós na rede ao longo de uma rota estabelecida, utilizando um comprimento de onda nos enlaces que ligam esses nós (vide Figura 2.1).

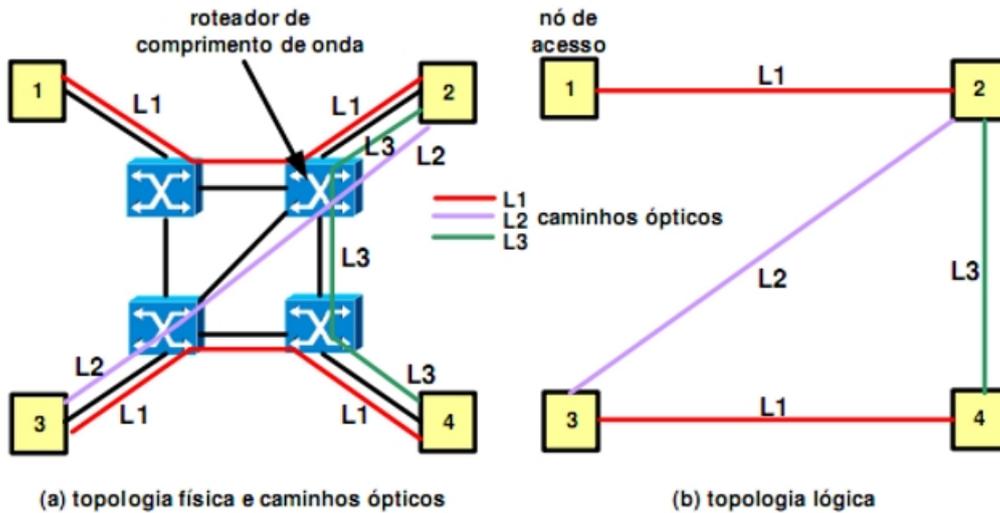


Figura 2.1. Rede WDM com seus caminhos ópticos

Dentre as vantagens da tecnologia WDM, pode-se destacar:

- Permitir utilizar equipamentos para redes de transporte e multi-serviços sobre a mesma infra-estrutura de meio físico óptico;
- Permitir a combinação de diversas tecnologias, independente do fabricante, através do uso de *transponders* que é um dispositivo de comunicação eletrônico complementar de automação e cujo objetivo é receber, amplificar e retransmitir um sinal em uma frequência diferente ou transmitir de uma fonte uma mensagem pré-determinada em resposta à outra pré-definida de outra fonte;

- Permitir a economia de equipamentos de aplicação ao longo das rotas, mediante a instalação destes apenas nos pontos de retirada/inserção de tráfego;
- Permitir a economia e a otimização do uso de fibras ópticas em locais com alta densidade de redes e acessos.

Estas e outras vantagens têm levado ao rápido incremento do número de comprimentos de onda no mesmo cabo. O resultado é um espaçamento entre canais cada vez mais estreito, que caracteriza uma nova classe dentro da tecnologia WDM denominada “WDM densa” (DWDM). Apresenta acima de 16 canais com os respectivos comprimentos de onda, ampliados para 32 canais no final da década de 90 [Alferness et al., 1999], e hoje a casa de milhares.

## 2.2 Projeto de Redes Ópticas

O problema de planejamento e projeto de redes ópticas pode ser dividido em dois subproblemas: o planejamento da rede física e o projeto da topologia virtual que ficará encarregada pela transmissão dos dados decorrentes do conjunto de requisições existentes, fazendo uso da rede física projetada anteriormente.

As primeiras abordagens sistemáticas acerca do Projeto de Redes Ópticas surgiram apenas no início da década de 90. Em sua grande maioria, os trabalhos existentes sobre este problema, se focavam em torno das características físicas das redes de maneira a dispor os elementos da rede da melhor forma, devido principalmente as restrições tecnológicas e de custos existentes na época.

No caso do subproblema de planejamento da rede física procura-se na grande maioria das vezes estabelecer quantos e quais elementos (roteadores, conversores, etc) farão parte da rede afim de interligar os pontos de oferta e demanda. Em Borella et al. [1997] e Ramaswami & Sivarajan [1998] são apresentados de forma mais detalhada os elementos de uma rede óptica. Em Iness [1997] há um estudo dos problemas advindos da utilização de conversores em *loops*, ou seja, anéis fechados de fibras ópticas. Além disso existe uma análise sobre o uso de conversores de comprimento de onda de capacidade limitada. Ainda pode-se destacar o trabalho em Ramamurthy [1998] no qual procurou-se a determinação de uma localização ótima dos amplificadores nas redes. Como pode ser observado, muitas vezes as redes físicas já existem, por isso poucos trabalhos foram feitos com o objetivo de solucionar este subproblema por completo. A maioria destes trabalhos limitam-se em localizar os amplificadores na rede já existente de forma a tentar reduzir os custos na implantação dos mesmos.

Quanto ao subproblema de projeto da topologia virtual, como no caso do subproblema de planejamento da rede física, os primeiros trabalhos são encontrados a partir da década de 90, destacando-se principalmente os estudos encontrados em [Marsan et al., 1993; Chlamtac et al., 1992, 1993; Banerjee, 1992]. Mas diferente do primeiro subproblema, com o passar dos anos veio o surgimento de muitas inovações tecnológicas e então mediante este cenário, surgiram inúmeros trabalhos que tratavam o subproblema de projeto de topologia virtual. O trabalho encontrado em Mukherjee et al. [1996] sugere uma decomposição, mas de forma aproximada como visto em [Dutta & Rouskas, 2000] deste subproblema em outros quatro subproblemas distintos. Esta decomposição é dita aproximada uma vez que não é provado que ao se resolver os quatro subproblemas em sequência e posteriormente combiná-los, seja alcançado a solução ótima para o subproblema original. Este tipo de abordagem pode ser encontrada em diversos trabalhos na literatura, destacando-se [Krishnaswamy & Sivarajan, 1998; Mukherjee et al., 1994; Ramaswami & Sivarajan, 1996; Banerjee & Mukherjee, 1996]. Os quatro subproblemas gerados são denominados como:

- **Determinação da topologia lógica :** neste subproblema procura-se estabelecer qual topologia deverá ser empregada sobre a rede física de forma a estabelecer quais serão os caminhos lógicos de comunicação de forma a atender o conjunto de demandas.
- **Roteamento de canais lógicos :** aqui busca-se a determinação de quais fibras serão usadas por cada um dos canais lógicos.
- **Alocação de comprimentos de onda :** como o próprio nome diz, aqui ocorre a determinação de qual comprimento de onda será utilizado por cada canal lógico da topologia virtual.
- **Roteamento do tráfego :** neste subproblema ocorre a determinação dos fluxos através das rotas pré-estabelecidas.

## 2.3 Roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA)

### 2.3.1 Introdução

O problema de *RWA* talvez seja um dos problemas relacionados ao projeto de redes *WDM* que tenha recebido maior atenção por parte dos pesquisadores desta área, dado

que toda rede usando tecnologia *WDM* deve dispor de um processo de *RWA* para estabelecer uma conexão. Neste problema busca-se estabelecer uma configuração de caminhos ópticos para um dado conjunto de requisições através de roteamento e alocação de comprimentos de onda para cada uma dessas requisições, dada uma restrição no número de comprimentos de onda disponíveis.

O objetivo do *RWA* é selecionar a melhor combinação de rotas e comprimentos de onda para cada conexão de forma a otimizar o atendimento das demandas dentro da rede, maximizando o número de conexões estabelecidas, minimizando a probabilidade de bloqueio de conexão na rede e/ou minimizando o número de comprimentos de onda usados pela rede [Zhu et al., 2000; Assi et al., 2001; Zang et al., 2000; Strand et al., 2001].

Em princípio, um caminho óptico deve utilizar o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces da rota especificada. Esta propriedade é conhecida como continuidade obrigatória de comprimento de onda [Zhu & Mukherjee, 2003]. Porém com a evolução tecnológica, surgiram os conversores de comprimento de onda que possibilitaram o envio das requisições sem a necessidade de se manter a continuidade quanto ao comprimento de onda usado e assim possibilitando um melhor uso dos recursos da rede. Os modelos propostos na seção 3.2 tratam o problema de *RWA* com proteção nos quais tal restrição de continuidade não é necessária, ou seja, os nós da rede podem usar conversores de comprimento de onda.

De uma forma geral, o problema *RWA* pode ser classificado de duas maneiras:

- **Estático:** no *RWA* estático, o conjunto de requisições a serem enviadas pela rede são conhecidas com antecedência, logo tanto o roteamento quanto a alocação dos comprimentos de onda são realizados de forma *offline*. O problema se restringe a estabelecer os caminhos ópticos para as conexões de uma maneira global enquanto se minimiza o uso de recursos da rede, como o número de comprimentos de onda, de forma a acomodar um determinado número de conexões, ou maximizar o número de conexões acomodadas, se o número de comprimentos de onda for limitado.
- **Dinâmico:** Já no caso dinâmico, as requisições não são conhecidas com antecedência e os pedidos de conexão chegam à rede um por vez. Um caminho óptico é estabelecido à medida que as requisições de conexões chegam no nó de acesso, devendo cada qual ser atendida no instante da solicitação, sem esperar, portanto, que futuras requisições se tornem conhecidas. Os caminhos existentes não podem ser re-roteados para acomodar uma nova requisição, pois isto implicaria em uma interrupção momentânea das conexões ativas. Para o caso dinâmico, as soluções

devem ser computacionalmente de baixo custo computacional, uma vez que as requisições devem ser processadas em tempo real.

Ainda, segundo Murthy & Gurusamy [2002] os algoritmos de RWA se baseiam em três abordagens distintas de funcionamento:

1. No primeiro tipo de abordagem busca-se inicialmente a melhor rota, entre a origem e o destino da demanda, que possua comprimento de onda disponível e caso seja encontrada, a mesma é alocada para o estabelecimento da conexão. Caso não seja possível o atendimento da requisição, a mesma é dada como não atendida devido à indisponibilidade de recursos.
2. A segunda forma de se tratar o problema é selecionar primeiramente o comprimento de onda adequado e apenas posteriormente escolhe-se a melhor rota disponível para a alocação com tal comprimento de onda. Tenta-se primeiro efetuar a alocação com a melhor rota e, caso isso não seja possível, continua-se a tentar, sucessivamente, com as outras rotas. Caso não se tenha rota disponível para atender a requisição com o comprimento de onda determinado, repetem-se os mesmos passos anteriores para o segundo comprimento de onda mais adequado, e assim por diante. Se, após estas tentativas de atendimento da requisição com os diversos comprimentos de onda, não for possível estabelecer um par “comprimento de onda/rota” válido, a requisição deve ser negada por indisponibilidade de recursos.
3. Por fim, uma última forma de se abordar o RWA é considerar de maneira simultânea tanto as determinações da rota quanto do comprimento de onda a ser alocado de modo a se atender a requisição. Apesar desta última abordagem tender a uma alocação mais lógica dos recursos da rede, uma vez que leva ambos em consideração (com as devidas ponderações) simultaneamente, tem-se que ela, geralmente, acarreta uma maior sobrecarga de processamento e, conseqüentemente, maior demora no atendimento das requisições.

De acordo com o exposto acima, os algoritmos de RWA possuem, basicamente, duas partes independentes: um módulo de seleção de rotas e um módulo de seleção de comprimentos de onda. A escolha da rota é baseada em algum critério como a quantidade de saltos, por exemplo. A determinação do comprimento de onda é feita tendo por base algum critério, por exemplo, o fator de uso (número mínimo) dos diferentes comprimentos de onda na rede como um todo.

Devido à esta variedade dos algoritmos, tanto no processo de seleção de rotas quanto na alocação dos comprimentos de onda, nas seções 2.3.3 e 2.3.4 são mostrados os principais algoritmos referentes a cada um destes processos presentes no RWA e na seção 2.3.5 são explicitados os principais algoritmos existentes para o tratamento do problema de RWA.

### 2.3.2 Redes Ópticas Opacas e Transparentes

As redes ópticas WDM podem ser classificadas em opacas ou transparentes. As redes ópticas opacas realizam o roteamento de comprimentos de onda no domínio eletrônico. Neste tipo de rede óptica são necessários conversores Óptico-Eletró-Óptico (OEO) responsáveis por converter o sinal óptico em sinal elétrico e vice-versa em cada nó da rede. Conversores OEO têm o inconveniente de inserir atrasos de processamento, além de aumentar significativamente o custo dos equipamentos.

Em uma rede óptica transparente o sinal óptico é transmitido ao longo de nós intermediários sem a realização de conversão para o domínio eletrônico. Desta forma, o custo associado a uma comutação de alta velocidade em meio eletrônico é eliminado. Diferentes tecnologias de comutação foram desenvolvidas com o objetivo de viabilizar o uso de redes ópticas WDM sem a necessidade de se realizar o processamento eletrônico intermediário.

Um canal óptico satisfaz as restrições de continuidade de comprimento de onda se uma determinada requisição é transportada pelo mesmo comprimento de onda da origem ao destino, ou seja, em princípio, um circuito óptico deve utilizar o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces da rota especificada.

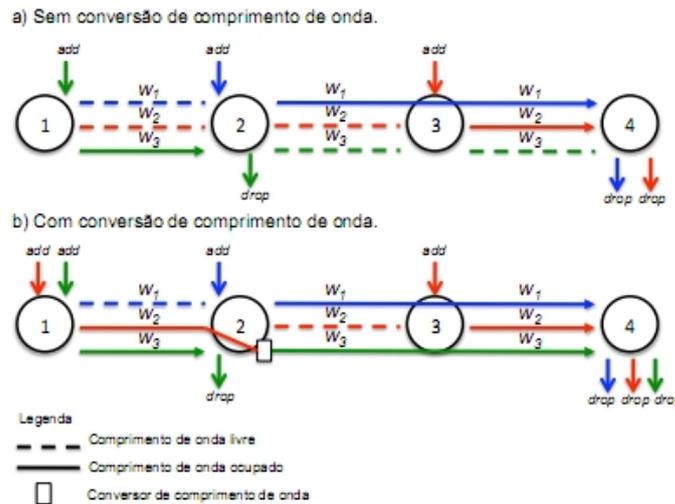
Para redes opacas esta restrição não é problema, pois como a comutação do feixe de luz é realizada através de conversões OEO a conversão eletrônico-óptica da porta de saída pode escolher o comprimento de onda disponível na fibra.

As redes transparentes, em contrapartida, não apresentam conversões OEO e, portanto, a restrição de continuidade pode acarretar em altas probabilidades de bloqueio. Uma alternativa é a introdução de conversores de comprimento de onda em seus nós, que não apresenta as limitações de banda dos dispositivos eletrônicos e reduz a probabilidade de bloqueio, devido à eficiência de utilização dos comprimentos de onda da rede.

Conversores de comprimento de onda são dispositivos localizados nos nós da rede óptica, com a função de realizar a conversão de um comprimento de onda de entrada em um comprimento de onda de saída diferente. O uso de conversores de comprimento de onda permite que um circuito óptico seja formado por comprimentos de onda diferentes,

em diferentes enlaces da rota especificada, isto é, a propriedade de continuidade de comprimento de onda pode ser desrespeitada.

Na figura 2.2 (a) e (b) ilustram respectivamente a tentativa de estabelecer um caminho óptico entre os nós 1 e 4 sem e com o uso de um conversor de comprimento de onda.



**Figura 2.2.** Exemplo de estabelecimento de conexão com e sem conversão de comprimento de onda

### 2.3.3 Algoritmos de roteamento

O subproblema de roteamento se restringe em encontrar uma rota para um par origem-destino de um pedido de conexão. Os algoritmos de roteamento, de uma forma mais geral, podem ser classificados em quatro categorias [Zhu et al., 2000; Zang et al., 2000; Assi et al., 2001; Strand et al., 2001; Zang et al., 2001; Tachibana & Kasahara, 2002; Cieutat & Binh, 2003; Maier et al., 2004]: Roteamento Fixo (fixed routing), Roteamento Alternativo (alternate routing), Roteamento à Exaustão (exhaust routing) e Roteamento Adaptativo (adaptive routing). A seguir os mesmos são explicitados de forma mais detalhada:

- **Roteamento Fixo:** Neste método apenas uma rota é fornecida para cada par de nós origem-destino e normalmente a rota mais curta é a escolhida (pois depende do critério ponderado). Caso exista mais de uma requisição, todas disputam o mesmo recurso (conjunto de comprimentos de onda) e isso implica em uma maior probabilidade no aumento das requisições não atendidas. Esse tipo de roteamento é muito simples de ser implementado, mas possui desvantagens como por exemplo

não tolerância a falha uma vez que para se contornar tal situação, seria necessário um esquema de caminhos alternativos de forma a prover uma proteção.

- **Roteamento Alternativo:** Nos algoritmos do tipo roteamento alternativo, para cada par de nós origem-destino, é fornecido um conjunto de rotas candidatas, as quais correspondem a um subconjunto de todas as possíveis rotas para o par de nós em questão. Ou seja, ao contrário do roteamento fixo, no roteamento alternativo todas as combinações de pares de nós origem-destino possuem mais de uma rota. A rota a ser estabelecida para uma conexão pode ser escolhida somente do conjunto de rotas pré-determinadas. Observa-se que os algoritmos que empregam o roteamento alternativo, não possuem uma complexidade alta de implementação e além disso podem ser utilizados para que se tenha uma maior tolerância quanto a falhas uma vez que pode-se dar preferência a rotas disjuntas de arco.
- **Roteamento à Exaustão:** No método de roteamento por exaustão, todas as rotas possíveis são verificadas para o par de nós, ou seja, para um dado par de nós origem-destino, é escolhida uma rota dentre todas as possíveis. O método por exaustão apresenta melhor desempenho que os já citados, mas apresenta uma complexidade bem maior.
- **Roteamento Adaptativo:** Neste caso, o roteamento baseia-se na disponibilidade de recursos em cada enlace durante o estabelecimento da conexão. Qualquer rota possível a partir do nó fonte até o destino pode ser candidata quando há uma requisição de conexão. A escolha de uma rota depende da política de rede utilizada tais como a primeira rota de menor custo, a primeira rota menos congestionada, etc. As vantagens do roteamento adaptativo são uma maior tolerância às falhas e uma baixa probabilidade de bloqueio quando comparado com o roteamento fixo e com o roteamento alternativo. Por outro lado, o roteamento adaptativo é o mais complexo computacionalmente.

Ao analisar as descrições feitas acima, pode-se observar que de uma forma geral a implementação do roteamento fixo é mais simples, enquanto o roteamento adaptativo fornece melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de requisições [Cieutat & Binh, 2003]. Já o roteamento alternativo oferece um meio termo entre a sobrecarga de cálculo e o desempenho da rede, mas depende do número de rotas alternativas a serem consideradas [Koçyigit & Bilgen, 2003].

### 2.3.4 Algoritmos de Alocação de comprimento de onda

No subproblema de alocação de comprimento de onda, deve-se alocar um comprimento de onda para cada conexão requisitada. Dado um conjunto de requisições e suas rotas a alocação de um comprimento de onda deve ser feita de forma a minimizar a quantidade de comprimentos de onda utilizados e posteriormente maximizar o número de conexões possíveis a serem estabelecidas futuramente minimizando assim a probabilidade de bloqueio de novas conexões.

Duas correntes se mostraram bastantes claras nos estudos heurísticos para alocação de comprimentos de onda: as que provocam uma distribuição igualitária de carga entre todos os comprimentos de onda e as que, contrariamente, sobrecarregam determinados comprimentos de onda em detrimento de outros. Em geral, este último caso utiliza algoritmos que estabelecem algum tipo de prioridade entre os comprimentos de onda, sendo por isso chamados de ajuste prioritário.

Os algoritmos de seleção de comprimentos de onda podem ser basicamente separados em quatro tipos:

- **Most Used** [Subramaniam & Bary, 1997]: Neste algoritmo sempre aloca-se o comprimento de onda disponível mais utilizado, baseado nas informações do estado atual da rede, ou seja, o comprimento de onda livre é definido fazendo uma busca do mais utilizado para o menos utilizado. Para funcionar corretamente, tal algoritmo necessita conhecer informações reais ou estimadas a respeito do estado global da rede, de modo a determinar o fator de uso de cada um dos diferentes comprimentos de onda. Esta solução tenta prover o máximo reuso de comprimento de onda na redes
- **Least Used (LU)** [Subramaniam & Bary, 1997]: Este algoritmo é o oposto do algoritmo "Most Used" uma vez que sempre se aloca o comprimento de onda disponível menos utilizado, baseado nas informações do estado atual da rede. Procura-se desta forma, balancear a carga entre todos os comprimentos de onda existentes a cada novo pedido que surge.
- **First Fit (FF)** [Chlamtac et al., 1989]: No caso deste algoritmo ocorre uma indexação de todos os comprimentos de onda e ao surgir um pedido de conexão, o **FF** aloca o comprimento de onda disponível com menor índice e para isso precisa apenas conhecer o estado dos comprimentos de onda dos enlaces que compõem a rota da conexão a ser estabelecida e não necessita de informação global dos enlaces da rede. O algoritmo possui baixo custo computacional, uma vez que não há a necessidade de se pesquisar o estado de todos os arcos da rede e ainda pode

ser utilizado em qualquer topologia de rede. A desvantagem é que ele provoca um desbalanceamento de carga, sobrecarregando os comprimentos de onda de menor índice. Mas na prática, é um dos mais utilizados principalmente por não necessitar de informações globais da rede.

- ***Random Wavelength Assignment (RD)*** [Chlamtac et al., 1989]: Aqui neste algoritmo é criada uma lista com todos os comprimentos de onda disponíveis, ao longo da rota determinada, para atender a requisição de conexão. Em seguida o algoritmo RD escolhe um dos comprimentos de onda de maneira aleatória. Tal algoritmo também é independente dos fatores de uso dos comprimentos de onda uma vez que não precisa de informações a respeito do estado global da rede e, nesse sentido, mostra-se adequado tanto para implementações centralizadas quanto distribuídas. A idéia do RD é, de maneira similar ao que acontece no algoritmo LU, distribuir de forma balanceada a carga entre os diferentes comprimentos de onda.

### 2.3.5 Algoritmos para o Problema de RWA

Tendo visto os vários algoritmos individuais existentes para seleção de rotas e de comprimentos de onda, poderemos compreender mais claramente os algoritmos de alocação de rotas e comprimentos de onda (RWA), responsáveis por desempenhar ambas as funções.

No trabalho de Banerjee & Mukherjee [1996] é proposta uma heurística que decompõe o problema de RWA em dois subproblemas. Em um primeiro momento resolve-se o problema de roteamento, estabelecendo uma rota entre a origem e o destino da demanda. Em seguida resolve-se o problema de alocação de comprimentos de onda. Porém, é sabido que a combinação das soluções exatas de cada subproblema não necessariamente gera uma solução exata para o problema de RWA.

Hyttiä & Virtamo [1998] apresentaram duas heurísticas para resolução do problema de RWA. Na primeira as rotas das requisições são conhecidas a priori, reduzindo-o a um problema de coloração de grafos em um grafo de conflitos. Porém, caso tais rotas não sejam conhecidas a priori, eles sugerem um algoritmo para escolha de uma rota para cada demanda da rede. A escolha da rota é baseada nos seguintes princípios:

1. Caminhos ópticos que atravessam apenas um enlace podem fazer uso de qualquer comprimento de onda disponível no mesmo.
2. É preferível rotear os caminhos ópticos por caminhos mais curtos, pois assim menos comprimentos de onda são considerados ao longo da rota.

3. O número de caminhos ópticos que passam em um mesmo enlace define um limite inferior para o número total de comprimentos de onda.

Em Manohar et al. [2002] é proposta a heurística denominada Greedy-EDP-RWA. Ela baseia-se no princípio de que quanto mais caminhos ópticos utilizarem o mesmo comprimento de onda, menor será o valor total de utilização do mesmo. Porém para que dois caminhos ópticos compartilhem o mesmo comprimento de onda, o mesmo enlace não pode ser usado para o transporte [Noronha, 2008]. A Greedy-EDP-RWA foi comparada com a heurística proposta por Banerjee & Mukherjee [1996] e a mesma obteve soluções de maior qualidade e de forma mais rápida.

Porém as melhores heurísticas encontradas na literatura advêm do trabalho proposto por Skorin-Kapov [2007]. Tais heurísticas são adaptações de algoritmos utilizados para resolução do problema clássico de Empacotamento Unidimensional (*Bin Packing Problem*) no qual dado um conjunto de itens com seus respectivos pesos e caixas com uma dada capacidade, deseja-se distribuir o conjunto de itens no menor número de caixas possíveis com a restrição de que a soma dos pesos dos itens dentro de uma determinada caixa não pode ultrapassar a capacidade máxima da mesma. Fazendo uma comparação, os comprimentos de onda podem ser vistos como as caixas e as demandas como os itens. Logo no trabalho de Skorin-Kapov [2007] o problema de RWA é reformulado como o problema de distribuir o conjunto de demandas(itens) no menor número possível de comprimentos de onda(caixas). As heurísticas propostas foram: (i) FF-RWA que é baseada na heurística *First Fit*, (ii) BF-RWA que é baseada na heurística *Best Fit*, (iii) FFD-RWA que se espelha na heurística *First Fit Decreasing* e por fim (iv) BFD-RWA que baseia-se na heurística *Best Fit Decreasing*.

## 2.4 Proteção em Redes Ópticas WDM

Por mais robustas que sejam as grandes redes ópticas de telecomunicações, elas estão sempre sujeitas à falhas em enlaces de fibras, ou mesmo nas próprias centrais/roteadores, causando a interrupção da transmissão de todos os caminhos que passam pela fibra ou equipamento danificado. Devido ao grande tráfego neste tipo de rede, a falha de um elemento pode causar a perda de uma grande quantidade de dados, tornando-a menos confiável, e com isso o aspecto de sobrevivência do tráfego ganha grande importância. Assim, podem ser encontrados na literatura, trabalhos relacionados à proteção ou restauração da rede.

Existem essencialmente dois mecanismos para se tratar falhas na rede [Ramamurthy & Mukherjee, 1999a; Gerstel, 1998; Mohan et al., 2001]: proteção e restaura-

ção.

- Caso os recursos para a sobrevivência são pré-computados e reservados enquanto a conexão estiver ativa, esse mecanismo é chamado proteção [Ramamurthy & Mukherjee, 1999a].
- Mas, se ocorre o cálculo da rota para a sobrevivência apenas após a falha, é chamado de restauração [Ramamurthy & Mukherjee, 1999b].

Uma vez que a restauração é um método reativo inicializado após a falha do enlace, logo o mesmo não pode garantir a sobrevivência do tráfego na rede e então o tempo de recuperação se torna mais elevado. Por outro lado, a proteção, por ser um método pró-ativo, pode garantir a sobrevivência quase total das requisições em caso de falha e também torna mais rápida a recuperação do tráfego na rede. Neste trabalho o enfoque é feito em cima da proteção da rede.

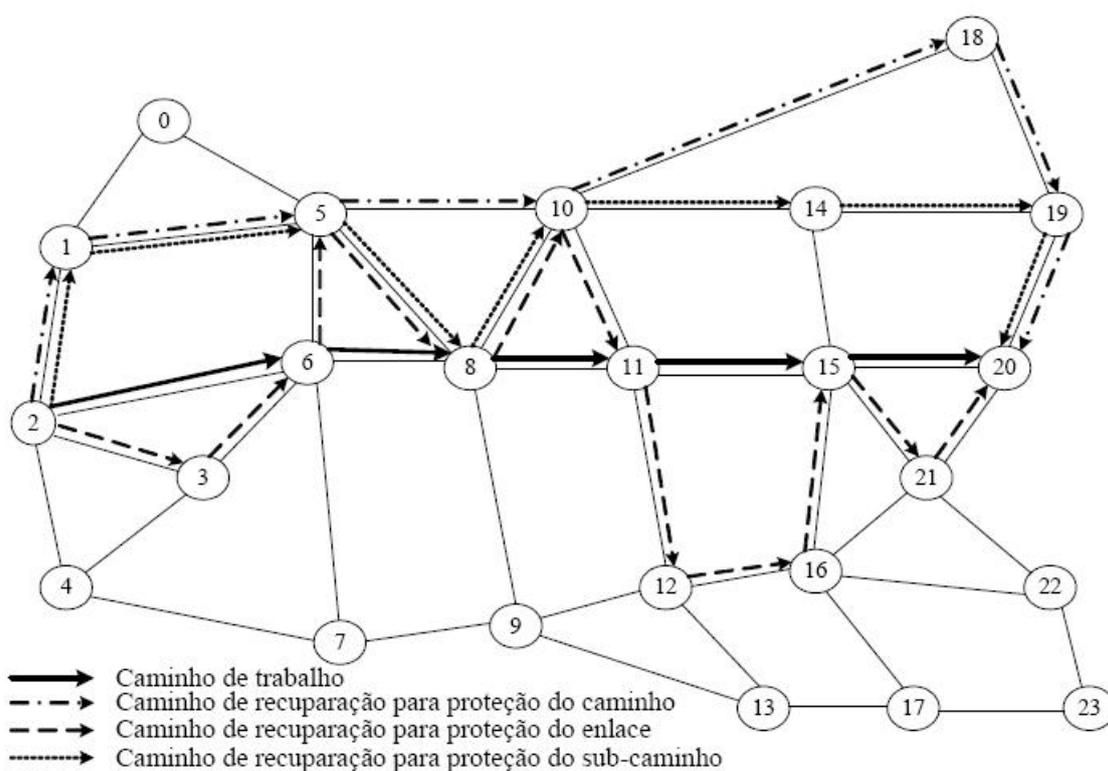
Apenas para um melhor entendimento, as rotas referentes à transmissão do tráfego na rede em condições normais serão chamadas de rotas de *trabalho*. Já as rotas utilizadas para proteger um caminho de trabalho serão denominadas rotas de *proteção*.

O conceito de proteção de rotas pode se dar em diversos níveis da infra-estrutura. Cada nível de proteção definirá categorias de grupos de enlaces com risco compartilhado (Shared Risk Link Group – SRLG) [Ramamurthy et al., 2003], que descrevem as relações de risco compartilhado entre diferentes caminhos de trabalho. Duas rotas que se interseccionam numa determinada fibra da rede, por exemplo, estarão numa mesma categoria de SRLG de fibra, uma vez que ambas terão seu tráfego interrompido, caso ocorra alguma falha no enlace em comum.

Os esquemas de proteção podem ser classificados mediante o tipo de estratégia de roteamento adotado, com proteção por rota, enlace ou sub-rota. Na proteção por rota, após uma falha na rota de trabalho, o tráfego é re-roteado através de uma rota que é disjunta de nó da rota de trabalho. Na proteção por enlace, em caso de falha, a requisição é re-roteada para uma rota com disjunção de enlaces em relação a rota de trabalho. A proteção por sub-rota divide a rota de trabalho em partes, provendo uma rota de proteção para cada uma destas partes.

Apenas como forma de ilustração, a Figura 2.3 adaptada de [Lee & Mukherjee, 2004] apresenta um exemplo dos mecanismos de proteção. No contexto da figura, considere uma requisição na rede com origem no nó 2 e destino no nó 20, roteada com o caminho de trabalho 2-6-8-11-15-20. Na proteção por enlace cada arco do grafo possuirá seu caminho de proteção específico. Por exemplo, na Figura 2.3 o enlace 2-6 possui a rota de proteção 2-3-6, o 6-8 tem como proteção a rota 6-5-8 e assim

por diante, formando assim a rota de proteção 2-3-6-5-8-10-11-12-16-15-21-20. Logo pode ser notado claramente que este tipo de proteção, por enlace, requer uma grande quantidade de recursos e é limitada a certas topologias. O mecanismo de sub-rote, no exemplo da Figura 2.3, divide a rede em duas partes: de 2 a 8 e de 8 a 20. A primeira parte possui a sub-rote de proteção 2-1-5-8 e segunda parte usa como proteção a sub-rote 8-10-14-19-20. Finalmente no mecanismo de proteção por caminho, na demanda em questão, é criada uma rota de proteção, neste caso disjunta de nó, 2-1-5-10-18-19-20. Apesar da proteção de sub-rote necessitar de menos recursos que a de enlace, em geral, o mecanismo de proteção por rota é mais econômico quanto aos recursos em comparação aos outros dois métodos apresentados.



**Figura 2.3.** Proteção por rota, enlace e sub-rote, adaptada de [Lee & Mukherjee, 2004]

De forma a lidar com a sobrevivência a falhas, as redes com proteção devem ter parte de seus recursos alocados como capacidade de reserva para proteção, que deverá ser usada por rotas de proteção em caso de falha. Podemos basicamente dividir em dois os tipos de abordagens para reserva de recursos na rede para proteção, a saber, dedicado ou compartilhado. Em um esquema de proteção dedicada, os recursos são exclusivos, ou seja, para cada demanda da rede, temos duas rotas dedicadas, uma para

o tráfego de trabalho e outra para o tráfego de proteção, esta última a ser utilizada em caso de falha. Já em um esquema de proteção compartilhada, os recursos de proteção podem estar sujeitos a compartilhamento entre duas ou mais rotas de trabalho [Maier et al., 2002] .

Além dos mecanismos anteriormente citados, em um projeto de rede óptica ainda pode-se optar entre dois esquemas de recuperação, 1+1 ou 1:1. Em um esquema 1+1, o tráfego de proteção é transmitido simultaneamente ao tráfego de trabalho, desta forma ao se detectar a falha na rota de trabalho, há a comutação para a rota de proteção. Por conta da transmissão ser feita simultaneamente entre as rotas de proteção e trabalho, este esquema possui recuperação mais rápida. Porém exige uma maior quantidade de recursos adicionais da rede, uma vez que basicamente duplica-se todas as demandas por rotas disjuntas, de enlace ou nó, aos de trabalho. No esquema 1:1 o tráfego de proteção é enviado apenas quando uma falha é detectada. Este esquema utiliza menos recursos adicionais da rede por não necessitar da transmissão simultânea [Resendo, 2008] .

## 2.5 Conceitos Iniciais sobre Otimização Multi-Objetivo

A característica principal da otimização multi-objetivo é a presença de duas ou mais funções objetivos associadas ao mesmo problema. De acordo com Deb [2001] o problema de otimização multi-objetivo pode ser definido matematicamente como :

$$\min f_m(x) \quad (2.1)$$

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = \{1, \dots, J\} \quad (2.2)$$

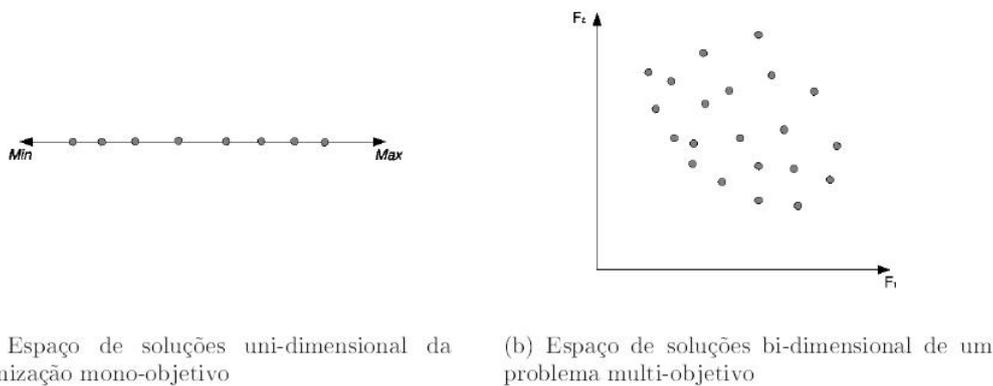
$$h_k(x) = 0, \quad k = \{1, \dots, K\} \quad (2.3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = \{1, \dots, N\} \quad (2.4)$$

As variáveis de decisão do problema representado pelo modelo acima são representadas pelo vetor n-dimensional  $x$ , ou seja, este vetor possui a solução do problema. Já o vetor  $f_m$ , com  $m = \{1, \dots, M\}$  refere-se as  $M$  funções objetivos do modelo. Um detalhe importante que deve ser levado em conta é que todas as funções do problema devem objetivar a maximização ou minimização. É claro, para que se chegue a uma solução viável todas as restrições devem ser satisfeitas, caso contrário o problema é considerado inviável.

A principal diferença entre um problema mono-objetivo e um multi-objetivo é o

espaço de soluções de cada um. No primeiro, cada vetor  $x$  que satisfaz as restrições do problema leva a uma solução viável em um espaço unidimensional. Porém no caso multi-objetivo, o vetor de solução  $x$  leva a soluções em um espaço multi-dimensional. A Figura 2.4, adaptada de Santos [2009], ilustra dois possíveis espaços de valores objetivo, com (a) representado uma solução para o problema mono-objetivo e o item (b) para o problema multi-objetivo.



**Figura 2.4.** Espaço de valores das funções objetivos para os problemas de otimização mono-objetivo e multi-objetivo

### 2.5.1 Conjunto Pareto-Ótimo

O objeto fundamental da otimização multi-objetivo consiste em um conjunto de soluções, denominado conjunto Pareto-ótimo que conterá as possíveis soluções do problema. Este tipo de otimização está diretamente relacionado ao conceito de dominância, que segundo Takahashi [2004], pode ser definido como :

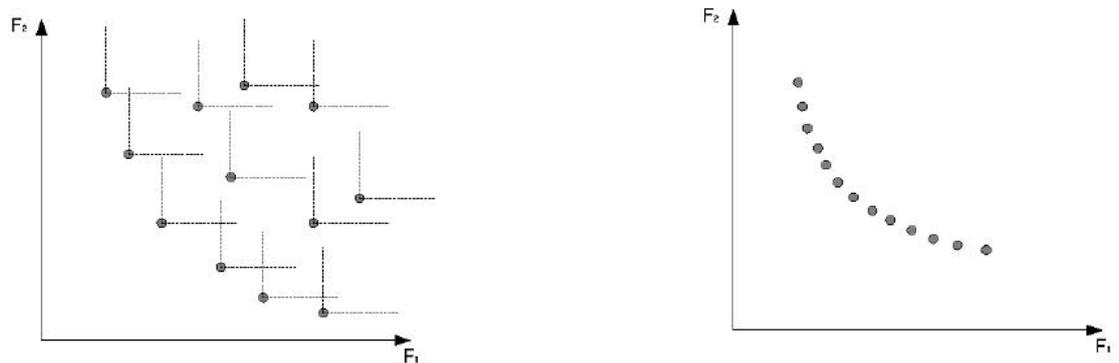
**Definição 1 (Dominância :)** Diz-se que o ponto  $x_1 \in X$  domina o ponto  $x_2 \in X$  se  $f_m(x_1) \leq f_m(x_2)$  e  $f_m(x_1) \neq f_m(x_2)$ . Equivalentemente, diz-se que  $f_m(x_1) \in Z$  domina  $f_m(x_2) \in Z$  nestas mesmas condições.

Ou seja, dado dois pontos  $x_1$  e  $x_2$  ambos pertencentes ao conjunto de vetores  $X$  que solucionam o problema, então o ponto  $x_1$  domina o ponto  $x_2$ , se no mínimo o valor em um dos objetivos de  $x_1$  é melhor que o mesmo objetivo em  $x_2$  e o restante dos valores dos objetivos de  $x_1$  não podem ser piores que o restante dos mesmos valores nos objetivos em  $x_2$ .

Em um processo de otimização procura-se sempre por soluções não-dominadas até que todas os vetores  $x \in X$  sejam analisados. A definição 2 encontrada no trabalho

de Takahashi [2004] comprova que ao se considerar o conjunto de soluções possíveis do problema multi-objetivo, apenas aquelas não-dominadas podem fazer parte do conjunto Pareto-Ótimo. A Figura 2.5 ilustra dois conjuntos de soluções referentes a um problema multi-objetivo. O item (a) mostra o conjunto de soluções agregando tanto as soluções dominadas quanto as não-dominadas e já no item (b) são apresentadas apenas as soluções não-dominadas, ou mais especificamente o conjunto Pareto-Ótimo do problema.

**Definição 2 (Solução Pareto-Ótima :)** Diz-se que o ponto  $x^* \in X$  é uma solução Pareto-ótima do problema de otimização multi-objetivo se não existe qualquer outra solução  $x \in X$  tal que  $f_m(x) \leq f_m(x^*)$  e  $f_m(x) \neq f_m(x^*)$ , ou seja, se  $x^*$  não é dominado por nenhum outro ponto factível.



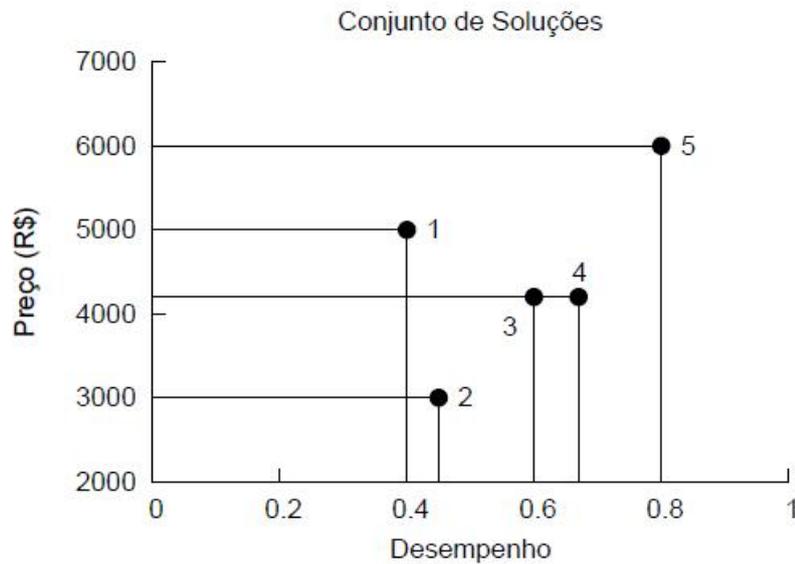
(a) Conjunto de soluções viáveis no espaço de objetivos  $Z$

(b) Conjunto de soluções não-dominadas (ótimas) no espaço de objetivos  $Z$

**Figura 2.5.** Conjunto de soluções de um problema multi-objetivo

Para ilustrar o que foi descrito até o momento nesta subseção, podemos analisar um exemplo prático, como a compra de um computador. Na compra do computador podemos levar em conta dois objetivos, o preço e o desempenho do mesmo. A Figura 2.6 apresenta um possível conjunto de soluções para o problema aqui exemplificado.

Ao analisar a Figura 2.6 pode-se observar que a solução 2 é mais indicada caso se queira um computador de baixo orçamento mas com desempenho não tão alto. Porém caso não se tenha muitas restrições financeiras, a solução 5 daria um computador com um melhor desempenho. Já as soluções 1 e 3 não se mostram convenientes uma vez que pode-se encontrar soluções com preço menor ou igual e com melhor desempenho.



**Figura 2.6.** Conjunto de soluções do exemplo, explicitando os conflitos entre os dois objetivos existentes

Então, chega-se a conclusão que as soluções 1 e 3 são dominadas, ou seja, não fazem parte do conjunto Pareto-ótimo.

Como pode ser visto através do exemplo, devido a quantidade de possíveis soluções e seus conflitos, obtém-se uma grande diversidade de soluções para um problema. Caso não ocorra algum conflito ao se otimizar as funções objetivos, a solução obtida é denominada solução utópica. A solução utópica pode ser definida como aquela que expressa os valores ótimos para cada uma das funções objetivos do problema e além disso pode ser usada como métrica para mensurar a qualidade de aproximações e distância entre as soluções no espaço dos valores objetivos.

# Capítulo 3

## Modelos Matemáticos

Neste capítulo são apresentados os modelos propostos neste trabalho. Tais modelos se referem basicamente aos seguintes problemas:

- Problema de Roteamento com Proteção (nos *enlaces* e nós).
- Problema de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda com Proteção (nos *enlaces* e nós).

### 3.1 Problema de Roteamento com proteção

A alocação dos comprimentos de onda é uma das partes fundamentais para um projeto de redes ópticas com tecnologia WDM como foi apresentado na seção 2.3. Tal restrição aumenta consideravelmente a complexidade dos modelos limitando a escalabilidade dos mesmos. Porém, assumindo que todos os nós da rede são dotados de equipamentos para o processamento eletrônico do tráfego (OEO), constituindo uma rede opaca, o problema da atribuição de comprimentos de onda fica restrito a cada enlace individualmente. Essa característica permite uma simplificação do modelo, reduzindo o problema de RWA a um problema de roteamento.

Então nesta seção são apresentados modelos para o Problema de Roteamento em redes ópticas com proteção dedicada do tipo 1+1. conforme seção 2.4 tal proteção pode ser classificada desta forma: o tráfego é transmitido de forma simultânea ao de trabalho. Porém primeiramente, de forma a facilitar o entendimento dos modelos propostos, no item 3.1.1 são apresentados os parâmetros e variáveis a serem utilizados no desenvolvimento dos modelos.

### 3.1.1 Caracterização de Variáveis e parâmetros

Seja o grafo  $G = (V, A)$  representando a rede, onde  $V = \{1, 2, \dots, ||V||\}$  é o conjunto de nós representando os roteadores e outros elementos da rede e  $A = \{(i, j)\}$  o conjunto de arcos simbolizando os enlaces existentes entre cada par  $(i, j)$  de nós. Uma requisição para um par origem-destino  $(u, v)$  é definida como uma demanda por um produto  $k$  com origem em  $u$  e destino em  $v$ . Abaixo, de forma mais detalhada, são identificados e caracterizados os parâmetros e variáveis presentes nos modelos explicitados no restante da seção :

#### Parâmetros:

- $d_k$  : demanda do produto  $k$  para um par origem - destino  $(u, v)$
- $u$  : origem da demanda
- $v$  : destino da demanda
- $B_{ij}$  : capacidade total do enlace  $(i, j)$
- $C$  : representa uma quantidade mínima de requisições que devem ser atendidas, desde que seja viável

#### Variáveis:

- $x_{ij}^k$  : 1 se o produto  $k$  usa o arco  $(i, j)$ , 0 caso contrário
- $x_{ij}^{kp}$  : 1 se o produto  $k$  usa o arco  $(i, j)$  na rota de proteção, 0 caso contrário
- $a^k$  : 1 se a requisição é atendida, 0 caso contrário

### 3.1.2 Formulações Matemáticas

Nesta subseção é apresentado inicialmente o modelo (3.1) - (3.5) que trata o problema de Roteamento em redes ópticas com proteção nos enlaces, com o objetivo de minimizar o número de enlaces utilizados no transporte. Depois são mostradas possíveis variações sobre este modelo tais como mudança na proteção passando a ser sobre os nós e adição de novos objetivos.

De forma a criar a proteção na rede, para cada demanda  $d_k$  são criadas duas rotas, uma de trabalho (primária) e outra de proteção (secundária), esta última pode ser disjunta de enlaces ou nós em relação a primeira, dependendo claro se a proteção é feita em cima dos enlaces ou nós da rede.

$$\min \sum_k (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \quad (3.1)$$

$$\sum_k d_k (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \leq B_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.2)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ij}^k - \sum_{(l,i)} x_{li}^k = \begin{cases} 1, & \text{se } i = u, \quad \forall k \\ -1, & \text{se } i = v, \quad \forall k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ij}^{kp} - \sum_{(l,i)} x_{li}^{kp} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = u, \quad \forall k \\ -1, & \text{se } i = v, \quad \forall k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$x_{ij}^{kp} + x_{ij}^k \leq 1, \quad \forall (i, j), \forall k \quad (3.5)$$

$$x_{ij}^k, x_{ij}^{kp}, a^k \in \{0, 1\} \quad (3.6)$$

Como pode ser visto na função objetivo 3.1, procura-se minimizar o número de enlaces utilizados no transporte de cada uma das requisições. Nesta função leva-se em conta tanto os enlaces utilizados na rota de trabalho quanto na de proteção. Quanto menos enlaces forem utilizados no transporte da demanda, menor será o atraso.

Na restrição exibida em (3.2), o somatório das demandas que passam no enlace  $(i, j)$  deve ser menor ou igual a capacidade do mesmo, ou seja, através desta restrição verifica-se que a quantidade de dados a trafegar no arco  $(i, j)$  não pode ultrapassar sua capacidade  $B_{i,j}$ .

Em (3.3) são explicitadas as restrições clássicas de conservação de fluxo, as quais garantem que todo o tráfego que entra em um determinado vértice deverá ser o mesmo a sair, exceto na origem e destino da requisição. Tal restrição se aplica aos nós pertencentes as rotas de trabalho. Já as restrições em (3.4) tem a mesma função da anterior, porém sendo aplicadas aos nós pertencentes a rota de proteção criada.

Por fim a restrição (3.5) é utilizada para garantir que uma mesma requisição não compartilhe o mesmo enlace tanto na rota de trabalho quanto na de proteção. Logo esta restrição garante que a rota de trabalho seja disjunta de arco da rota de proteção para uma dada requisição. Se ao invés de usar a proteção com rotas disjuntas de arco se queira fazer uso de uma proteção com rotas disjuntas de nó, basta trocar a restrição exibida em (3.5) pela (3.7) mostrada a seguir:

$$\sum_{(i,j) \in E(j)} (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \leq 1, \quad \forall k, \forall j \neq u, j \neq v \quad (3.7)$$

onde  $E(j)$  é o conjunto dos arcos que chegam ao nó  $j$ .

Frequentemente no contexto de redes ópticas aparece o conceito de QoS (Quality of Service), visto que a medida que ocorre a evolução das redes, mais se tem exigência sobre a qualidade e segurança da mesma. Exemplos de requisitos nesse sentido são parâmetros como redução do número de requisições bloqueadas e redução no atraso sobre o envio das requisições pela rede.

Devido ao elevado número de indicadores de QoS que podem ser considerados no roteamento em redes ópticas, as técnicas de otimização multi-objetivo podem ser consideradas como alternativa para solução, de forma mais ampla, deste problema. Ao se considerar um número maior de objetivos, tem-se um aumento na complexidade do problema, uma vez que o resultado de tal otimização fornece um conjunto de soluções, caracterizado na literatura como conjunto Pareto-Ótimo, diferentemente do caso mono-objetivo que gera apenas uma solução, ou seja, um ponto de mínimo/máximo. Então diante deste contexto, é proposta uma extensão do modelo apresentado, onde além do objetivo de se minimizar o número de enlaces, adiciona-se mais dois objetivos, ambos podendo ser considerados indicadores de QoS da rede. Logo passa-se a ter três funções objetivos, caracterizadas como:

- $f_1$  : O número de enlaces utilizados no transporte de cada uma das requisições. Nesta função leva-se em conta tanto os enlaces utilizados na rota de trabalho quanto na de proteção. Quanto menos enlaces forem utilizados no transporte da demanda menor será o atraso na transmissão dos dados.
- $f_2$  : A quantidade de requisições rejeitadas na rede. Obviamente, quanto menos requisições forem rejeitadas, maior a taxa de demandas atendidas, aumentando assim a confiabilidade da rede.
- $f_3$  : O balanceamento de carga na rede. Isto nos diz que a carga está distribuída entre os enlaces da rede.

Então o modelo multi-objetivo aqui proposto pode ser expresso como:

$$\min = \begin{cases} f_1 = \sum_k (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \\ f_2 = \sum_k (1 - a^k) \\ f_3 = \alpha \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\sum_k d_k (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \leq \alpha B_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.9)$$

$$\sum_k a^k \geq C \quad (3.10)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ij}^k - \sum_{(l,i)} x_{li}^k = \begin{cases} a^k, & \text{se } i = u, \quad \forall k \\ -a^k, & \text{se } i = v, \quad \forall k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ij}^{kp} - \sum_{(l,i)} x_{li}^{kp} = \begin{cases} a^k, & \text{se } i = u, \quad \forall k \\ -a^k, & \text{se } i = v, \quad \forall k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$x_{ij}^{kp} + x_{ij}^k \leq 1, \quad \forall (i, j), \forall k \quad (3.13)$$

$$x_{ij}^k, x_{ij}^{kp}, a^k \in \{0, 1\} \quad (3.14)$$

Como pode ser observado, a adição dos novos objetivos implicaram em mudanças no conjunto de restrições do modelo. As restrições expressas em (3.9) são responsáveis em verificar que a quantidade de dados a trafegar no arco  $(i, j)$  não pode ultrapassar sua capacidade  $B_{i,j}$ . Já a restrição (3.10), que não aparece no modelo inicial, permite limitar a um número mínimo  $C$  de requisições que devem ser atendidas do conjunto de requisições, desde que essa condição seja viável para a rede dada. Este tipo de limitação do número de demandas que não podem ser bloqueadas mostra-se de grande valia em determinados ambientes, além de impor mais um quesito de qualidade de serviço a rede. Por fim, as restrições clássicas de controle de fluxo expressas em (3.11) e (3.12), passam a fazer tal controle através das variáveis  $a^k$  que determinam se a requisição  $k$  foi atendida ou não.

## 3.2 Problema de RWA com proteção

Nesta seção são apresentados modelos para o Problema de RWA com proteção dedicada do tipo 1+1, como nos modelos da seção 3.1. Porém, diferente dos modelos explicitados em 3.1, além da necessidade de se obter uma rota para o transporte da requisição, há também a necessidade de seleção e alocação dos comprimentos de onda para a

transmissão dos dados. De forma a facilitar o entendimento dos modelos, na subseção 3.2.1 são apresentados os parâmetros e variáveis utilizados no desenvolvimento dos mesmos.

### 3.2.1 Definições

Seja o grafo  $G = (V, A)$  representando a rede a ser otimizada, onde  $V = \{1, 2, \dots, ||V||\}$  é o conjunto de nós representando os roteadores e outros elementos da rede e  $A = \{(i, j)\}$  o conjunto de arcos simbolizando os enlaces existentes entre cada par  $(i, j)$  de nós. Seja  $K$  o conjunto de produtos e  $S$  o conjunto de comprimentos de onda. Abaixo são definidos os parâmetros e variáveis dos modelos apresentados nesta seção:

#### Parâmetros

- $d_k$ : demanda do produto  $k$  para um par origem - destino  $(u, v)$
- $u$ : origem da demanda
- $v$ : destino da demanda
- $Q_s$ : capacidade do comprimento de onda  $s$
- $W_{ij}$ : número total de comprimentos de onda no arco  $(i, j)$

#### Variáveis

- $x_{ij}^k$ : 1 se o produto  $k$  usa o arco  $(i, j)$ , 0 caso contrário
- $x_{ij}^{kp}$ : 1 se o produto  $k$  usa o arco  $(i, j)$  na rota de proteção, 0 caso contrário
- $t_k^{sij}$ : 1 se o comprimento de onda  $s$  é utilizado no arco  $(i, j)$  pelo produto  $k$
- $a^k$ : 1 se a requisição é atendida, 0 caso contrário

### 3.2.2 Formulações Matemáticas

O modelo apresentado nesta seção trata do problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda em redes ópticas WDM. De forma análoga ao modelo apresentado em 3.1, as rotas de trabalho e proteção de cada requisição do conjunto de requisições devem ser disjuntas de enlace ou nó. Além disso foi retirada a restrição de continuidade, existente em vários modelos encontrados na literatura, que impunha a necessidade de utilização de um mesmo comprimento de onda da origem até o destino da demanda. Tal mudança possibilita ter um melhor uso dos recursos da rede.

Após a apresentação do primeiro modelo, serão abordadas algumas variações, seguindo a linha de pensamento usada na subseção 3.1.2, na qual apresentou-se extensões ao modelo com o intuito de alterar os elementos aos quais a proteção é aplicada e adição de novos objetivos a função.

A seguir é apresentado o primeiro modelo proposto referente ao problema de RWA com proteção nos enlaces, juntamente com o detalhamento da função objetivo e restrições existentes no mesmo.

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{(i,j)} t_k^{sij} \quad (3.15)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ij}^k - \sum_{(l,i)} x_{li}^k = \begin{cases} 1, & \text{se } i = u, \quad \forall k \\ -1, & \text{se } i = v, \quad \forall k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ij}^{kp} - \sum_{(l,i)} x_{li}^{kp} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = u, \quad \forall k \\ -1, & \text{se } i = v, \quad \forall k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$\sum_{s \in S} Q_s t_k^{sij} \geq d_k(x_{(i,j)}^k + x_{(i,j)}^{kp}), \quad \forall k, \forall (i,j) \in A \quad (3.18)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} t_k^{sij} \leq W_{ij}, \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.19)$$

$$\sum_{k \in K} t_k^{sij} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A, \forall s \quad (3.20)$$

$$t_k^{sij} \leq t_k^{s-1,ij}, \quad \forall k, \forall s, \forall (i,j) \quad (3.21)$$

$$x_{ij}^{kp} + x_{ij}^k \leq 1, \quad \forall (i,j), \forall k \quad (3.22)$$

$$x_{ij}^k, x_{ij}^{kp}, t_k^{sij} \in \{0, 1\} \quad (3.23)$$

Como pode ser observado, a função objetivo deste modelo visa minimizar a utilização dos comprimentos de onda em cada arco  $(i,j)$  pertencente as rotas necessárias no transporte do conjunto de requisições.

Em (3.16) são explicitadas as restrições clássicas de conservação de fluxo, as quais garantem que todo o tráfego que entra em um determinado nó deverá ser o mesmo a sair, exceto na origem e destino da requisição. Tal restrição se aplica aos nós pertencentes as rotas de trabalho. Já as restrições em (3.17) tem a mesma função da anterior, porém sendo aplicadas aos nós pertencentes a rota de proteção criada.

As restrições exibidas em (3.18) garantem que a capacidade, em comprimentos de

onda, alocadas a cada arco para cada produto  $k$  seja maior que a demanda do produto  $k$  no arco  $(i, j)$ .

As restrições em (3.19) garantem que o número de comprimentos de onda alocados nos arcos  $(i, j)$ , que foram utilizados por cada uma das requisições  $k$ , deve ser menor ou igual a capacidade do arco em número de comprimentos de onda,  $W_{i,j}$ . Em (3.21) basicamente é imposto que os comprimentos de onda devem ser utilizados na sequência de sua numeração, ou seja, através desta restrição o modelo segue as características do algoritmo de alocação de comprimentos de onda denominado *First Fit* e que foi explicado em 2.3.4 .

Em (3.20) são mostradas as restrições responsáveis por garantir que apenas uma única requisição  $k$  possa ser transportada pelo comprimento de onda  $s$  pertencente ao enlace  $(i, j)$ , ou seja, um mesmo comprimento de onda não pode transportar em um mesmo enlace mais de uma demanda.

De forma análoga a restrição (3.5) apresentada na seção 3.1.2 , a restrição (3.22) é utilizada de forma a garantir que uma mesma requisição não compartilhe o mesmo enlace tanto na rota de trabalho quanto de proteção. Logo esta restrição garante que a rota de trabalho seja disjunta de arco da rota de proteção para uma dada requisição.

Assim como no modelo da seção 3.1.2, trocando a restrição (3.22) pela restrição (3.24), obtem-se uma proteção na qual as rotas, tanto de trabalho quanto de proteção de cada requisição, são disjuntas de nó.

$$\sum_{(i,j) \in E(j)} (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \leq 1, \quad \forall k, \forall j \neq u \quad (3.24)$$

De forma análoga a seção 3.1.2, podemos adicionar mais objetivos a função inicial, transformando o modelo de mono-objetivo para multi-objetivo. No caso do RWA com proteção, incluímos mais três funções objetivo no modelo inicial. E como já foi discutido na subseção 3.1.2, tal alteração da quantidade de objetivos, acarreta em uma mudança no conjunto de restrições do modelo inicial mono-objetivo. Como pode ser observado em 3.25 são consideradas então quatro funções objetivo associadas ao modelo, cujo os objetivos são minimizar:

- $f_1$  : O número de enlaces utilizados no transporte dos produtos  $k$ . Nesta função leva-se em conta tanto os enlaces utilizados na rota de trabalho quanto na de proteção. Quanto menos enlaces forem utilizados no transporte da demanda, menor será o atraso.

- $f_2$  : A quantidade de requisições rejeitadas na rede. Obviamente, quanto menos requisições forem rejeitadas, maior a taxa de demandas atendidas, aumentando assim a confiabilidade da rede.
- $f_3$  : O balanceamento de carga na rede. Isto nos diz que a carga está distribuída de maneira uniforme entre os enlaces da rede.
- $f_4$  : O número de comprimentos de onda utilizados para o transporte dos produtos  $k$ .

Com a adição dos novos critérios e mudança nas restrições, o modelo multi-objetivo para o problema de RWA com proteção, neste caso com proteção nos enlaces, pode ser expresso como:

$$\min = \begin{cases} f_1 = \sum_k (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \\ f_2 = \sum_k (1 - a^k) \\ f_3 = \alpha \\ f_4 = \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{(i,j)} t_k^{sij} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ij}^k - \sum_{(l,i)} x_{li}^k = \begin{cases} a^k, & \text{se } i = u, \quad \forall k \\ -a^k, & \text{se } i = v, \quad \forall k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\sum_{(i,j)} x_{ij}^{kp} - \sum_{(l,i)} x_{li}^{kp} = \begin{cases} a^k, & \text{se } i = u, \quad \forall k \\ -a^k, & \text{se } i = v, \quad \forall k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\sum_k a^k \geq C \quad (3.28)$$

$$\sum_{s \in S} Q_s t_k^{sij} \geq d_k (x_{(i,j)}^k + x_{(i,j)}^{kp}), \quad \forall k, \forall (i, j) \in A \quad (3.29)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} Q_s t_k^{sij} \leq \alpha B_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.30)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} t_k^{sij} \leq W_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.31)$$

$$\sum_{k \in K} t_k^{sij} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A, \forall s \quad (3.32)$$

$$t_k^{sij} \leq t_k^{s-1,ij}, \quad \forall k, \forall s, \forall (i, j) \quad (3.33)$$

$$x_{ij}^{kp} + x_{ij}^k \leq 1, \quad \forall (i, j), \forall k \quad (3.34)$$

$$x_{ij}^k, x_{ij}^{kp}, t_k^{sij} \in \{0, 1\} \quad (3.35)$$

Em (3.26) e (3.27) são explicitadas as restrições clássicas de conservação de fluxo para os nós da rota de trabalho e proteção respectivamente. O objetivo de tais restrições é garantir que todo o tráfego que entra em um determinado nó deverá ser o mesmo a sair, exceto na origem e destino do produto  $k$ .

As restrições (3.28) tem como objetivo atribuir um limite mínimo de requisições que devem ser atendidas pela rede. Tal valor é dado pela constante  $C$  presente no lado direito da restrição. Apenas como referência, nos testes feitos sobre o modelo desta seção, o limite mínimo de requisições a serem atendidas foi de 70%. Já as restrições demonstradas em (3.29) tem o objetivo de garantir que a capacidade, em comprimentos de onda, alocadas a cada arco para cada produto  $k$  seja maior que a demanda do produto  $k$  no arco  $(i, j)$ .

As restrições expressas em (3.30) garantem que a capacidade dos comprimentos de onda utilizados no transporte do conjunto de requisições passantes no arco  $(i, j)$  não ultrapassem a capacidade máxima do mesmo. Como pode ser visto, nestas restrições aparece a variável  $\alpha$  responsável pelo balanceamento da rede e que é minimizada pela função  $f_3$  mostrada em (3.25).

Em (3.31) são apresentadas as restrições que são responsáveis em assegurar que a quantidade de comprimentos de onda alocados ao enlace  $(i, j)$ , deve ser menor ou igual a capacidade do arco em número de comprimentos de onda. E por fim as restrições representadas em (3.34) garantem que uma mesma requisição não compartilhe o mesmo arco na rota de trabalho e proteção.

# Capítulo 4

## Abordagens Heurísticas

Neste capítulo são apresentados dois Algoritmos Genéticos, um mono-objetivo para o problema de RWA com proteção nos enlaces e outro multi-objetivo para o problema de roteamento com a mesma proteção apresentada no primeiro.

Inicialmente na seção 4.1 são apresentadas algumas definições e características gerais sobre o algoritmo genético. Depois, na seção 4.2, é detalhado o algoritmo genético proposto para a resolução do problema multi-objetivo de Roteamento com proteção nos enlaces. Por fim na seção 4.3 é explicitada a heurística implementada para o problema mono-objetivo de RWA com proteção nos enlaces.

### 4.1 Introdução

O Algoritmo Genético (AG) é um método para a solução de problemas de otimização que é baseado na seleção natural, o processo que conduz a evolução biológica. Combina a sobrevivência do mais apto entre estruturas de seqüências com uma troca de informações, porém com certa aleatoriedade. Assim, o Algoritmo Genético modifica repetidamente a população de indivíduos.

Os AGs foram introduzidos em 1975 por John Holland da Universidade de Michigan [Goldberg, 1989], com o intuito de formalizar matematicamente e explicar rigorosamente processos de adaptação em sistemas naturais e desenvolver sistemas artificiais (simulados em computador) que reproduzam os mecanismos originais encontrados em sistemas naturais.

O processo de evolução pode ser aleatório, porém guiado por um mecanismo de seleção baseado na adaptação de estruturas individuais. A cada iteração do algoritmo um novo conjunto de estruturas é criado a partir de estruturas bem adaptadas selecionadas da geração anterior, pela troca de informação (bits ou blocos) entre essas

estruturas. Novas informações são geradas aleatoriamente com uma dada probabilidade, e incluídas nas estruturas descendentes. Se projetado e implementado de forma adequada, um AG irá exibir um comportamento similar ao descrito na teoria de evolução de Darwin - estruturas com adaptação relativamente superior possuem uma chance maior de sobreviver e produzir descendentes ainda mais bem adaptados. O resultado será um aumento na adaptação global da população a cada nova geração. A Figura 4.1 ilustra o processo clássico de um algoritmo genético.



**Figura 4.1.** Algoritmo Genético clássico

Por serem uma analogia da seleção natural de Darwin, os algoritmos genéticos adotaram um vocabulário derivado da genética. Assim, um conjunto de soluções candidatas é denominado de população; cada solução candidata é denominada indivíduo ou cromossomo, que por sua vez é formada por genes. Cada iteração do algoritmo genético é chamada de geração; a combinação de dois (ou mais) indivíduos para se criar novos indivíduos é dito de recombinação ou *crossover*; e a modificação aleatória de um indivíduo é chamada de mutação.

## 4.2 Algoritmo Genético Multi-objetivo para o Problema de Roteamento com proteção nos enlaces

O algoritmo genético proposto nesta seção trata do Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces. Nas subseções a seguir o algoritmo implementado é explicado de forma detalhada. Inicialmente na subseção 4.2.1 será descrita a metaheurística utilizada, denominada NSGA-II e em 4.2.2 será descrita a representação genética do indivíduos da população. Depois em 4.2.3 é mostrado o processo de obtenção da população inicial a ser usada no processo de cruzamento. Em 4.2.4 o processo de seleção implementado é descrito, e o mesmo é utilizado no cruzamento, explicado na subseção 4.2.5.

### 4.2.1 NSGA-II

A metaheurística utilizada foi a NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) que é utilizada principalmente para resolver problemas multi-objetivo. Ela se baseia em algoritmos genéticos e implementa o conceito de Dominância, ou seja, classificar a População total em *fronts* de acordo com o grau de dominância do indivíduo.

Segundo o NSGA-II, os indivíduos que estão localizados no primeiro *front* são considerados as melhores soluções daquela geração, enquanto que no último *front* encontram-se as piores. Usando esse conceito, pode-se encontrar resultados mais consistentes (pontos mais próximos do conjunto Pareto-ótimo) e que se adaptam melhor ao tipo do problema.

Por meio do critério de dominância, o algoritmo agrega o conceito de Elitismo o qual classifica a população total em diferentes categorias de qualidade ao invés de tratá-las como pertencentes a um único grupo. Isso permite ao algoritmo a priorização daqueles que foram melhores classificados, ou seja, aqueles que são não-dominados.

O algoritmo NSGA-II apresenta dois mecanismos relevantes à aproximação das soluções ao conjunto Pareto-ótimo, o *fast-non-dominated-sorting* e o *crowding-distance-sorting*.

No *fast-non-dominated-sorting* cada indivíduo  $p$  da população  $P$ , armazena dois atributos,  $n_p$  que guarda o número de indivíduos que dominam  $p$  e  $S_P$  que possui a lista dos indivíduos dominados por  $p$ . Este mecanismo, no caso do algoritmo proposto, pode ser dividido em duas etapas. Na primeira etapa ocorre a análise de todos os indivíduos da População total  $P$ , comparando-os uns com os outros para classificá-los de acordo

com o grau de dominância  $n_p$ . Dessa forma se um indivíduo  $p$  é dominado por um número  $x$  de indivíduos da população total  $P$ , o seu valor correspondente de  $n_p$  é igual a  $x$ . De acordo com a definição de dominância, aqueles indivíduos não dominados estão mais próximos do conjunto Pareto-ótimo, logo estes são priorizados para seguirem a próxima geração, portanto, os indivíduos com  $n_p = 0$  seguem. Na segunda etapa ocorre a classificação de cada indivíduo em diferentes categorias (os *fronts*) de acordo com os seus valores de  $n_p$ . Cada indivíduo incluído em um dos fronts são retirados totalmente do contexto do sistema, decrementando os valores de  $n_p$  de cada indivíduo dominado por esses. Isso repete-se até que não sobrem mais indivíduos na população restante. Abaixo é apresentado o pseudocódigo do mecanismo *fast-non-dominated-sorting*:

---

**Algorithm 1** fast-non-dominated-sorting( $P$ )
 

---

**Entrada:**  $P$ 

```

1: para cada  $p \in P$  faça
2:    $S_p = \emptyset$ 
3:    $n_p = 0$ 
4:   para cada  $q \in P$  faça
5:     se  $p \prec q$  então
6:        $S_p = S_p \cup \{q\}$ 
7:     senão se  $q \prec p$  então
8:        $n_p = n_p + 1$ 
9:     fim se
10:  fim para
11:  se  $n_p = 0$  então
12:     $p_{rank} = 1$ 
13:     $F_1 = F_1 \cup \{p\}$ 
14:  fim se
15: fim para
16:  $i = 1$ 
17: para cada  $p \in P$  faça
18:   enquanto  $F_i \neq \emptyset$  faça
19:    para cada  $q \in S_p$  faça
20:      $n_q = n_q - 1$ 
21:     se  $n_q = 0$  então
22:        $q_{rank} = i + 1$ 
23:        $Q = Q \cup \{q\}$ 
24:     fim se
25:   fim para
26:    $i = i + 1$ 
27:    $F_i = Q$ 
28: fim enquanto
29: fim para

```

---

Quando não é possível inserir um *front* por completo, aplica-se o operador *crowding-distance-sorting*. Ele classifica os indivíduos quanto à sua distribuição no espaço de soluções. Ele calcula a distância média entre um ponto central  $i$  selecionado dentro da população e dois pontos localizados nas extremidades do ponto central ( $i - 1$ ) e ( $i + 1$ ). A idéia é que a partir de um ponto central o operador de diversidade possa encontrar pontos extremos e priorizar os pontos mais distantes durante o processo de seleção a fim de espalhar os resultados ao longo do conjunto Pareto-ótimo, ou seja, ele tenta evitar a aglomeração de soluções no espaço de objetivos. A disposição dos pontos extremos formam um cubóide em relação ao ponto central, como pode ser demonstrado através da Figura 4.2 . Uma questão importante sobre o *crowding-distance-sorting* é que ele é aplicado a cada *front* por vez, como pode ser observado no Algoritmo 2 no qual o parâmetro de entrada do método é  $\Gamma$  que neste caso representa um determinado *front* . O método *crowding-distance* é descrito a seguir:

---

**Algorithm 2** crowding-distance( $\Gamma$ )

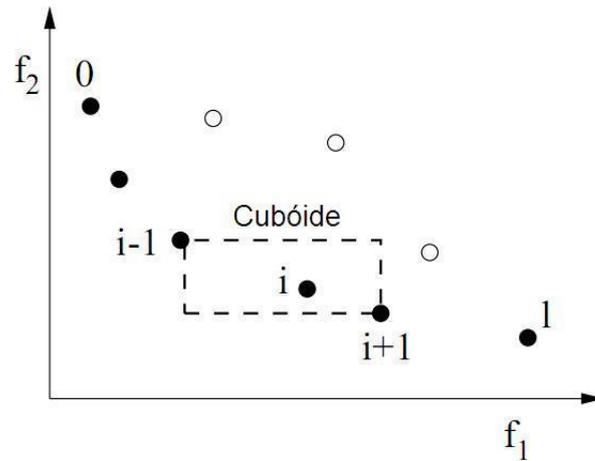
---

**Entrada:**  $\Gamma$ 

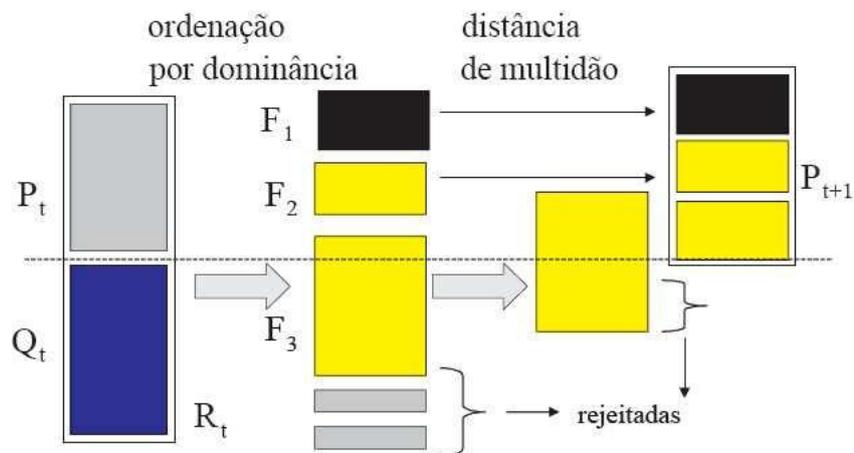
- 1:  $l = |\Gamma|$
  - 2: **para cada**  $i$  **faça**
  - 3:      $\Gamma[i]_{distancia} = 0$
  - 4: **fim para**
  - 5: **para cada** objetivo  $m$  **faça**
  - 6:      $\Gamma = sort(\Gamma, m)$
  - 7:      $\Gamma[1]_{distancia} = \Gamma[l]_{distancia} = \infty$
  - 8:     **para**  $i = 2$  **até**  $(l - 1)$  **faça**
  - 9:          $\Gamma[i]_{distancia} = \Gamma[i]_{distancia} + (\Gamma[i + 1].m - \Gamma[i - 1].m) / (f_m^{max} - f_m^{min})$
  - 10:     **fim para**
  - 11: **fim para**
- 

A Figura 4.3 adaptada de Deb et al. [2000] mostra de forma ilustrada a definição dos indivíduos da próxima geração. Pode-se observar pela figura que inicialmente aplica-se o método *fast-non-dominated-sorting* ao conjunto  $R_t$  composto pelos pais e filhos. Caso não haja a possibilidade de inserção de um *front* por inteiro, no caso da figura exemplificada pelo *front*  $F_3$ , aplica-se o *crowding-distance-sorting* ao *front* em questão. Ao final deste processo temos os indivíduos que constituirão a próxima geração.

A meta-heurística NSGA-II é fundamentado nos conceitos descritos, porém o funcionamento do algoritmo conta com as etapas tradicionais dos algoritmos genéticos (seleção, cruzamento, etc). A entrada do algoritmo consiste de dois parâmetros, que são o tamanho da população ( $T_{pop}$ ) e a quantidade máxima de gerações ( $G_{max}$ ). Inicialmente define-se uma população inicial para então iniciar o processo evolutivo. Então



**Figura 4.2.** Ilustração do *crowding-distance-sorting*



**Figura 4.3.** Definição dos indivíduos da próxima geração

é feito o cruzamento, e os indivíduos resultantes fazem parte do conjunto  $Q$ . Devido ao algoritmo ter características elitistas, o conjunto  $R$  representa todos os indivíduos do algoritmo, ou seja, a união dos conjuntos de pais  $P$  e filhos  $Q$ . Para a definição dos melhores indivíduos então são utilizados os mecanismos explicitados anteriormente, denominados *fast-non-dominated-sorting* e *crowding-distance-sorting*. A figura 4.4 ilustra o ciclo da meta-heurística NSGA-II implementada e o Pseudo-código 3 representa o algoritmo NSGA-II implementado.

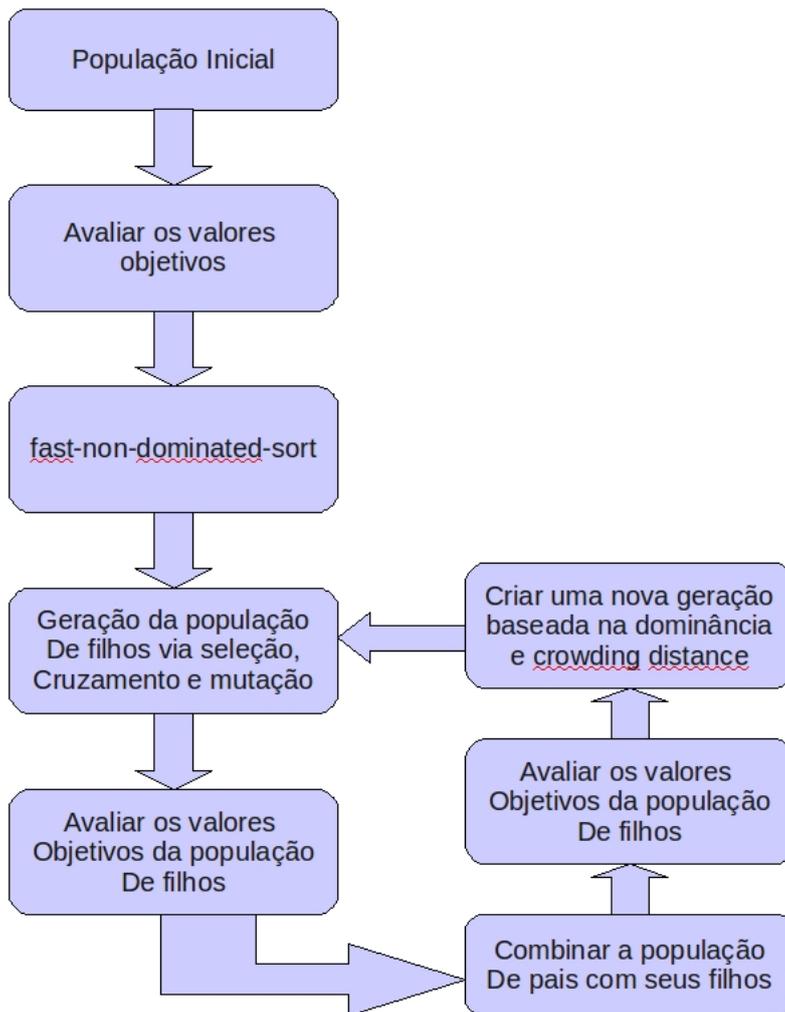


Figura 4.4. Ciclo da meta-heurística NSGA-II

Tabela 4.1. Requisições

Topologia	Requisição
Mesh	(0,4) (3,2)

### 4.2.2 Representação Genética

Nesta abordagem, cada indivíduo representa uma solução para o problema, assim cada indivíduo possuirá um vetor de genes. Cada gene do indivíduo armazena duas rotas, uma que será a rota original a ser utilizada no envio da requisição e outra que servirá como rota de proteção, caso a original sofra algum dano e não consiga levar a requisição até seu destino. Vamos usar como exemplo a rede da Figura 4.5 e o conjunto de requisições da Tabela 4.1.

Os alelos representam as possíveis rotas, trabalho e de proteção, para cada requi-

**Algorithm 3** NSGA-II**Entrada:**  $T_{pop}$ ,  $G_{max}$ 

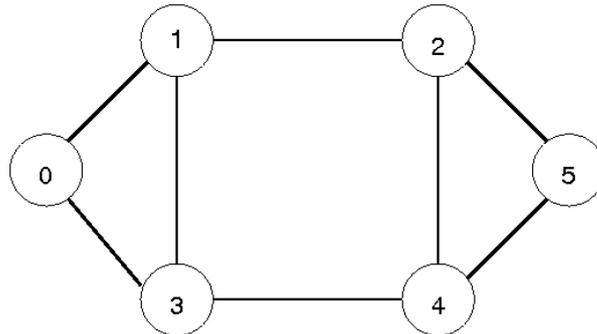

---

```

1:  $P_t = \text{populacaoInicial}(T_{pop})$ 
2: para  $t = 1$  até  $G_{max}$  faça
3:    $Q_t = \text{cruzamento}(P_t)$ 
4:    $R_t = P_t \cup Q_t$ 
5:    $\chi = \text{fast - non - dominated - sorting}(R_t)$ 
6:    $P_{t+1} = \emptyset$ 
7:    $i = 1$ 
8:   repita
9:      $\text{crowding - distance - sorting}(\chi_i)$ 
10:     $P_{t+1} = P_{t+1} \cup \chi_i$ 
11:     $i = i + 1$ 
12:  até  $(|P_{t+1}| + |\chi_i|) \leq T_{pop}$ 
13:  enquanto  $|P_{t+1}| < T_{pop}$  faça
14:     $P_{t+1} = P_{t+1} \cup \text{melhorElemento}(\chi)$ 
15:  fim enquanto
16:  retorne  $P$ 
17: fim para

```

---

**Figura 4.5.** Exemplo - Topologia Mesh

sição. No caso deste trabalho o número de possíveis rotas é limitado pelo parâmetro  $K$ , ou seja, o algoritmo trabalhará com os  $K$  primeiros caminhos de cada requisição da rede. Por exemplo, se  $K = 2$ , poderia-se ter a configuração, mostrada na Tabela 4.2

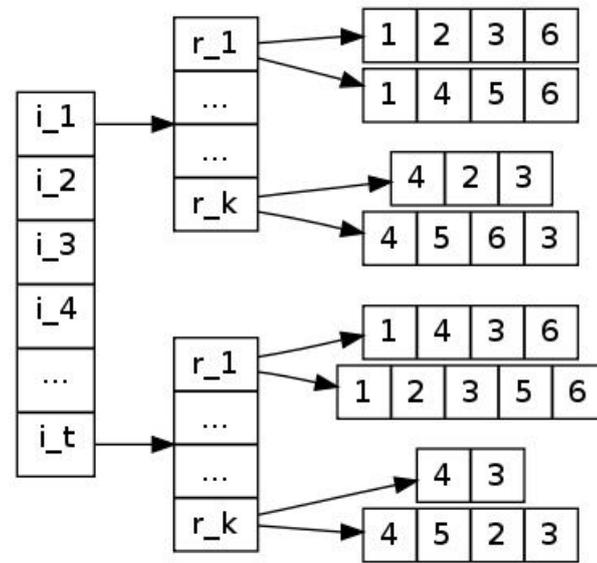
**Tabela 4.2.** Possíveis valores de genes

Requisição	Alelo 1	Alelo 2
1	0-3-4	0-1-2-4
2	3-1-2	3-4-2

Na Tabela 4.3 são mostrados os possíveis valores dos indivíduos levando em conta a topologia e requisições exemplificadas.

**Tabela 4.3.** Valores de possíveis indivíduos

Indivíduo	Gene 1	Gene 2
1	0-3-4	3-1-2
	0-1-2-4	3-4-2
2	0-3-4	3-4-2
	0-1-2-4	3-1-2



**Figura 4.6.** Representação genética utilizada no algoritmo

A representação genética é ilustrada na Figura 4.6. Como pode ser observado cada um dos  $t$  indivíduos da população armazena um vetor de  $k$  requisições e cada uma guarda duas listas, uma contendo a rota de trabalho e outra armazenando a rota de proteção.

### 4.2.3 População Inicial

Para a geração da população inicial, inicialmente seleciona-se aleatoriamente uma requisição  $r$  do conjunto  $R$ . Então através do algoritmo de Dijkstra [1959], são geradas uma rota de trabalho e uma de proteção, sendo que esta última deve ser disjunta de arco da primeira. Para a criação da rota de proteção, retira-se inicialmente do grafo original, caso exista, os enlaces pertencentes ao caminho de trabalho e executa-se o algoritmo de Dijkstra [1959] em cima desta nova rede.

Para que a requisição seja considerada atendida, deve-se obrigatoriamente encontrar uma rota de trabalho e uma rota de proteção e neste caso em que se chega ao

atendimento da demanda, a matriz de capacidades é atualizada. Porém para que uma requisição seja dada como não-atendida, ela deve se encaixar em alguma das seguintes situações:

- Não é encontrada uma rota de trabalho com capacidade para transportar a requisição.
- É encontrada uma rota de trabalho porém não é possível estabelecer uma rota de proteção.

Ao final desta etapa, temos uma população de indivíduos com possíveis soluções para o problema.

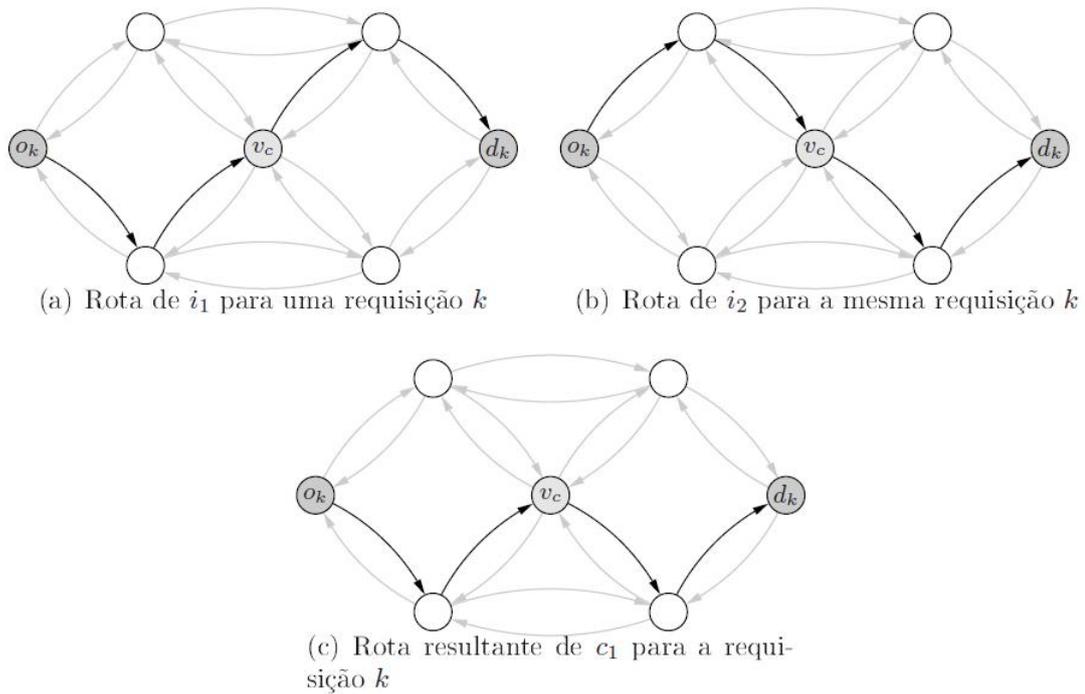
#### 4.2.4 Seleção

Nesta fase os indivíduos mais aptos da geração atual são selecionados e estes são utilizados para gerar uma nova população por cruzamento. No caso deste algoritmo a seleção dos indivíduos baseia-se no conceito de dominância apresentado anteriormente. O método de seleção determinado neste algoritmo escolhe de forma aleatória um par de indivíduos da população e verifica-se a relação de dominância entre eles e aquele indivíduo que dominar o outro, segue para o cruzamento e caso não haja uma relação de dominância entre eles, ambos são cruzados. Este método de seleção é denominado *Torneio de Pareto*.

#### 4.2.5 Cruzamento

Nesta fase, os indivíduos selecionados são cruzados, de forma a gerar um indivíduo filho com as características dos pais. Suponha que  $i_1$  e  $i_2$  são os pais selecionados para o cruzamento. Caso ambos os pais possuam rotas viáveis para a requisição  $d_k$ , o filho herdará tanto uma rota de trabalho quanto de proteção, que serão a integração das rotas dos pais. Para ambas as rotas, proteção e trabalho, o processo de cruzamento é o mesmo. Inicialmente encontra-se um vértice  $v_c$  que seja comum as rotas de  $i_1$  e  $i_2$  e caso o mesmo seja encontrado, ele será usado como intermédio entre as rotas dos pais. Da origem da requisição até  $v_c$  é herdado de  $i_1$  e de  $v_c$  até o destino será obtido de  $i_2$ . A Figura 4.7 ilustra o processo de cruzamento aqui proposto.

Há a possibilidade de não se ter um nó em comum entre as rotas, de trabalho ou proteção, de  $i_1$  e  $i_2$  e então neste caso é utilizada outra estratégia para a geração de um novo caminho. Nesta estratégia busca-se por uma aresta  $a_c$  que conecte a rota de  $i_1$  a  $i_2$ , ou vice-versa. Assim o novo caminho para a demanda  $d_k$  será composto pelas



**Figura 4.7.** Cruzamento do Algoritmo Genético proposto

arestas de  $i_1$  da origem de  $d_k$  até  $a_c$  e de  $i_2$  de  $a_c$  até o destino de  $d_k$ . Este processo é ilustrado através da Figura 4.8.

Caso alguns dos pais tenha esta requisição  $r_k$  rejeitada, o filho herdará automaticamente a rota do pai que possua  $r_k$  atendida. E se nenhum dos pais tenha atendido  $r_k$ , o filho não recebe nenhuma rota, e a requisição é dada como rejeitada.

### 4.3 Algoritmo Genético Mono-objetivo para o Problema de RWA com proteção nos arcos

Neste capítulo é apresentado um algoritmo genético para resolução do problema de RWA com proteção dedicada 1+1 nos arcos. O algoritmo aqui proposto baseia-se na heurística apresentada no capítulo 4.2, diferenciando-se basicamente por não usar a meta-heurística NSGA-II visto que neste caso o problema tratado é mono-objetivo. Uma outra diferença importante é que no RWA o elemento comprimento de onda é levado em conta, tornando o problema mais complexo.

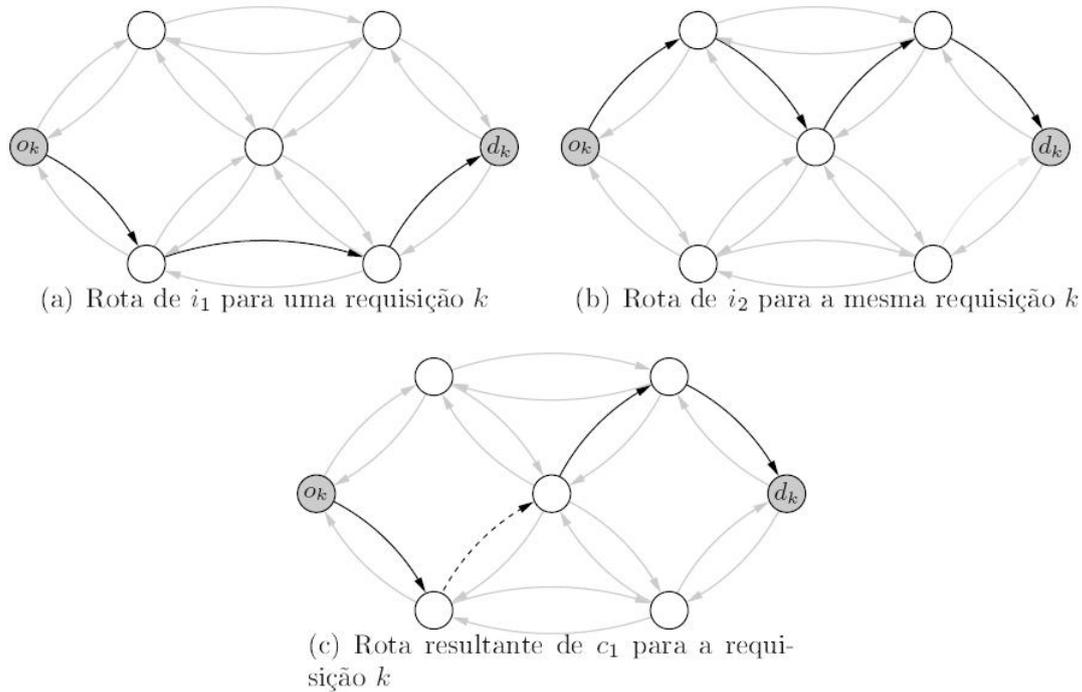


Figura 4.8. Cruzamento do Algoritmo Genético proposto

### 4.3.1 Representação Genética e População Inicial

Tal como nas populações naturais, as populações abstratas dos algoritmos genéticos possuem indivíduos. Cada indivíduo, no contexto do algoritmo proposto nesta seção, tem basicamente a mesma representação descrita de forma detalhada na subseção 4.2.2. A única diferença neste contexto, é a de que cada arco (enlace) do grafo (rede) armazena as informações referentes aos comprimentos de onda, como quantidade utilizada e quais estão disponíveis para a alocação.

Quanto a geração da população inicial, inicialmente seleciona-se aleatoriamente uma requisição  $d_k$  do conjunto  $R$  e através do algoritmo de Dijkstra [1959], são geradas uma rota de trabalho e uma de proteção, sendo que esta última deve ser disjunta de arco da primeira. Após selecionar as rotas de trabalho e proteção para a  $d_k$ , tenta-se alocar os comprimentos de onda necessários para o transporte da mesma. Caso haja sucesso no roteamento e alocação do comprimento de onda para  $d_k$ , a mesma é dada como atendida. Para que seja caracterizada como não-atendida, uma das seguintes situações deve ocorrer:

- (a) Não foi possível estabelecer uma rota de trabalho entre a origem e o destino de  $d_k$
- (b) Encontrou-se uma rota de trabalho porém a mesma não continha os comprimentos

de onda necessários para a transmissão de  $d_k$

- (c) Não foi possível encontrar uma rota de proteção entre a origem e o destino de  $d_k$
- (d) Por fim, as situações em (a), (b) e (c) não ocorrem mas não existem comprimentos de ondas suficientes na rota de proteção para o transporte de  $d_k$

### 4.3.2 Função *Fitness*

A função *fitness* representa a posição do indivíduo na população e quanto melhor esta posição mais apto é o indivíduo. A definição da função *fitness* depende da aplicação, mas há algumas linhas gerais que podem ser seguidas na escolha da mesma, como refletir as características mais relevantes a serem otimizadas, ou seja, representar de forma mais próxima a função objetivo do problema e também prover informação suficiente para guiar a busca do algoritmo genético.

No caso do algoritmo proposto a função *fitness* representa fielmente a função objetivo apresentada no modelo da seção 3.2, ou seja, contabiliza o número de comprimentos de onda utilizados no transporte das requisições do conjunto de demandas de conexão da rede. A função *fitness*  $f$  pode ser representada como:

$$f = \text{número total de comprimentos de onda utilizados} \quad (4.1)$$

A função apresentada em 4.1 será utilizada na escolha dos indivíduos a serem cruzados e que constituirão a nova população.

### 4.3.3 Seleção e Cruzamento

A seleção dos indivíduos para o cruzamento baseia-se em sua classificação diante da população atual que é determinada pelo valor da função *fitness* do indivíduo. No método de seleção do algoritmo genético proposto, escolhe-se de forma aleatória dois elementos da população e em seguida as funções *fitness* dos mesmos são comparadas. Aquele indivíduo que possuir maior valor da função, ou seja, ser mais apto para sobrevivência, será escolhido para o cruzamento. Como já foi dito na sessão 4.2.4, este método de seleção é denominado na literatura como Torneio de Pareto.

No caso do cruzamento deste algoritmo, o mesmo tem as mesmas características do apresentado na seção 4.2.5, visto a proximidade dos problemas. Porém no caso do problema de RWA, é necessário levar em conta os comprimentos de onda de cada enlace da rota de  $d_k$ . Um outro motivo em se utilizar o mesmo operando genético em ambos

os algoritmos foi o de analisar o comportamento deles mediante a mesma operação de reprodução.

#### 4.3.4 Mutação

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma estrutura escolhida, fornecendo assim, meios para introdução de novos elementos na população. Desta forma tenta-se contornar o problema de mínimos locais, pois com este mecanismo, altera-se levemente a direção da busca.

Neste algoritmo, o processo de mutação funciona da seguinte maneira no indivíduo candidato ao processo: escolhe-se de forma aleatória uma requisição pertencente ao conjunto de demandas atendidas. Então retira-se da rota de trabalho a aresta com maior quantidade de tráfego passante e a partir desta remoção, tenta-se formar uma nova rota de trabalho. Caso tal rota seja estabelecida, procura-se então criar uma nova rota de proteção baseando-se no novo caminho de trabalho. Caso obtenha sucesso nestas operações, a demanda é dada como atendida e o processo de mutação é terminado.

Como o processo de mutação pode ser visto em sua essência como aleatório, existe a possibilidade de piorar a solução do indivíduo. No contexto deste algoritmo, tal situação ocorre quando não é possível estabelecer uma conexão tanto de trabalho quanto de proteção para uma dada demanda  $d_k$ .

# Capítulo 5

## Resultados Numéricos

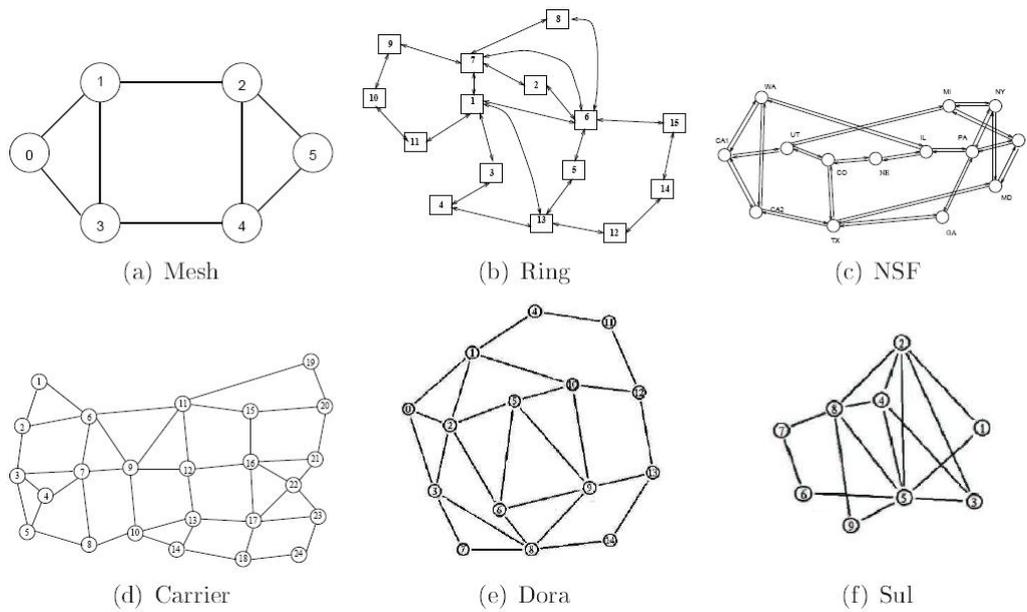
Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos dos testes efetuados sobre os modelos e heurísticas apresentados nos capítulos anteriores

### 5.1 Problema de Roteamento com proteção

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos obtidos pelos experimentos feitos sobre o modelo e heurística relacionados ao Problema de Roteamento com proteção e multi-objetivo. Na subseção 5.1.1 são apresentados os valores dos testes feitos sobre o modelo multi-objetivo apresentado na seção 3.1. E por fim na subseção 5.1.2 são mostrados os resultados do experimento feito na heurística proposta neste trabalho para o problema de roteamento com proteção nos enlaces multi-objetivo.

Nos experimentos foram utilizadas as mesmas topologias de rede adotadas em Oliveira [2005] e Santos [2009]. Estas topologias permitem avaliar o comportamento do algoritmo em diferentes cenários, permitindo melhor validá-lo. De acordo com Santos [2009] as topologias Ring, NSF e Carrier representam cenários reais de redes, com redes metropolitanas ou backbones de internet. Já as topologias Mesh, Dora e Sul são utilizadas em trabalhos correlatos. Na Tabela 5.1 são mostradas algumas características das topologias e na Figura 5.1 retirada de Santos [2009], são ilustradas algumas destas instâncias.

Quanto as requisições da rede, os pares(origem, destino) foram selecionados de forma aleatória. No caso das topologias Mesh, Ring, Carrier, Dora e Sul foram geradas instâncias com 10, 30 e 50 requisições. Já para as outras topologias foram utilizados os pares(origem, destino) disponibilizados nos repositórios das mesmas. Devido ao número elevado de instâncias e a complexidade em resolver algumas delas, necessitou-se limitar o tempo de execução em 3600 segundos.



**Figura 5.1.** Topologias das redes utilizadas nos testes

**Tabela 5.1.** Características das topologias

Topologia	nós	Enlaces
Mesh	6	16
Ring	15	42
NSF	14	38
Carrier	24	86
Dora	15	52
Sul	9	32
Atlanta	15	44
dfn-bwin	10	50
di-yuan	11	84

### 5.1.1 Resultados do modelo

A comparação de resultados de problemas multi-objetivo é definitivamente uma tarefa não-trivial diferentemente dos problemas mono-objetivo, nos quais esta tarefa se torna relativamente fácil bastando analisar o valor mínimo/máximo da solução. Como os valores dos experimentos, mais precisamente no caso do modelo de roteamento com proteção nos enlaces, serão utilizados para a mensuração da qualidade do algoritmo genético proposto na seção 4.2, a métrica utilizada para a comparação será a solução utópica gerada.

Para a obtenção da solução utópica, será considerada, para cada execução, uma função objetivo por vez e desta forma transformando o problema de roteamento multi-

objetivo em três problemas mono-objetivo. Para testar  $f_1$  e  $f_2$  a variável  $\alpha$  recebeu o valor 1 visto que a mesma não estava no contexto da otimização destas funções. Na tabela 5.2 são apresentados os valores das funções objetivo obtidos a partir da execução de cada função com proteção nos arcos e em 5.3 com proteção nos nós, obtidas pela aplicação do software comercial CPLEX.

Ao analisar as tabelas, pode-se observar claramente que a função objetivo  $f_3$ , na qual tenta-se balancear o tráfego, em ambas formulações apresentou os valores mais elevados de tempo de execução. Já a função  $f_1$  na qual objetiva-se diminuir o número de enlaces utilizados para o transporte das requisições, mostrou os valores mais baixos de tempo de execução em comparação as outras funções.

As topologias Carrier e NSF apresentaram os maiores valores em tempo de execução, por isto podendo ambas serem consideradas, para os modelos aqui propostos, as mais difíceis de serem resolvidas. Talvez isso se deva as características destas serem baseadas em cenários reais.

**Tabela 5.2.** Tabela de resultados para o Problema de roteamento com proteção nos enlaces

P. Roteamento com proteção nos enlaces												
			F1				F2				F3	
Inst.	V	A	P	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)
Carrier	24	43	10	0.07	27.0	0	0.024	0.0	0	0.133	0.23	0
			30	0.167	68.0	0	0.251	0.0	0	3602.621	0.23	15.29
			50	0.261	121.0	0	3608.0	-	-	3602.911	0.33	19.76
Dora	15	52	10	0.021	20.0	0	0.015	0.0	0	1.94	0.21	0
			30	0.055	52.0	0	0.089	1.0	0	6.562	0.14	0
			50	0.171	95.0	0	630.214	3.0	0	456.332	0.24	0
Mesh	6	16	10	0.01	17.0	0	0.0060	1.0	0	0.021	0.32	0
			30	0.027	49.0	0	0.096	8.0	0	0.984	0.46	0
			50	0.186	87.0	0	10.131	21.0	0	28.424	0.80	0
NSF	14	38	10	0.015	30.0	0	0.015	0.0	0	0.979	0.28	0
			30	0.051	83.0	0	26.478	5.0	0	136.808	0.31	0
			50	0.404	145.0	0	1529.976	13.0	0	3603.357	0.48	0.92
Ring	15	42	10	0.011	24.0	0	0.012	1.0	0	0.061	0.25	0
			30	0.089	75.0	0	0.081	5.0	0	0.909	0.41	0
			50	0.12	119.0	0	118.844	16.0	0	357.558	0.56	0
Sul	9	32	10	0.01	19.0	0	0.011	0.0	0	0.183	0.17	0
			30	0.073	51.0	0	0.117	11.0	0	110.721	0.54	0
			50	0.106	82.0	0	0.549	17.0	0	3603.842	0.51	3.84

### 5.1.2 Resultado comparativo do Algoritmo Genético

A qualidade do algoritmo genético será avaliada através da comparação de suas soluções com as obtidas de forma exata através da execução do modelo multi-objetivo, para o problema de Roteamento com proteção nos enlaces, via *software* CPLEX versão 10.2. A métrica utilizada para mensuração da qualidade das soluções será através da solução utópica, conforme seção anterior.

O problema multi-objetivo é transformado em três problemas mono-objetivo e cada solução resulta em uma coordenada da solução utópica.

Para os testes foi selecionado um subconjunto de instâncias do conjunto utilizado nos testes da seção 5.1. As instâncias deste subconjunto possuem 10, 30 e 50 requisições e demandas variando entre 251-400k.

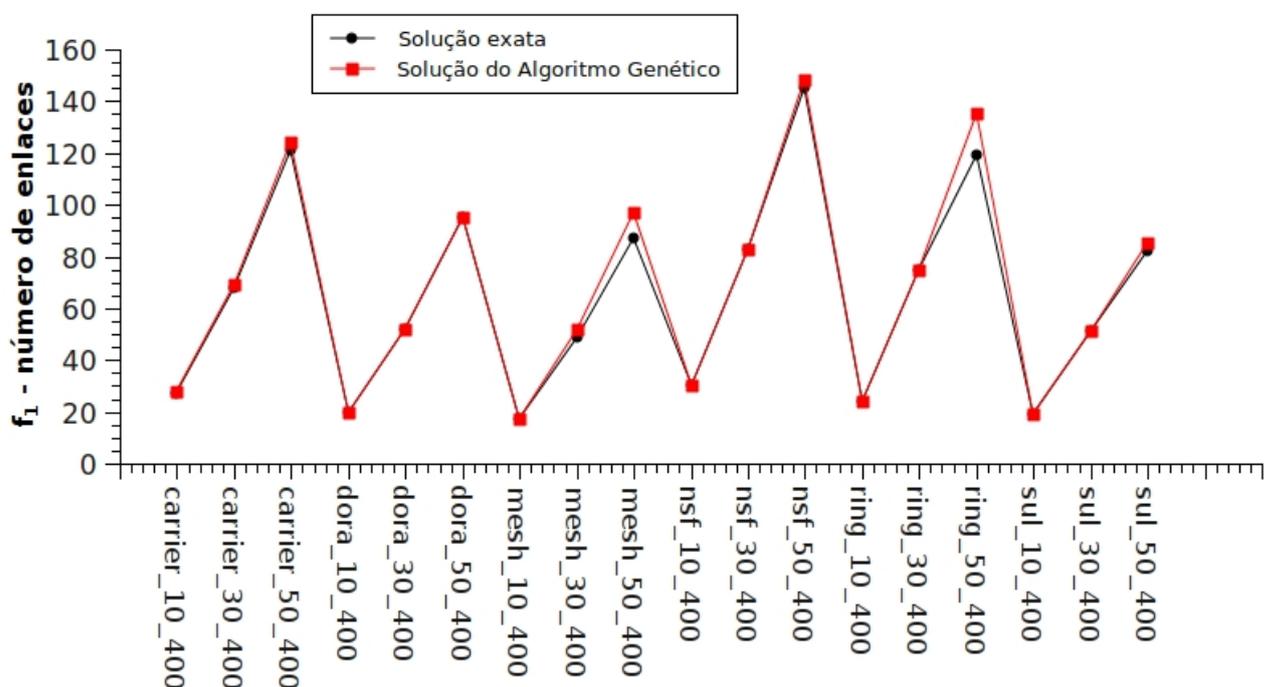
Como foi dito anteriormente, a métrica para qualificar as soluções obtidas pelo algoritmo genético será a aproximação das mesmas da solução utópica. O algoritmo genético irá gerar uma solução contendo os valores dos três objetivos, formando assim uma coordenada. Tais valores são os melhores encontrados, para cada objetivo, em toda a população não-dominada.

Da mesma maneira que foi feito com o CPLEX, o algoritmo genético irá gerar o melhor valor obtido para cada função objetivo. Os resultados das aproximações são explicitados na tabela 5.4 e onde também são mostrados os valores da solução utópica.

Tabela 5.3. Tabela de resultados para o Problema de roteamento com proteção nos nós

P. Roteamento com proteção nos nós												
		F1				F2				F3		
Inst.	V	A	P	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)
Carrier	24	43	10	0.131	27.0	0	0.022	0.0	0	1.29	0.23	0
			30	0.165	68.0	0	0.366	0.0	0	3604.017	0.24	15,07
			50	0.266	121.0	0	3646.355	8.0	17,08	3603.055	0.33	16
Dora	15	52	10	0.059	20.0	0	0.015	0.0	0	1.38	0.21	0
			30	0.104	52.0	0	0.138	1.0	0	14.851	0.14	0
			50	0.187	95.0	0	2.064	3.0	0	3604.62	0.24	0,12
Mesh	6	16	10	0.0090	19.0	0	0.0090	2.0	0	0.056	0.35	0
			30	0.116	55.0	0	0.331	11.0	0	1.34	0.60	0
			50	-	-	-	-	-	-	-	-	0
NSF	14	38	10	0.022	30.0	0	0.015	0.0	0	1.202	0.28	0
			30	0.091	84.0	0	1.109	5.0	0	42.859	0.33	0
			50	0.836	147.0	0	1816.038	13.0	1,73	3602.812	0.48	1,73
Ring	15	42	10	0.056	24.0	0	0.011	1.0	0	0.079	0.25	0
			30	0.08	75.0	0	0.197	5.0	0	3.433	0.41	0
			50	1.012	119.0	0	673.039	17.0	0	1011.886	0.59	0
Sul	9	32	10	0.038	19.0	0	0.039	0.0	0	0.294	0.17	0
			30	0.152	51.0	0	0.046	11.0	0	6.583	0.54	0
			50	0.251	83.0	0	1.634	17.0	0	534.262	0.51	0

Ao comparar os valores da tabela 5.4, observa-se que as soluções geradas pela heurística proposta ficaram próximas das soluções utópicas geradas. Particularmente no caso das funções  $f_1$  e  $f_2$ , em muitas instâncias, chegou-se ao valor ótimo gerado pelo CPLEX. Já os valores da função  $f_3$  distanciaram, talvez isto ocorra pelo fato de que este objetivo não foi privilegiado em nenhuma das operações genéticas, diferentemente da função  $f_1$  que é tratada no cruzamento. Os gráficos das figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram a comparação entre o valor obtido via CPLEX e o adquirido através do Algoritmo Genético, reforçando ainda mais a qualidade das aproximações.



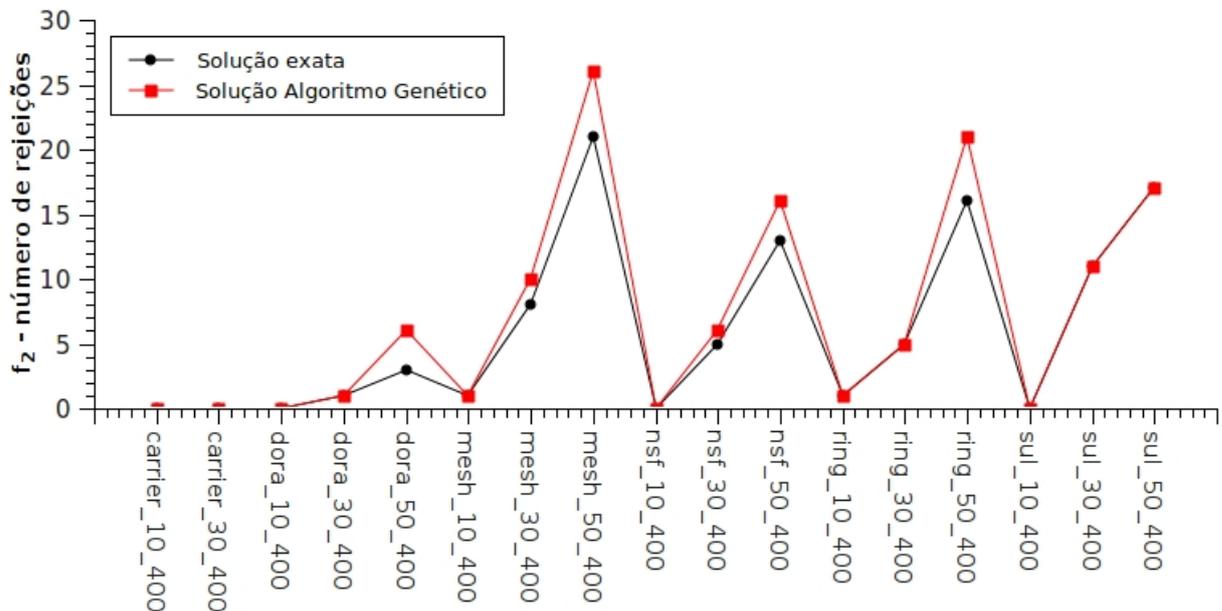
**Figura 5.2.** Gráfico comparativo entre o valor da função  $f_1$  obtida através do CPLEX e a obtida pelo Algoritmo Genético para o Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces

Quanto aos parâmetros utilizados na execução do algoritmo genético, temos:

- **Número de indivíduos:** Foram feitos testes com 10, 20 e 30 indivíduos por população e analisando os resultados observou-se que as melhores aproximações foram obtidas a medida que se aumentava o tamanho da população. Isto se deve pelo aumento da diversidade das soluções tanto iniciais quanto as obtidas durante a execução do algoritmo. Para a obtenção dos resultados via algoritmo genético na tabela 5.4 foram utilizados 30 indivíduos por população.

**Tabela 5.4.** Soluções utópicas do Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces obtidas via CPLEX e algoritmo genético respectivamente

Problema de Roteamento com proteção nos enlaces													
Inst.	V	A	P	f1				f2				f3	
				CPLEX	NSGA-II	Gap(%)	CPLEX	NSGA-II	Gap(%)	CPLEX	NSGA-II	Gap(%)	CPLEX
Carrier	24	43	10	27	28	3,7	0	0	0	0	0,23	0,33	43,48
			30	68	69	1,47	0	0	0	0,23	0,34	47,83	
			50	121	124	2,48	-	10	-	0,33	0,41	24,24	
Dora	15	52	10	20	20	0	0	0	0	0,21	0,26	23,81	
			30	52	52	0	1	1	0	0,14	0,24	71,43	
			50	95	95	0	3	6	100	0,24	0,31	29,17	
Mesh	6	16	10	17	17	0	1	1	0	0,32	0,42	31,25	
			30	49	52	6,12	8	10	25	0,46	0,53	15,22	
			50	87	97	11,49	21	26	23,81	0,8	0,89	11,25	
NSF	14	38	10	30	30	0	0	0	0	0,28	0,34	21,43	
			30	83	83	0	5	6	20	0,31	0,37	19,35	
			50	145	148	2,07	13	16	23,08	0,48	0,52	8,33	
Ring	15	42	10	24	24	0	1	1	0	0,25	0,31	24	
			30	75	75	0	5	5	0	0,41	0,51	24,39	
			50	119	135	13,45	16	21	31,25	0,56	0,65	16,07	
Sul	9	32	10	19	19	0	0	0	0	0,17	0,21	23,53	
			30	51	51	0	11	11	0	0,54	0,65	20,37	
			50	82	85	3,66	17	17	0	0,51	0,69	35,29	



**Figura 5.3.** Gráfico comparativo entre o valor da função  $f_2$  obtida através do CPLEX e a obtida pelo Algoritmo Genético para o Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces

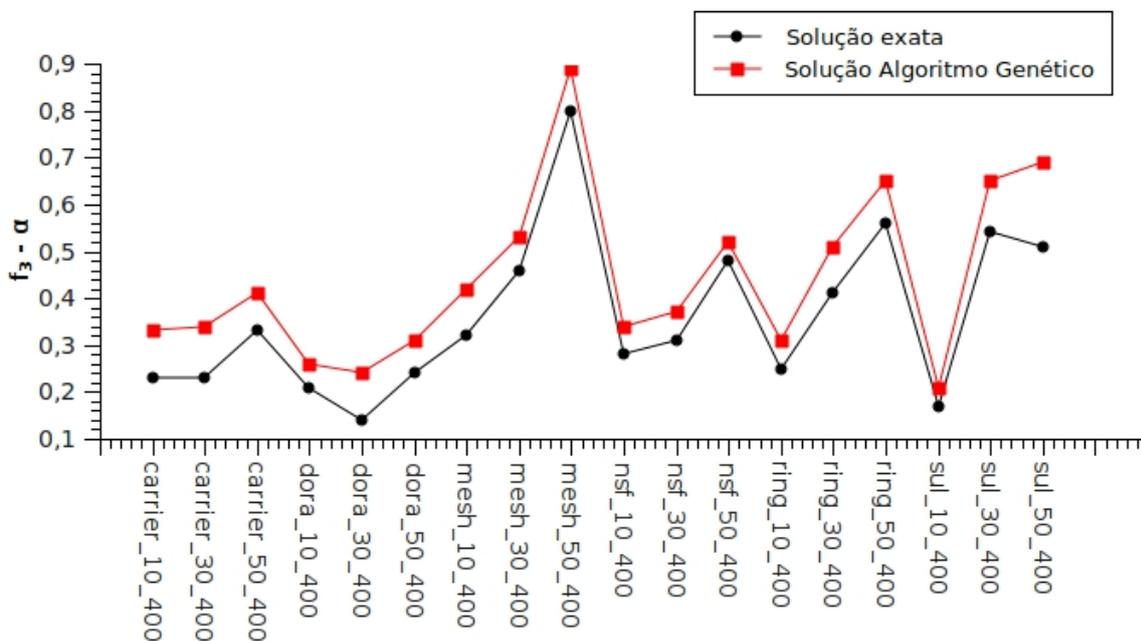
- **Número de gerações:** O número de gerações escolhido foi de 30. Foram feitos testes com 10, 30, 40 e 50 gerações, mas observou-se que a partir de 30 gerações os valores das soluções não sofriam alterações significativas, ou seja, o tempo de execução se elevava com o aumento das gerações mas as aproximações não melhoravam, por isto optou-se pela escolha de 30 gerações.

## 5.2 Problema de RWA com proteção

Nesta seção são apresentados os resultados numéricos dos modelos vistos na subseção 3.2. Em 5.2.1 são apresentados os resultados do modelo mono-objetivo com proteção, tanto nos enlaces quanto nos nós. Depois na subseção 5.2.2 são explicitados os resultados do modelo multi-objetivo e por fim o resultado do algoritmo genético que resolve o problema de RWA mono-objetivo com proteção nos enlaces.

### 5.2.1 Resultado do modelo mono-objetivo

Para obtenção das soluções do modelo mono-objetivo apresentado em 3.2 foi utilizado o *software* CPLEX versão 10.2. As instâncias utilizadas são praticamente as mesmas dos



**Figura 5.4.** Gráfico comparativo entre o valor da função  $f_3$  obtida através do CPLEX e a obtida pelo Algoritmo Genético para o Problema de Roteamento com Proteção nos enlaces

experimentos da seção 5.1 e que foram usadas nos trabalhos de Oliveira [2005] e Santos [2009]. Ainda foram utilizadas instâncias que podem ser encontradas em Orłowski et al. [2007]. No total foram utilizadas 21 instâncias e devido ao número elevado de instâncias e a complexidade em resolver algumas delas, necessitou-se limitar o tempo de execução em 3600 segundos.

A partir da análise das tabelas 5.5 e 5.6, pode-se observar que a medida que se aumenta o número de requisições a trafegarem na rede, maior é o tempo despendido para se encontrar a solução exata. Novamente como na seção anterior, as topologias Carrier e NSF se mostraram as mais complexas de serem resolvidas por apresentarem os maiores tempos de execução. Outras características importantes que influenciam na dificuldade de se resolver as instâncias são o valor das demandas e o número de requisições candidatas a trafegar na rede, sendo que esta última apresentou ter uma maior influência neste quesito.

Os valores tanto de tempo de execução quanto do valor da função objetivo referentes ao problema de RWA com proteção nos nós foram mais elevados quando comparados aos obtidos pela execução do modelo referente ao problema de RWA com proteção nos enlaces. Esse comportamento pode ser explicado pela maior complexidade em se encontrar rotas de proteção disjuntas de nó, assim o problema de RWA com proteção

nos nós pode ser visto como mais difícil de ser resolvido que o problema de RWA com proteção nos arcos.

**Tabela 5.5.** Resultados do modelo referente ao problema de RWA com proteção nos enlaces

RWA com proteção nos enlaces					
			Cplex		
Inst.	V     A	P	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)
Carrier	24 43	10	1566,81	306	0
		30	3604,07	1133	1,06
		50	3601,23	1464	2,37
Dora	15 52	10	7,43	145	0
		30	1601,11	463	0
		50	3617,37	757	1,09
Mesh	6 16	10	0,71	45	0
		30	4,11	169	0
		50	260,48	308	0
Ring	15 42	10	0,81	97	0
		30	1928,01	248	0
		50	3603,27	485	0,19
Sul	9 32	10	0,18	101	0
		30	260,77	253	0
		50	3620,76	556	1,98
Nsf-1	14 42	182	64,84	824	0
Nsf-3		182	150,48	808	0
Nsf2-1		182	3623,16	1055	6,08
dfn-bwin	10 90	45	3600,86	462	5,12
Di-yuan	11 84	22	10,56	169	0
pdh	11 68	24	3601,19	585	1,74

## 5.2.2 Resultado do modelo Multi-objetivo

Nesta subseção são explicitados os resultados dos testes efetuados sobre o modelo referente ao Problema de RWA Multi-objetivo com proteção, detalhado na seção 3.2.

Foram utilizadas as mesmas topologias dos testes feitos no modelo mono-objetivo, porém tanto as demandas quanto os pares origem-destino dos produtos foram alterados de forma a tentar proporcionar um aumento de carga na rede e consequentemente em algumas das instâncias gerar perdas de requisições. Para isso as demandas das requisições passaram a variar de 400 a 600k e os pares origem-destino foram gerados aleatoriamente.

Como nos testes da seção 5.1, a métrica utilizada para a comparação será a solução utópica gerada. Tal solução apresenta valores ótimos para cada uma das funções do problema e para a obtenção da mesma, será considerada, para cada execução, uma

**Tabela 5.6.** Resultados via CPLEX para o Problema de RWA com proteção nos nós

RWA com proteção nos nós					
			Cplex		
Inst.	V     A	P	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)
Carrier	24 43	10	1566,81	306	0
		30	3600,18	1136	2,51
		50	3610,04	1501	4,07
Dora	15 52	10	5,56	145	0
		30	1965,98	463	0
		50	3615,7	758	1,89
Mesh	6 16	10	0,93	53	0
		30	6,37	172	0
		50	3609,04	312	1,15
Ring	15 42	10	0,55	103	0
		30	3605,87	250	0,21
		50	3605,18	490	1,32
Sul	9 32	10	0,21	101	0
		30	1305,23	254	0
		50	3605,68	556	1,98
Nsf-1	14 42	182	3603,75	830	7,29
Nsf-3		182	3618,27	814	1,17
Nsf2-1		182	3608,16	1060	14,98
dfn-bwin	10 90	45	3601,27	461	6,1
Di-yuan	11 84	22	3,86	169	0
pdh	11 68	24	3618,45	585	1,44

função objetivo por vez. Nas tabelas 5.7 e 5.8 são apresentados os valores das funções objetivos obtidos a partir da execução de cada função do modelo exibido em 3.2.

Através da análise dos resultados obtidos, pode-se observar que as funções  $f_2$  e  $f_3$ , referentes respectivamente a minimização do número de requisições perdidas e balanceamento da rede, demonstraram ser neste experimento, mais difíceis de serem resolvidas quando comparadas com as outras funções pertencentes ao modelo. Ainda na função  $f_2$ , para duas instâncias não foi possível, dentro do limite de tempo estipulado (7200 segundos), encontrar uma solução viável inteira sendo assim representada na tabela por um traço.

Ao comparar os resultados do modelo apresentado em 3.1 referente ao Problema de Roteamento com proteção e o modelo RWA, verifica-se que a inserção da necessidade de alocação do comprimento de onda no transporte das requisições aumenta a complexidade do problema de transporte das requisições em redes ópticas WDM.

**Tabela 5.7.** Tabela de resultados obtidos pela execução do modelo referente ao problema de RWA multi-objetivo com proteção nos enlaces

Instância	Requisições	F1				F2			
		Tempo(s)	V. Obj.	Gap (%)	Tempo(s)	V. Obj.	Gap (%)		
Carrier	10	0.598	128.0	0	0.471	0.0	0		
	30	18.936	385.0	0	7204.346	7.0	57.14		
	50	61.051	444.0	0	-	-	-		
di-yuan	22	0.072	61.0	0	1.285	2.0	0		
	10	0.951	57.0	0	0.117	0.0	0		
Dora	30	11.192	174.0	0	182.482	3.0	0		
	50	5.903	235.0	0	7213.038	3.0	33.33		
	10	0.074	90.0	0	0.04	1.0	0		
Mesh	30	0.904	232.0	0	7207.613	7.0	14.29		
	50	7.052	321.0	0	7200.311	16.0	9.69		
	182	7.754	237.0	0	95.966	38.0	0		
NSF-1	182	3.138	224.0	0	94.434	37.0	0		
NSF-3	182	4.895	249.0	0	-	-	-		
NSF2-1	24	10.754	93.0	0	19.474	0.0	0		
Ring	10	0.212	93.0	0	0.162	1.0	0		
	30	2.827	251.0	0	7209.575	3.0	33.06		
	50	1817.479	409.0	0	692.174	4.0	0		
Sul	10	0.205	38.0	0	0.098	0.0	0		
	30	0.399	95.0	0	37.461	7.0	0		
	50	9.091	167.0	0	7199.283	20.0	11.02		

**Tabela 5.8.** Tabela de resultados obtidos pela execução do modelo referente ao problema de RWA multi-objetivo com proteção nos enlaces

Instância	Requisições	F3			F4		
		Tempo(s)	V. Obj.	Gap (%)	Tempo(s)	V. Obj.	Gap (%)
Carrier	10	2.182	0.20	0	0.193	21.0	0
	30	7284.308	0.28	8.43	0.795	71.0	0
	50	580.108	0.20	0	2.963	122.0	0
di-yuan	22	4.146	0.60	0	0.052	33.0	0
	10	6.739	0.13	0	0.13	18.0	0
	30	16.018	0.11	0	0.682	51.0	0
Dora	50	116.437	0.10	0	1.28	97.0	0
	10	0.345	0.16	0	0.038	18.0	0
	30	7.993	0.14	0	0.782	46.0	0
Mesh	50	48.526	0.11	0	13.521	78.0	0
	182	49.653	0.06	0	1.6	452.0	0
	182	35.926	0.06	0	1.493	452.0	0
NSF-1	182	69.013	0.06	0	3.316	415.0	0
	24	64.185	0.40	0	0.132	36.0	0
	10	0.314	0.13	0	0.141	24.0	0
NSF-3	30	11.892	0.13	0	0.465	75.0	0
	50	37.221	0.10	0	1.16	111.0	0
	10	0.308	0.04	0	0.101	19.0	0
NSF2-1	30	3.304	0.19	0	0.344	51.0	0
	50	1129.223	0.30	0	198.473	85.0	0
	50						

### 5.2.3 Resultado do Algoritmo Genético Mono-objetivo

Nesta subseção são apresentados os resultados numéricos obtidos através da execução do algoritmo genético proposto. Esses resultados, de forma a mensurar a qualidade dos mesmos, foram comparados com os valores adquiridos através da execução do modelo matemático mono-objetivo apresentado em 3.2.

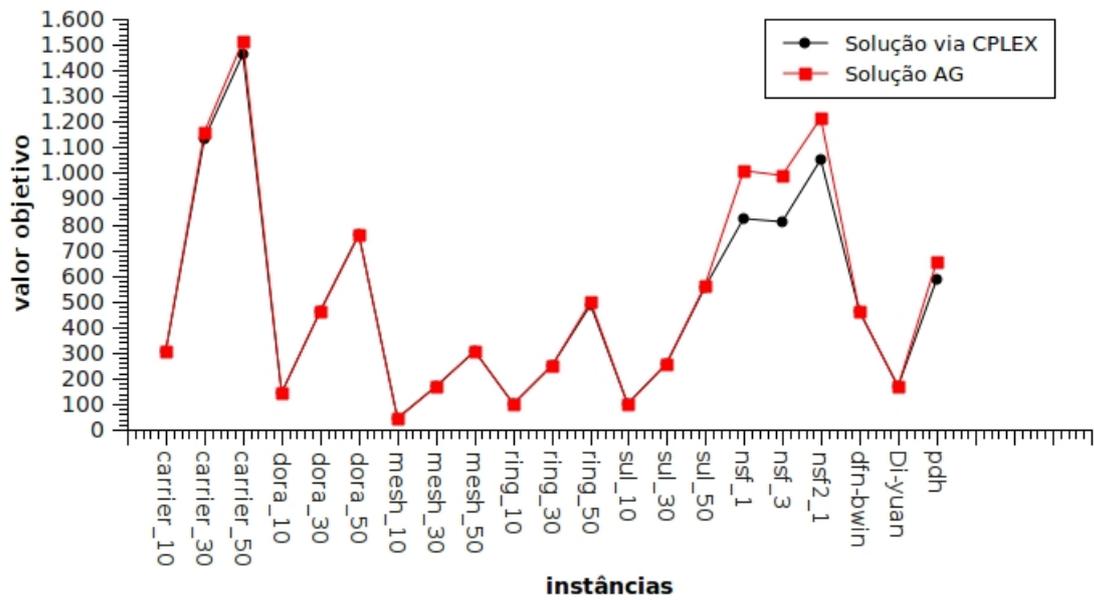
As instâncias utilizadas nos testes são as mesmas apresentadas na subseção 5.2.1. Na tabela 5.9 são apresentados os resultados encontrados pelo algoritmo genético e pelo CPLEX. Para ambos são explicitados o tempo de execução despendido e os valores objetivos encontrados. E por fim, a última coluna da tabela 5.9 apresenta o *gap* entre a solução encontrada pelo CPLEX e a encontrada pelo algoritmo genético.

Ao se comparar os valores da tabela, pode-se observar que o algoritmo genético aproximou-se do valor objetivo obtido via CPLEX para as instâncias com topologias Carrier, Dora, Mesh, Ring, Sul, dfn-bwin e di-yuan e em um tempo de computação baixo. Porém no caso das instâncias nsf-1, nsf-2, nsf-3 e pdh os valores objetivo ficaram em média 15% do valor obtido pelo CPLEX, ou seja, não tão próximos dos valores dos modelos.

Para as instâncias baseadas na topologia NSF o motivo para a diferença entre os valores pode ser explicado pela quantidade elevada de requisições, quando comparada as outras instâncias testadas. A figura 5.5 ilustra por via de um gráfico a comparação entre os valores da tabela 5.9

**Tabela 5.9.** Tabela comparativa entre os resultados do CPLEX e o algoritmo genético para o problema de RWA com proteção nos enlaces

RWA com Proteção nos enlaces								
Inst.	V	A	P	Cplex		GA		
				Tempo (s)	V. Obj.	Tempo (s)	V. Obj.	Gap (%)
Carrier	24 43		10	1566,81	306	11,05	306	0
			30	3604,07	1133	25,08	1156	1,99
			50	3601,23	1464	71,5	1510	3,05
Dora	15 52		10	7,43	145	4,82	145	0
			30	1601,11	463	9,24	463	0
			50	3617,37	757	14,62	760	0,39
Mesh	6 16		10	0,71	45	0,81	45	0
			30	4,11	169	1,59	169	0
			50	260,48	308	1,6	308	0
Ring	15 42		10	0,81	97	2,29	97	0
			30	1928,01	248	25,5	250	0,8
			50	3603,27	485	29,1	496	2,22
Sul	9 32		10	0,18	101	1,56	101	0
			30	260,77	253	3,52	254	0,39
			50	3620,76	556	5,7	561	0,89
Nsf-1	14 42		182	64,84	824	40,53	1006	18,09
Nsf-3			182	150,48	808	40,99	989	18,3
Nsf2-1			182	3623,16	1055	43,06	1211	12,88
dfn-bwin	10 90		45	3600,86	462	11,59	462	0
Di-yuan	11 84		22	10,56	169	5,94	169	0
pdh	11 68		24	3601,19	585	6,04	656	10,82



**Figura 5.5.** Gráfico comparativo entre o valor obtido através do CPLEX e o obtido pelo Algoritmo Genético para o problema de RWA com proteção nos enlaces

## Capítulo 6

# Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou modelos e algoritmos para resolução de problemas que envolvem o projeto de redes ópticas WDM. Mais especificamente o problema de RWA sobre redes transparentes e o problema de Roteamento. A característica de proteção da rede foi adicionada a todos os modelos afim de reduzir o número de demandas rejeitadas devido à uma falha em algum enlace ou nó da rede óptica.

Para o Problema de Roteamento inicialmente foram propostos dois modelos mono-objetivo, o primeiro com proteção nos enlaces e o segundo nos nós. Seguindo a mesma linha dos primeiros modelos, foi desenvolvido um modelo multi-objetivo com proteção nos enlaces ou nos nós. Devido à complexidade do problema multi-objetivo, foi proposto um algoritmo baseado na meta-heurística NSGA-II. Através dos testes efetuados foi possível perceber que o algoritmo conseguiu obter soluções próximas das obtidas via execução do modelo.

No problema de RWA o objetivo é minimizar o número de comprimentos de onda necessários para o transporte do conjunto de requisições da rede. Para este problema também foram propostos dois modelos. O primeiro tenta resolver o problema de RWA aplicando uma proteção sobre os enlaces da rede. Já no segundo criou-se uma proteção sobre os nós. Por ser um problema de difícil solução devido à complexidade, foi desenvolvido um algoritmo genético para tratar o problema de RWA com proteção nos enlaces e o resultado comparativo entre as soluções obtidas via heurística e CPLEX mostrou que as soluções ficaram bem próximas demonstrando assim a qualidade do algoritmo proposto. Por fim foi proposto um modelo multi-objetivo para o Problema de RWA, com o intuito de agregar novas métricas e características ao modelo mono-objetivo.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Como possíveis trabalhos futuros pode-se citar:

- Elaboração de um operador específico para o balanceamento da carga, com a finalidade de melhorar os resultados da heurística apresentada em 4.2.
- Desenvolvimento de algoritmo para resolver o Problema de Roteamento multi-objetivo com proteção nos nós.
- Elaboração de um algoritmo afim de solucionar o Problema de RWA multi-objetivo, devido sua elevada complexidade.
- Inserir prioridades nas requisições a serem transmitidas na rede. Ou seja, aquelas requisições que possuem maior prioridade devem ser enviadas antes das requisições de menor prioridade.
- Efetuar simulações via software apropriado para este fim, com o objetivo de verificar o comportamento dos algoritmos e modelos propostos em determinados ambientes
- Adição da característica de *Grooming* aos modelos.

# Referências Bibliográficas

- Alferness, R. C.; Bonenfant, P. A. Newton, C. J.; Sparks, K. A. & Varma, E. L. A. (1999). Practical vision for optical transport networking. *Bell Labs - Technical Journal*, 4(1):3–18.
- Assi, C.; Shami, A.; Ali, M. A. Kurtz, R. & Guo, D. (2001). Optical networking and real-time provisioning: An integrated vision for the next-generation internet. *IEEE Network*, 15:36–45.
- Banerjee, D. & Mukherjee, B. (1996). A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength-routed optical networks. *IEEE JSAC*, 14:903–908.
- Banerjee, S. (1992). *Optimally-structured high-speed metropolitan area networks with distributed control*. PhD thesis, Dep. Computer Science, University of California, Davis, CA.
- Barr, R. S. & Patterson, R. A. (2001). Grooming telecommunication networks. *Optical Networks Magazine*, 2(3):20–23.
- Borella, M. S.; Jue, J. P.; Banerjee, D.; Ramamurthy, B. & Mukherjee, B. (1997). Optical components for WDM lightwave networks. In *Proceedings of the IEEE*, volume 8, pp. 1274–1307.
- Chaudhuri, S.; Hjalmtysson, G. & Yates, J. (2000). Control of lightpaths in an optical network. *IETF Internet Draft*.
- Chlamtac, I.; Ganz, A. & Karmi, G. (1989). Purely optical network for terabit communication. In *IEEE Infocom '89*, pp. 887–896.
- Chlamtac, I.; Ganz, A. & Karmi, G. (1992). Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WANs. *IEEE Trans. Communications*, 40(7):1171–1182.
- Chlamtac, I.; Ganz, A. & Karmi, G. (1993). Lightnets: Topologies for high-speed optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 11(5/6):951–961.

- Cieutat, L. C. & Binh, L. N. (2003). Routing and wavelength assignment in GMPLS - based optical networks : An omnet++ modeling platform. Technical report, Monash University.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization. John Wiley & Sons.
- Deb, K.; Agrawal, S.; Pratab, A. & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference*, pp. 849–858, Paris, France.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connection with graphs. *Numerical Mathematics*, 1:269–271.
- Dutta, R. & Rouskas, G. N. (2000). A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks. *Optical Networks Magazine*, pp. 73–89.
- Gerstel, O. (1998). Opportunities for optical protection and restoration. In *Optical Fiber Communications Conference*, pp. 269–270.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing, Boston, MA, USA.
- Hyytiä, E. & Virtamo, J. (1998). Wavelength assignment and routing in WDM networks. In *Fourteenth Nordic Teletraffic Seminar*, Copenhagen.
- Iness, J. (1997). *Efficient use of optical components in WDM-based optical networks*. PhD thesis, Dep. Computer Science, University of California, CA.
- Koçyigit, A. & Bilgen, S. (2003). Statistically predictive optimal wavelength routing. *Optical Networks Magazine*.
- Krishnaswamy, R. & Sivaraman, K. (1998). Of logical topologies : A linear formulation for wavelength routed optical networks with no wavelength changers. In *Proceedings IEEE INFOCOM*, pp. 919–927.
- Lee, Y. & Mukherjee, B. (2004). Traffic engineering in next-generation optical networks. *IEEE Communications Surveys*, 6:16–32.
- Maier, G.; Pattavina, A.; Barbato, L.; Cecini, F. & Martinelli, M. (2004). Routing algorithms in WDM networks under Mixed Static and Dynamic Lambda-Traffic. *Photonic Network Communications*, 8(1):69–87.

- Maier, G.; Pattavina, A.; Patre, S. D. & Martinelli, M. (2002). Optical network survivability: Protection techniques in the WDM layer. *Photonic Network Communications*, 3:251–269.
- Manohar, P.; Manjunath, D. & Shevgaonkar, R. K. (2002). Routing and wavelength assignment in optical networks from edge disjoint path algorithms. *IEEE Communications Letters*, 5:211–213.
- Marsan, M.; Bianco, A.; Leonardi, E. & Neri, F. (1993). Topologies for wavelength-routing all-optical networks. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 5:534–546.
- Mohan, G.; Murthy, C. S. R. & Somani, A. K. (Oct. 2001). Efficient algorithms for routing dependable connections in WDM optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 9:553–556.
- Mukherjee, B.; Ramamurthy, S.; Banerjee, D. & Mukherjee, A. (1994). Some principles for designing a wide-area optical network. In *Proceeding IEEE INFOCOM*, pp. 110–119.
- Mukherjee, B.; Ramamurthy, S.; Banerjee, D. & Mukherjee, A. (1996). Some principles for designing a wide-area optical network. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 4:684–696.
- Murthy, C. S. R. & Gurusamy, M. (2002). *WDM optical networks: Concepts, design and algorithms*. Prentice Hall PTR.
- Noronha, T. F. d. (2008). *Algoritmos para problemas de otimização aplicados a roteamento e atribuição de comprimentos de onda*. PhD thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Departamento de Informática.
- Oliveira, A. (2005). *Um arcabouço para engenharia de tráfego em redes MPLS*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Orlowski, S.; Pióro, M.; Tomaszewski, A. & Wessälly, R. (2007). SNDlib 1.0—Survivable Network Design Library. In *Proceedings of the 3rd International Network Optimization Conference (INOC 2007), Spa, Belgium*. <http://sndlib.zib.de>, extended version accepted in Networks, 2009.
- Patrocínio, Z. K. G. (2005). *Planejamento de Topologia Virtual com Combinação de Tráfegos em Redes Óticas Multiplexadas por Divisão de Comprimento de Onda*. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.

- Ramamurthy, B. (1998). *Efficient design of wavelength division multiplexing based optical networks*. PhD thesis, Dep. Computer Science, University of California, Davis, CA.
- Ramamurthy, S. & Mukherjee, B. (Mar. 1999a). Survivable WDM mesh networks-part i: Protection. In *IEEE INFOCOM*, pp. 1744–751.
- Ramamurthy, S. & Mukherjee, B. (Mar. 1999b). Survivable WDM mesh networks-part ii: Restoration. In *IEEE INFOCOM*, pp. 2023–2030.
- Ramamurthy, S.; Sahasrabudde, L. & Mukherjee, B. (April 2003). Survivable WDM mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, 21(4):870–883.
- Ramaswami, R. & Sivarajan, K. (1996). Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks. *IEEE J-SAC*, 14:840–851.
- Ramaswami, R. & Sivarajan, K. N. (1998). *Optical Networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufmann Publisher Inc.
- Resendo, L. C. (2008). *Contribuições para o Projeto de Grooming de Tráfego Sobre Redes Ópticas WDM*. PhD thesis, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Santos, F. A. (2009). Otimização multi-objetivo aplicada à alocação dinâmica de rotas em redes de telecomunicações. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Skorin-Kapov, N. (2007). Routing and wavelength assignment in optical networks using bin packing based algorithms. *European Journal of Operational Research*, 177:1167–1179.
- Strand, J.; Chiu, A. & Tkach, R. (2001). Issues for routing in the optical layer. *IEEE Communications Magazine*, 39:81–87.
- Subramaniam, S. & Bary, R. (1997). Wavelength assignment in fixed routing WDM networks. In *IEEE ICC '97*, volume 1, pp. 406–410.
- Tachibana, T. & Kasahara, S. (2002). Performance analysis of dynamic lightpath configuration for WDM Tandem networks. In *Internacional Conference on Telecommunication Systems: Modelling and Analysis*, pp. 679–688.
- Takahashi, R. H. C. (2004). Otimização escalar e vetorial - notas de aula. Technical report, Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte.

- Zang, H.; Jue, J. P. & Mukherjee, B. (2000). A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks. *SPIE Optical Networks Magazine*, 1:47–60.
- Zang, H.; Jue, J. P.; Sahasrabudde, L.; Ramamurthy, R. & Mukherjee, B. (2001). Dynamic lightpath establishment in wavelength-routed WDM networks. *IEEE Communications Magazine*, pp. 100–108.
- Zhu, K. & Mukherjee, B. (2003). A review of traffic grooming in WDM optical networks: Architectures and challenges. *Optical Networks Magazine*, 4(2):55–64.
- Zhu, Y.; Rouskas, G. N. & Perros, H. G. (2000). A comparison of allocation policies in wavelength routing networks. *Photonic Networks Communication Journal*, 2:265–293.

