



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

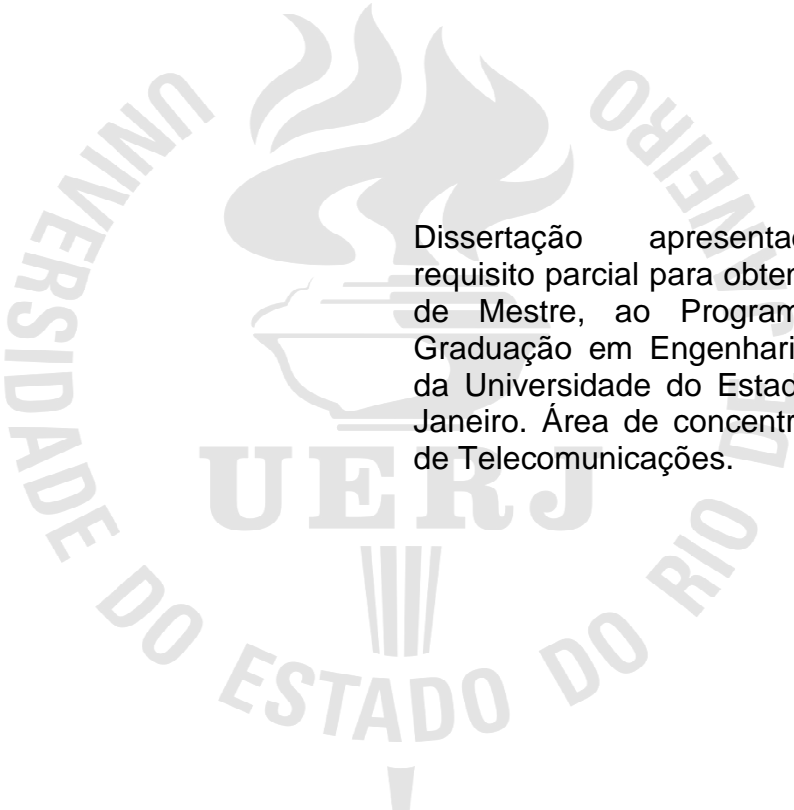
Eduardo Rodrigues Benayon

**Roteamento e alocação de comprimento de onda em redes WDM
segundo algoritmo baseado em regras da natureza**

Rio de Janeiro
2012

Eduardo Rodrigues Benayon

**Roteamento e alocação de comprimento de onda em redes WDM segundo
algoritmo baseado em regras da natureza**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. José Rodolfo Souza

Rio de Janeiro

2012

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

B456 Benayon, Eduardo Rodrigues.
Roteamento e alocação de comprimento de onda em redes WDM segundo algoritmos baseados em regras da natureza / Eduardo Rodrigues Benayon. – 2012.
89f.

Orientador: Prof. Dr. José Rodolfo Souza
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Eletrônica. 2. Comunicação por fibra ótica.-
Dissertações. I. Souza, José Rodolfo. II. Universidade do Estado do Rio. III. Título.

CDU 621.39

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Eduardo Rodrigues Benayon

**Roteamento e alocação de comprimento de onda em redes WDM segundo
algoritmo baseado em regras da natureza**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Aprovado em: 17 de dezembro de 2012.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Rodolfo Souza (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. José Franco Machado do Amaral
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Rodolfo Araujo de Azevedo Lima
Instituto de Pesquisas da Marinha - IpqM

Rio de Janeiro

2012

DEDICATÓRIA

A meus pais, por permitirem mais essa vitória. A minha família, pela paciência e carinho nestes anos e a minha maravilhosa esposa Barbara, por compartilhar os momentos mais complicados nessa empreitada.

AGRADECIMENTOS

A meu orientador, Prof. Doutor José Rodolfo Souza por todo o auxílio, conselho e paciência que teve durante esse período.

À UERJ, porque sem ela não poderia ter realizado esta conquista.

Aos professores do mestrado pelos ensinamentos que serviram de base para a elaboração dessa dissertação.

À empresa onde trabalho, Padtec, por entender que conhecimento é fundamental e ter sido flexível durante esse período.

Aos meus colegas de mestrado, especialmente Luiz Fabiano Buriche, pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário.

Aos meus amigos de trabalho pela paciência e suporte com os meus estudos.

A todos aqueles que, embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende de nossa vontade e perseverança.

Albert Einstein

RESUMO

BENAYON, Eduardo Rodrigues. *Roteamento e alocação de comprimento de onda em redes WDM segundo algoritmo baseado em regras da natureza*. 2012. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

O surgimento de novos serviços de telecomunicações tem provocado um enorme aumento no tráfego de dados nas redes de transmissão. Para atender a essa demanda crescente, novas tecnologias foram desenvolvidas e implementadas ao longo dos anos, sendo que um dos principais avanços está na área de transmissão óptica, devido à grande capacidade de transporte de informação da fibra óptica. A tecnologia que melhor explora a capacidade desse meio de transmissão atualmente é a multiplexação por divisão de comprimento de onda ou *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) que permite a transmissão de diversos sinais utilizando apenas uma fibra óptica. Redes ópticas WDM se tornaram muito complexas, com enorme capacidade de transmissão de informação (terabits por segundo), para atender à explosão de necessidade por largura de banda. Nesse contexto, é de extrema importância que os recursos dessas redes sejam utilizados de forma inteligente e otimizada. Um dos maiores desafios em uma rede óptica é a escolha de uma rota e a seleção de um comprimento de onda disponível na rede para atender uma solicitação de conexão utilizando o menor número de recursos possível. Esse problema é bastante complexo e ficou conhecido como problema de roteamento e alocação de comprimento de onda ou, simplesmente, problema RWA (*Routing and Wavelength Assignment problem*). Muitos estudos foram realizados com o objetivo de encontrar uma solução eficiente para esse problema, mas nem sempre é possível aliar bom desempenho com baixo tempo de execução, requisito fundamental em redes de telecomunicações. A técnica de algoritmo genético (AG) tem sido utilizada para encontrar soluções de problemas de otimização, como é o caso do problema RWA, e tem obtido resultados superiores quando comparada com soluções heurísticas tradicionais encontradas na literatura. Esta dissertação apresenta, resumidamente, os conceitos de redes ópticas e de algoritmos genéticos, e descreve uma formulação do problema RWA adequada à solução por algoritmo genético.

Palavras-chave: Roteamento e alocação de comprimento de onda; Redes ópticas; Multiplexação por divisão de comprimento de onda; Algoritmo genético; Função de avaliação de aptidão.

ABSTRACT

The advent of new telecommunication services resulted in a huge increase of data traffic in the transmission networks. New technologies were developed and implemented over the years to attend to this growing demand, and the optical transmission technology stands. It has advanced greatly, due to the optical fiber's large capacity of information transmission. Actually, the best technology to exploits the capacity of the fiber is the wavelength-division multiplexing (WDM), allowing the transmission of multiple signals over a single optical fiber. The WDM optical networks have become very complex, with huge capacity (terabits per second), to attend the ever growing need for bandwidth. In this context, it is extremely important to use the networks resources in an intelligent and optimized way. One of the biggest challenges in an optical network is choosing a route, and selecting a available wavelength on the network to attend a connection request using the least amount of resources. This problem is quite complex, and is known as the *routing and wavelength assignment problem* or simply *RWA problem*. Many studies were conducted in order to find an efficient solution to this problem, but it is not always possible to combine good performance with low execution time, a fundamental requirement in telecommunications networks. Genetic Algorithms have been used to solve hard optimization problems, as is the case of the RWA problem, and has produced remarkable results when compared to traditional heuristics found in the literature. This work presents an overview of the concepts of optical networks and genetic algorithms, and describes a formulation of RWA problem that is adequate for solution by genetic algorithm.

Keywords: Routing and wavelength assignment; Optical networks; Wavelength-division multiplexing; Genetic algorithm; Fitness function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tráfego total global em redes móveis, 2007-2012.	15
Figura 1.1 – Evolução da capacidade por canal e das topologias de redes ópticas.	21
Figura 1.2 – Exemplo de uma WRON de uma operadora.	21
Figura 1.3 – Elementos de um ROADM/OXC.	22
Figura 1.4 – Rede óptica e possíveis <i>lightpaths</i> entre os nós 1 e 6.	23
Figura 1.5 – Exemplo de roteamento fixo.	25
Figura 1.6 – Exemplo de roteamento fixo-alternativo.	26
Figura 1.7 – Exemplo de roteamento adaptativo.	27
Figura 1.8 – Comparação das heurísticas em relação a probabilidade de bloqueio.	27
Figura 2.1 – Analogia entre a evolução natural e os problemas de busca.	39
Figura 2.2 – Método de seleção da roleta.	40
Figura 2.3 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.	41
Figura 2.4 – Codificação de duas rotas possíveis entre os nós 0 e 5.	42
Figura 2.5 – Exemplo do funcionamento do operador recombinação.	43
Figura 2.6 – Exemplo do funcionamento do operador mutação.	43
Figura 2.7 – Topologia da rede óptica com 6 nós.	47
Figura 2.8 – Matriz de adjacência (ou de custo) da rede de 6 nós.	47
Figura 2.9 – Topologia da NSFNET.	47
Figura 2.10 – Matriz de adjacência (ou de custo) da NSFNET.	48
Figura 2.11 – Rede no estado inicial.	49
Figura 2.12 – Rede após o estabelecimento de 6 conexões.	49
Figura 2.13 – Matrizes de ocupação da rede em dois momentos.	50
Figura 3.1 – Topologia da rede e conexões da simulação 1.	62
Figura 3.2 – Estado dos comprimentos de onda na simulação 1.	62
Figura 3.3 – Gráfico da evolução da avaliação de aptidão e rota selecionada na simulação 1.	63
Figura 3.4 – Topologia da rede e conexões da simulação 2.	64
Figura 3.5 – Estado dos comprimentos de onda na simulação 2.	64
Figura 3.6 – Gráfico da evolução da avaliação de aptidão e rota selecionada na simulação 2.	65
Figura 3.7 – Topologia da rede e conexões da simulação 3.	66

Figura 3.8 – Estado dos comprimentos de onda na simulação 3.	66
Figura 3.9 – Gráfico da evolução da avaliação de aptidão e rota selecionada na simulação 3.	67
Figura 3.10 – Topologia da rede e conexões da simulação 4.	68
Figura 3.11 – Gráfico da evolução da avaliação de aptidão e rota selecionada na simulação 4.	69
Figura 3.12 – Topologia da rede e conexões da simulação 5.	70
Figura 3.13 – Gráfico da evolução da avaliação de aptidão e rota selecionada na simulação 5.	70
Figura 3.14 – Topologia da rede e conexões da simulação 6.	71
Figura 3.15 – Gráfico da evolução da avaliação de aptidão e rota selecionada na simulação 6.	72
Figura 3.16 – Comparação do desempenho para diferentes quantidades de gerações (G).	79
Figura 3.17 – Topologia da rede utilizada na comparação com outras heurísticas.	79
Figura 3.18 – Comparação de desempenho do algoritmo AG proposto com os de outras heurísticas.	80
Figura 3.19 – Comparação do desempenho do algoritmo proposto com os de trabalhos que utilizam AG.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das heurísticas de alocação de comprimento de onda.....	36
Tabela 2 - Teste do parâmetro α para prioridade ao comprimento de rota.	55
Tabela 3 - Teste do parâmetro α para prioridade aos comprimentos de onda livres	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
CF-AG	Caixa de Ferramenta de Algoritmo Genético
DWDM	Dense Wavelength-Division Multiplexing
GA	Genetic Algorithm
ITU	International Telecommunication Union
N	Quantidade de Nós da Rede Óptica
NSFNET	National Science Foundation Network
OXC	Optical Cross Connect
Pb	Probabilidade de Bloqueio
QoS	Quality of Service
RCL	Relative Capacity Loss
ROADM	Reconfigurable Add and Drop Multiplexer
RWA	Routing and Wavelength Assignment
T_RET	Tempo de Retenção
W	Capacidade Total de Comprimentos de Onda
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
WRON	Wavelength-routed Optical Network
WCC	Wavelength Continuity Constraint

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	Comprimento de Onda
α	Parâmetro de Projeto da Função de Avaliação de Aptidão
Ψ	Estado da Rede
χ	Taxa Média de Chegada de Requisições de Conexões

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
1	ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA	19
1.1	Introdução	19
1.2	Redes Ópticas	19
1.3	O Problema RWA	23
1.4	Subproblema de Roteamento	24
1.4.1	Roteamento Fixo	25
1.4.2	Roteamento Fixo-Alternativo	25
1.4.3	Roteamento Adaptativo	26
1.5	Subproblema de Alocação do Comprimento de Onda	27
1.5.1	Alocação Aleatória.....	28
1.5.2	Primeiro da Fila.....	29
1.5.3	Menos Usado	30
1.5.4	Mais Usado.....	30
1.5.5	Produto Mínimo	30
1.5.6	Menor Carga.....	31
1.5.7	Soma Máxima.....	32
1.5.8	Perda de Capacidade Relativa	33
1.5.9	Reserva de Comprimento de Onda	34
1.5.10	Limite de Proteção.....	34
1.6	Desempenho das Heurísticas e Complexidade Computacional	35
1.7	Considerações Finais	37
2	ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AO PROBLEMA RWA	39
2.1	Introdução	39
2.2	Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda Utilizando Algoritmo Genético	41
2.2.1	Operador de Recombinação (<i>Crossover</i>)	42
2.2.2	Operador de Mutação.....	43
2.2.3	Função de Avaliação de Aptidão	43
2.3	Algoritmo Genético Proposto para Solução do Problema RWA	44
2.3.1	Parâmetros do Problema.....	45

2.3.2	Criação das Redes Ópticas	46
2.3.3	Ocupação da Rede.....	48
2.3.4	Codificação dos Indivíduos.....	50
2.3.5	Criação da População Inicial	51
2.3.6	Função de Avaliação de Aptidão	52
2.3.7	Operador de Seleção.....	56
2.3.8	Operador de Recombinação (<i>Crossover</i>).....	57
2.3.9	Operador de Mutação.....	58
2.3.10	Critério de Parada.....	58
2.3.11	Opções da CF-AG	59
3	IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PROPOSTA	61
3.1	Simulações para Avaliação do Funcionamento do Programa	61
3.1.1	Simulação 1	62
3.1.2	Simulação 2	64
3.1.3	Simulação 3	66
3.1.4	Simulação 4 (Utiliza Cenário da Simulação 1).....	68
3.1.5	Simulação 5 (Utiliza Cenário da Simulação 2).....	69
3.1.6	Simulação 6 (Utiliza Cenário da Simulação 3).....	71
3.2	Avaliação do Desempenho do Script AG Desenvolvido	73
3.2.1	Modelo de Tráfego nas Redes de Telecomunicações.....	73
3.2.2	Cálculo da Probabilidade de Bloqueio	74
3.2.3	Gerador de Requisições e Tráfego.....	74
3.2.4	Análise do Desempenho do AG Proposto Variando o Número de Gerações	78
3.2.5	Comparação do Desempenho do AG Proposto com Heurísticas Encontradas na Literatura	79
3.2.6	Comparação do Desempenho do AG Proposto com Outros Trabalhos que Também Utilizam AG.....	80
4	CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	82
4.1	Trabalhos Futuros	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – Fluxograma do algoritmo primeiro da fila.....	87
	APÊNDICE B – Fluxograma do algoritmo RCL.....	88
	APÊNDICE C – Fluxograma do algoritmo genético proposto.....	89

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o tráfego nas redes de telecomunicações cresceu de forma acentuada, devido ao surgimento de novas tecnologias e serviços, como internet banda larga, vídeo em alta definição, vídeo sob demanda, IPTV, comércio eletrônico, *triple play*, armazenamento em nuvem, *e-science*, internet móvel (*tablets*), etc.

A Figura 1, retirada de um estudo realizado pela Ericsson (2012), ilustra bem essa enorme demanda por largura de banda. O gráfico mostra o crescimento do tráfego total mensal nas redes móveis, separados em voz e dados, de janeiro de 2007 a janeiro de 2012. O gráfico deixa clara a tendência de crescimento acelerado do tráfego de dados e uma estabilização do tráfego de voz.

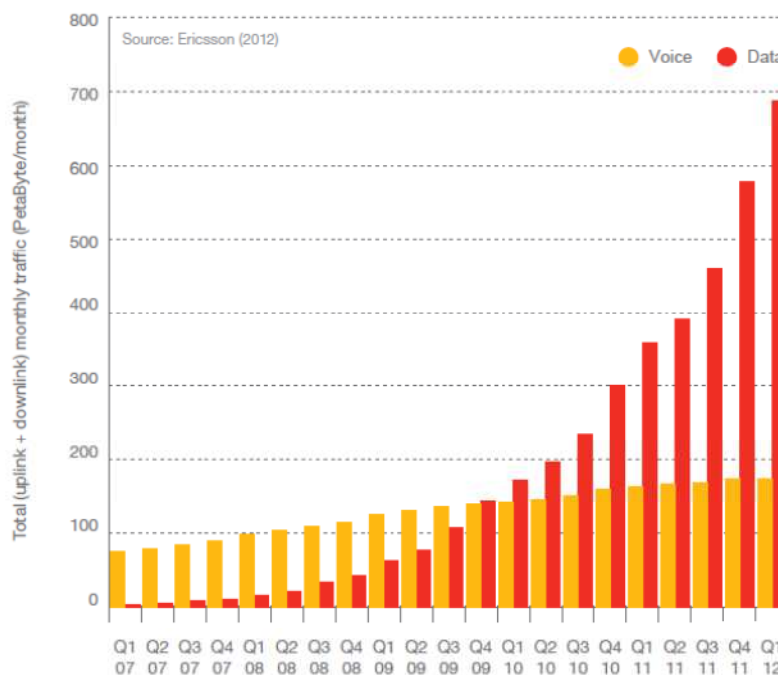


Figura 1 - Tráfego total global em redes móveis, 2007-2012.

O único meio de transmissão capaz de suportar essa enorme demanda por largura de banda é a fibra óptica, e a tecnologia adotada nas redes de transmissão, por explorar melhor essa capacidade, foi a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength-Division Multiplexing - WDM*).

As redes WDM passaram por uma grande evolução nos últimos anos, começando com sistemas ponto a ponto, passando pelas redes em anel e chegando às redes em malha. Com o desenvolvimento e comercialização de comutadores

ópticos (*Optical Cross Connect* - OXC) e multiplexadores de adição e extração reconfiguráveis (*Reconfigurable Add and Drop Multiplexer* - ROADM), que possuem a funcionalidade de comutação e roteamento de comprimentos de onda, foi possível implementar redes totalmente ópticas, conhecidas como redes ópticas com roteamento por comprimento de onda (*wavelength-routed optical network* - WRON).

O estabelecimento de uma conexão entre dois pontos em uma rede WRON exige a escolha de uma rota física (conjunto de enlaces de fibras ópticas entre os nós da rede) e de uma rota luminosa (conjunto de comprimentos de onda utilizados ao longo da rota física), denominado *lightpath*. Este processo é conhecido como o problema de roteamento e alocação de comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment problem* - RWA problem) (ROUSKAS, 2001).

O problema RWA é bastante complexo e está diretamente ligado ao desempenho e otimização da rede óptica, podendo ser dividido em estático e dinâmico. Além disso, o problema de roteamento geralmente é tratado separadamente do de alocação de comprimento de onda com o objetivo de tornar o problema RWA mais simples (RAMAWAMI; SIVARAJAN, 2002).

Na literatura, encontram-se diversas propostas de solução para o problema RWA dinâmico, como roteamentos fixo, fixo alternado e adaptativo, para o subproblema do roteamento, e métodos heurísticos para solução do problema de alocação de comprimento de onda, como a alocação aleatória (*Random Assignment*), Primeiro da fila (First-Fit), Menos usado (*Least-Used/SPREAD*), Menor carga (*Least Loaded*) entre outros (ZANG, 2000).

Este trabalho tem como objetivo o estudo e a utilização da técnica de algoritmo genético para solução do problema RWA dinâmico. Esta alternativa vem se mostrando muito eficaz quando comparada com tradicionais métodos heurísticos (BECKMANN; KILLAT, 1999; OZDALGAR; BERSEKAS, 2003; BISBAL et al., 2004; NAKEERAN, et al., 2004; LE et al., 2005; BANERJEE et al., 2010; BARPANDA, 2009; NAGIB, 2010; BHANJAM et al. 2010; YUSSOF; ONG, 2010).

Revisão bibliográfica

São apresentados, a seguir, alguns dos principais trabalhos demonstrando a utilização de algoritmo genético na solução do problema RWA e utilizados na elaboração da implementação do algoritmo genético proposta nesta dissertação.

Bisbal et al. (2004) propôs a utilização de um algoritmo genético para solucionar o problema de alocação de comprimento de onda em redes ópticas roteadas por comprimentos de onda, com perfil de tráfego dinâmico. O algoritmo obteve baixa probabilidade de bloqueio e um tempo computacional pequeno.

Outro ponto positivo desse trabalho foi a implementação, no algoritmo, da capacidade de prover imparcialidade entre as conexões, ou seja, de oferecer qualidade de serviço similar (em relação à probabilidade de bloqueio) entre todas as conexões.

Adicionalmente, foi proposta uma extensão do algoritmo para prover tolerância a falhas na camada óptica, com o objetivo de atender à alta disponibilidade desejada em redes ópticas. Esta funcionalidade seleciona duas rotas luminosas, uma preferencial e uma reserva, para uma solicitação de conexão. O resultado do trabalho demonstrou que a inclusão da funcionalidade de tolerância a falhas ao algoritmo genético proposto resultou em uma otimização significativa de recursos, quando comparado com outros métodos, como o de roteamento alternativo.

Le et al. (2005) elaborou uma função de avaliação de aptidão que considera simultaneamente o comprimento da rota e o número de comprimentos de onda disponíveis em cada rota para solução do problema RWA em redes WDM sem capacidade de conversão de comprimento de onda (um mesmo comprimento de onda deve ser utilizado em todos os enlaces que compõe a rota) e com perfil de tráfego dinâmico. Diversas simulações demonstraram que o novo algoritmo obteve baixa probabilidade de bloqueio e bom balanceamento de carga entre as rotas, superando métodos eficientes, como o do roteamento fixo-alternado e o algoritmo genético original proposto por Bisbal et al. (2004).

Objetivo

Este trabalho busca avaliar a aplicação e o desempenho da utilização de algoritmo genético para solução do problema de roteamento e alocação de comprimento de onda em redes ópticas WDM.

Para isso, será desenvolvido um programa em Matlab para solução do problema RWA utilizando algoritmo genético. Vale ressaltar que a determinação da função de avaliação de aptidão (*fitness function*) a ser utilizada tem grande

importância no trabalho, pois está diretamente ligada ao desempenho do algoritmo genético.

Após a criação e depuração do programa desenvolvido, serão realizadas diversas simulações com o objetivo de comparar o desempenho do algoritmo proposto com heurísticas já existentes e com outros trabalho que utilizam algoritmo genético.

Estrutura da dissertação

Este trabalho foi dividido em 4 capítulos, com o objetivo de facilitar a exposição do estudo e o entendimento dos resultados alcançados.

O Capítulo 1 apresenta, resumidamente, os conceitos de uma rede óptica por multiplexação por comprimento de onda (WDM). O problema RWA também é definido e detalhado. Os métodos existentes para solução do problema RWA são apresentados e os resultados analisados e comparados. O objetivo do capítulo é dar subsídios ao leitor para entendimento do problema estudado e da solução proposta nos capítulos seguintes.

O Capítulo 2 trata, inicialmente, dos conceitos de algoritmo genético (AG) e, na sequência, apresenta uma proposta de algoritmo genético para solução do problema RWA. Este capítulo detalha todos os principais passos da formulação de todas as etapas de algoritmo genético no ambiente Matlab.

O Capítulo 3 trata da implementação e avaliação do desempenho do algoritmo proposto. Inicialmente, para avaliação de desempenho, o algoritmo foi testado em cenários conhecidos. Em seguida, o desempenho algoritmo proposto foi comparado com os de outras técnicas encontradas na literatura, com variações de parâmetros do algoritmo, e de outros trabalhos baseados em AG. A metodologia utilizada para criação da rede, geração do tráfego da rede e requisições de chamadas também é detalhada nesse capítulo.

Finalmente, o Capítulo 4 apresenta uma avaliação dos resultados obtidos neste trabalho.

1 ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

1.1 Introdução

As redes DWDM passaram por grande evolução nos últimos anos, como já comentado, assumindo a configuração de WRON, redes com roteamento por comprimento de onda. Uma WRON é formada, basicamente, por nós ópticos interconectados por enlaces de fibras ópticas, formando uma topologia física que é utilizada para prover o estabelecimento de circuitos ópticos, também chamados de rotas luminosas, ou *lightpaths*. O estabelecimento de *lightpaths* é uma tarefa fundamental, pois está ligado à otimização do uso da rede. Este é um problema de grande complexidade, e ficou conhecido como o problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda, ou problema RWA. Diversos estudos foram realizados ao longo dos últimos anos em busca de soluções para o problema RWA. Esse capítulo trata de redes ópticas, do problema RWA e das soluções propostas para o mesmo na literatura.

1.2 Redes Ópticas

A fibra ótica é um meio de transmissão com enorme capacidade de transporte de informação com baixíssimas perdas (da ordem de 0,2 dB/km). No entanto, um canal de informação utiliza somente uma pequena fração da capacidade da fibra. Para tirar maior proveito do potencial desse meio de transmissão, a tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) passou a ser adotada nas redes de telecomunicações.

Com a tecnologia WDM, uma fibra ótica transporta vários canais simultaneamente, cada um em um comprimento de onda específico. O número de comprimentos de onda é limitado por características físicas da própria fibra e do sistema. Atualmente, existem sistemas comerciais que suportam até 160 comprimentos de onda na janela de transmissão de 1550 nm, onde a fibra ótica introduz menor atenuação. A capacidade de sistemas WDM pode ser aumentada com o acréscimo de comprimentos de onda e/ou elevação da taxa de transmissão de cada comprimento de onda. Portanto, sistemas ópticos WDM têm o potencial de

oferecer uma capacidade total de terabits por segundo, o suficiente para satisfazer a crescente demanda por maior largura de banda.

No entanto, a velocidade na qual é possível processar sinais eletronicamente é bastante limitada, se comparada com a enorme banda provida pela fibra óptica. Essa grande diferença entre a velocidade de transmissão óptica e processamento eletrônico resulta em um gargalo na rede, comumente denominado gargalo eletrônico.

O advento de comutadores totalmente ópticos e de *hardware* capazes de processar sinais ópticos permitiu superar esta limitação, maximizando os benefícios providos pelo domínio óptico, alguns, até então, pouco explorados. Isto resultou na introdução de uma inteligência na camada física da rede (ambiente fotônico) que antes era restrita às camadas superiores. Tarefas como chaveamento, roteamento e encaminhamento de dados, que anteriormente exigiam a passagem para o domínio eletrônico, passaram a ser desempenhadas com eficiência no domínio óptico (SOARES; GIOZZA, 2004).

Esta nova filosofia agrega uma série de vantagens, como transparência à taxa e aos protocolos, aumento da capacidade efetiva de tráfego suportado, melhor utilização nos recursos da rede, diminuição do atraso no transporte fim-a-fim da informação, suporte a diversos tipos de mídias e aplicações com diferentes requisitos de qualidade de serviço (QoS – *quality of service*) (ROUSKAS, 2001).

Redes ópticas transparentes suportam tráfego de uma ampla gama de aplicações, envolvendo o transporte de grandes quantidades de dados e, geralmente, requerendo resposta muito rápida. Tais aplicações incluem vídeo sob demanda e teleconferência, aplicações de telemedicina, distribuição de documentos multimídia, armazenamento em nuvem e outros serviços que ainda estão por vir. Consequentemente, redes ópticas WDM têm sido alvo de extensa pesquisa.

A Figura 1.1 ilustra a evolução da capacidade por canal das redes WDM e das topologias ópticas.

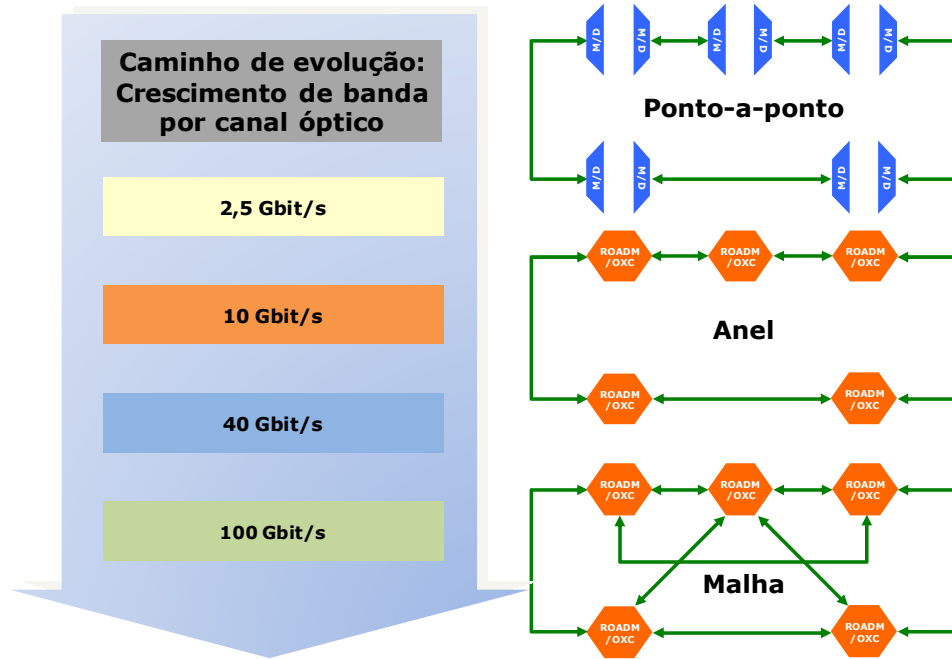


Figura 1.1 – Evolução da capacidade por canal e das topologias de redes ópticas.

A infraestrutura de transmissão das operadoras de telecomunicações é formada por redes WDM em malha ou evolui para isso. As redes consideradas nesta dissertação empregam roteamento por comprimento de onda (*Wavelength Routed Optical Networks – WRON*), como ilustrado na Figura 1.2.

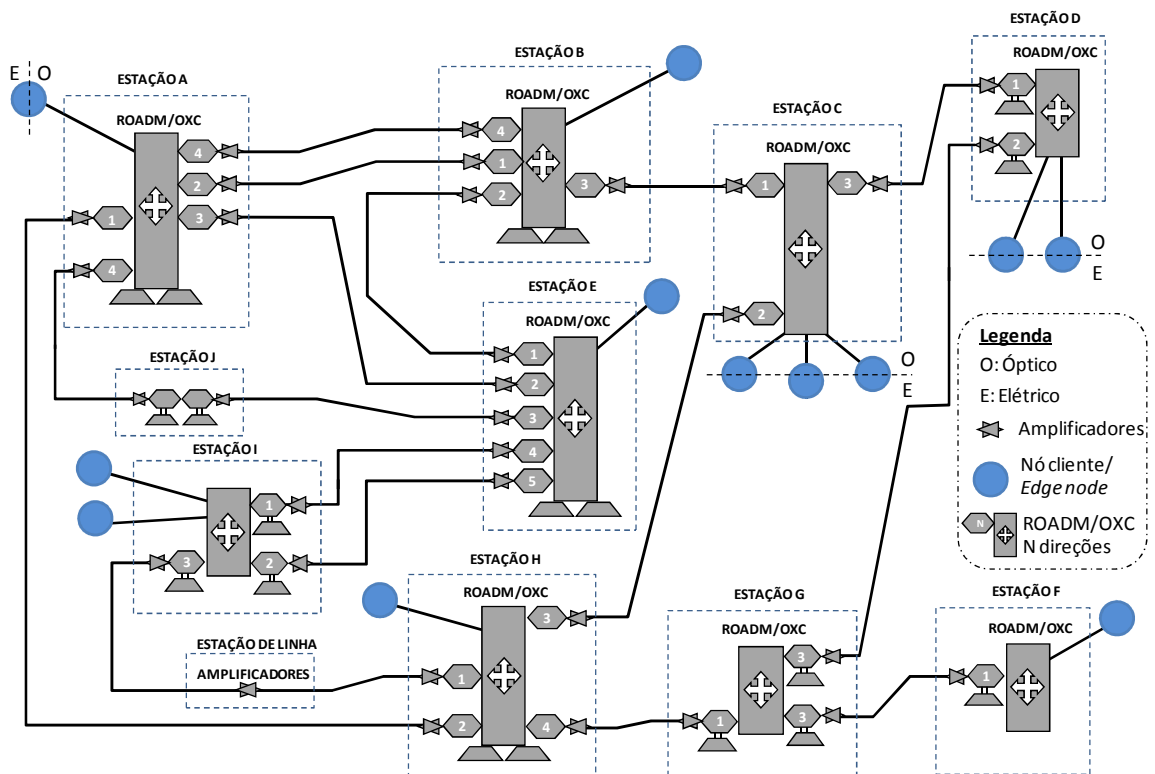


Figura 1.2 – Exemplo de uma WRON de uma operadora.

Os multiplexadores de adição/extração reconfiguráveis (ROADM) ou comutadores ópticos (OXC) que ficam nas estações das operadoras se interligam com outros equipamentos ROADM/OXC, formando a malha WDM, e com os nós de borda (*edge nodes*) ou nós-clientes, onde ficam os equipamentos que atendem o usuário final, como roteadores IP, *switches* ATM e equipamentos TDM.

O ROADM/OXC é um elemento da rede óptica que tem a função de comutar um comprimento de onda de uma porta de entrada para uma outra porta de saída. Esta função é fundamental para definir o caminho ou rota a ser utilizada por um circuito óptico ou *lightpath*. Há dois tipos de ROADM/OXCs: os de nós intermediários, que apenas realizam a comutação de comprimento de onda de um determinado circuito entre as portas de entrada e de saída, e os de estações com demanda de tráfego, que realizam adicionalmente a inserção (*add*) ou extração (*drop*) de canais. O sinal agregado que chega ao ROADM/OXC deve passar, primeiramente, por um demultiplexador para separar os comprimentos de onda; em seguida, os comprimentos de onda passam por comutadores ópticos, onde ocorre o roteamento de cada comprimento de onda para a direção desejada; por fim, os comprimentos de onda são agrupados novamente por multiplexadores e encaminhados para cada direção do elemento de rede. A Figura 1.3 mostra o detalhamento dos elementos de um ROADM/OXC.

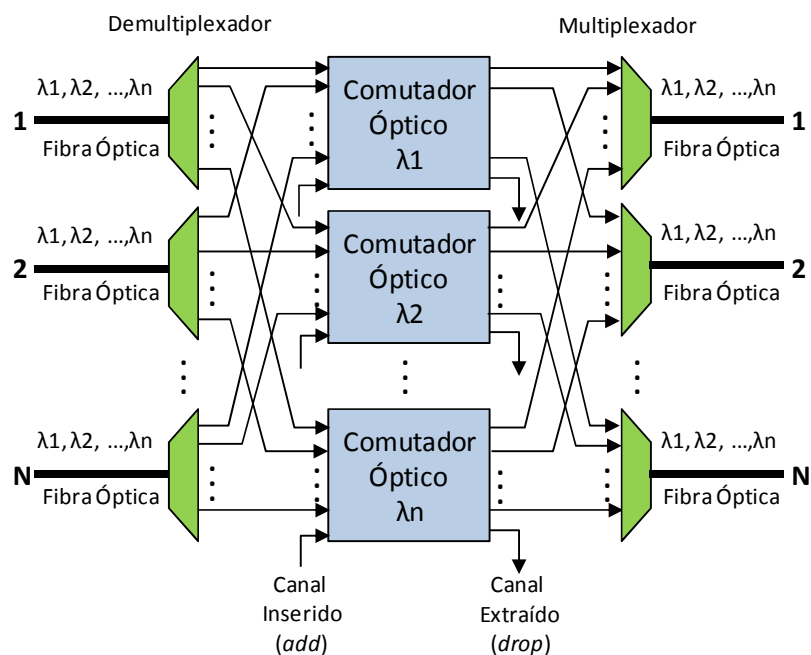


Figura 1.3 - Elementos de um ROADM/OXC.

O estabelecimento de uma conexão óptica em uma rede WDM requer o roteamento (seleção de uma rota física adequada) e a alocação de um comprimento de onda. O problema resultante, denominado *problema de roteamento e alocação de comprimento de onda* (problema RWA), é estudado a seguir.

1.3 O Problema RWA

O estabelecimento de uma conexão entre dois pontos de uma rede WRON exige a escolha de uma rota física (conjunto de segmentos de fibras ópticas) e de uma rota luminosa (conjunto de comprimentos de onda utilizados ao longo da rota física). A realização dessas duas ações recebe, na literatura, a denominação de *lightpath*. A Figura 1.4 mostra um exemplo de rede óptica e algumas possibilidades de rotas entre os nós 1 e 6.

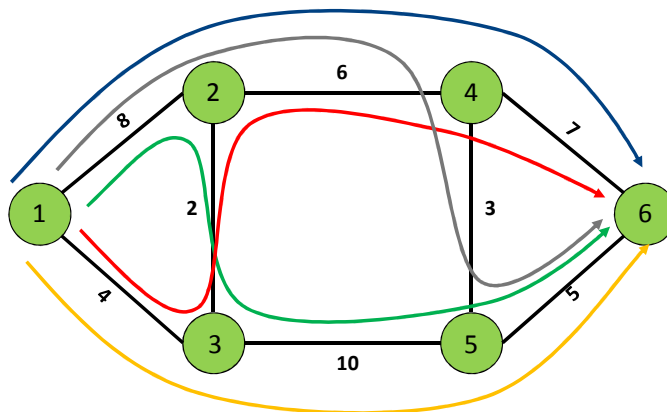


Figura 1.4 – Rede óptica e possíveis *lightpaths* entre os nós 1 e 6.

Caso a rede não possua elementos com a funcionalidade de conversão de comprimento de onda, um *lightpath* deve ocupar o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces de sua rota. Essa condição é conhecida como *restrição de continuidade de comprimento de onda* (ZANG, 2000). Deve-se levar em consideração também que, em qualquer situação, dois *lightpaths* não podem utilizar um mesmo comprimento de onda em mesmo segmento de fibra. Caso não exista comprimento de onda disponível para atender uma solicitação de conexão, esta será bloqueada.

O problema do RWA é tratado de acordo com o tipo de tráfego da rede óptica, que pode ser classificado como estático ou dinâmico (RAMASWAMI; SIRAJAN,

1995). Em uma rede com perfil de tráfego estático, os pares de nós origem e destino são conhecidos previamente; logo, os recursos necessários (comprimentos de onda) para se estabelecer cada circuito óptico são alocados *off-line*, em uma fase de planejamento da rede óptica. A solução do problema RWA para redes com perfil de tráfego estático tem o objetivo de minimizar a utilização da capacidade da rede necessária para atender a demanda de tráfego. No caso de tráfego dinâmico, *lightpaths* são estabelecidos e finalizados dinamicamente (*on-line*), de acordo com as solicitações dos usuários e do roteamento de conexões da rede óptica. Em redes com essas características, as solicitações de conexões não são conhecidas previamente e, por conseguinte, é possível que a demanda de tráfego em um determinado momento supere a capacidade da rede, gerando bloqueio de conexões.

O problema RWA dinâmico busca minimizar a utilização da capacidade da rede a qualquer momento em que uma requisição de conexão é recebida e, assim, diminuir a probabilidade de bloqueio de conexões futuras. Vale ressaltar que, no problema RWA dinâmico, os algoritmos devem apresentar baixa complexidade computacional, uma vez que as escolhas das rotas e dos comprimentos de onda são realizadas durante a operação da rede (BISBAL et al., 2004).

O problema RWA estático pode ser formulado como um problema de programação linear inteira mista (RAMASWAMI; SIRAVAJAN, 1995). O problema RWA dinâmico é mais complexo; por isso, em geral, sua solução é baseada em métodos heurísticos. Para reduzir sua complexidade, o problema RWA é, usualmente, separado em dois subproblemas: um subproblema de roteamento e um subproblema de alocação de comprimento de onda (BANERJEE; MUKHERJEE, 1996).

A solução do subproblema do roteamento é, com frequência, baseada em três abordagens: Roteamento Fixo, Roteamento Fixo-alternativo e Roteamento Adaptativo. Para a solução do subproblema da alocação de comprimento de onda, a literatura oferece diversos métodos heurísticos, que serão analisados ainda neste capítulo.

1.4 Subproblema de Roteamento

Esta seção apresenta as técnicas utilizadas para solução do subproblema de roteamento.

1.4.1 Roteamento Fixo

No roteamento fixo, entre cada par de nós há apenas uma rota fixa que é definida previamente. Essa técnica tem baixa complexidade computacional, logo, gera menos atraso no estabelecimento de um circuito óptico quando comparada com as outras técnicas de roteamento (SOARES; GIOZZA, 2004). A Figura 1.5 mostra o exemplo de uma rota fixa para uma conexão entre os nós 1 e 6. Caso não exista comprimento de onda disponível na rota pré-definida entre os nós 1 e 6, a conexão será bloqueada, uma vez que esta técnica não utiliza rotas alternativas.

O roteamento fixo é de implementação muito simples, mas tem a desvantagem de não ser tolerante a falhas (qualquer falha na rota implica perda de conexão) e, geralmente, apresenta maior probabilidade de bloqueio que outros tipos de roteamento que usam rotas alternativas.

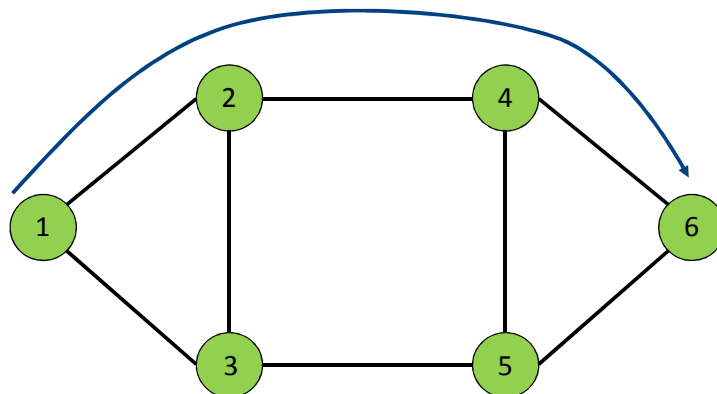


Figura 1.5 – Exemplo de roteamento fixo.

1.4.2 Roteamento Fixo-Alternativo

A técnica de roteamento fixo-alternativo é caracterizada pela existência de um conjunto fixo de rotas definidas previamente para cada par de nós de origem e destino. Para isso, é necessário que cada nó possua uma tabela com a lista de possíveis rotas para cada destino, que são ordenadas em função de um custo, como o número de saltos (segmentos de fibra) entre origem e destino, comprimento da rota ou algum outro parâmetro.

A Figura 1.6 apresenta um exemplo de roteamento fixo-alternativo para atender uma conexão entre os nós 1 e 6, juntamente com a tabela de roteamento do nó 1.

Ao chegar uma requisição de conexão óptica, a lista de rotas pré-selecionadas é percorrida na ordem crescente de custo com o objetivo de identificar a rota de menor custo da lista que tenha a capacidade de estabelecer o circuito óptico requisitado. Se nenhuma das rotas pré-definidas tiver recursos disponíveis, o circuito óptico será bloqueado. A rota de menor custo para uma conexão é chamada de rota primária ou preferencial, enquanto as demais são chamadas de rotas alternativas. As rotas alternativas devem ser disjuntas da rota primária, ou seja, não devem com ela compartilhar enlaces a fim de evitar que uma falha atinja as duas rotas. No caso de duas rotas alternativas possuírem o mesmo custo, a seleção da rota a ser utilizada pode ser realizada de forma aleatória (SOARES; GIOZZA, 2004).

As principais vantagens do roteamento fixo-alternativo são a possibilidade de prover certo grau de tolerância a falhas e menor probabilidade de bloqueio que o roteamento fixo.

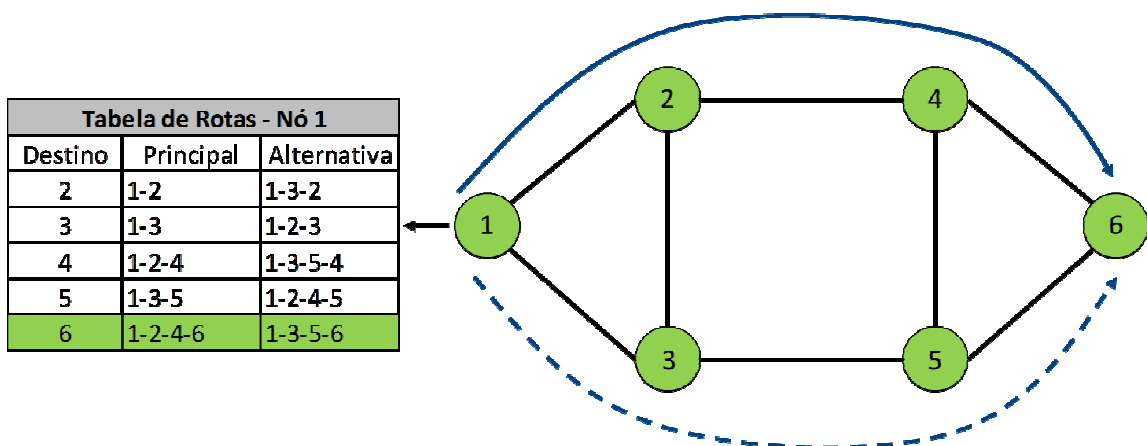


Figura 1.6 – Exemplo de roteamento fixo-alternativo.

1.4.3 Roteamento Adaptativo

Nesta abordagem, qualquer uma das possíveis rotas que interligam os nós de origem e destino pode ser utilizada no atendimento da solicitação de conexão. As rotas são escolhidas dinamicamente em função do atual estado da rede. Apesar de qualquer rota viável poder ser selecionada, prioriza-se o uso das rotas de menor custo, onde o custo pode ser o número de saltos na rota, por exemplo. Um exemplo de roteamento adaptativo é o da rota de menor custo (*Adaptive Shortest-Cost Path* -

ASCP). Nesta técnica, é atribuído o custos 1 (um) aos enlaces livres e infinito aos enlaces ocupados. Os custos dos enlaces que formam a rota são somados, de modo que seja escolhida a melhor rota (de menor custo) dentre todas as rotas admissíveis.

A Figura 1.7 mostra o atendimento de uma solicitação de conexão entre os nós 1 e 6 com alguns enlaces sem disponibilidade de recursos.

Apesar de proporcionar maior tolerância a falhas e probabilidade de bloqueio inferior do que os roteamentos fixo e fixo-alternativo, o roteamento adaptativo apresenta alta complexidade computacional, devido à sobrecarga resultante de frequentes atualizações de informação sobre o estado da rede. O roteamento adaptativo deve explorar todas as possibilidades de rotas para cada solicitação de conexão, isto é, a conexão será bloqueada somente se nenhuma dessas rotas possuir recursos disponíveis (SOARES et al., 2009).

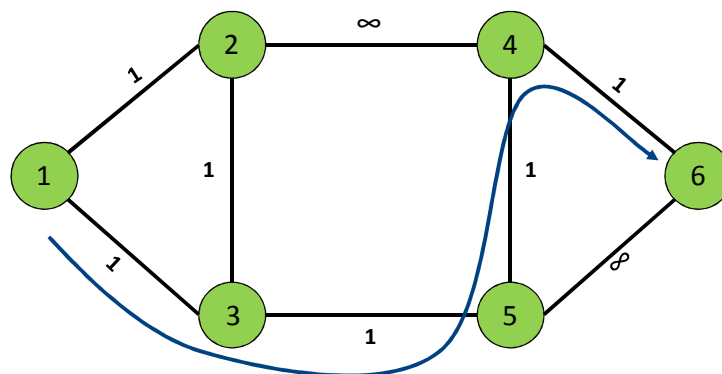


Figura 1.7 – Exemplo de roteamento adaptativo.

1.5 Subproblema de Alocação do Comprimento de Onda

A solução para o subproblema de alocação de comprimento de onda é dada de acordo com o perfil de tráfego da rede. No caso do tráfego estático, onde os pares de nós origem e destino são conhecidos previamente, geralmente utiliza-se a técnica de coloração de grafos para solução do problema. Já em redes com tráfego dinâmico, onde as solicitações de conexões podem chegar a qualquer momento (*on line*), são utilizados métodos heurísticos para realizar a alocação de comprimentos de onda. Este trabalho leva em consideração redes com perfil de tráfego dinâmico e por esse motivo os métodos heurísticos serão tratados com maior profundidade.

Existem, na literatura, muitas soluções propostas para o problema de alocação de comprimento de onda dinâmica, como os métodos heurísticos da Alocação Aleatória (*Random Assignment*), Primeiro da Fila (*First-Fit*), Menos Usado (*Least-Used/SPREAD*), Mais Usado (*Most Used/PACK*), Produto Mínimo (*Min-Product*), Menor Carga (*Least Loaded*), Soma Máxima (*MAX-SUM*) e Perda da Capacidade Relativa (*Relative Capacity Loss – RCL*) (ZANG, 2000; ZHOU; YUAN, 2002; SOARES; GIOZA, 2004; SOARES et al., 2009). Essas heurísticas podem ser aplicadas em redes com tráfego estático ou dinâmico, em conjunto com os diversos esquemas de roteamento vistos na seção anterior.

Esses métodos para solução do problema RWA foram largamente estudados e simulados, como em Zang (2000), por exemplo, e serão detalhados a seguir, especialmente os algoritmos Primeiro da Fila e RCL, por apresentarem bom desempenho e possuírem complexidade computacional diferentes. O RCL possui alta complexidade computacional enquanto o primeiro da fila é mais simples.

As definições abaixo serão utilizadas na descrição de cada técnica.

- L: Número de enlaces
- M_i : Número de fibras no enlace i
- M: Número de fibras por enlace, caso todos os enlaces possuam o mesmo número de fibras
- W: Número de comprimentos de ondas por fibra
- $\pi(p)$: Conjunto de segmentos de fibra que formam uma rota p .
- S_p : Conjunto de comprimentos de onda disponíveis ao longo da rota p selecionada
- D_{ij} Número de fibras alocadas no enlace i e comprimento de onda j .

1.5.1 Alocação Aleatória

Neste método, os comprimentos de onda disponíveis na rede são agrupados em um conjunto. Para atender uma requisição de conexão, o algoritmo escolhe, de forma aleatória (com probabilidade uniforme), um comprimento de onda do conjunto formado inicialmente.

Esse esquema tem a vantagem de não requerer conhecimento do estado global da rede; porém, requer uma avaliação inicial dos comprimentos de onda disponíveis, o que demanda um tempo de processamento. Além disso, não

apresenta bom desempenho em relação à probabilidade de bloqueio e ao balanceamento de carga (SOARES; GIOZA, 2004).

1.5.2 Primeiro da Fila

Neste algoritmo, proposto por Chlamtac (1989), todos os comprimentos de onda da rede são numerados, formando uma fila. Quando ocorre uma requisição de conexão, o primeiro comprimento de onda disponível é selecionado. O algoritmo precisa apenas conhecer o estado dos comprimentos de onda nos enlaces que compõem a rota selecionada, dispensando o conhecimento do estado global da rede. Em consequência, esta abordagem possui baixa complexidade computacional.

A idéia do algoritmo é agrupar todos os comprimentos de onda em uso no início da fila, de modo que os comprimentos de onda do final da fila fiquem disponíveis em todos os enlaces, aumentando a probabilidade de atender requisições de caminhos mais longos. Com essa estratégia, o algoritmo tem bom desempenho quanto à probabilidade de bloqueio, mas pode provocar um desbalanceamento de carga na rede, sobrecarregando os comprimentos de onda de numeração mais baixa.

Esse esquema é muito utilizado na prática, devido à simplicidade de implementação, baixa complexidade computacional, por não requerer informações globais da rede e ainda apresentar desempenho melhor do que “alocação aleatória”, uma vez que considera a ocupação dos comprimento de onda.

Para implementação deste técnica, é necessário criar uma tabela com a ocupação dos comprimentos de onda em cada enlace da rede. Ao chegar uma solicitação de conexão, inicialmente, o algoritmo busca, na matriz de ocupação, um comprimento de onda disponível em todos os enlaces da rota, garantindo o atendimento da restrição de continuidade do comprimento de onda. O primeiro comprimento de onda que atenda esta condição será alocado e a conexão será estabelecida. Esse procedimento é repetido a cada nova solicitação de conexão, até que os comprimentos de onda livres se esgotem. A partir desse momento, as solicitações de conexão serão bloqueadas (SUN et al., 2003).

A cada comprimento de onda alocado ou liberado (caso uma conexão deixe de existir), a matriz de ocupação é atualizada. Geralmente, atribui-se o valor ‘0’ aos comprimentos de onda livres e ‘1’ aos comprimentos de onda ocupados.

O Apêndice A apresenta um fluxograma do algoritmo Primeiro da Fila.

1.5.3 Menos Usado

Esse esquema seleciona o comprimento de onda menos utilizado na rede para atender uma conexão (SOARES; GIOZA, 2004). O objetivo é proporcionar um balanceamento de carga entre os comprimentos de onda da rede; porém, esta ação acaba deixando poucos comprimentos de onda disponíveis para atender conexões de rotas mais longas, que passam por vários enlaces e são bloqueadas em pouco tempo. Com isso, o algoritmo limita-se a atender (preferencialmente) conexões curtas.

Além desta limitação, o esquema requer informação do estado global da rede, aumentando o custo computacional. Este esquema possui desempenho pior do que “alocação aleatória” e “primeiro da fila”. Diante de dessas desvantagens, esse algoritmo raramente é utilizado na prática.

1.5.4 Mais Usado

Este método seleciona o comprimento de onda mais utilizado na rede para atender uma requisição de conexão (ZHOU; YUAN, 2002). Dessa forma, um mesmo comprimento de onda é utilizado para atender um número maior de conexões, preservando a capacidade dos comprimentos de onda menos utilizados para conexões mais longas e, conseqüentemente, diminuindo a probabilidade de bloqueio.

A implementação desse esquema requer a introdução de cabeçalho de comunicação para colher informação sobre o estado da rede. O algoritmo tem desempenho muito melhor do que “menos usado” e, em algumas condições de tráfego, supera por pouco “primeiro da fila” em relação a probabilidade de bloqueio.

1.5.5 Produto Mínimo

Este algoritmo é utilizado em redes com múltiplas fibras por enlace; em redes com uma única fibra, é equivalente a “primeiro da fila”. O algoritmo tenta agrupar os

comprimentos de onda no menor número de fibras possível, com o objetivo de reduzir o número de fibras utilizadas na rede (ZANG, 2000).

O algoritmo escolhe o comprimento de onda que satisfaz a condição em (1.1), onde D_{ij} é o número de fibras alocadas no enlace i e comprimento de onda j ($1 \leq j \leq W$), $\pi(p)$ é o conjunto de segmentos de fibra que formam uma rota p , S_p é o conjunto de comprimentos de onda disponíveis na rota p . Portanto, este produto é uma medida da utilização do comprimento de onda j na rota p .

$$\min_{j \in S_p} \prod_{i \in \pi(p)} D_{ij} \quad (1.1)$$

O esquema escolhe o comprimento de onda (de numeração mais baixa) de menor carga na rota p . Este esquema tem desempenho pior do que a versão multifibra do algoritmo “primeira da fila”, no qual tanto os comprimentos de onda como as fibras são numeradas. Além disso, tem maior custo computacional, devido à necessidade do cálculo do produto.

1.5.6 Menor Carga

Este algoritmo também é utilizado em redes multifibras. O método escolhe o comprimento de onda com maior capacidade residual no enlace de maior carga ao longo de uma rota p . A heurística também pode ser utilizada em uma única fibra. Neste caso, a capacidade residual é igual a 1 (para comprimento de onda disponível) ou 0 (para comprimento de onda indisponível) e o algoritmo escolhe o comprimento de onda de mais baixa numeração e capacidade residual igual a 1, ficando com funcionamento idêntico ao esquema “primeiro da fila”.

Em redes multifibras, o algoritmo escolherá o comprimento de onda j com mais baixa numeração que satisfaça a seguinte condição:

$$\max_{j \in S_p} \min_{i \in \pi(p)} (M_i - D_{ij}) \quad (1.2)$$

onde S_p é o conjunto de comprimentos de onda disponíveis na rota p ; $\pi(p)$ é o conjunto de enlaces que formam a rota p ; M_i é o número de fibras no enlace i ; D_{ij} é o número de fibras para as quais o comprimento de onda j é usado no enlace i .

Na expressão (1.2), $M_i - D_{ij}$ representa, portanto, o número de fibras nas quais o comprimento de onda j está disponível no enlace i , que representa a capacidade residual desse comprimento de onda. O algoritmo calcula, inicialmente, a capacidade residual mínima de cada comprimento de onda nos enlaces de uma conexão e , então, seleciona o comprimento de onda que maximiza essa capacidade residual.

Este esquema se mostra mais eficiente do que os algoritmos “primeiro da fila” e “mais usado” (ZANG, 2000).

1.5.7 Soma Máxima

Este é mais um esquema que foi projetado para redes multifibra, mas também pode ser utilizado em redes com apenas uma fibra.

O objetivo é maximizar a capacidade das rotas remanescentes após o estabelecimento da conexão em questão. Neste esquema, todos os possíveis caminhos ópticos são considerados, o que requer uma rota pré-selecionada para cada conexão, o conhecimento antecipado da matriz de tráfego, que deve se manter estável por um intervalo de tempo (BARRY; SUBRAMANIAM, 1997).

Seja ψ um estado da rede, descrevendo as *lightpaths* existentes e alocações de comprimentos de onda. A “capacidade de *enlace*” do *link* i e no comprimento de onda j no estado ψ é definida como o número de fibras nas quais o comprimento de onda j está livre, ou seja:

$$r(\psi, i, j) = M_i - D(\psi)_{ij} \quad (1.3)$$

Em (1.3), $D(\psi)_{ij}$ representa o número de fibras no *link* i e comprimento de onda j , no estado ψ .

A capacidade de uma rota p , no comprimento de onda j , é definida como o número de fibras nas quais este comprimento de onda está disponível no enlace mais congestionado ao longo da rota:

$$r(\psi, p, j) = \min_{i \in \pi(p)} r(\psi, i, j) \quad (1.4)$$

A “capacidade de rota” de uma rota p no estado ψ é definida como a soma das capacidades de rota em todos os comprimentos de onda:

$$R(\psi, p) = \sum_{j=1}^W \min_{i \in \pi(p)} r(\psi, i, j) \quad (1.5)$$

Seja $\psi'(j)$ o próximo estado da rede caso o comprimento de onda j seja alocado à conexão. O esquema “soma máxima” escolhe o comprimento de onda que maximiza a seguinte quantidade:

$$\sum_{p \in P} R(\psi'(j), p) \quad (1.6)$$

onde P é o conjunto de todas as rotas potenciais para a conexão solicitada no presente estado da rede (ψ).

Após o estabelecimento do *lightpath* para uma determinada conexão, o estado da rede será atualizado e uma nova requisição de conexão poderá ser processada.

1.5.8 Perda de Capacidade Relativa (RCL)

O algoritmo “Perda da Capacidade Relativa” (RCL) (ZHANG, 1998) foi proposto para realizar a alocação de comprimento de onda em rede multifibras com perfil de tráfego estático ou dinâmico e com restrição de continuidade de comprimento de onda. O objetivo é reduzir a probabilidade de bloqueio e a quantidade de comprimentos de onda necessários para atender uma conexão.

Este esquema foi proposto para evitar uma deficiência da “soma máxima”, que nem sempre escolhe o melhor comprimento de onda. Em algumas situações, a atribuição de um determinado comprimento de onda pela “soma máxima” pode resultar no bloqueio de um *lightpath* (ZANG, 2000). Entretanto, é possível que a escolha de outro comprimento reduza a capacidade da rede nos demais comprimentos de onda, mas não leve ao bloqueio do *lightpath*. Neste caso, a escolha do segundo comprimento de onda é mais adequada, mesmo representando redução da capacidade na rede.

Diferentemente do algoritmo “soma máxima”, que calcula perda de capacidade total da rede, o esquema RCL calcula a perda de capacidade relativa em cada rota em cada comprimento de onda disponível, e seleciona o comprimento de onda que minimiza a soma da perda da capacidade relativa de todas as rotas.

A perda de capacidade relativa da rede no comprimento de onda j e rota p é definida como:

$$\sum_{p \in P} \frac{r(\psi, p, j) - r(\psi'(j), p, j)}{r(\psi, p, j)} \quad (1.7)$$

onde $r(\psi, p, j)$ é a capacidade de uma rota p , no comprimento de onda j e estado ψ , como definido anteriormente.

O esquema RCL calcula a perda da capacidade relativa em cada rota, em cada comprimento de onda disponível, e escolhe o comprimento de onda que minimiza a soma, em todas as rotas, da perda de capacidade relativa.

O Apêndice B mostra um fluxograma do algoritmo RCL.

Na maioria dos casos, o esquema RCL apresenta desempenho melhor do que “soma máxima”.

1.5.9 Reserva de Comprimento de Onda

Este esquema tem o objetivo de minimizar a probabilidade de bloqueio, mas não seleciona um comprimento de onda para atender uma conexão; logo, deve ser usado em conjunto com outro método de alocação de comprimento de onda.

Nesse método um comprimento de onda é reservado para atendimento de uma rota específica que, geralmente, é formada por muito enlaces. Desta forma, o esquema consegue reduzir a probabilidade de bloqueio de conexões em rotas longas; no entanto, aumenta a probabilidade de bloqueio para as conexões que atravessam um único enlace da fibra.

Vale ressaltar que essa técnica só tem aplicação para alocação de comprimento de onda em redes com tráfego dinâmico, uma vez que no tráfego estático os pares de nós origem e destino são conhecidos previamente.

1.5.10 Limite de Proteção

Neste esquema, a alocação de um comprimento de onda a uma conexão que atravessa apenas um *link* de fibra é feita somente se o número total de comprimentos de onda disponíveis no *link* for maior ou igual a um certo valor limite.

Assim como o esquema “reserva de comprimento de onda”, deve ser combinado com outro esquema de alocação de comprimento de onda e só é aplicável em rede com perfil de tráfego dinâmico.

Alguns trabalhos na literatura não observaram apenas a solução do problema RWA de forma eficiente, mas acrescentaram parâmetros de qualidade, como imparcialidade entre conexões (*fairness*) e tolerância a falhas, visando minimizar a probabilidade de bloqueio (BISBAL, 2004).

1.6 Desempenho das Heurísticas e Complexidade Computacional

Em redes ópticas avançadas, os métodos para solução do problema RWA devem ter baixa probabilidade de bloqueio e pouca complexidade computacional. Assim, é interessante comparar a complexidade computacional das soluções discutidas nas seções anteriores.

A Tabela 1, elaborada a partir das simulações realizadas por Mukherjee (1997), compara o desempenho em relação à probabilidade de bloqueio das principais heurísticas para solução do problema de alocação do comprimento de onda. O estudo considerou o caso de uma rede com apenas uma fibra entre os nós, 16 comprimentos de onda e carga variando de 10 a 70 Erlang. A complexidade computacional, também estudada em Mukherjee (1997), foi adicionada à tabela para facilitar a visualização da relação entre o desempenho do algoritmo (em relação à probabilidade de bloqueio) e a complexidade computacional.

Tabela 1 - Comparação das heurísticas de alocação de comprimento de onda.

Heurísticas	Complexidade Computacional	Probabilidade de Bloqueio	
		Carga: 50E	Carga: 70E
Aleatório (Random Wavelength Assignment)	$O(W)$	0,1343	0,2312
Primeiro da Fila (First-Fit)	$O(W)$	0,1187	0,2093
Menos usado (Least-Used / Spread)	$O(LW)$	0,1375	0,2125
Mais usado (Most-Used / PACK)	$O(NW)$	0,1281	0,2281
Produto Mínimo (Min-Product)	$O(NW)$	Obs 1	Obs 1
Menor carga (Least-Loaded)	$O(LW)$	Obs 1	Obs 1
Soma máxima (MAX-SUM)	$O(WN^3)$	0,1312	0,2155
Perda de capacidade relativa (Relative Capacity Loss - RCL)	$O(WN^3)$	0,1327	0,19375
L: Número de enlaces N: Número de nós da rede W: Número de comprimentos de onda da rede Obs 1: Heurísticas utilizadas em redes multifibras			

Na Tabela 1, a complexidade computacional é uma medida do tempo de computação, e $f(x) = O(g(x))$ (função “ordem de x ”) significa que existe um número real positivo M e um número real x_0 tais que $f(x) \leq M|g(x)|$, para todo $x > x_0$.

De maneira geral, dentre os algoritmos de alocação de comprimento de onda citados, “primeiro da fila” e “mais usado” apresentam o melhor desempenho em relação à probabilidade de bloqueio em redes com tráfego até 50 Erlang. Vale ressaltar que o “primeiro da fila” também apresenta baixa complexidade computacional. Já em redes com tráfego acima de 50 Erlang, os métodos RCL e “primeiro da fila” se destacam. A Figura 1.8, retirada do estudo de Zang (2000), mostra com maior detalhe o desempenho dos algoritmos citados em função do tráfego considerando uma rede de 6 nós com 16 comprimentos de onda e uma fibra entre os enlaces. A heurística RCL tem desempenho superior às demais no que diz respeito à probabilidade de bloqueio em redes com tráfego acima de 50 Erlang. Além disso, esta abordagem também proporciona o balanceamento de tráfego na rede. Em contrapartida, junto com “soma máxima”, apresenta a maior complexidade computacional dentre todas as heurísticas.

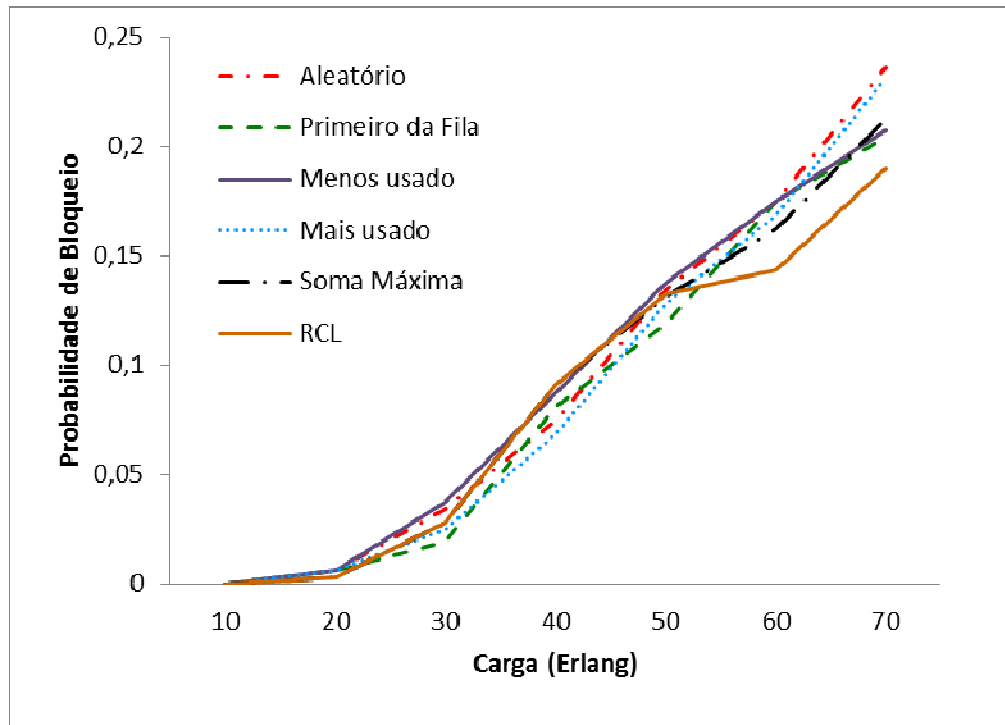


Figura 1.8 – Comparação das heurísticas em relação a probabilidade de bloqueio.

Diante dos resultados mostrados, fica claro que novos estudos buscando um algoritmo que alie baixas probabilidade de bloqueio e complexidade computacional se faz necessário.

1.7 Considerações Finais

Neste capítulo, foi discutido o problema RWA e sua importância nas redes ópticas de transporte. As diversas técnicas para solucionar os subproblemas de roteamento e alocação de comprimento de onda nem sempre são eficientes em todos os requisitos, ou seja, não conseguem otimizar os recursos da rede e minimizar a probabilidade de bloqueio com baixo custo computacional. Isso ficou claro na revisão dos métodos heurísticos para alocação de comprimento de onda. O algoritmo “primeiro da fila” tem pouca complexidade, pois não exige conhecimento da rede e até tem bom desempenho a probabilidade de bloqueio, porém não se preocupa em distribuir o tráfego pela rede, já o algoritmo “perda da capacidade relativa” também apresenta baixa probabilidade de bloqueio e se preocupa em preservar a capacidade da rede, porém necessita de conhecimento da rede e, conseqüentemente, tem alta complexidade computacional.

A simplicidade de implementação de um algoritmo para solução do problema RWA deve ser priorizada, uma vez que o estabelecimento de conexões em um rede com tráfego dinâmico deve ser feita da forma mais rápida possível. Muitas vezes, essas conexões são oriundas de salvamento de tráfego, ou seja, enquanto a conexão não tiver sido estabelecida a rede óptica permanecerá com o serviço interrompido.

Diante dos desafios impostos para solução do problema RWA em rede ópticas de última geração de forma eficiente, novos algoritmos continuam sendo pesquisados e desenvolvidos, em especial os inspirados em regras da natureza.

A sequência do trabalho trata de um desses algoritmos, amplamente utilizado para solução de diversos problemas, o algoritmo genético. Esta técnica será, então, aplicada à solução do problema RWA.

2 ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AO PROBLEMA RWA

2.1 Introdução

Algoritmo genético (AG) é uma técnica de busca e otimização inspirada no princípio darwiniano de seleção natural e na reprodução genética. Foi desenvolvido na década de 1970 por John H. Holland. AG é baseado no conceito de um conjunto de indivíduos, cada um representando uma possível solução para o problema que está sendo tratado. A Figura 2.1 faz uma analogia entre evolução natural e os problemas de busca.

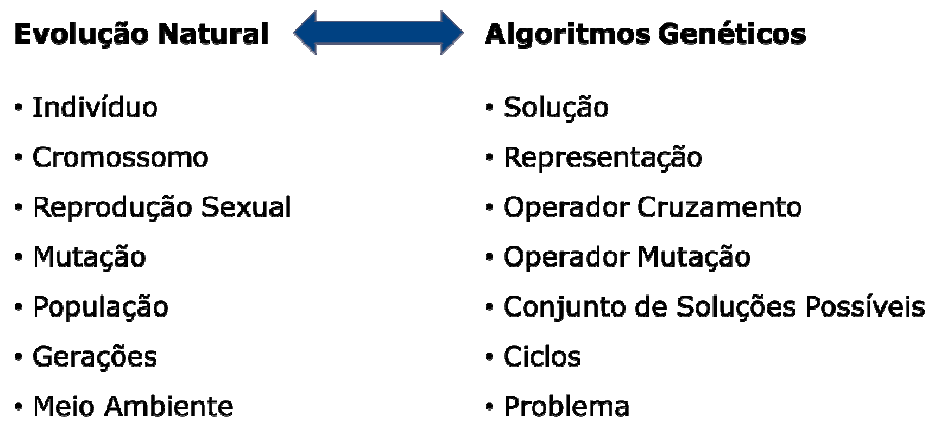


Figura 2.1 – Analogia entre a evolução natural e os problemas de busca.

No algoritmo genético, os indivíduos (possíveis soluções) são codificados em uma estrutura que pode ser processada por um computador. Esse processo é conhecido como *representação* ou *codificação* e, geralmente, feito por meio de palavras binárias (mais adotada), números reais, vetor de números reais, lista de eventos ou estruturas mais complexas (CHIPPERFIELD, 1994).

Uma função de avaliação de aptidão (*fitness function*) é definida para avaliar a qualidade de uma solução para um dado problema. Cada indivíduo recebe uma *nota* a partir dessa função, também conhecida como *avaliação* e *aptidão*, permitindo a seleção dos indivíduos mais *aptos*.

O algoritmo requer uma população inicial (conjunto inicial de possíveis soluções), geralmente criada de forma aleatória. A essa população inicial são, então, aplicados os operadores genéticos, como *seleção*, *cruzamento* ou *recombinação* (*crossover*) e *mutação*, dando origem a uma nova geração, que se

espera ser mais apta do que a anterior. O processo de evolução é repetido por um número pré-definido de iterações ou até satisfazer algum critério de parada.

O operador *seleção* determina a probabilidade de os indivíduos serem selecionados pela avaliação da aptidão. O mecanismo de seleção mais utilizado é o da roleta, onde cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente à sua avaliação de aptidão. Assim, os indivíduos mais aptos terão um maior pedaço na roleta e, conseqüentemente, maior chance de serem escolhidos. O contrário acontece com os indivíduos menos aptos. A roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e são escolhidos os indivíduos que participarão da próxima geração (HOUCK, 1995). A Figura 2.2 mostra um exemplo da divisão da roleta proporcionalmente à aptidão de cada indivíduo (CARVALHO, 19--).

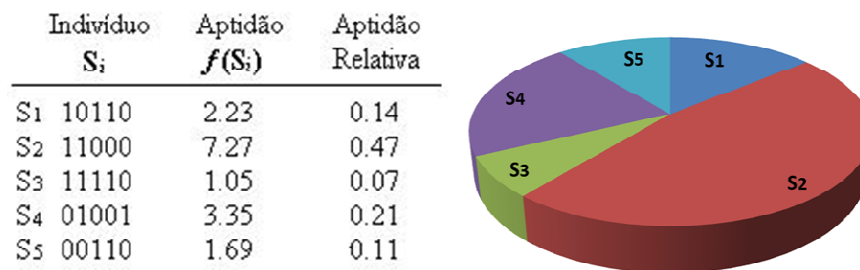


Figura 2.2 – Método de seleção da roleta.

O operador de *recombinação* é aplicado a pares de indivíduos para trocar parte de seus materiais genéticos, imitando a reprodução natural por acasalamento. Aplicando esse operador aos indivíduos mais aptos, as características boas devem se propagar através das gerações (IQUEBAL, 2009).

O operador de *mutação* realiza uma alteração aleatória no material genético de um indivíduo, permitindo que o AG explore novos pontos no espaço de busca.

Ao final do processo de evolução, é esperado que a população final possua uma solução próxima da ótima. A Figura 2.3 mostra o fluxograma típico do funcionamento do algoritmo genético.

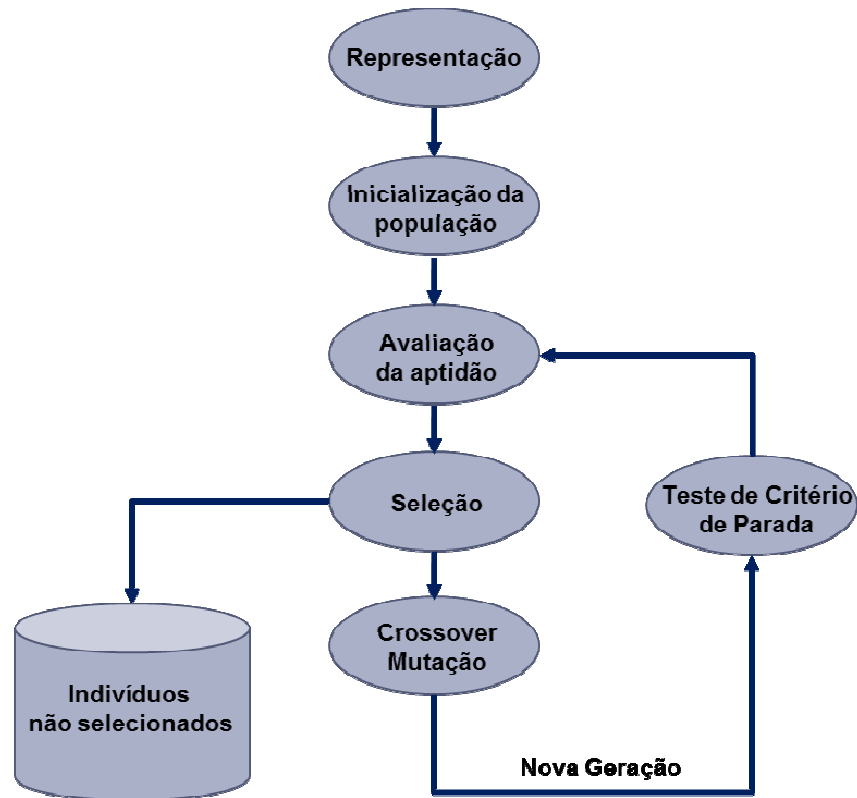


Figura 2.3 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.

É importante destacar que AG é um método genérico e deve ser adaptado ao problema a ser resolvido.

2.2 Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda Utilizando Algoritmo Genético

A utilização do algoritmo genético para solução do problema de RWA, tem sido foco de diversos estudos nos últimos anos por apresentar desempenho superior a outras técnicas com custo computacional menor (BECKMANN; KILLAT, 1999; OZDALGAR; BERSEKAS, 2003; BISBAL et al., 2004; NAKEERAN, et al., 2004; LE et al., 2005; BANERJEE et al., 2010; BARPANDA, 2009; NAGIB, 2010; BHANJAM et al. 2010; YUSSOF; ONG, 2010).

O algoritmo genético é acionado a cada solicitação de conexão que chega, e a primeira ação é criar a população inicial, que, no caso do problema RWA, é formada por um conjunto de indivíduos representados por rotas possíveis geradas aleatoriamente entre os nós de origem e destino.

Cada rota é codificada em um vetor de números inteiros, e cada componente do vetor representa um nó ao longo da rota. A Figura 2.4 mostra a codificação de duas rotas possíveis entre os nós 0 e 5.

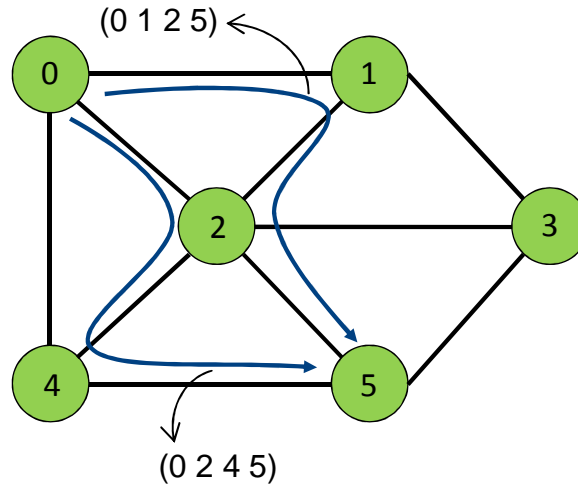


Figura 2.4 - Codificação de duas rotas possíveis entre os nós 0 e 5.

Em seguida, a essa população são aplicados os operadores genéticos, formando uma nova geração; cada geração é avaliada por uma função de aptidão e a função de seleção separa os indivíduos que permanecem na evolução ou são descartados, sendo que os mais aptos têm maior probabilidade de seguir. O processo de evolução é repetido até atingir um critério de parada e finalmente o melhor indivíduo da população final é selecionado.

Os operadores genéticos de recombinação (*crossover*) e mutação e a função de aptidão para solução do problema RWA são explicados na sequência. A função de seleção e o critério de parada são os mesmos utilizados na solução de outros problemas.

2.2.1 Operador de Recombinação (*Crossover*)

Este operador é aplicado apenas a pares de rotas (indivíduos) que possuam pelo menos um nó em comum.

O algoritmo, primeiramente, seleciona as rotas com nós em comum e, posteriormente, seleciona os pais de forma aleatória. Os pais são divididos em duas partes no nó em comum entre as duas rotas, conhecido como nó ou ponto de

crossover. Os filhos são criados mantendo a primeira metade e trocando as metades finais dos pais, como ilustrado na Figura 2.5.

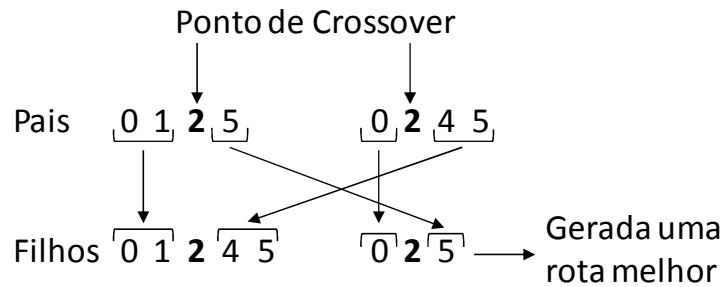


Figura 2.5 – Exemplo do funcionamento do operador recombinação.

Os filhos gerados que forem rotas válidas e diferentes dos pais serão adicionados à população, substituindo os pais, até que todas as combinações sejam realizadas ou até a população corrente chegar ao tamanho desejado.

2.2.2 Operador de Mutação

Na mutação, o nó de uma rota é substituído por outro nó do espaço de busca, ambos selecionados aleatoriamente, e uma nova rota é gerada. Esse nó é denominado nó de mutação. A parte da rota que vai do nó de origem ao de mutação não sofre alteração.

Este operador é aplicado a uma pequena amostragem da população ou aos indivíduos cujos valores de aptidão ficam abaixo de um dado limiar.

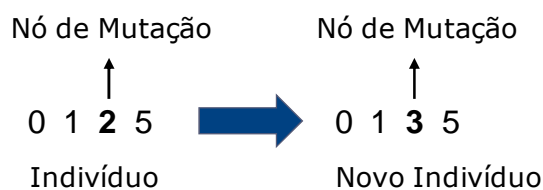


Figura 2.6 – Exemplo do funcionamento do operador mutação.

2.2.3 Função de Avaliação de Aptidão

A função de aptidão deve ser definida de acordo com cada problema, e a evolução satisfatória do algoritmo genético está diretamente ligada à adequada elaboração dessa função.

Para o problema de roteamento e alocação de comprimento de onda em uma rede óptica, a nota de cada indivíduo da população pode estar relacionada a diversos parâmetros. A métrica mais simples para o problema de roteamento é o número de saltos em cada rota, considerando que existe pelo menos um comprimento de onda disponível para ser alocado. Já para alocação do comprimento de onda, basta enumerar os comprimentos de onda disponíveis e selecionar o primeiro deles, como ocorre na técnica do “primeiro da fila”. Caso não exista disponibilidade de comprimento de onda, o custo do *lightpath* será infinito e conseqüentemente nenhum comprimento de onda será alocado. Essa função de aptidão foi apresentada em Bisbal (2004).

Outras características podem ser incluídas na função de aptidão para atender os objetivos de desempenho de cada rede, como distribuição de tráfego na rede, atendimento a limiares de características ópticas da rede (OSNR, PMD, atenuação, dispersão cromática, entre outras). Não existe uma função de aptidão absoluta, e sim a que melhor atende a um determinado problema .

2.3 Algoritmo Genético Proposto para Solução do Problema RWA

Esta seção tem o objetivo de detalhar todos os passos necessários à criação do *script* de solução do problema RWA utilizando algoritmo genético.

O programa foi desenvolvido utilizando a *caixa de ferramentas* de algoritmo genético (CF-AG) do Matlab (CHIPPERFIELD, 1994), adaptando algumas funções às características do problema RWA.

A CF-AG de Matlab soluciona problemas de otimização com base em dados do tipo *double* (real) e sequência binária, ou seja, as funções para a criação, recombinação e mutação assumem que a população possui o formato de uma matriz com esse tipo de dado.

A solução do problema RWA não pode ser atendida com essa abordagem, uma vez que a representação adotada será de números inteiros e os indivíduos (possíveis rotas) possuem comprimentos variados. Para esse tipo de problema de otimização, a CF-AG permite utilizar uma matriz de células (*cell array*), porém é necessário adaptar as funções de criação, recombinação e mutação.

Matrizes de células são formas especiais de representar matrizes. Neste tipo de representação, cada elemento da matriz pode conter matrizes com diferentes dimensões e formatos.

O desenvolvimento do trabalho baseou-se em 2 topologias de redes ópticas em malhas com diferentes objetivos. A primeira é uma simples topologia composta por 6 nós, pois o objetivo era avaliar o funcionamento do AG. A segunda topologia usada foi a NSFNET (*National Science Foundation Network*), uma rede mais complexa, com 14 nós. O estudo considerou redes ópticas sem a funcionalidade de conversão de comprimento de onda, o que aumenta a complexidade do problema RWA, devido à condição de continuidade de comprimento de onda.

A NSFNET foi um programa patrocinado pela *National Science Foundation* (NSF) dos Estados Unidos, que teve início em 1985, para promover a pesquisa avançada e redes de educação (JENNINGS et al. 1986). A NSFNET era também o nome dado a várias redes de *backbone*, abrangendo todo o país, que foram construídas para apoiar as iniciativas da NSF no período de 1985-1995. Inicialmente criada para ligar pesquisadores aos centros de supercomputadores, acabou se transformando em grande parte do *backbone* da Internet. A NSFNET é amplamente utilizada na literatura em trabalhos envolvendo problemas redes de telecomunicações, como o problema RWA, e sua utilização nas simulações possibilita a comparação do desempenho do algoritmo desenvolvido nessa dissertação com os de outros já existentes.

A seguir, é descrita a metodologia adotada para criação do *script* de Matlab para solução do problema RWA utilizando algoritmo genético.

2.3.1 Parâmetros do Problema

Inicialmente, é necessário definir os seguintes parâmetros:

N: Número de nós da rede óptica

W: Capacidade da rede, ou seja, número de comprimentos de onda disponíveis na rede.

Origem e Destino da solicitação de conexão.

Esses dados podem ser alterados no item “Parâmetros do Problema” do *script*.

2.3.2 Criação das Redes Ópticas

A descrição da rede óptica é um parâmetro fundamental para o programa. A partir dessa informação, o *script* avalia o conjunto de rotas viáveis e possíveis comprimentos de onda para criar a população inicial e dar início à evolução. Além disso, a rede óptica também é utilizada pela função de aptidão, fornecendo informação sobre o tamanho de cada rota. Toda informação relativa à rede óptica deve ser codificadas de forma que seja corretamente interpretada pelo Matlab.

A topologia de uma rede óptica pode ser considerada como um grafo $G(V,E)$ (OZDALGAR; BERSEKAS, 2003), formado pelos conjuntos V de nós da rede, representando os equipamentos OXC/ROADM, e E dos segmentos de fibras, representando a conexão física entre os nós da rede. Por sua vez, o grafo pode ser representado por meio de uma matriz de adjacência. Nesta matriz, A , os índices i e j representam os nós e os elementos $A(i,j)$ representam as ligações entre os nós. Se existir uma conexão entre um par de nós na rede, o correspondente elemento da matriz de adjacência recebe o valor 1; se não houver conexão, o valor do elemento será zero (ou infinito). As conexões entre nós podem ser ponderadas, com o peso indicando o “custo” da conexão. Neste caso, o valor do correspondente elemento da matriz de adjacência será o “custo” da conexão. A matriz de adjacência, portanto, também é uma matriz de custo.

Essa representação permite realizar as simulações em Matlab.

O programa utiliza duas diferentes topologias de rede, uma rede simples em malha de 6 nós e a NSFNET, descritas anteriormente. Outras topologias de rede podem ser facilmente utilizadas no programa, bastando fornecer a correspondente matriz de adjacência.

A rede óptica é configurada manualmente no *script*, pois admite-se que sua topologia física não é alterada no processo de atendimento de uma solicitação de conexão.

As Figuras 2.7 a 2.10 mostram as redes de 6 nós e a NSFNET e suas respectivas matrizes de adjacência. Na Figura 2.7, os números sobre os enlaces representam custo. Por simplicidade, todos os custos foram assumidos como 1, assim como na NSFNET.

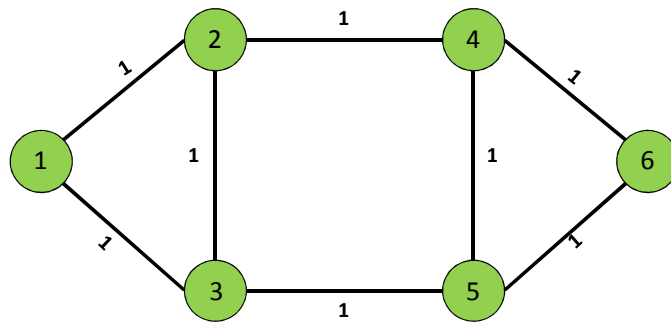


Figura 2.7 – Topologia da rede óptica com 6 nós.

A=

	1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	0	0	0
2	1	0	1	1	0	0
3	1	1	0	0	1	0
4	0	1	0	0	1	1
5	0	0	1	1	0	1
6	0	0	0	1	1	0

Figura 2.8 - Matriz de adjacência (ou de custo) da rede de 6 nós.

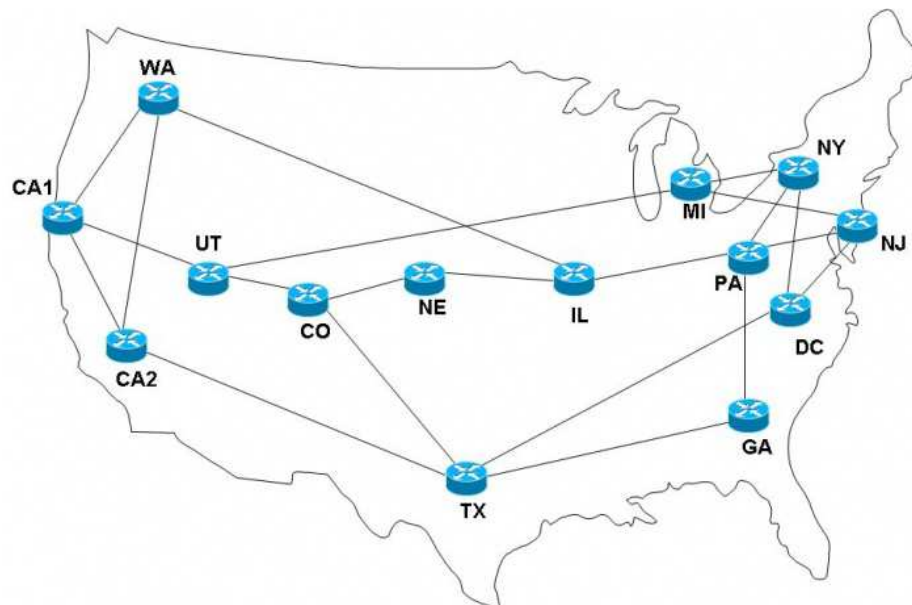


Figura 2.9 – Topologia da NSFNET.

NÓS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
7	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
10	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0

Figura 2.10 - Matriz de adjacência (ou de custo) da NSFNET.

2.3.3 Ocupação da Rede

Outro parâmetro de grande importância para o programa é a ocupação da rede, que, em conjunto com a matriz de adjacência, fornece a nota de aptidão aos indivíduos. A função de aptidão será vista em detalhe no item 2.3.6.

A ocupação da rede é representada por uma matriz, similar à matriz de custo, onde cada elemento representa o somatório da disponibilidade de cada comprimento de onda em cada enlace da rede, em um determinado momento. A capacidade da rede é definida pelo número de comprimentos de onda disponíveis na rede, também representados por uma matriz, na qual “1” indica que o referido comprimento de onda está ocupado e “0”, disponível.

Para proporcionar uma melhor compreensão da matriz de ocupação, uma rede de 6 nós com 3 comprimentos de onda disponíveis é apresentada a seguir, em dois momentos distintos. O primeiro momento considera o estado inicial da rede: a rede possui uma capacidade de 3 comprimentos de onda em cada enlace, porém nenhum deles está alocado. No segundo momento, seis conexões foram realizadas (5-6, 1-6, 4-1, 2-4, 3-6 e 5-1). As Figuras 2.11 a 2.13 ilustram a rede e respectivas matrizes de ocupação nesses dois momentos.

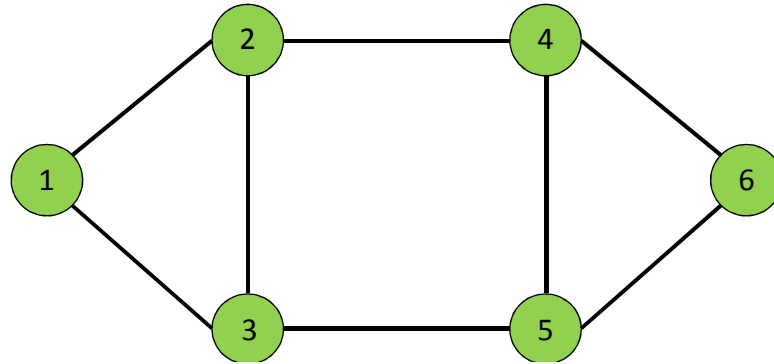


Figura 2.11 – Rede no estado inicial.

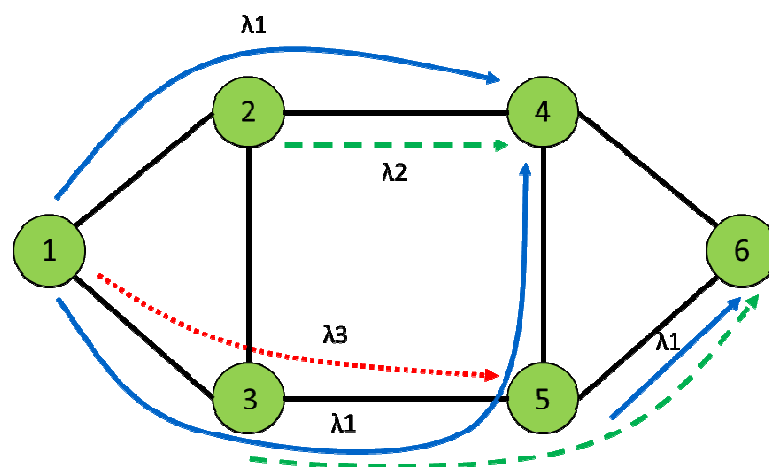


Figura 2.12 - Rede após o estabelecimento de 6 conexões.

A cada nova conexão ou desconexão, a matriz de ocupação deve ser atualizada. Devido à característica dinâmica da rede, é desejável que a atualização seja feita de forma automática. Outro ponto de dificuldade é o fato de que a matriz pode ser muito grande, dependendo do tamanho da rede e do número de comprimentos de onda.

Diante dessa necessidade, a matriz de ocupação da rede foi desenvolvida para ser atualizada automaticamente e para ser criada a partir do número de nós e número de comprimentos de onda da rede, possibilitando sua utilização em qualquer tipo de rede.

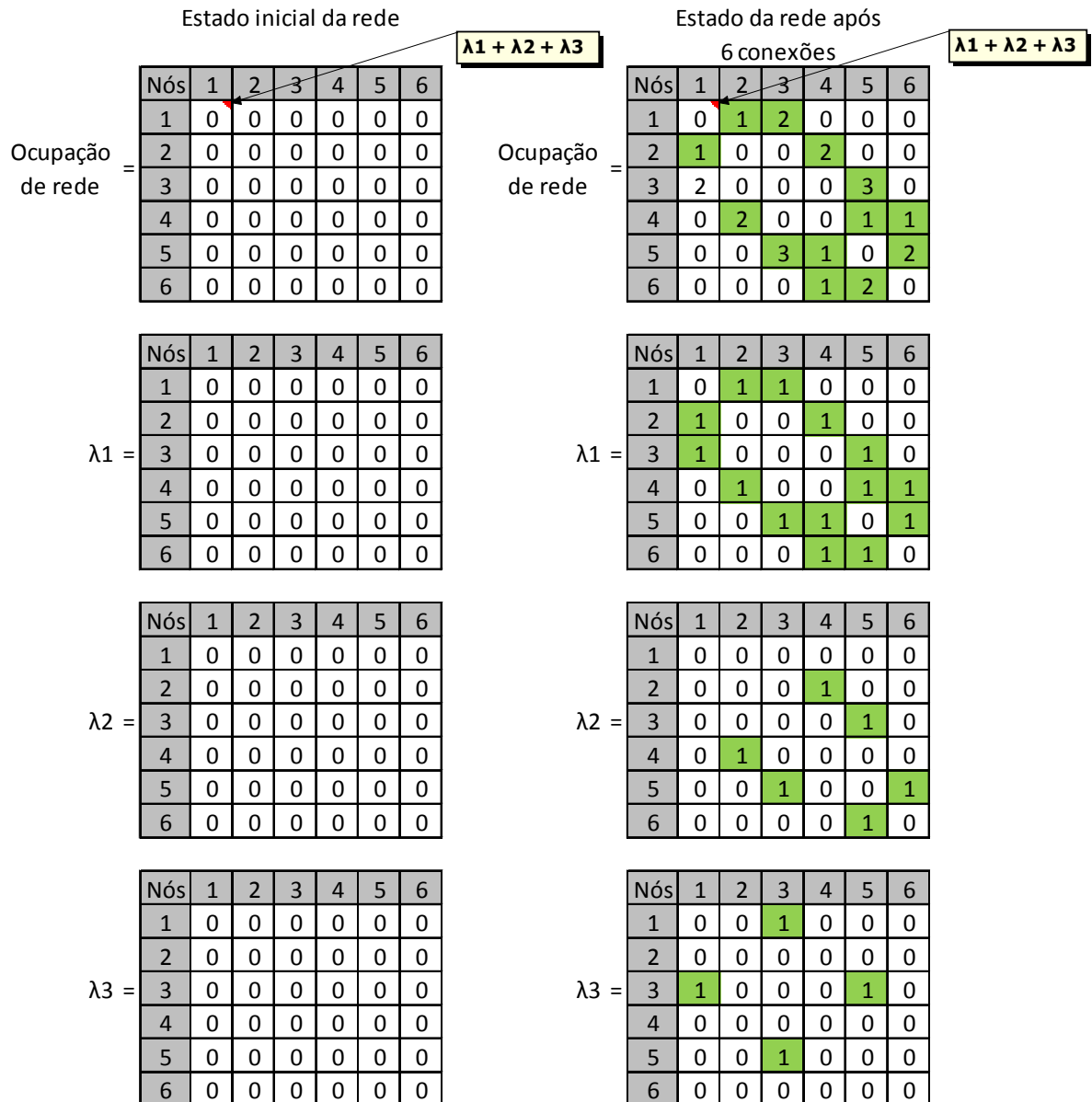


Figura 2.13 - Matrizes de ocupação da rede em dois momentos.

2.3.4 Codificação dos indivíduos

A maioria dos Algoritmos Genéticos utilizados na solução do problema RWA encontrados na literatura utiliza números inteiros para representar um indivíduo (ou cromossomo), onde cada número representa um nó na rede. Essa representação diminui a dificuldade de implementação das operações em relação à codificação binária.

A CF-AG de Matlab trabalha com as codificações binária e de inteiros, e este trabalho adotou a representação por inteiros, por proporcionar maior simplicidade e melhor desempenho.

Todas as funções foram adaptadas para usar números inteiros, como detalhado a seguir.

2.3.5 Criação da População Inicial

A função de criação é responsável pela criação dos indivíduos, selecionados aleatoriamente, que formam a população inicial. No caso do problema RWA, a população inicial é formada por um conjunto de rotas possíveis entre os nós de origem e destino de uma solicitação de conexão. O número de indivíduos que formam a população inicial é definida pelo operador nos parâmetros da CF-AG de Matlab. Em diversos problemas de otimização que utilizam algoritmo genético, a população inicial é criada de maneira totalmente aleatória, ou seja, não respeita qualquer regra. Para o problema RWA, certas condições devem ser seguidas, com o objetivo de gerar apenas rotas possíveis e preservar o desempenho do algoritmo.

Primeiramente, uma rota possível deve, obrigatoriamente, ter os nós de origem (transmissor) e de destino (receptor) definidos pela solicitação de conexão. O indivíduo deve ser formado por nós que estejam conectados e um nó não pode ser visitado mais de uma vez na rota entre origem e destino.

Diante dessas restrições, foi feita uma pesquisa na literatura sobre algoritmos que listassem possíveis rotas em redes ou grafos. Diversos métodos foram encontrados, sendo que os algoritmos de *Dijkstra*, da *k-ésima rota mais curta (K-th Shortest Path)* e *determinador de rota (Path finder)* (NAGIB,2010) foram avaliados para serem utilizados na criação de rotas possíveis.

O algoritmo mais adequado e selecionado para ser utilizado no *script* é o da *k-ésima rota mais curta*, pois tem como resposta um conjunto de rotas possíveis e usa números inteiros na codificação. Essa característica se enquadra muito bem na utilização do algoritmo genético adotada.

Vale ressaltar que um dos objetivos de utilizar algoritmo genético é diminuir a complexidade computacional; logo, foi utilizado apenas a parte da criação de rotas possíveis, ou seja, que contenham apenas nós conectados e não passe mais de uma vez por um mesmo nó. A parte de definição da melhor rota foi descartada, uma vez que o algoritmo genético definirá uma boa solução por meio da evolução da população.

Ao chegar uma solicitação de conexão entre dois nós, o programa cria a população inicial consultando a matriz de adjacência ou custo da topologia da rede.

Como exemplo, a população inicial com 8 indivíduos gerada pelo programa para uma solicitação de conexão entre os nós 2 e 14 na NSFNET da Figura 2.9 é reproduzida a seguir:

```

pop{1} = 2  1  8  9  12  13  14
pop{2} = 2  1  8  9  14
pop{3} = 2  3  1  8  9  14
pop{4} = 2  1  8  9  12  14
pop{5} = 2  3  6  13  14
pop{6} = 2  4  5  6  13  12  11  14
pop{7} = 2  1  8  9  12  11  14
pop{8} = 2  3  6  10  9  14

```

Cada vetor $pop\{.\}$ descreve um indivíduo, ou seja, uma conexão entre os nós 2 e 14. Por exemplo, $pop\{5\} = 2\ 3\ 6\ 13\ 14$ é uma conexão entre os nós 2 e 14 que passa pelos nós 3, 6 e 13.

2.3.6 Função de Avaliação de Aptidão

As notas de aptidão dos indivíduos da população inicial e das gerações seguintes da evolução, usadas para realizar a seleção dos indivíduos mais aptos, são calculadas com a função de aptidão. Esta função deve ser definida segundo as características de cada problema, e a evolução satisfatória do algoritmo genético está diretamente ligada à sua adequada elaboração.

A função de aptidão utilizada neste trabalho leva em consideração dois fatores importantes: o comprimento da rota e o número de comprimentos de onda disponíveis (estado da rede).

O comprimento da rota é fundamental para o problema RWA, pois define o número de comprimentos de onda que serão utilizados no atendimento de uma conexão. Quanto menor for a rota, menos comprimentos de onda por enlace serão necessários para atender a conexão. Essa parte da função de aptidão soluciona apenas o problema do roteamento. Além disso, gera um desbalanceamento indesejado de carga na rede, uma vez que os comprimentos de onda serão alocados considerando apenas o comprimento da rota. Assim, enlaces que

interligam nós com maior demanda de tráfego poderão ficar com uma ocupação alta, podendo até ocasionar bloqueios, enquanto outros enlaces podem estar com baixa ocupação.

Para solução do problema de alocação de comprimento de onda e do balanceamento da rede, a função de aptidão também considera o estado da rede na avaliação dos indivíduos.

No caso da alocação, comprimentos de onda que estiverem ocupados, correspondendo a alta ocupação de algum enlace na rota, terão influência negativa na nota de aptidão do indivíduo, aumentando a probabilidade de que este seja descartado durante a evolução, e comprimentos de onda livres sejam escolhidos.

No caso do balanceamento da rede, as rotas que apresentarem maior ocupação terão pior valor de aptidão, ou seja, as rotas com menor ocupação e comprimentos iguais ou semelhantes terão maior probabilidade de serem escolhidas.

A função de aptidão proposta é apresentada a seguir:

$$f_i = \alpha \frac{1}{\sum l_j} + (1 - \alpha) \frac{f_{wi}}{W} \quad (2.1)$$

Sendo:

f_i : A função de aptidão para a rota i entre os nós de origem e destino da conexão.

l_j : Comprimento do j -ésimo enlace (segmento de fibra) que compõe a rota i .

f_{wi} : Número de comprimentos de onda livres na rota i .

W : Número total de comprimentos de onda.

α : Parâmetro de projeto, que varia entre 0 e 1.

A primeira parte da função é calculada a partir da matriz de custo utilizada para representar a topologia da rede e apresentada no item 2.3.2.

Seja $P_1 = 1-2-3-5-6$ uma possível rota entre os nós 1 e 6 na rede de 6 nós. P_1 é formada pelos enlaces 1-2, 2-3, 3-5 e 5-6 que correspondem, respectivamente, aos elementos A_{12} , A_{23} , A_{35} e A_{56} da matriz de custo A . Com essa informação, já é possível calcular a parte da nota relacionada ao comprimento da rota; para este indivíduo, tem-se: $1 / (A_{12} + A_{23} + A_{35} + A_{56}) = 0,25$.

Para avaliar a parte da função de aptidão relacionada ao número de comprimentos de onda livres, é necessário conhecer o estado da rede; para isso, é

necessário estabelecer uma tabela que mostre a utilização dos comprimentos de onda em todos os enlaces que compõem a rede. Essa tabela foi denominada matriz de ocupação da rede. Como explicado anteriormente, essa matriz é composta por elementos que representam todos os enlaces da rede, e cada elemento é definido como a soma da disponibilidade de cada comprimento de onda na rede. Cada comprimento de onda também é representado por uma matriz de ocupação por enlace, onde o estado 1 representa ocupado e o estado 0 disponibilidade. Essas matrizes foram ilustradas na Figura 2.13.

O parâmetro α foi inserido na função de aptidão para proporcionar a possibilidade de selecionar uma maior prioridade para o roteamento ou para a distribuição de tráfego na rede na escolha de um *lighpath*. Esse parâmetro pode variar de acordo com tipo de rede ou o estado atual da rede. Por exemplo, se a rede estiver ocupada de forma desigual, o operador poderá modificar o parâmetro α para atuar mais fortemente na distribuição de tráfego.

O estudo da influência do parâmetro α na função de aptidão é feito a seguir.

O parâmetro α deve ser escolhido para atender as seguintes condições:

- (i) A rota mais curta deve ter maior valor de aptidão.
- (ii) Dentre as rotas de mesmo comprimento, a que tiver maior número de comprimentos de onda livres deve ter maior nota.

A segunda condição é, obviamente, atendida pela segunda parte da função de aptidão (2.1); logo, para atender a primeira condição, α deve satisfazer (LE et al., 2005):

$$\alpha \frac{1}{d} + (1-\alpha) \frac{1}{W} > \alpha \frac{1}{d+1} + (1-\alpha) \frac{W}{W} \quad (2.2)$$

Ou seja, a rota de comprimento d e apenas um comprimento de onda disponível deve ter nota maior do que a rota de comprimento $d+1$ e todos os W comprimentos de onda disponíveis. A Equação (2.2) é facilmente reescrita como:

$$\alpha > \frac{(W-1)(d+1)d}{W+(W-1)(d+1)d} \quad (2.3)$$

Para um dado valor de W , o lado direito da inequação aumenta com o aumento de d . A Tabela 2 mostra o resultado de alguns testes com essa condição.

Tabela 2 - Teste do parâmetro α para prioridade ao comprimento de rota.

W= 40	W= 20	W= 10	W= 4
d= 1	d= 1	d= 1	d= 1
$\alpha > 0,661017$	$\alpha > 0,655172$	$\alpha > 0,642857$	$\alpha > 0,6$
W= 40	W= 20	W= 10	W= 4
d= 2	d= 2	d= 2	d= 2
$\alpha > 0,854015$	$\alpha > 0,850746$	$\alpha > 0,84375$	$\alpha > 0,818182$
W= 40	W= 20	W= 10	W= 4
d= 3	d= 3	d= 3	d= 3
$\alpha > 0,92126$	$\alpha > 0,919355$	$\alpha > 0,915254$	$\alpha > 0,9$
W= 40	W= 20	W= 10	W= 4
d= 4	d= 4	d= 4	d= 4
$\alpha > 0,95122$	$\alpha > 0,95$	$\alpha > 0,947368$	$\alpha > 0,9375$

Na Tabela 2, W é o número de comprimentos de onda na rede e d , o comprimento da rota. Pode-se verificar que α deve variar de 0,6 a 1, quando o objetivo é encontrar a menor rota.

O parâmetro α também pode ser ajustado para que a escolha da rota leve em consideração o número de comprimentos de onda disponíveis.

Sejam r_1 e r_2 duas rotas possíveis entre dois nós de uma solicitação de conexão, sendo r_1 um *link* mais longo do que r_2 , e r_1 possui m comprimentos de onda livres a mais que r_2 . Para assegurar que o valor de aptidão de r_1 seja maior do que o valor de r_2 , o parâmetro α deverá atender a seguinte inequação:

$$\alpha \frac{1}{d} + (1 - \alpha) \frac{f_w}{W} < \alpha \frac{1}{d+1} + (1 - \alpha) \frac{f_w + m}{W} \quad (2.4)$$

Esta inequação é facilmente reescrita como:

$$\alpha < \frac{d(d+1)m}{W + d(d+1)m} \quad (2.5)$$

Para dados valores de W e m , o lado direito da inequação aumenta com o aumento de d . A Tabela 3 mostra alguns resultados obtidos em (2.5).

Tabela 3 - Teste do parâmetro α para prioridade aos comprimentos de onda livres

W= 40	W= 40	W= 40
m= 1	m= 2	m= 3
d= 1	d= 1	d= 1
$\alpha < 0,047619$	$\alpha < 0,090909$	$\alpha < 0,130435$
W= 40	W= 40	W= 40
m= 1	m= 2	m= 3
d= 2	d= 2	d= 2
$\alpha < 0,130435$	$\alpha < 0,230769$	$\alpha < 0,310345$
W= 40	W= 40	W= 40
m= 1	m= 2	m= 3
d= 3	d= 3	d= 3
$\alpha < 0,230769$	$\alpha < 0,375$	$\alpha < 0,473684$
W= 40	W= 40	W= 40
m= 1	m= 2	m= 3
d= 4	d= 4	d= 4
$\alpha < 0,333333$	$\alpha < 0,5$	$\alpha < 0,6$

Pode-se verificar que α deve variar de 0 a 0,6 quando a prioridade é selecionar a rota com mais comprimentos de onda livres, ou seja, α deve ser menor que 0,6.

As primeiras simulações foram concentradas na variação do parâmetro α nas duas topologias de rede. Foram utilizados três valores para α : $\alpha = 0,9$, que prioriza a escolha da rota mais curta (em caso de rotas de mesmo comprimento, a que tiver mais comprimentos de onda livres terá maior valor de aptidão); $\alpha = 0,1$, que busca selecionar rotas com maior número de comprimentos de onda disponíveis, mesmo que o comprimento da rota em questão seja um pouco maior (um ou dois links); e $\alpha = 0,5$, um valor intermediário que não prioriza qualquer das condições citadas. O resultado das simulações apresentado em LE et al. (2005) mostrou que a utilização de $\alpha = 0,9$ teve um desempenho melhor em relação à probabilidade de bloqueio em diversas topologias de rede.

2.3.7 Operador de Seleção

O operador de seleção determina a probabilidade de os indivíduos serem selecionados com base nas respectivas notas de aptidão. O mecanismo de seleção mais utilizado é o da roleta, explicado anteriormente. A roleta é girada um

determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e são escolhidos os indivíduos que participarão da próxima geração.

Não foi necessário adaptar a função de seleção para o funcionamento da CF-AG. A função de seleção padrão é a “uniforme estocástica” (CHIPPERFIELD, 1994). Para escolher outra função de seleção, é necessário alterar as opções da CF-AG de Matlab, como será explicado no item 2.3.11.

2.3.8 Operador de Recombinação (*Crossover*)

Após a avaliação da aptidão da população inicial, os operadores genéticos são executados, começando pelo de *recombinação*.

O operador de *recombinação*, que forma duas novas rotas (filhos) por meio da combinação de partes de dois indivíduos (pais), deve ter a preocupação de selecionar um nó comum entre os pais para que os novos indivíduos sejam rotas viáveis. Assim, foi necessário buscar funcionalidades do Matlab para comparar indivíduos e impedir a criação de novas rotas caso os pais não possuíssem nós em comum (além da origem e destino).

O comando *ismember* de Matlab identifica os elementos em comum entre dois vetores, e se aplica à solução desse problema. A utilização desse comando possibilitou criar a função de *recombinação* com sucesso.

Primeiramente, os nós de origem e destino são retirados dos pais, uma vez que sempre serão nós em comum entre duas rotas possíveis; em seguida, o comando *ismember* é usado para selecionar os nós comuns entre os pais. O nó da rota onde é realizada a operação de *recombinação* é denominado de ponto ou nó de *crossover*, e selecionado aleatoriamente. Por fim, o ciclo *if* é utilizado para realizar a operação apenas no caso dos pais possuírem pelo menos um nó em comum.

A função de *recombinação* criada possibilita a geração apenas de rotas viáveis, melhorando o desempenho do algoritmo genético. Além disso, a função foi criada com a preocupação de não gerar filhos iguais a um dos pais, uma vez que essa situação provoca uma diminuição na diversidade da população e, conseqüentemente, prejudica o desempenho do algoritmo.

O percentual da população que será submetido a *recombinação* é definido pelo parâmetro *crossover fraction* nas opções da CF-AG, que serão vistas no item 2.3.11. A fração de recombinação deve ser um valor entre 0 (nenhuma

recombinação) e 1. O valor-padrão do CF-AG é 0,8 e foi utilizado nas simulações deste trabalho.

Um exemplo de operação de recombinação realizado pelo *script* na NSFNET em atendimento a uma solicitação de conexão entre os nós 2 e 14 é apresentado a seguir:

<i>parent1</i> =	2	1	8	7	5	6	13	14	
<i>parent2</i> =	2	3	1	8	9	14			
<i>xoverKids</i> {1} =	2	1	8	9	14				<i>Rota viável</i>
<i>parent1</i> =	2	3	6	10	9	12	13	14	
<i>parent2</i> =	2	4	11	12	10	9	14		
<i>xoverKids</i> {2} =	2	3	6	10	9	14			<i>Rota viável</i>
<i>parent1</i> =	2	3	6	5	4	11	14		
<i>parent2</i> =	2	1	8	7	5	6	13	14	
<i>xoverKids</i> {3} =	2	3	6	5	6	13	14		<i>Rota viável</i>

2.3.9 Operador de Mutação

O operador de mutação também precisou ser adaptada, mas não foi necessária a eliminação de rotas não possíveis. A mutação deve ter um caráter exploratório e é aplicada a um baixo percentual da população. A imposição da restrição sobre rotas não possíveis implicaria em aumento do custo computacional, devido à necessidade de verificar a (in)viabilidade da rota e, provavelmente, não acarretaria melhora no desempenho do algoritmo.

A função desenvolvida levou em consideração a substituição de um nó aleatório de uma determinada rota por outro nó aleatório, excetuando a origem e o destino. Caso a rota formada não seja viável, ou seja, um dos enlaces não tenha conexão, a nota de aptidão dada a esse indivíduo será infinita e, muito provavelmente, será descartado durante a evolução.

2.3.10 Critério de Parada

O critério de parada utilizado no algoritmo genético proposto é o de quantidade de gerações criadas.

Para escolher a quantidade de gerações apropriada, é necessário alterar o campo “Generations” nas opções da CF-AG de Matlab, como explicado no item 2.3.11.

2.3.11 Opções da CF-AG

Assim como ocorre na função de seleção, qualquer parâmetro que necessite ser modificado em relação ao padrão da CF-AG deve ser indicado através do comando de Matlab `options = gaoptimset`. Por exemplo, para o problema em questão, as funções de criação, recombinação e mutação foram adaptadas e outros parâmetros, como população inicial, critério de parada etc, variam de acordo com o problema; logo, alterações devem ser feitas nas opções da CF-AG, o que é feito com o seguinte comando de Matlab:

```
options = gaoptimset(options, 'CreationFcn', @create_permutations, ...
    'CrossoverFcn', @crossover_permutation, ...
    'MutationFcn', @mutate_permutation, ...
    'SelectionFcn', @selectionroulette, ...
    'PlotFcn', my_plot, ...
    'Generations', 8, 'PopulationSize', 8)
```

A tela das opções selecionadas está reproduzida a seguir:

`options =`

```
PopulationType: 'custom'
PopInitRange: [2x1 double]
PopulationSize: 50
EliteCount: []
CrossoverFraction: []
ParetoFraction: []
MigrationDirection: []
MigrationInterval: []
MigrationFraction: []
Generations: 50
TimeLimit: []
FitnessLimit: []
StallGenLimit: 20
StallTimeLimit: []
TolFun: []
TolCon: []
InitialPopulation: []
```

InitialScores: []
InitialPenalty: []
PenaltyFactor: []
PlotInterval: []
CreationFcn: @create_permutations
FitnessScalingFcn: []
SelectionFcn: @selectionroulette
CrossoverFcn: @crossover_permutation
MutationFcn: @mutate_permutation
DistanceMeasureFcn: []
HybridFcn: []
Display: []
PlotFcns: [function_handle]
OutputFcns: []
Vectorized: 'on'
UseParallel: []

O Apêndice C mostra o fluxograma da implementação de algoritmo genético feita nesta dissertação, descrita nas páginas anteriores.

3 IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PROPOSTA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a avaliação do desempenho do algoritmo genético desenvolvido para solução do problema RWA. Inicialmente, foram realizadas simulações em cenários onde a resposta desejada (rota selecionada e comprimento de onda) fosse conhecida, com o objetivo de observar o funcionamento correto do programa. Para isso, utilizou-se a topologia de rede mais simples, composta por 6 nós e 3 comprimentos de onda.

A segunda parte do capítulo compara o desempenho do algoritmo genético proposto com os de heurísticas encontradas na literatura e de outros trabalhos que também utilizam algoritmo genético para solução do problema RWA. As simulações foram realizadas na NSFNET, pois é uma rede utilizada em diversos trabalhos na literatura. Além disso, foi necessário criar um gerador de chamadas para modelar o tráfego na rede e gerar as requisições de chamadas, permitindo a comparação dos algoritmos estudados, como descrito mais adiante neste capítulo.

3.1 Simulações para Avaliação do Funcionamento do Programa

As simulações foram realizadas em uma rede de 6 nós (Figura 2.7), sem funcionalidade de conversão de comprimento de onda, e com 3 comprimentos de onda. Cada simulação considera um cenário com algumas conexões já estabelecidas.

Vale ressaltar que a função de aptidão conta com o parâmetro α , que determina se o algoritmo deve priorizar o comprimento da rota e o número de comprimentos de onda utilizados ($0,6 < \alpha < 0,99$) ou a ocupação da rota ($0,1 < \alpha < 0,6$). As simulações 1 a 3 foram realizadas com $\alpha = 0,7$; as simulações 4 a 6 consideraram os mesmos cenários das simulações anteriores, mas com $\alpha = 0,4$.

Foi utilizada uma população de 8 indivíduos ($P=8$) e critério de parada de 16 gerações ($G=16$).

3.1.1 Simulação 1

A topologia da rede e as respectivas conexões é apresentada na Figura 3.1, onde há três conexões em vigor e deseja-se estabelecer uma nova conexão entre os nós 3 e 6.

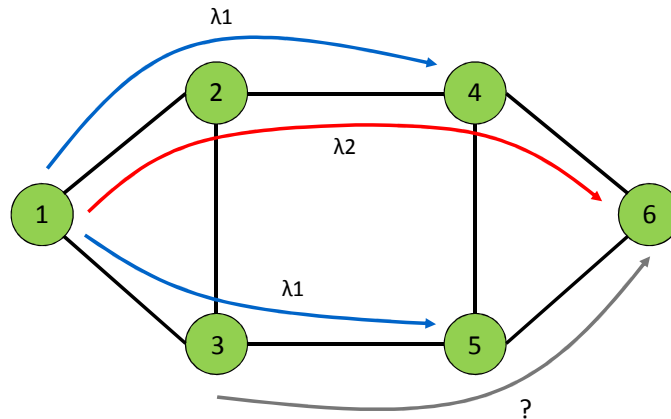


Figura 3.1 – Topologia da rede e conexões da simulação 1.

Conexões: 1-4: λ_1 ; 1-6: λ_2 ; 1-5: λ_1 ; 3-6: ?

As matrizes de ocupação dos comprimentos de onda (conexões em vigor) são mostradas na Figura 3.2.

$I\{1\} =$	$I\{2\} =$	$I\{3\} =$
0 1 1 0 0 0	0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
1 0 0 1 0 0	1 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0
1 0 0 0 1 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
0 1 0 0 0 0	0 1 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0	0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0

Figura 3.2 – Estado dos comprimentos de onda da simulação 1.

A Figura 3.3 mostra o resultado gerado pelo programa. A parte superior da figura mostra a variação do valor de aptidão ao longo das gerações, indicando o melhor valor (*Best fitness*) e valor médio (*Mean fitness*) em cada geração. A parte inferior da figura ilustra a rota escolhida (linha cheia).

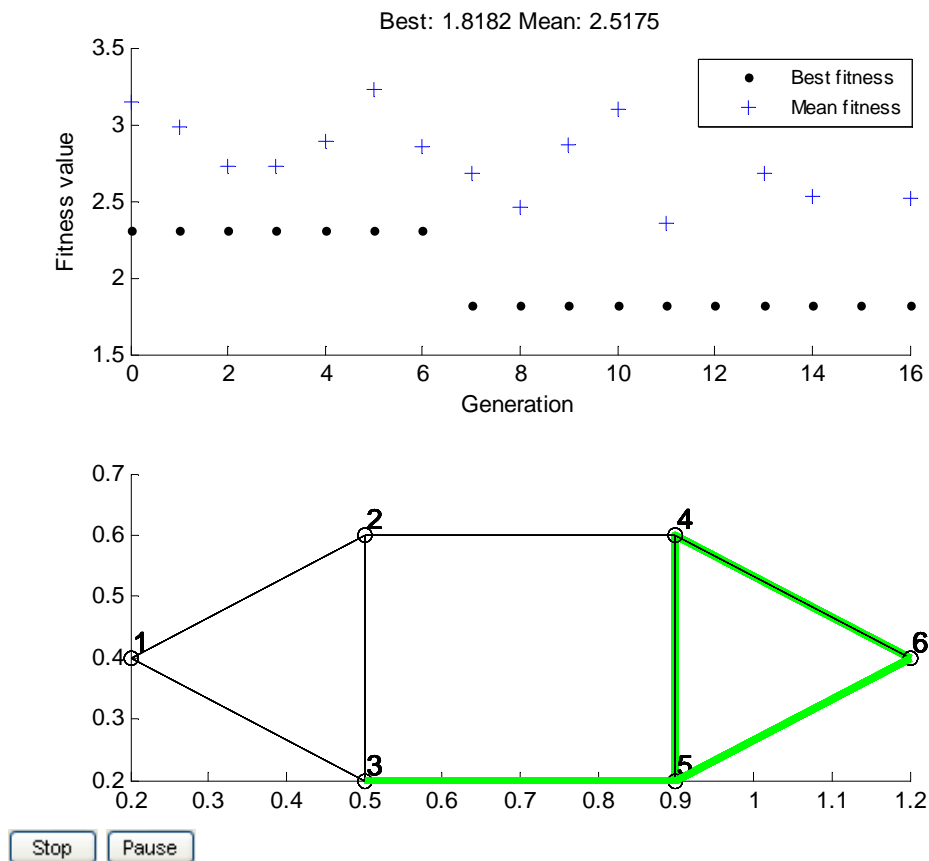


Figura 3.3 – Gráfico da evolução da nota de aptidão e rota selecionada da simulação 1.

Os dados da rota escolhida são (resultado do programa):

rota = 3 5 6 (Rota selecionada pelo programa)

Comprimento de onda ocupado 1

Alocado Comprimento de onda 2

fval = 1,8182 (Valor de Aptidão)

A rota mais curta (3-5-6) possui um comprimento de onda ocupado no enlace 3-5, porém as rotas mais longas também possuem pelo menos 1 comprimento de onda ocupado em um dos enlaces. Portanto, o algoritmo agiu corretamente ao selecionar a rota mais curta e alocar λ_2 , uma vez que λ_1 já estava em uso no enlace 3-5.

3.1.2 Simulação 2

A topologia da rede e as respectivas conexões é apresentada na Figura 3.4, onde há quatro conexões em vigor e deseja-se estabelecer uma nova conexão entre os nós 2 e 6.

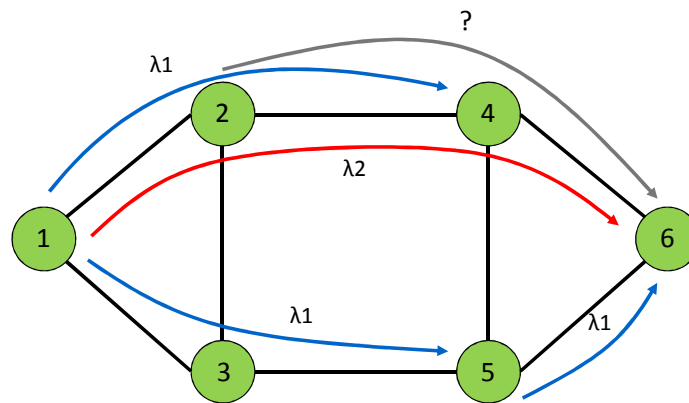


Figura 3.4 – Topologia da rede e conexões da simulação 2.

Conexões: 1-4: λ_1 ; 1-6: λ_2 ; 1-5: λ_1 ; 5-6: λ_1 ; 2-6: ?

As matrizes de ocupação dos comprimentos de onda (conexões em vigor) são mostradas na Figura 3.5.

$I\{1\} =$	$I\{2\} =$	$I\{3\} =$
0 1 1 0 0 0	0 1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
1 0 0 1 0 0	1 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0
1 0 0 0 1 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
0 1 0 0 0 0	0 1 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 0 1	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0	0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0

Figura 3.5 - Estado dos comprimentos de onda na simulação 2.

A Figura 3.6 mostra o resultado gerado pelo programa. A parte superior da figura mostra a variação do valor de aptidão ao longo das gerações, indicando o melhor valor (*Best fitness*) e valor médio (*Mean fitness*) em cada geração. A parte inferior da figura ilustra a rota escolhida (linha cheia).

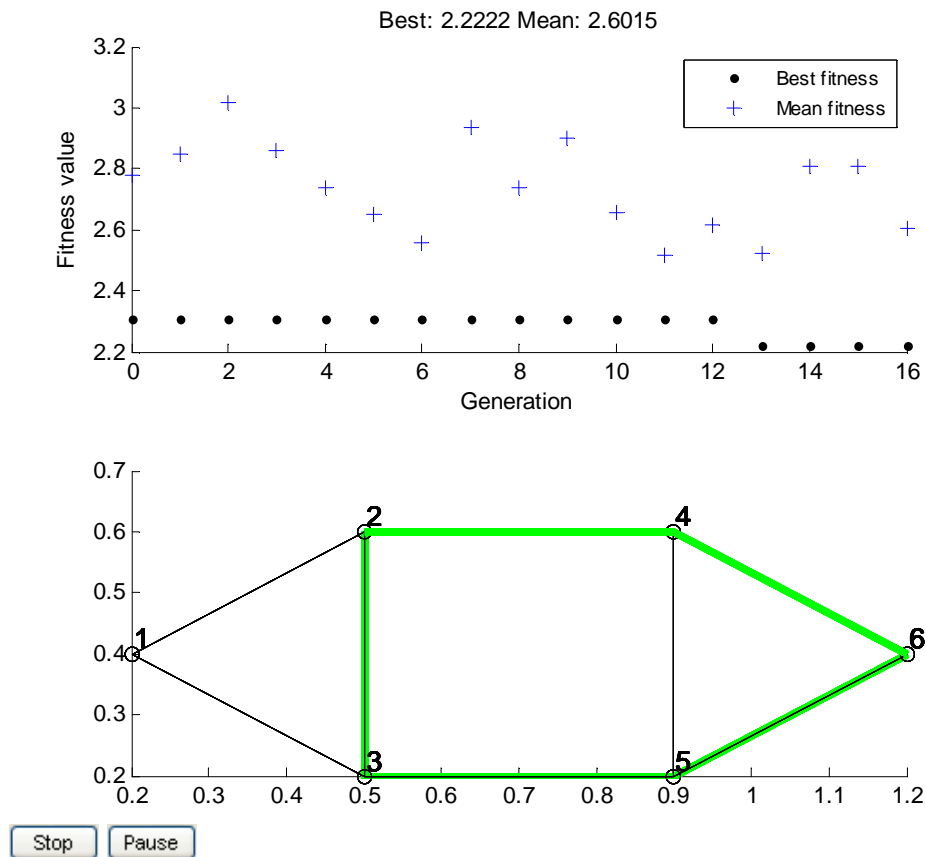


Figura 3.6 - Gráfico da evolução da nota de aptidão e rota selecionada na simulação 2.

Os dados da rota escolhida são (resultado do programa):

rota = 2 4 6

Comprimento de onda ocupado 1

Comprimento de onda ocupado 2

Alocado Comprimento de onda 3

fval = 2,2222

A rota mais curta (2-4-6) possui 2 comprimentos de onda ocupados no enlace 2-4, enquanto algumas rotas mais longas possuem apenas 1 comprimento de onda ocupado em um dos enlaces. Nessa situação, o algoritmo poderia selecionar tanto a rota 2-4-6 como a rota 2-3-5-6. A escolha depende da configuração do parâmetro α . Como as primeiras simulações consideram $\alpha = 0,7$, que prioriza a menor rota e o

número de comprimentos de onda utilizados, o algoritmo teve sucesso ao seleccionar a rota 2-4-6 e alocar o comprimento de onda 3.

3.1.3 Simulação 3

A topologia da rede e as respectivas conexões é apresentada na Figura 3.7, onde há três conexões em vigor e deseja-se estabelecer uma nova conexão entre os nós 2 e 6.

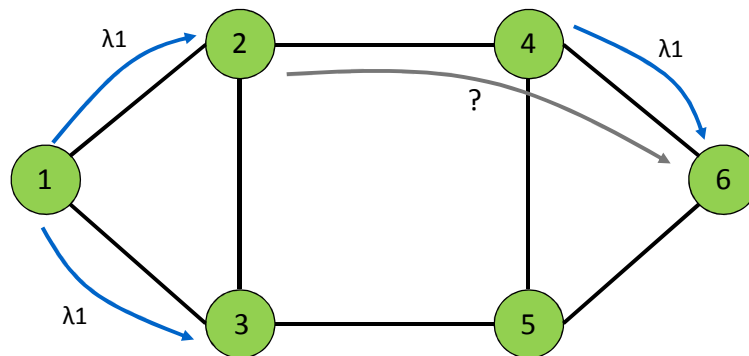


Figura 3.7 – Topologia da rede e conexões da simulação 3.

Conexões: 1-2: λ_1 ; 4-6: λ_1 ; 1-3: λ_1 ; 2-6: ?

As matrizes de ocupação dos comprimentos de onda (conexões em vigor) são mostradas na Figura 3.8.

$I\{1\} =$	$I\{2\} =$	$I\{3\} =$
0 1 1 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0	0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0

Figura 3.8 - Estado dos comprimentos de onda na simulação 3.

A Figura 3.9 mostra o resultado gerado pelo programa. A parte superior da figura mostra a variação do valor de aptidão ao longo das gerações, indicando o melhor valor (*Best fitness*) e valor médio (*Mean fitness*) em cada geração. A parte inferior da figura ilustra a rota escolhida (linha cheia).

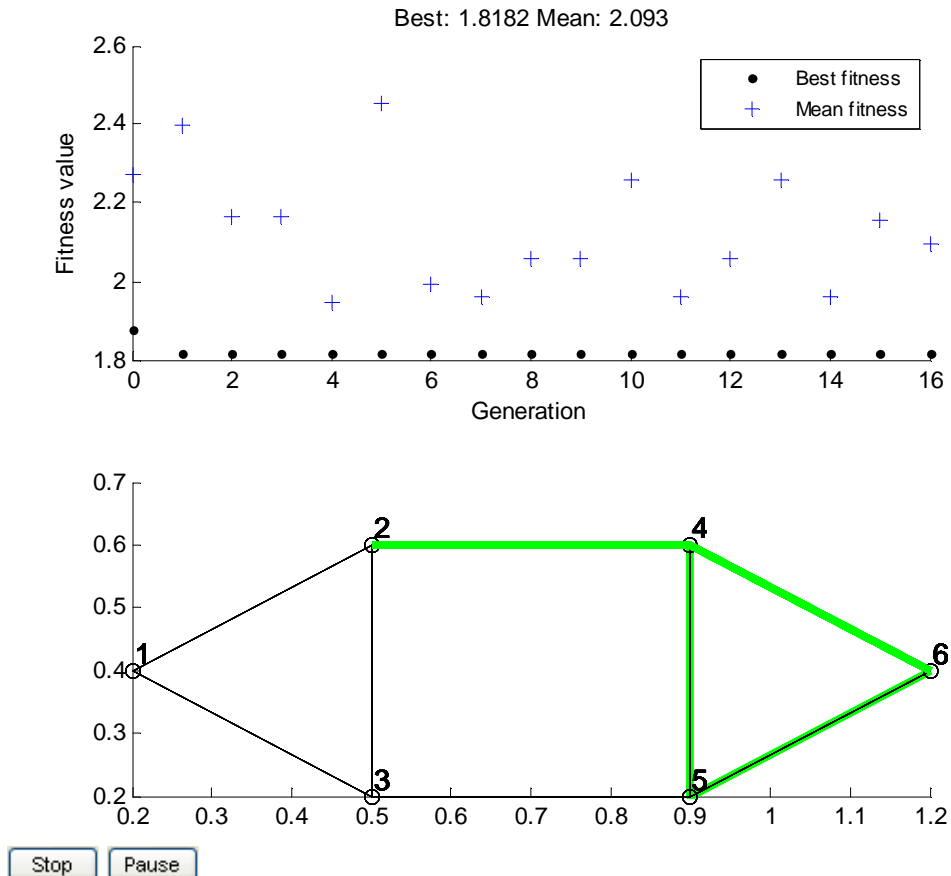


Figura 3.9 - Gráfico da evolução da nota de aptidão e rota selecionada na simulação 3.

Os dados da rota escolhida são (resultado do programa):

rota = 2 4 6

Comprimento de onda ocupado 1

Alocado Comprimento de onda 2

fval = 1.8182

A resposta do algoritmo a esse cenário foi muito semelhante à do caso anterior. A rota mais curta possui um comprimento de onda ocupado, enquanto algumas rotas mais longas (2-3-5-6 ou 2-4-5-6) não possuem comprimento de onda

ocupado. Novamente, o algoritmo poderia selecionar qualquer uma dessas rotas, de acordo com a configuração do parâmetro α . Como, nessa simulação, $\alpha = 0,7$ o algoritmo optou pela rota mais curta.

3.1.4 Simulação 4 (Utiliza Cenário da Simulação 1)

A partir dessa simulação, os cenários das simulações 1 a 3 serão repetidos utilizando o parâmetro $\alpha = 0,4$, que prioriza a ocupação das rotas.

A topologia da rede e as respectivas conexões é apresentada na Figura 3.10, onde há três conexões em vigor e deseja-se estabelecer uma nova conexão entre os nós 3 e 6.

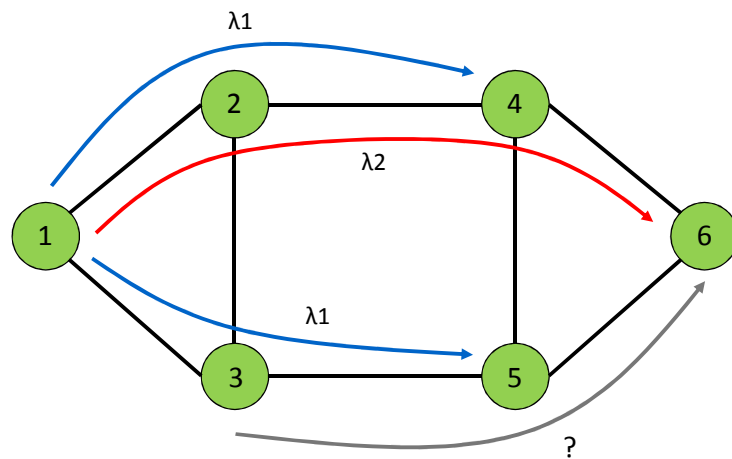


Figura 3.10 – Topologia da rede e conexões da simulação 4.

Conexões: 1-4: λ_1 ; 1-6: λ_2 ; 1-5: λ_1 ; 3-6: ?

A matriz de ocupação de comprimentos de onda é a mesma da Figura 3.2.

A Figura 3.11 mostra o resultado gerado pelo programa. A parte superior da figura mostra a variação do valor de aptidão ao longo das gerações, indicando o melhor valor (*Best fitness*) e valor médio (*Mean fitness*) em cada geração. A parte inferior da figura ilustra a rota escolhida (linha cheia).

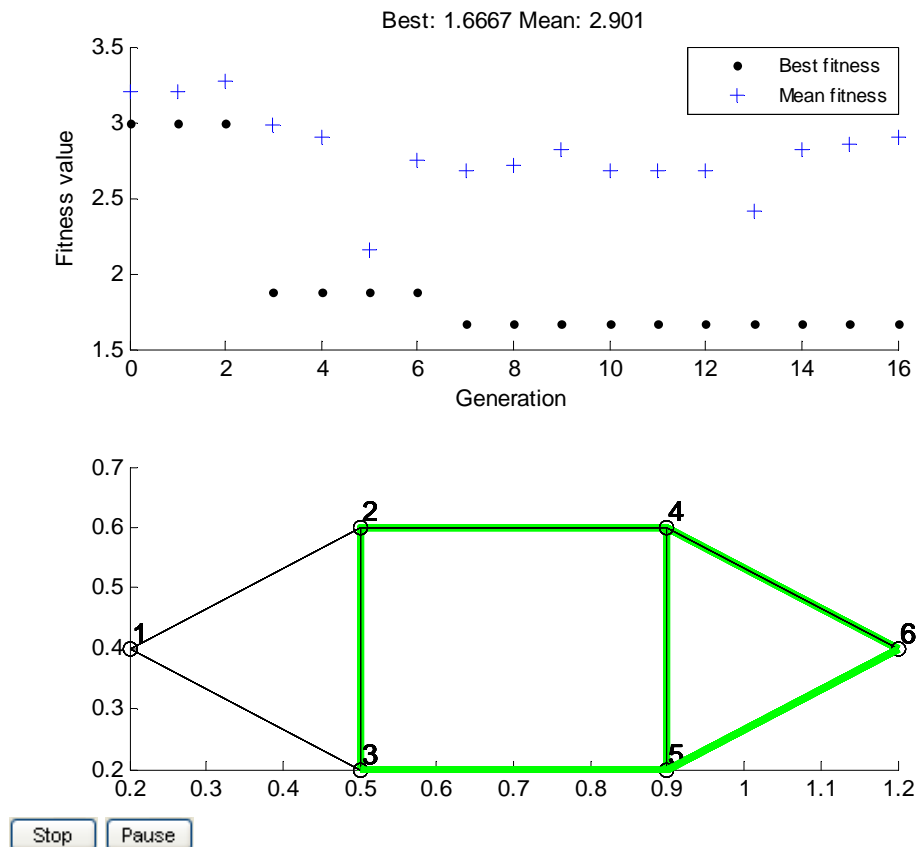


Figura 3.11 - Gráfico da evolução da nota de aptidão e rota selecionada na simulação 4.

Os dados da rota escolhida são (resultado do programa):

rota = 3 5 6

Comprimento de onda ocupado 1

Alocado Comprimento de onda 2

fval = 1,6667

A rota selecionada foi a mesma do simulação 1, uma vez que a menor rota também possui a menor ocupação. Foi alocado o comprimento de onda λ_2 , pois λ_1 estava ocupado no enlace 3-5.

3.1.5 Simulação 5 (Utiliza Cenário da Simulação 2)

A topologia da rede e as respectivas conexões é apresentada na Figura 3.12, onde há quatro conexões em vigor e deseja-se estabelecer uma nova conexão entre os nós 2 e 6.

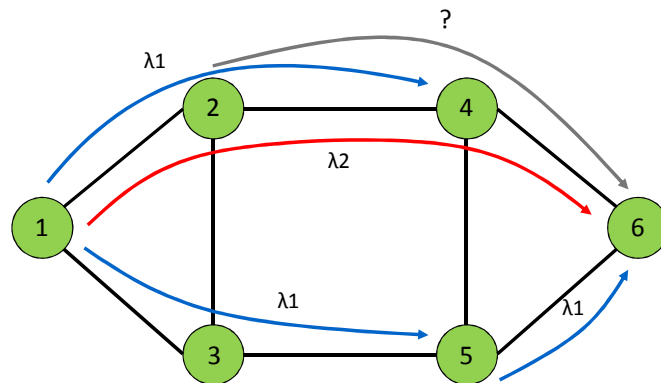


Figura 3.12 - Topologia da rede e conexões da simulação 5.

Conexões: 1-4: λ_1 ; 1-6: λ_2 ; 1-5: λ_1 ; 5-6: λ_1 ; 2-6: ?

A matriz de ocupação dos comprimentos de onda é a mesma da Figura 3.5.

A Figura 3.13 mostra o resultado gerado pelo programa. A parte superior da figura mostra a variação do valor de aptidão ao longo das gerações, indicando o melhor valor (*Best fitness*) e valor médio (*Mean fitness*) em cada geração. A parte inferior da figura ilustra a rota escolhida (linha cheia).

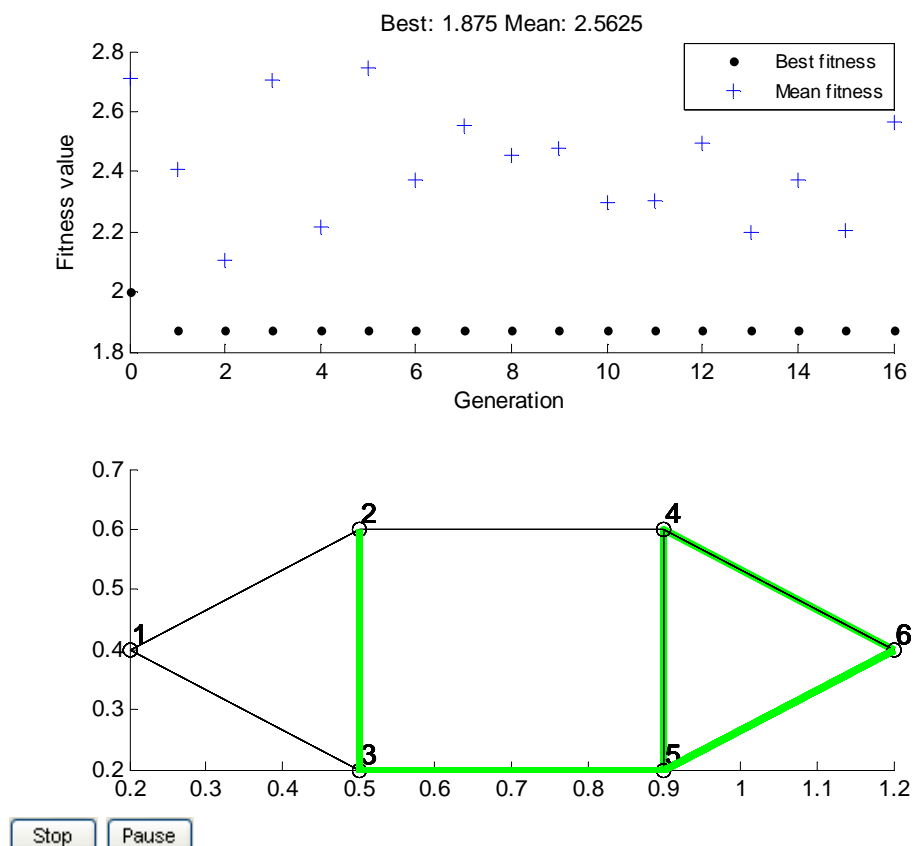


Figura 3.13 - Gráfico da evolução da nota de aptidão e rota selecionada na simulação 5.

Os dados da rota escolhida são (resultado do programa):

rota = 2 3 5 6

Comprimento de onda ocupado 1

Alocado Comprimento de onda 2

fval = 1,8750

O algoritmo selecionou a rota 2-3-5-6, que é um salto mais longa do que a menor rota possível (2-4-6), porém apresenta menor ocupação do que a rota 2-4-6. Esse comportamento está de acordo com o esperado, uma vez que o parâmetro α está configurado para priorizar rotas com menor ocupação.

3.1.6 Simulação 6 (Utiliza Cenário da Simulação 3)

A topologia da rede e as respectivas conexões é apresentada na Figura 3.14, onde há quatro conexões em vigor e deseja-se estabelecer uma nova conexão entre os nós 2 e 6.

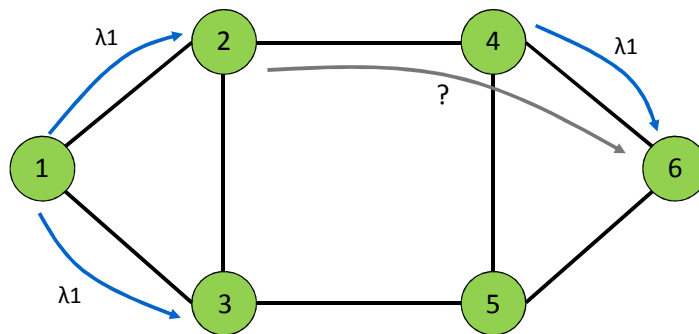


Figura 3.14 - Topologia da rede e conexões da simulação 6.

Conexões: 1-2: λ_1 ; 4-6: λ_1 ; 1-3: λ_1 ; 2-6: ?

A matriz de ocupação dos comprimentos de onda é a mesma da Figura 3.8.

A Figura 3.15 mostra o resultado gerado pelo programa. A parte superior da figura mostra a variação do valor de aptidão ao longo das gerações, indicando o melhor valor (*Best fitness*) e valor médio (*Mean fitness*) em cada geração. A parte inferior da figura ilustra a rota escolhida (linha cheia).

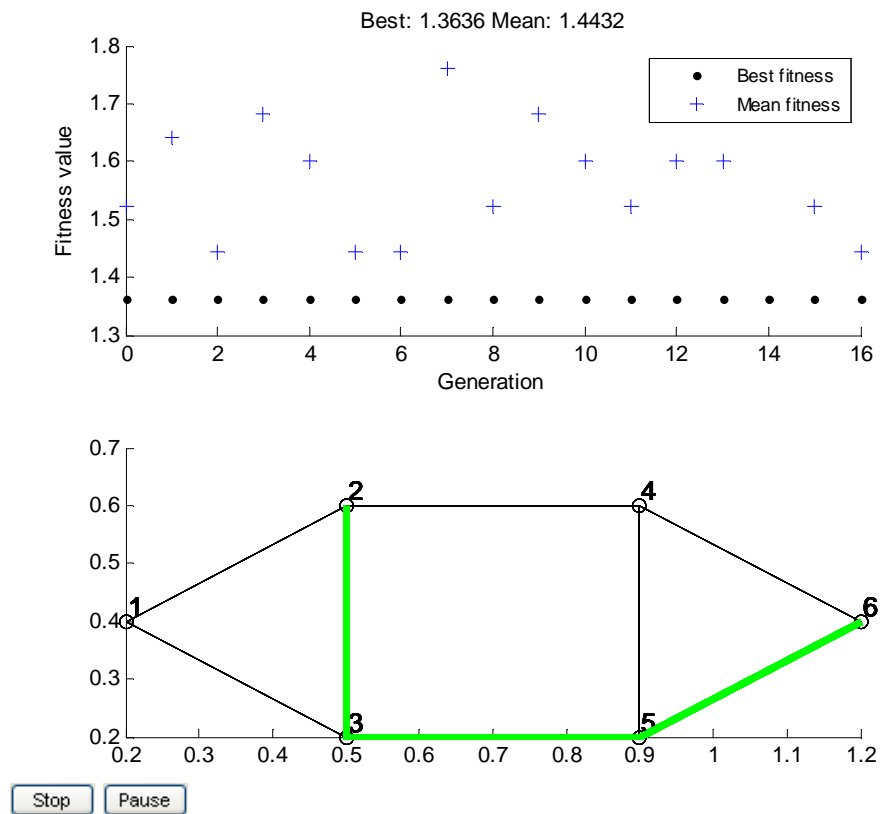


Figura 3.15 - Gráfico da evolução da nota de aptidão e rota selecionada na simulação 6.

Os dados da rota escolhida são:

$rota = 2 \quad 3 \quad 5 \quad 6$

Alocado Comprimento de onda 1

$fval = 1,2500$

O algoritmo selecionou a rota 2-3-5-6, que é um salto mais longa que a menor rota possível, porém tinha todos os comprimentos de onda disponíveis; por esse motivo, foi alocado λ_1 .

Esse comportamento está de acordo com o esperado, uma vez que o parâmetro α está configurado para priorizar rotas com menor ocupação.

O desempenho do algoritmo nestas seis simulações correspondeu totalmente às expectativas. Os resultados confirmam a utilidade do parâmetro α na configuração do tipo de solução desejado.

3.2 Avaliação do Desempenho do Script AG Desenvolvido

Esta seção detalha os resultados das simulações realizadas com o programa desenvolvido. Como comentado anteriormente, foi necessário implementar um gerador de chamada para simular o tráfego e as requisições de chamadas. A seguir, é descrito o modelo de tráfego empregado nesta dissertação.

3.2.1 Modelo de Tráfego nas Redes de Telecomunicações

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura modela o tráfego em redes de telecomunicações, incluindo rede de transmissão óptica, por meio da geração de requisições que seguem uma distribuição de Poisson (OLIVEIRA, 2011; ROSA, 2010; IOPE, 2011; LO, 2005; ELSAYED,2004; BISBAL et al., 2004). O modelo procura reproduzir a forma como as solicitações de conexões chegam em uma rede real.

A chegada das solicitações de conexões ocorre de acordo com um processo de Poisson com taxa de chegada média χ (requisições por unidade de tempo). O tempo de retenção médio dos caminhos ópticos estabelecidos respeita uma distribuição exponencial com média equivalente a t_{ret} , sendo que, para efeito de simulações, o tempo de retenção médio, geralmente, é definido com uma unidade de tempo (HSU, 2005) .

Em telecomunicações, o tráfego das redes é expresso por uma unidade adimensional, chamada Erlang, que é o produto entre a taxa média de chegada e o tempo médio de retenção, ou seja, $\chi \times t_{ret}$.

Um Erlang representa o uso contínuo de um circuito de voz, ou seja, o volume de tráfego em um canal ocupado por um dado intervalo de tempo, em geral, 1 hora.

Diversos trabalhos utilizam simuladores acadêmicos ou comerciais para reproduzir a carga desejada em uma determinada rede, assim como os geradores de requisições de chamadas. As simulações realizadas neste trabalho foram viabilizadas pela criação de um gerador de carga e requisições no Matlab, que será detalhado no item 3.2.3.

Para simplificar e permitir a comparação com outros resultados encontrados na literatura, considerou-se uma rede com perfil de tráfego dinâmico e que as requisições eram geradas aleatoriamente, ficando estabelecidas durante um ciclo de

simulação (não há desconexões), em acordo com a distribuição de Poisson e o modelo Erlang (ZHENG, 2004). Como o tempo de retenção médio considerado é a unidade de tempo, o tráfego que chega a um par de nós origem e destino (o,d) é dado em Erlang como $\rho(o,d) = \chi(o,d)$. Para uma rede de N nós, a carga pode ser descrita por uma matriz $(\rho)_{N \times N}$, onde cada elemento $\rho(o,d)$ representa o tráfego em cada par de nós da rede, e a carga total da rede é dada por:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho(i, j) \quad (3.1)$$

Vale ressaltar que o presente estudo trabalha com o pior caso em termo de probabilidade de bloqueio, pois adota a premissa de que as conexões são mantidas durante todo o período da simulação.

Outra preocupação foi realizar as simulações para uma determinada carga com diferentes ocupações de rede; assim, a cada ciclo de simulações, a carga da rede é alterada de forma aleatória, e novas simulações são realizadas.

3.2.2 Cálculo da Probabilidade de Bloqueio

A probabilidade de bloqueio é a métrica mais usada na literatura para avaliação do desempenho do algoritmo para a solução do problema RWA ou da rede como um todo. A probabilidade de bloqueio (P_b) pode ser definida como a razão entre o número de requisições bloqueadas (NRB) pelo número de requisições totais (NRT) (CHAGAS, 2010):

$$P_b = \text{NRB} / \text{NRT} \quad (3.2)$$

3.2.3 Gerador de Requisições e Tráfego

Primeiramente, foi necessário adequar o *script* de solução do problema RWA para gerar as requisições aleatórias de chamadas quando acionado pelo gerador de requisição de tráfego. Foram elaboradas duas abordagens. Na primeira, os nós de origem e destino são selecionados de forma aleatória por meio do comando *randi* do Matlab; caso o nó de destino seja o mesmo da origem, um novo nó de destino é selecionado, como no *script* a seguir:

```

od=randi([1 N],1,2);           %gera dois números entre 1 e N
origem=od(1);                 %especifica o nó de origem
destino=od(2);                %especifica o nó de destino
while destino==origem         %teste se destino = origem
    destino=randi([1 N],1,1);   %gera novo número entre 1 e N
end

```

A segunda abordagem realiza uma distribuição uniforme das chamadas entre os nós da rede, que são escolhidos aleatoriamente. Esse método foi viabilizado pelo comando *randperm* do Matlab, que realiza a distribuição de chamadas pelos N nós da rede aleatoriamente sem repetição. A resposta do comando *randperm* para uma rede de 14 nós e o trecho do *script* são apresentados a seguir:

```
randperm(14)
```

```
ans =
```

```
1 8 11 4 12 7 3 10 13 9 14 2 5 6
```

```
%Primeira chamada
```

```

orig=[randperm(N) randperm(N) randperm(N) randperm(N) randperm(N)
randperm(N) randperm(N) randperm(N) randperm(N) randperm(N) randperm(N)
randperm(N)];           %distribuição uniforme dos nós
orig1=1;                 %especifica o nó de origem
origem=orig(orig1);      %nó de origem
destino=randi(N);        %especifica nó de destino
while destino==origem    %testa se destino = origem
    destino=randi(N);     %especifica novo nó de destino
end

```

```
%A partir da segunda chamada
```

```

orig1=orig1+1           %especifica o nó de origem
destino=randi(N);       %especifica o nó de destino
while destino==origem   %testa se destino = origem
    destino=randi(N);    % especifica novo nó de destino
end

```

Foi necessário, ainda, adicionar ao *script* global um mecanismo de identificação da carga da rede, para permitir o cálculo da probabilidade de bloqueio para uma determinada carga.

A carga da rede é determinada pela soma da ocupação da rede em um determinado momento. Como a matriz de ocupação da rede possui dois elementos que representam um determinado enlace (origem/destino e destino/origem), é

necessário dividir o somatório da matriz de ocupação da rede por dois, como no *script* a seguir.

```
carga_1=sum(ocuprede);      % cada elemento desse vetor é a soma de uma
                             % coluna da matriz de ocupação da rede
carga_rede=sum(carga_1)/2  % carga da rede
```

Para contabilizar as chamadas realizadas e bloqueadas, e também viabilizar o cálculo da probabilidade de bloqueio, foi inserido o parâmetro CB, ao qual é atribuído o valor 0 para chamadas realizadas e valor 1 para chamadas bloqueadas, como mostrado a seguir:

```
if j~=W+1
    disp('Chamada realizada')
    CB=0;
end
break
else
    disp('Comprimento de onda ocupado'),disp(j);
if j==W
    disp('Chamada bloqueada')
    CB=1;
end
```

As modificações efetuadas no *script* principal permitiram a criação do gerador de tráfego e solicitações de conexões. Inicialmente, é necessário definir o número de simulações a serem realizadas e desejada taxa de chegada de solicitações de chamadas (por simplicidade, taxa de chamadas). O gerador atua em 2 etapas. A primeira consiste em gerar uma chamada considerando o estado inicial da rede. Em seguida, o gerador realiza uma série de conexões definida pela taxa de chamadas, atualizando a disponibilidade dos comprimentos de onda e a ocupação da rede. A cada conexão realizada, a ocupação e a carga da rede são atualizadas; portanto, a chamada seguinte é realizada em uma rede com uma carga diferente da chamada anterior, e esse processo se repete até atingir o limite configurado para a taxa de chamadas. No caso da chamada ser bloqueada, a rede não é atualizada.

Nesse cenário, as requisições geradas servem tanto para prover a carga na rede como para avaliação da probabilidade de bloqueio, uma vez que, a cada chamada gerada, tem-se a condição de realizada (valor 0), ou bloqueada (valor 1)

para cada carga. Assim, ao final das simulações, tem-se o total de chamadas realizadas e de chamadas que foram bloqueadas.

O gerador armazena as informações de carga da rede e bloqueio de chamadas de cada simulação em matrizes carga e bloqueio. Para permitir uma melhor análise dos resultados, as informações de carga e bloqueio são posicionadas lado a lado, formando uma matriz de carga e respectivo bloqueio, chamada de *m_carga_bloq*, com a seguinte disposição (algumas linhas da matriz):

m_carga_bloq{1} =

```

0  0
1  0
3  0
6  0
...
40 0
41 0
43 0
...
80 1
82 1
...
85 0

```

A primeira coluna representa a carga na rede e a segunda, a condição de conexão realizada ou bloqueada.

Por conveniência, foi adotado o procedimento de exportar o resultado para Excel, e então, calcular a probabilidade de bloqueio. Obviamente, este cálculo pode ser embutido no *script* de Matlab.

O comando *diary* do Matlab foi utilizado para salvar o histórico das simulações.

O código gerador de chamadas é apresentado a seguir.

<i>diary</i> (Nome do arquivo')	%salva o histórico da simulação
<i>for</i> s=1:100	%número de simulações
taxa_chegada=50;	%taxa média de chegada desejada (χ)
solucao_rwa	%chama o script principal
<i>disp</i> ('Chamada:'), <i>disp</i> ('1');	%mostra o número da chamada corrente
carga(1)=CB;	%atribui condição da primeira chamada
<i>for</i> c=2:taxa_chegada	%ciclo para atribuir condição das chamadas
solucao_rwa__2	%segundo script com atualização da rede

```

disp('Chamada:'),disp(c);           %mostra o número da chamada corrente
carga(c)=carga_rede;             %cria matriz carga
bloq(c)=CB;                       %cria matriz bloqueio
end
carga=carga';                    %ajusta carga para matriz coluna
bloq=bloq';                       %ajusta bloqueio para matriz coluna
m_carga_bloq{s}=[carga,bloq]     %cria matriz carga x bloqueio

disp('Fim de 1 Ciclo')
clearvars -except simulacoes m_carga_bloq
end
celldisp(m_carga_bloq)           %exibe a matriz carga x bloqueio
disp('Fim da simulação')
diary off

```

3.2.4 Análise do Desempenho do AG Proposto Variando o Número de Gerações

O número de gerações tem influência direta no tempo de execução do algoritmo e também na probabilidade de bloqueio. Quanto maior o número de gerações, maior será o tempo de execução, porém, a probabilidade de bloqueio tende a ser menor. O ideal é utilizar o menor número possível de gerações que permita encontrar uma boa solução para o problema.

Esse parâmetro também varia com a complexidade da rede. Uma rede maior, geralmente, necessita de maior número de gerações para chegar a um boa solução; em redes menores acontece o contrário.

A gráfico na Figura 3.16 compara o desempenho do algoritmo com diferentes números de gerações (4, 8 e 16), considerando a NSFNET com 8 comprimentos de onda e população de 8 indivíduos. É possível observar que existe uma diferença significativa em relação ao número de bloqueios quando o número de gerações aumenta de 4 para 8. No entanto, o aumento de 8 para 16 gerações praticamente não proporciona ganho. Logo, para a rede em questão, é interessante utilizar 8 gerações, uma vez que é possível atingir um bom desempenho com menor tempo de execução.

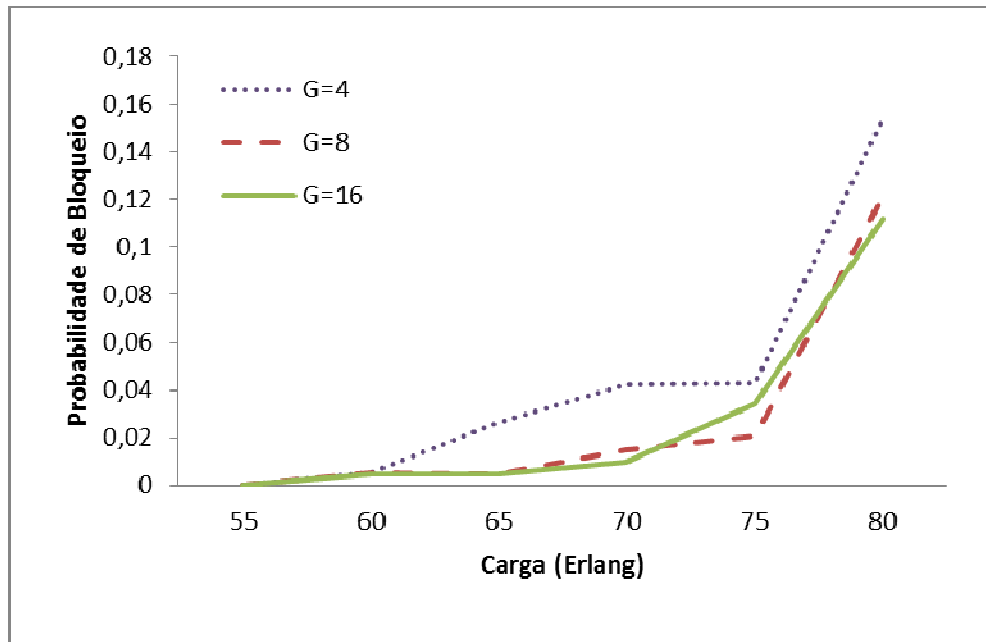


Figura 3.16 – Comparação do desempenho para diferentes quantidades de gerações (G).

3.2.5 Comparação do Desempenho do AG Proposto com Heurísticas Encontradas na Literatura

O estudo realizado por Zang (2000) apresentou uma revisão das heurísticas existentes na literatura para solução do problema RWA. O autor realizou simulações para avaliar o desempenho das heurísticas analisadas em relação à probabilidade de bloqueio. O trabalho também compara os desempenhos dos algoritmos de alocação de comprimento de onda “primeiro da fila” (*First-Fit* – FF) e RCL, apresentados na Seção 1.5, com roteamento fixo e adaptativo em uma rede com 6 nós, reproduzida na Figura 3.17, e 16 comprimentos de onda. Os números sobre os *links* representam o custo de cada enlace da rede.

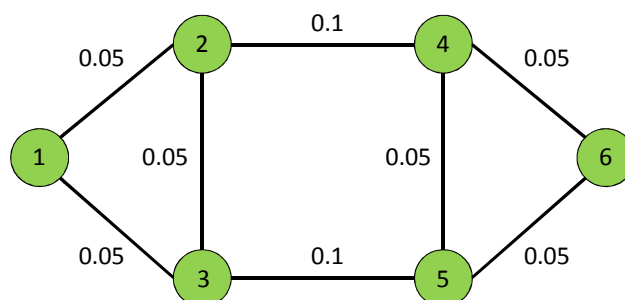


Figura 3.17 – Topologia da rede utilizada na comparação com outras heurísticas.

O desempenho do algoritmo genético proposto foi inserido no gráfico, com o objetivo de realizar a comparação com as heurísticas e técnicas de roteamento já citadas. Foi utilizada a mesma configuração de rede, número de comprimentos de onda (16), 8 indivíduos e 8 gerações. O resultado das simulações é apresentado na Figura 3.18.

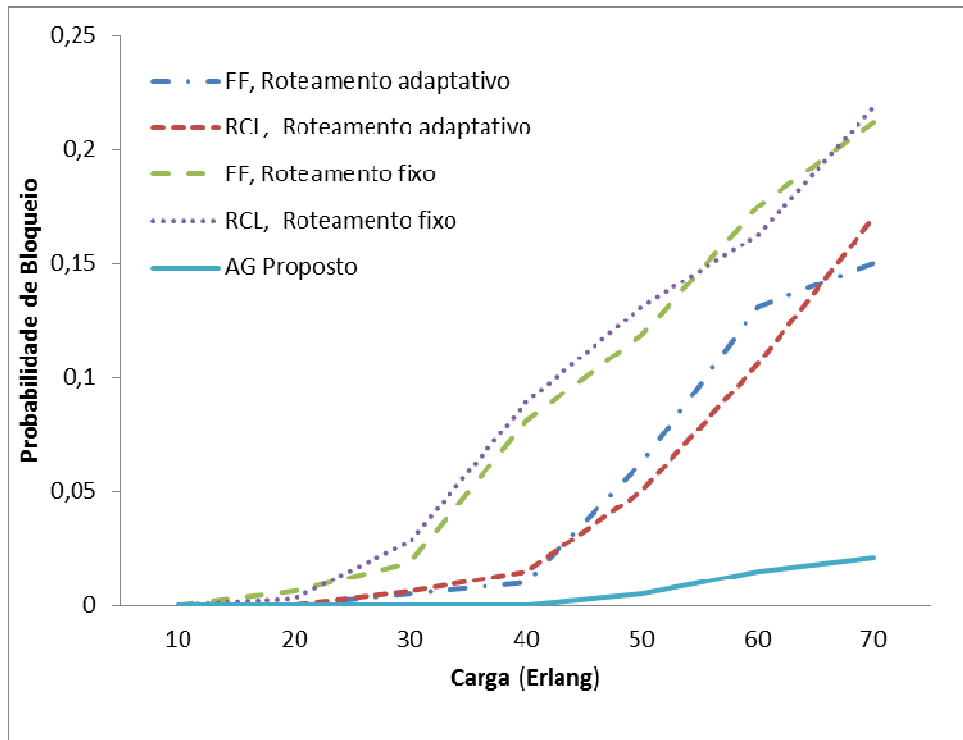


Figura 3.18 – Comparação de desempenho do algoritmo AG proposto com os de outras heurísticas.

O desempenho do algoritmo genético proposto superou de forma significativa as demais técnicas apresentadas, reforçando que sua utilização é bastante recomendável na solução do problema RWA.

3.2.6 Comparação do Desempenho do AG Proposto com Outros Trabalhos que Também Utilizam AG

O trabalho proposto por Le *et al.* (2005) apresenta uma abordagem para a solução do problema RWA utilizando algoritmo genético. As simulações foram realizadas considerando a NSFNET utilizando o Simulator NS-2. Os autores compararam o desempenho de seu algoritmo com o do trabalho proposto por Bisbal

et. al (2000), que também utiliza algoritmo genético, e o da técnica de roteamento fixo-alternativo (FA) com alocação de comprimento de onda utilizando “primeiro da fila”.

O desempenho do algoritmo proposto nesse trabalho foi incluído nessa comparação, utilizando os mesmos parâmetros. O resultado é apresentado na Figura 3.19. Os seguintes parâmetros foram usados: número de fibra: 1; número de comprimentos de onda da rede: 8; carga: 35 a 75 Erlangs; número de indivíduos P: 8; número de gerações G: 8.

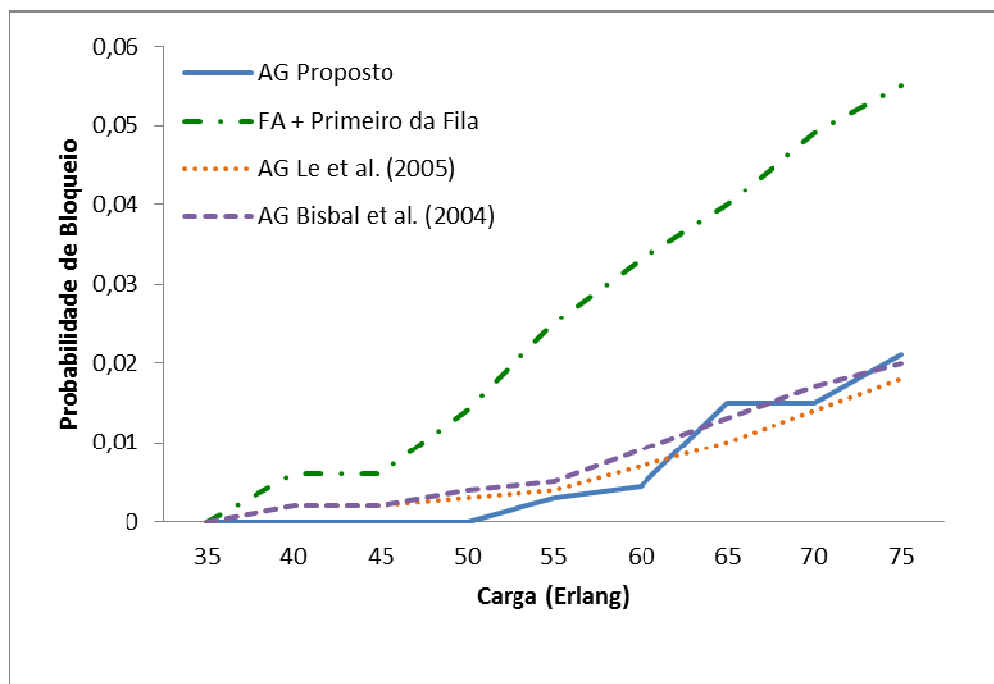


Figura 3.19 – Comparação do desempenho do algoritmo proposto com os de trabalhos que utilizam AG.

O programa desenvolvido utilizando algoritmo genético para solução do problema RWA teve um desempenho dentro do esperado, apresentado resultado muito semelhante aos de outros trabalhos que também utilizam AG, e superando substancialmente o método de roteamento fixo-alternado (FA).

4 CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O surgimento de novos serviços de telecomunicações tem impulsionado o aumento da capacidade de redes ópticas. Atualmente, muitas pesquisas estão em andamento buscando o aumento da taxa de transmissão por canal, a acomodação de mais canais na banda de transmissão da fibra óptica e a otimização dos recursos das redes ópticas para permitir o atendimento da crescente demanda por largura de banda.

Em redes ópticas de roteamento de comprimento de onda (WRON), ao chegar uma solicitação de conexão entre dois nós, é necessário selecionar uma rota e alocar um comprimento de onda disponível de forma que atenda a requisição atual e, preferencialmente, preserve recursos para atendimento de demandas futuras. Essa tarefa é denominada de problema de roteamento e alocação de comprimento de onda (problema RWA) que determina o estabelecimento de conexões.

O problema RWA e os diversos trabalhos encontrados na literatura para sua solução foram revisados e detalhados nesse trabalho, ficando claro a importância do desenvolvimento de novas técnicas, com objetivo de diminuir a probabilidade de bloqueio de chamadas.

O trabalho se concentrou na utilização de algoritmo genético como alternativa às diversas heurísticas encontradas na literatura. Foi descrito o conceito de algoritmo genético e apresentado o detalhamento do programa criado em ambiente Matlab para solução do problema RWA. Diversas simulações foram realizadas para avaliar o funcionamento do código e, por fim, seu desempenho foi avaliado por meio de comparações com trabalhos de outros autores.

A utilização do algoritmo genético proposto se mostrou viável para solução do problema RWA em redes ópticas de baixa e alta complexidades. O resultado obtido nas simulações mostrou que essa técnica tem desempenho superior ao de heurísticas tradicionais.

4.1 Trabalhos Futuros

A proposta apresentada neste trabalho pode se estender para obter novas funcionalidades como as descritas a seguir:

- Criação de novas Funções de aptidão

O estudo de novas Funções de aptidão para o algoritmo genético proposto é sempre interessante, pois permite buscar um desempenho ainda melhor para solução do problema RWA. Também é possível incluir outros parâmetros nas funções, como restrições físicas da rede e do meio (OSNR, PMD etc.), e comparar com outros trabalhos encontrados na literatura.

- Implementação do algoritmo em uma rede real

Uma interessante extensão do estudo apresentado é a implementação do algoritmo proposto em redes reais, como a rede de uma grande operadora de telecomunicações. Para isso, será necessário realizar o estudo aprofundado nas tecnologias utilizadas para troca de informações entre os nós da rede de uma rede óptica e plano de controle.

- Comparação ou implementação com outros algoritmos inspirados em regras da natureza

Outros algoritmos inspirados em regras da natureza vêm sendo explorados na solução do problema RWA, como otimização por colônia de formigas (ACO - *Ant Colony Optimization*) e otimização por colônia de abelhas artificiais (ABC - *Artificial Bee Colony*) (GARLICK e BARR, 2002) e (MARCOVIC e ACIMOVIC-RASPOPOVIC, 2010). Seria interessante realizar o estudo dessas técnicas e comparar os desempenhos com o deste trabalho.

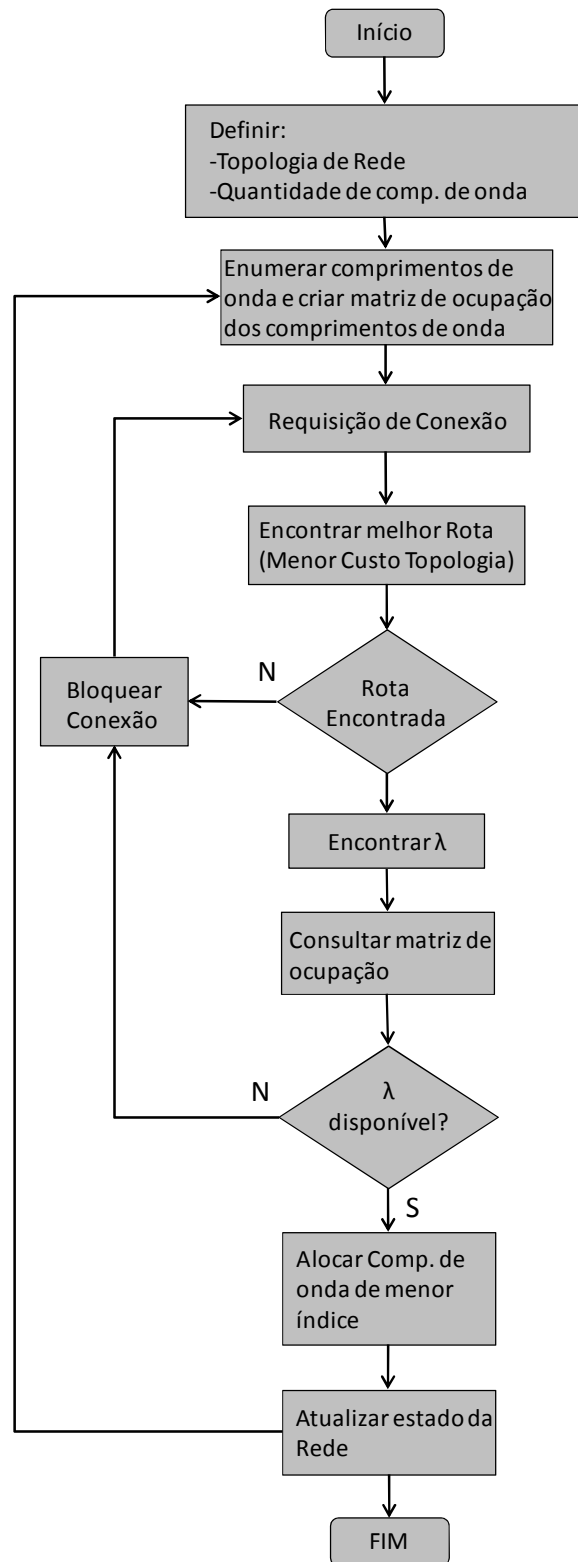
REFERÊNCIAS

- ARNOLD, D. Graphs and Matlab, August 26, 1996.
- BANERJEE, D.; MUKHERJEE, B. "A Practical Approach for Routing and Wavelength Assignment in Large Wavelength-Routed Optical Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, v. 14, no. 5, p. 903-908, June 1996.
- BANERJEE, N.; METHA, V.; PANDEY, S. A Genetic Algorithm Approach for Solving the Routing and Wavelength Assignment Problem in WDM Networks. Lecture Notes in Computer Science Vol. 6466, 2010, p. 599-606, 2010
- BARPANDA, R. S. A New Cost Function to Solve RWA Problem in Wavelength Routed Optical Network Using Genetic Algorithms. Nature & Biologically Inspired Computing, 2009, p. 1297-1302, 2009.
- BARRY, R. A.; SUBRAMANIAM, S. The max-sum wavelength assignment algorithm in WDM ring networks, OFC '97, p. 121-122, fev 1997.
- BECKMANN, D., KILLAT, U. Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks Using Genetic Algorithms. European Transactions on Telecommunications, VOL. 10, issue 5, p. 534-544, 1999.
- BHANJA, U.; MAHAPATRA, S.; ROY, R. A Novel Solution To The Dynamic Routing Wavelength Assignment Problem in Transparent Optical Networks. International Journal of Computer Networks & Communications, p. 119-130, 2010.
- BISBAL, D. et al. Dynamic Establishment of All-Optical Connections in Wavelength-Routed Optical Networks Using Genetic Algorithms. , Next Generation Optical Network Design and Modelling, p. 377-392, Kluwer Academic Publishers, 2003
- BISBAL, D. et al. Dynamic Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks by Means of Genetic Algorithms, Photonic Network Communications, 7:1, p. 43-58, 2004.
- CARVALHO, A. P. L. Algoritmos Genéticos. Disponível em: <http://www2.icmc.usp.br/~andre/research/genetic/index.htm>. [S.l.: s.n., 19—]. 6 p., Acesso em: 21 nov. 2012
- CHAGAS, S. Uma Abordagem Distribuída para o Problema de Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda em Redes WDM. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília – 2010.
- CHIPPERFIELD, A., et al: Genetic Algorithm TOOLBOX. For Use with MATLAB (Version 1.2) Sheffield: University of Sheffield, 1994.
- CHLAMTAC, I.; GANZ, A. and KARMI., G. Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WAN'S. IEEE Transactions on Communications, 40(7), July 1992.
- CHRISTODOULOPOULOS, K. et al. Comparison of Routing and Wavelength Assignment Algorithms in WDM Networks. Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE, p.1-6, 2008.

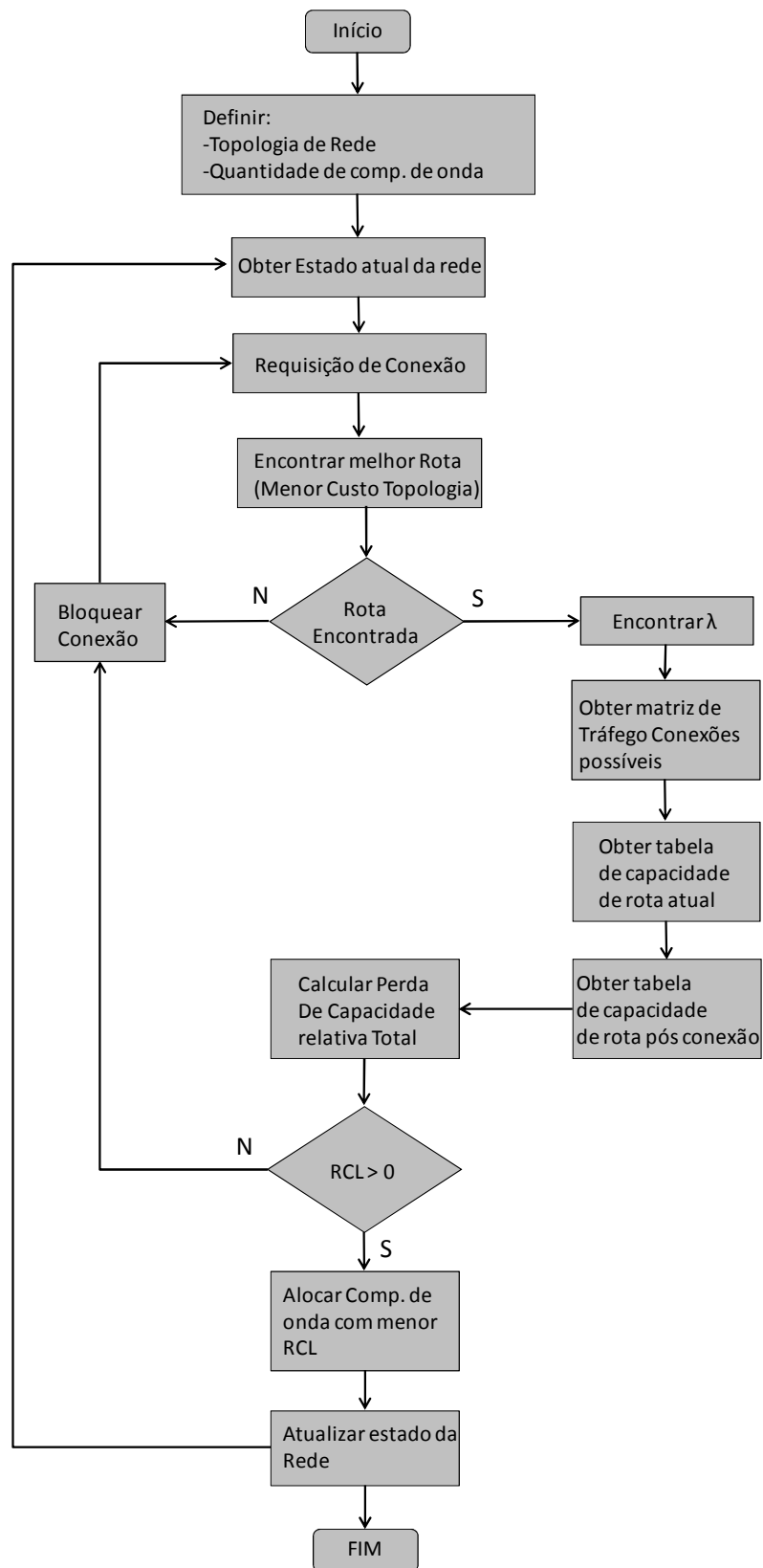
- ELSAYED, K. M. F. Dynamic Routing, Wavelength, and Fiber Selection Algorithms for Multi-Fiber WDM Grooming Networks, Proceedings of EE Communications, vol. 152, no. 1, 2005.
- ERICSSON, Traffic and Market report, Jun. 2012.
- GARLICK, R. M. and BARR, R. S. Dynamic Wavelength Routing in WDM Networks via Ant Colony Optimization. Ant Algorithms : Third International Workshop, ANTS, v. 2463 / 2002 of Lecture Notes in Computer Science, 2002.
- GUAN, X. A New Method for Solving Routing and Wavelength Assignment Problems in Optical Networks, Journal of Lightwave Technology, vol. 25, no. 8, Aug. 2007
- HOUCK, C. R.; JOINES, J. A.; KAY, M. G. A Genetic Algorithm to Function Optimization: A Matlab Implementation. Technical Report NCSU-IE Technical Report 95-09, North Carolina State University, 1995.
- HSU, C.; LIU, T; LIN, F. On Dynamic Routing and Wavelength Assignment in Multi-Granular All-Optical Networks. Proceedings of the Third International Conference on Information Technology and Applications, 2005.
- IOPE, R. Estratégias de Controle Dinâmico de Caminhos Ópticos Sobre redes Fotônicas WDM Utilizando Inteligência de Enxame. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo – 2011.
- IQUEBAL, M. A. Genetic Algorithms and their Applications: An Overview. Ind. J. Agric. Sci., 79, p. 399-401, 2009.
- JENNINGS, D.M. et al. Computer networks for scientists. Science 231 p. 943-950, Feb. 1986.
- LE, V. T. et al. A Genetic Algorithm for Dynamic Routing and Wavelength Assignment in WDM Networks. Lecture Notes in Computer Science, Volume 3358/2005, 893-902, DOI: 10.1007/978-3-540-30566-8_103, 2005.
- LO, K. et al. Dynamic Wavelength routing in all optical mesh network. Edith Cowan University Research Online, 2011.
- MARCOVIC, G. Z.; ACIMOVIC-RASPOPOVIC, V. S. Solving the RWA Problem in WDM Optical Networks Using the BCO Meta-Heuristic, Telfor Journal, v. 2, 2010.
- MUKHERJEE, B. Optical Communication Networks, McGraw-Hill, New York, 1997.
- NAGIB, G., Network Routing Protocol using Genetic Algorithms. International Journal of Electrical&Computer Sciences IJECS/IJENS. Vol.10 issue 02 p. 40-44 , Apr. 2010.
- NAKEERAN, R.; VIVEK, A. V. N., KOTA, P. Genetic algorithm based approach for routing and wavelength Assignment. Photonics Conference Proceedings, 2004.
- OLIVEIRA, A.; GUIMARÃES, L. Avaliação das Técnicas de Roteamento e Posicionamento de Conversores em Redes Ópticas. Monografia – Universidade de Brasília, 2011.
- OZDALGAR, A. E.; BERSEKAS, D. Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 11 Issue 2, p. 259 – 272, Apr. 2003.

- RAMASWAMI, R.; SIRAVAJAN, K. N. Routing and Wavelength Assignment in all-optical Networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 3, no. 5, p. 489-500, Oct. 1995.
- RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N. *Optical Network - A Practical Perspective*, 2nd ed., Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- ROSA, S.; DRUMMON, A.; FONSEA, N. Desempenho de Algoritmos de Proteção por Caminho Compartilhado Sensíveis às Limitações da Camada Física em Redes WDM. SBC - Sociedade Brasileira de Computação, 2009.
- ROUSKAS, G. *Routing and Wavelength Assignment in Optical WDM Networks*, Wiley Encyclopedia of Telecommunications, John Wiley & Sons, 2001
- SCHEINERMAN, E., R. MATGRAPH: A Matlab Toolbox for Graph Theory. Tech rep, Johns Hopkins University, 2006.
- SOARES et al. *Redes Ópticas Transparentes: Tendências e Desafios* (ISBN 9788576692485). In: Raimundo dos Santos Moura. (Org.). ERCEMAPI 2009 - Escola Regional de Computação (Ceará, Maranhão e Piauí). 1ed.: , v. 1, p. 83-109, 2009.
- SOARES, A; GIOZZA, W. Avaliação de Desempenho de Algoritmos para Alocação Dinâmica de Comprimentos de Onda em Redes Ópticas Transparentes. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 2. p. 661-674, 2004.
- SUN et al. Performance Analysis of First-Fit Wavelength Assignment Algorithm in Optical Networks. *IEEE*, p. 403-409, Jun. 2003.
- YUSSOF, S.; ONG, H. A Robust GA-based QoS Routing Algorithm for Solving Multi-constrained Path Problem. *Journal of Computers, North America*, 5, Sep. 2010.
- ZANG H. et al. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks. *Optical Networks Magazine*, vol. 1, no. 1, p. 47-60, 2000.
- ZHANG, X.; QIAO, C. Assignment for Dynamic Traffic in Multi-fiber WDM Networks, *Computer Communications and Networks. Proceedings. 7th International Conference ON*, Oct. 1998.
- ZHENG, X.; ZHANG, T. Dynamic routing and wavelength assignment for two-stage multi-granularity WDM optical networks. *Optics Communications* 229, p. 191–196, 2004.
- ZHOU, J.; YUAN, x. A study of dynamic routing and wavelength assignment with imprecise network state information, in *Parallel Processing Workshops*, p. 207 –213, Aug. 2002.

APÊNDICE A – Fluxograma do algoritmo primeiro da fila.



APÊNDICE B – Fluxograma do algoritmo RCL.



APÊNDICE C – Fluxograma do algoritmo genético proposto.

