



Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em
Computação Aplicada
Mestrado Acadêmico

Maurício Beraldin Barreto

Estratégias para Planejamento e Recomposição em Redes de
Telecomunicações

São Leopoldo, 2011

MAURÍCIO BERALDIN BARRETO

ESTRATÉGIAS PARA PLANEJAMENTO E
RECOMPOSIÇÃO EM REDES DE
TELECOMUNICAÇÕES

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção título de mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Canto Dos Santos

SÃO LEOPOLDO
2011

B273e	<p>Barreto, Maurício Beraldin Estratégias para planejamento e recomposição em redes de telecomunicações / por Maurício Beraldin Barreto. – São Leopoldo, 2011.</p> <p>.121.f. : il. color. ; 30 cm.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, RS, 2011. Orientação: Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos, Ciências Exatas e Tecnológicas.</p> <p>1.Telecomunicações. 2.Redes de telecomunicações. 3.Sistemas de transmissão de dados. 4.Telecomunicações – Tráfego. 5.Sistemas de telecomunicação. I.Santos, José Vicente Canto dos. II.Título.</p> <p>CDU 654 621.39 004.71</p>
-------	---

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

MAURÍCIO BERALDIN BARRETO

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção título de mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Aprovado em 29 de Março de 2011

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Canto Dos Santos – Unisinos

(Examinador interno) Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiakovsky – Unisinos

(Examinador externo) Prof. Dr. Felipe Martins Müller – UFSM

Dedico este trabalho à minha adorável e querida esposa pelo companheirismo, apoio, paciência e amor incondicional ao longo desta jornada, ajudando-me nos diversos momentos de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, este grande “engenheiro” do universo, pela força, sabedoria e conhecimento que me guiaram em uma das maiores conquistas da minha vida.

Agradeço aos meus pais por sempre acreditarem no meu potencial e principalmente por apoiar as minhas decisões ao longo da vida.

Agradeço em especial ao Professor e amigo Dr. José Vicente, pelo incentivo à realização do mestrado no Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada (Pipca) ainda no período da graduação, com as disciplinas de Otimização para Engenharia e Inteligência Artificial, aplicadas à rede de energia elétrica, que serviram de base para na elaboração desta dissertação.

Agradeço ao meu Diretor, Eng^o. Fernando Ferreira, pelos sábios conselhos e apoio em um dos momentos mais importantes da minha vida profissional e acadêmica. Também agradeço ao colega e amigo Reiner Perozzo pelas incansáveis conversas e delírios no desenvolvimento desta dissertação, além dos colegas Celso Schulz e Emerson Silveira pelo apoio técnico, motivacional e moral nas diversas empreitadas que passamos ao longo do ano de 2010.

Agradeço também aos colegas da pós-graduação, professores, bolsistas do projeto SoC e funcionários do Pipca pelo apoio e suporte durante os mais “curtos” 2 anos da minha vida.

Agradeço de uma forma muito amorosa à minha esposa, Ingrid, pelo carinho, apoio, suporte e companheirismo na vida, possibilitando o meu desenvolvimento profissional e acadêmico.

"Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino".

Leonardo da Vinci

RESUMO

O crescimento do tráfego nas redes de telecomunicações por serviços de banda larga, telefonia fixa e móvel tem demandado esforços no planejamento e estudo da recomposição da rede, em especial redes de transporte, tornando elevado o nível de complexidade na elaboração de projetos que envolvem redes. A complexidade de interligação aumenta de acordo com as restrições impostas pela capacidade de investimentos e custos operacionais na obtenção da solução ótima para a melhor topologia de rede. Para resolver problemas de planejamento e recomposição da rede de telecomunicações é necessária a utilização de recurso computacional, pois problemas que envolvem redes desta natureza possuem a característica do conjunto de problemas de otimização combinatória, considerados difíceis. Com o objetivo de planejar e realizar estudos na recomposição da rede de telecomunicações, neste trabalho é apresentada a estratégia que visa o uso de recursos heurísticos como algoritmo genético e Dijkstra, bem como o conceito de rede fictícia na modelagem e solução computacional na obtenção da solução ótima referente à topologia de rede, possibilitando a análise prévia do tráfego na topologia proposta caso houver a incidência de falhas.

Palavras-chave: Planejamento de redes de telecomunicações. Redes ASON. Simulação de múltiplas falhas em rede de transporte. Algoritmo de Dijkstra. Algoritmo Genético.

ABSTRACT

The growth of traffic on telecommunications networks for broadband services, fixed and mobile telephony has demanded efforts in planning and study the restoration of the network, especially transport networks, making the high level of complexity in developing projects that involve networks. The interconnection complexity increases with the restrictions imposed by the capacity of investment and operating costs in obtaining the optimal solution for the best network topology. To resolve issues of planning and rebuilding of the telecommunication networks is necessary to use computational resources, since problems involving networks of this nature have the feature set of combinatorial optimization problems, considered difficult. With the objective to plan and carry out studies on the recomposition of the telecommunications network, in this work the strategy for use as heuristic genetic algorithm and Dijkstra, as well as the concept of fictitious network modeling and computational solution to obtain the solution great on the network topology, enabling preliminary analysis of traffic on the proposed topology where there incidence of failures.

Keywords: Planning of telecommunication network. ASON networks. Simulation of multiple failures in the transport network. Dijkstra's algorithm and Genetic algorithm.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Contextualização da rede de transporte conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007).....	28
Figura 2.2 – Exemplo real de rede de transporte de telecomunicações conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007).....	29
Figura 2.3 – Representação da arquitetura da rede ASON conforme Piqueira (PIQUEIRA, 2008).	32
Figura 2.4 – Representação típica, por grafos e através da matriz de adjacência de uma rede de telecomunicações.	36
Figura 2.5 – Representação típica, por grafos e através da matriz de incidência de uma rede de telecomunicações.	37
Figura 2.6 – Representação típica, por grafos e lista encadeada de uma rede de telecomunicações.	38
Figura 2.7 – Representação por vetorização de um grafo.	39
Figura 2.8 – Pseudocódigo do AG conforme López-Pastor (LÓPEZ-PASTOR, 2007).....	42
Figura 2.9 – Representação gráfica dos resultados esperados com o uso de cruzamento e mutação (Modificado BISCHOFF, 2009).....	43
Figura 2.10 – Pseudocódigo do algoritmo de Dijkstra conforme Arenales (ARENALES <i>et al.</i> , 2007).	45
Figura 2.11 – Representação da rede de telecomunicações através de grafos e matriz de adjacência.	46
Figura 2.12 – Representação do conceito de rede fictícia na modelagem da rede.	47
Figura 2.13 – Aplicação do conceito de rede fictícia em redes de telecomunicações.	47
Figura 4.1 – Representação dos métodos de configuração do caminho reserva em rede de transporte conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007).....	60
Figura 4.2 – Representação do uso dos recursos de reservas em rede de transporte conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007).....	61
Figura 4.3 – Restauração distribuída – Reparo Global.	62
Figura 4.4 – Restauração distribuída – Reparo Local.	63
Figura 4.5 – Restauração distribuída – Pré-planejamento.....	64
Figura 4.6 – Representação gráfica de uma rede de transporte modificado por Barreto (BARRETO, 2007).	65

Figura 4.7 – Fluxograma da estratégia principal.	67
Figura 4.8 – Identificação do número máximo de arcos.....	70
Figura 4.9 – Exemplos de topologia de rede.	71
Figura 4.10 – Detalhamento da estratégia referente ao planejamento.	79
Figura 4.11 – Aplicação da estratégia no estudo da recomposição da rede.	82
Figura 4.12 – Detalhamento da estratégia no estudo da recomposição.	83
Figura 4.13 – Representação gráfica das variáveis de entrada utilizada por Bassam (BASSAM <i>et al.</i> , 2006).	86
Figura 4.14 – Representação da solução ótima obtida de forma manual com as distâncias. ...	86
Figura 4.15 – Representação gráfica da solução ótima obtida com a utilização da estratégia.	87
Figura 4.16 – Representação gráfica da rede de Bassam (BASSAM <i>et al.</i> , 2006) com o conceito de rede fictícia na presença de falha entre as estações 1 e 3.	88
Figura 5.1 – Topologia de rede proposta pela estratégia para 11 nós com o menor custo.	95
Figura 5.2 – Representação gráfica da convergência das funções objetivo para rede de 11 nós.	96
Figura 5.3 – Representação gráfica da convergência das funções objetivo truncada na 100 ^a geração.	97
Figura 5.4 – Representação gráfica da função objetivo das 6 simulações para rede de 11 nós.	97
Figura 5.5 – Representação gráfica dos resultados obtidos por PL e AG para instância de 11 nós.	98
Figura 5.6 – Representação gráfica da convergência das funções objetivo da rede de 27 nós.	101
Figura 5.7 – Representação gráfica da função objetivo das 6 simulações da rede de 27 nós.	102
Figura 5.8 – Representação gráfica da topologia e o roteamento dos circuitos para rede de 11 nós.	104
Figura 5.9 – Representação gráfica da incidência de 4 falhas na rede de 11 nós.	106
Figura 5.10 – Topologia de rede proposta pela estratégia para 27 nós com o menor custo... ..	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplo de levantamento de dados da rede de transporte com lista de incidência.	38
Tabela 4.1 – Apresentação das instâncias de entrada, localização e demanda.....	68
Tabela 4.2 – Resultado da codificação da topologia de rede.	72
Tabela 4.3 – Valores presentes após geração da população inicial (Pi).	72
Tabela 4.4 – Apresentação dos resultados conforme métodos de seleção.	76
Tabela 4.5 – Representação do <i>crossover</i> com os cromossomos pais selecionados.	77
Tabela 4.6 – Representação da mutação na nova população de cromossomos filhos.	78
Tabela 4.7 – Variáveis de entrada utilizada por Bassam (BASSAM <i>et al.</i> , 2006).....	85
Tabela 4.8 – Tabela com os valores das distâncias por enlaces.	85
Tabela 4.9 – Apresentação da tabela com os circuitos, percursos e custos iniciais.	87
Tabela 4.10 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede.	88
Tabela 4.11 – Apresentação das distâncias envolvidas na topologia com o conceito de rede fictícia.....	88
Tabela 4.12 – Tabela com a distribuição da demanda e custos envolvidos por percurso na presença de falha.....	89
Tabela 5.1 – Representação das coordenadas cartesianas da rede de 11 nós.....	92
Tabela 5.2 – Representação da demanda entre os nós de origem e destino da rede de 11 nós.....	92
Tabela 5.3 – Valores obtidos com o critério de parada em 500 gerações.....	93
Tabela 5.4 – Valores obtidos com o critério de parada em 750 gerações.....	94
Tabela 5.5 – Valores obtidos com o critério de parada em 1500 gerações.....	94
Tabela 5.6 – Valores obtidos com o critério de parada em 3000 gerações.....	95
Tabela 5.7 – Valores obtidos para as 6 simulações da rede de 11 nós.....	96
Tabela 5.8 – Representação das coordenadas cartesianas da rede de 27 nós.....	99
Tabela 5.9 – Representação da demanda entre os nós de origem e destino da rede de 27 nós.	100
Tabela 5.10 – Valores obtidos para as 6 simulações da rede 27 nós.....	101
Tabela 5.11 – Custos e percursos obtidos para rede de 11 nós sem a presença de falhas.	104
Tabela 5.12 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede para rede de 11 nós	105
Tabela 5.13 – Valores obtidos com a incidência de falhas na rede de 11 nós	106

Tabela 5.14 – Custos e percursos obtidos para rede de 27 nós sem a presença de falhas.	108
Tabela 5.15 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede de 27 nós.....	109
Tabela 5.16 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede de 27 nós após falha no enlace entre as estações 2 e 6.	110
Tabela 5.17 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede de 27 nós após aplicação de múltiplas falhas nos enlaces com a estação 6.....	111
Tabela 5.18 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede de 27 nós após falha total nos enlaces com a estação 6.....	112
Tabela 5.19 – Percursos obtidos com a incidência de falhas na rede de 27 nós.	113
Tabela 5.20 – Valores obtidos dos custos com a incidência de falhas na rede de 27 nós.....	114

LISTA DE ABREVIATURAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
ACP	<i>ASON Control Plan</i>
ADM	<i>Add/Drop Multiplex</i>
AG	Algoritmo Genético
AMP	<i>ASON Managment Plan</i>
APS	<i>Automatic Protection Swithed</i>
ASON	<i>Automatically Switched Optical Network</i>
ASTN	<i>Automatic Ewitched Transport Network</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
ATP	<i>ASON Transport Plan</i>
BT	<i>British Telecom</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i>
CF	Centro de Feixe
DCNR	<i>Design of Reliable Communication Networks</i>
DXC	<i>Digital Cross Connect</i>
FIS	<i>Failure Indication Signal</i>
Gbps	<i>Gigabit por segundo</i>
GMPLS	<i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU-T	<i>International Telecommunications Union - Telecommunications</i>
MDP	Processo markoviano de decisão
MLCR	<i>Multi Layer Least Congestion Routing Algorithm</i>
MLLR	<i>Multi Layer Least Loaded Routing Algorithm</i>
MROB	<i>Multi Layer Routing Algorithms based on backtracking</i>
NE	<i>Network Element</i>
NNI	<i>Network-Network Interface</i>

NOC	<i>Network Operation Center</i>
OIF	<i>Optical Internetworking Forum</i>
ONC	<i>Optical Network Controller</i>
OPEX	<i>Operational Expenditures</i>
OTN	<i>Optical Transport Networks</i>
PDH	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>
PL	<i>Programação Linear</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Network</i>
STM-N	<i>Synchronous Transport Module level - N</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
UNI	<i>User-Network Interface</i>
VC	<i>Virtual Container</i>
VC-12	<i>Virtual Container – 12</i>
VC-4	<i>Virtual Container – 4</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	18
1.2 OBJETIVO	18
1.2.1 Objetivos Propostos.....	20
1.3 MOTIVAÇÕES	21
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1 REDES DE TELECOMUNICAÇÕES	26
2.2 REDE DE TRANSPORTE DE TELECOMUNICAÇÕES	28
2.3 EVOLUÇÃO DAS REDES DE TRANSPORTE.....	29
2.3.1 Rede ASON.....	30
2.4 REPRESENTAÇÃO DE REDES DE TELECOMUNICAÇÕES.....	32
2.4.1 Teoria de Grafos.....	33
2.4.1.1 Representação de um Grafo por Matriz de Adjacência	36
2.4.1.2 Representação de um Grafo por Matriz de Incidência	37
2.4.1.3 Representação de um Grafo por Listas Lineares ou Encadeadas.....	38
2.4.1.4 Representação de um Grafo por Vetorização	39
2.5 MÉTODOS DE SOLUÇÃO COMPUTACIONAL	40
2.5.1 Algoritmo Genético	40
2.5.2 Algoritmo de Dijkstra	43
2.5.3 Conceitos de Rede Fictícia	45
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	48
3.1 PLANO DE CONTROLE EM REDES ASON.....	48
3.2 OTIMIZAÇÃO EM REDES DE TELECOMUNICAÇÕES	50
3.2.1 Planejamento Em Redes De Telecomunicações	50
3.2.2 Recomposição Em Redes De Telecomunicações.....	56
3.3 OUTROS MÉTODOS.....	56

3.4 PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	58
4 PROBLEMA ALVO E MÉTODO PROPOSTO	59
4.1 PROBLEMA ALVO	59
4.2 MÉTODO PROPOSTO	65
4.2.1 Variáveis de Entrada.....	68
4.2.2 Bloco Funcional do Planejamento	69
4.2.2.1 Definição da Estratégia.....	70
4.2.2.1.1 Codificação	71
4.2.2.1.2 Geração da População Inicial	72
4.2.2.1.3 Fitness.....	73
4.2.2.1.4 Seleção.....	76
4.2.2.1.5 Crossover	77
4.2.2.1.6 Mutação	77
4.2.2.1.7 Critério de parada.....	78
4.2.2.2 Resultados Obtidos do Planejamento	78
4.2.3 Bloco Funcional da Recomposição.....	80
4.2.3.1 Definição da Estratégia.....	80
4.2.3.2 Resultados Obtidos do Estudo da Recomposição	82
4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	83
4.3.1 Ferramenta Computacional.....	84
4.3.2 Aplicação da Estratégia de Forma Experimental	84
5 TESTES E RESULTADOS	90
5.1 PLANEJAMENTO	90
5.1.1 Planejamento em Rede de 11 Nós.....	91
5.1.2 Planejamento em Rede de 27 Nós.....	98
5.2 RECOMPOSIÇÃO	102
5.2.1 Estudo de Caso com Rede de 11 Nós	103
5.2.2 Estudo de Caso com Rede de 27 Nós	107
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	115
6.1 CONCLUSÕES	115
6.2 TRABALHOS FUTUROS	117
REFERÊNCIAS.....	118

1 INTRODUÇÃO

Com a privatização no Brasil na década de 90, o setor de Telecomunicações apresentou forte crescimento desde o ano de 1998. Mesmo com o aumento da renda *per capita* do brasileiro em apenas 20,3% no período, findo em 2009, as densidades de telefones fixos e celulares aumentaram em 80,7% e 1956%, respectivamente. Já o serviço de acesso a banda larga no final do 1º semestre de 2010 possuía 12,2 milhões de assinantes. Outro fator importante a ser destacado é o maior plano de investimento da história na expansão, modernização e melhoria da qualidade da prestação de serviços na economia brasileira, sendo R\$ 177 milhões de 1998 a 2009, dos quais R\$153 milhões ocorreram no período de 2000 a 2009.

Com o intuito de atender o forte crescimento da demanda dos serviços de telecomunicações, sendo os mesmos comutados por circuito ou por pacotes, as operadoras de telecomunicações necessitaram realizar de forma adequada o planejamento de suas redes, (e.g. redes de transporte síncrona ou assíncrona), de acordo com a arquitetura e componentes funcionais estabelecidos pelas normas da *International Telecommunications Union – Telecommunications* (ITU-T), com o conjunto de protocolos a ser utilizado de forma inteligente para implementação das funcionalidades por tecnologia definidas pelo *Internet Engineering Task Force* (IETF) e pelo *Optical Internetworking Fórum* (OIF), responsável pelo conglomerado de empresas que tem como missão o desenvolvimento de soluções e serviços interoperáveis entre tecnologias de redes, bem como a realização do dimensionamento da infraestrutura necessária às acomodações físicas para instalação e operação dos equipamentos responsáveis por prover a conexão entre vários tipos de redes, serviços, *internet* e interconexão com outras operadoras (BERGAMASCHI, 2001).

Para que o planejamento dessas redes seja atingindo adequadamente é necessário: acessibilidade, ou a capacidade de fornecer os serviços comutados conforme as demandas; transparência do setor operacional com o setor de engenharia; e principalmente, a viabilidade e o retorno econômico do investimento.

Estabelecer e atender as demandas desejadas são requisitos que têm vários aspectos. Dentre as responsabilidades da operadora da rede, o requisito principal é a capacidade de estabelecer uma conexão bem-sucedida. Para este requisito, o próprio equipamento de comutação é somente um de vários fatores importantes. Se a capacidade de comutação estiver subdimensionada resultará em congestionamento na rede, significando que o planejamento da rede está inadequado. Caso essa rede seja submetida a falhas internas ou externas, descritas no artigo de Heegaard e Trivedi (HEEGAARD e TRIVEDI, 2009), a arquitetura da rede deve atender de forma satisfatória a comutação dos circuitos afetados, minimizando perdas que possam impactar no *Service Level Agreement* (SLA) contratado pelos clientes.

Segundo Goldberg e Luna (GOLDBARG e LUNA, 2000) problemas que envolvem redes de comunicação, como planejamento de redes externas, são classificados como problemas de conexão e são resolvidos por: caminhos, quando o foco está em uma trajetória; árvores quando o foco está na continuidade da conexão e no estabelecimento de uma espinha dorsal sobre um conjunto de pontos demandantes; e emparelhamento, quando o problema de conexão envolve pequenos grupamentos. Para os problemas com características de expansão de redes ou a realização de projetos de redes, os mesmos podem ser modelados como os problemas de fluxo em redes. Já para problemas que envolvem projetos em redes de telecomunicações, baseadas na construção de topologias (e.g. barramento, estrela ou anel) e roteamentos de pacotes de dados, podem ser utilizadas as técnicas de roteamento, onde os pontos de atendimentos são considerados como demandas, possuindo interligações entre os pontos de origem e os destinos.

Conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007) em sua dissertação, os maiores desafios enfrentados pelas operadoras, e que são justificados pela proposta de serviços gerenciados para as redes de telecomunicações, são: o aumento da complexidade da rede; a necessidade constante de desenvolvimento de competência; as pressões financeiras para diminuição de OPEX¹ e CAPEX²; a necessidade de aumentar a eficiência operacional e, por fim, as constantes mudanças nos negócios de telecomunicações. Independentemente de como estes problemas serão resolvidos pelas operadoras ou por provedores de serviços, a utilização de ferramentas computacionais para gestão integrada destas redes é um ponto chave para o sucesso.

¹ OPEX – *Operational Expenditures* – Custos operacionais para manter um negócio/produto.

² CAPEX – *Capital Expenditures* – Custos para desenvolver ou expandir negócio/produto. Associado aos itens não consumíveis.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho, estuda-se especificamente o problema de planejamento em redes de telecomunicações referente a rede de transporte, *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH), com arquitetura *Automatically Switched Optical Network* (ASON) possibilitando diversos formatos de topologias para o estabelecimento do tráfego entre os locais de origens e destinos conforme demandas apresentadas pelas localidades mantendo o SLA contratados (BARRETO, 2007). Para ocorrer o atendimento do tráfego conforme demanda, é necessário constituir topologias de redes através de recursos computacionais com o objetivo de apresentar o menor custo, ou seja, minimizar os orçamentos de OPEX e CAPEX entre as distâncias físicas dos nós da rede além de prover a minimização da perda de tráfego em caso de falhas devido a fatores externos ou internos, como apresentada por Heegaard e Trivedi (HEEGAARD e TRIVEDI, 2009), pois problemas dessa magnitude possibilitam $214.358.881 \times 10^6$ milhões de combinações possíveis de escolha de topologias para redes compostas por 11 localidades e $6,08 \times 10^{35}$ combinações possíveis para rede composta por 27 localidades. Ou seja, tornando impossível projetar a topologia ideal prevendo atender satisfatoriamente a demanda bem como a preservação do tráfego em caso de falhas.

1.2 OBJETIVO

Hoje em dia, o planejamento de redes é significativamente diferente dos apresentados na década de 60 e 70, pois com a crescente variedade de tecnologias e serviços tem requerido formulações matemáticas para se tornar inequívoca e compreensível, uma vez que o problema em questão é indicado de maneira formal, revelando que métodos de otimização são aplicáveis e apropriadas (PIÓRO e MEDHI, 2004).

Como este trabalho insere-se na área de modelagem computacional para problemas de otimização combinatória se faz necessário a modelagem do problema através da Teoria de Grafos, pois de forma análoga, a rede de telecomunicações pode ser representada por grafos

não planares, na elaboração de estratégias que visam o tratamento adequado ao planejamento, e como recurso diferencial, prover o estudo de casos na recomposição do tráfego em caso de falha ou múltiplas falhas de forma sistêmica, possibilitando apoio, suporte e conhecimento prévio sobre a característica da rede aos planejadores, administradores de redes de telecomunicações e ao setor de engenharia de uma operadora, na escolha da melhor topologia de rede.

Para realização do planejamento, neste trabalho, será apresentada a estratégia responsável pela solução do problema na busca pela topologia ótima, ou seja, a topologia com o menor custo, possibilitando atender todos os pontos dentro de um espaço geográfico e a demanda do tráfego conforme seus respectivos pontos de origem e destino. A solução é formada através: (i) da utilização do Algoritmo Genético (AG), tendo como objetivo final a melhor topologia de rede com o menor custo, definido pela função objetivo entre os pontos avaliados; (ii) a utilização do conceito de rede fictícia; (iii) a avaliação do atendimento da demanda sobre cada topologia proposta por geração e, principalmente, (iv) a avaliação do atendimento do tráfego sobre a distância entre cada ponto da rede.

Com a ocorrência de falha na infraestrutura ou gerados por eventos indesejáveis, podendo ser externos (e.g. ambientes, desastres naturais, acidentes, ataque humano mal intencionado e ataque eletrônico) ou internos (e.g. congestionamento de tráfego, falha ou reparo no enlace ou nó e diferentes modos de falhas) como apresentada por Heegaard e Trivedi (HEEGAARD e TRIVEDI, 2009), neste trabalho, como um grande diferencial, é a elaboração da estratégia responsável pelo estudo da recomposição da rede em caso de múltiplas falhas. Para concretização dessa estratégia é utilizado o conceito de rede fictícia, apresentado nos artigos de Monticelli (MONTICELLI *et al.*, 1982) e Canto dos Santos (CANTO DOS SANTOS e GARCIA, 2004), possibilitando a simulação da perda de tráfego no caso de falha ou múltiplas falhas na rede e o algoritmo de Dijkstra, responsável pela verificação do atendimento da demanda, conforme simulação do caminho mais curto, possibilitando ao planejador de redes o conhecimento prévio entre a simulação com a estrutura real existente em uma operadora de telecomunicações.

1.2.1 Objetivos Propostos

Com o constante crescimento da *internet* e demais serviços oferecidos pelas operadoras ou prestadoras de serviços de telecomunicações, há a necessidade de automatizar processos, de possuir o controle de gestão das redes de transportes, que visam à redução de custos no desenvolvimento de novos projetos de rede, bem como a melhor utilização dos recursos já existentes.

Para que seja possível a realização da gestão da rede de transporte, este trabalho propõe o desenvolvimento de um conjunto de estratégias que possibilitam:

- Entrada de dados com a localização dos pontos a serem analisados, conforme plano cartesiano, e com o levantamento da demanda referente ao tráfego;
- Prover solução envolvendo AG, que possibilite o uso da capacidade evolutiva dos indivíduos mais aptos (princípio da sobrevivência) na procura da solução ótima global;
- Aplicar o conceito de rede fictícia no planejamento e no estudo da recomposição da rede;
- Simular múltiplas falhas sobre a topologia de rede fornecida como solução ótima;
- Verificar a totalidade do tráfego presente em cada nó, identificando pontos para futuras ampliações de rota;
- Ordenar os nós de acordo com o grau de importância devido à capacidade de atender a demanda solicitada, focado no processo de inicialização em caso de falha geral ou *blackout*,
- Validar o método proposto com simulação de múltiplas falhas com trabalhos existentes resolvidos por métodos exatos.

Desta forma, com o desenvolvimento deste trabalho, haverá um sistema que utiliza o AG, o conceito da rede fictícia e do algoritmo de Dijkstra, diretamente no plano de controle da rede de transporte apresentados no trabalho de Piqueira (PIQUEIRA, 2008), formando a essência da estratégia. Desta forma, será possível, o refinamento de topologias de redes, definidas no planejamento e, principalmente, o estudo da recomposição do tráfego em caso de falhas em redes de telecomunicações.

1.3 MOTIVAÇÕES

Nos parágrafos abaixo são apresentados os diversos motivos para a elaboração das estratégias aplicadas ao planejamento da topologia ótima, a alocação dos circuitos na mesma e o estudo da restauração em redes de telecomunicações.

Hillier e Lieberman (HILLIER e LIEBERMAN, 2005), em seu livro, descrevem que uma das mais empolgantes evoluções em pesquisa operacional tem sido o avanço de metodologias e aplicações para os problemas de otimização de redes. Um número maior de algoritmos tem obtido uma maior evolução com a utilização de conceitos vistos pela Ciência da Computação como a estruturação de dados e, conseqüentemente, uma melhor eficiência na manipulação dos dados. Assim possibilitando o desenvolvimento de *softwares* para resolver problemas que envolvem rotas completamente intratáveis há duas ou três décadas atrás.

Outro ponto que deve ser salientado são as dificuldades de planejamento devido ao crescimento da complexidade das redes atuais, em função da alta demanda de tráfego de dados e da adição de várias restrições que compõem o problema de otimização, desde a estrutura física da rede até os valores orçamentários para realização de um bom projeto. Desta forma, buscam-se novas tecnologias que possibilitem a melhoria dos serviços e a satisfação do cliente.

Com a integração entre instituições e órgãos responsáveis pela padronização dos modelos, características e funcionamento dessas novas redes, um novo ponto de vista deve ser observado pela convergência de várias técnicas aplicadas por tecnologia para apenas uma

nova rede de telecomunicações (e.g. *Optical Transport Networks* (OTN), ASON e *Generalized Multiprotocol Label Switching* (GMPLS)).

Com a adoção da topologia de rede com arquitetura ASON, essa nova rede permitirá a realização das configurações de serviços com menor recurso da rede e redução de custos operacionais, através das ferramentas automáticas de provisionamento. Porém, há um ponto que deve ser considerado com essa nova tecnologia: a topologia em malha torna a conectividade entre os nós de origem e de destino mais vulnerável a múltiplas falhas, sendo isto agravado à medida que a distância entre os nós origem e destino aumenta (PIQUEIRA, 2008).

Nos artigos de Luo (LUO *et al.*, 2009), Oliveira Lima (OLIVEIRA LIMA *et al.*, 2009) e Waldman (WALDMAN *et al.*, 2009), os autores apresentam a forma de multi-objetivo, modificação na programação linear mista e o uso de heurísticas, respectivamente, para a realização do planejamento. Para a realização da otimização de circuitos, o artigo de Carvalho (CARVALHO *et al.*, 2009) expressa as dificuldades computacionais e a necessidade do uso de metaheurísticas na solução de problemas complexos que envolvem alguns tipos de redes de telecomunicações, e para os autores Jun (JUN *et al.*, 2009), Kim (KIM *et al.*, 2007), Heegaard e Trivedi (HEEGAARD e TRIVEDI, 2009) e Koroty (KOROTKY *et al.*, 2006) a restauração da rede de telecomunicações torna-se algo obrigatório na busca pela eficiência operacional em relação às perdas financeiras. Outro fator que leva à motivação desta dissertação é a abordagem de novos métodos com o objetivo de encontrar soluções ótimas, além de técnicas propostas por programação linear inteira. Ou seja, busca-se o melhor conjunto de soluções ótimas para tomada de decisão na elaboração dos orçamentos anuais e atuação financeira diretamente no OPEX e CAPEX.

No artigo de Verbrugge (VERBRUGGE *et al.*, 2006) é mencionada a importância da avaliação do investimento a ser realizado, baseada na relação OPEX/CAPEX em função da demanda de tráfego. Guiotti (GUIOTTI, 2007) também menciona a importância da avaliação dos planos de investimentos OPEX e CAPEX, pois o planejamento da rede de telecomunicações depende diretamente de verbas pré-estabelecidas. Na linha de avaliação do OPEX e CAPEX, conforme Zuliani (ZULIANI, 2006) exemplifica que o modelo de empilhamento de tecnologia de transporte não é satisfatório, pois com tantos níveis torna-se problemático lidar com a configuração, gerência e peculiaridade de cada camada, as interfaces

de acesso entre as camadas e a manutenção dos equipamentos distribuídos entre os diversos níveis. Além disso, a eficiência do transporte é comprometida, devido à sobrecarga de operação de cada tecnologia. Uma rede operando com pilha completa de tecnologia (ex: *Internet Protocol-IP*, *Asynchronous Transfer Mode-ATM*, *SDH*, *Wavelength Division Multiplexing-WDM*) possui uma eficiência de transporte em torno de 51%, ou seja, para cada 2 bits transportados, um é dado e o outro controle. Isso faz com que os custos de CAPEX e OPEX sejam elevados, fazendo com que as operadoras busquem um novo modelo de operação para transportar mais eficientemente um maior volume de tráfego, reduzindo o CAPEX e o OPEX, e automatizem o provisionamento de circuitos, permitindo oferecer serviços novos e mais lucrativos (PIÓRO e MEDHI, 2004).

Na apresentação de Garcia (GARCIA, 2009), o mesmo sinaliza os desafios de projetos e implementação de mecanismos de proteção e restauração, otimização da rede com as restrições de cálculo das rotas e a inserção de novas restrições e implementação de serviços.

Conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007) as propostas de mudanças no plano de controle da rede óptica agregam elevada complexidade e têm grande impacto na forma atual de administração das redes de transportes. Outro fator é a necessidade de interação com sistemas proprietários de fornecedores, dificultando o uso de uma única ferramenta. Guiotti (GUIOTTI, 2007) apresenta a falta de ferramentas adequadas e compatibilidade entre os diversos fornecedores, onde cada fornecedor possui sistemas proprietários, dificultando a manutenção da base de dados, que serve de alimentação para utilização de *softwares* ou ferramentas que possibilitam a simulação e o estudo estratégico da rede de transporte. Ainda, no trabalho de Guiotti (GUIOTTI, 2007) é apresentada a citação de Suzana Schawartz, especialista em tecnologias de sistemas de suporte à operação e ao negócio:

“Enquanto outras indústrias utilizam sistemas automatizados para associar pedidos de clientes aos recursos, as operadoras de telecomunicações ainda dependem de planilhas para rodar seu negócio multibilionário”.

De acordo com os três planos lógicos que compõem a rede ASON, Piqueira (PIQUEIRA, 2008) salienta que é possível a habilitação da “inteligência da rede”, através da interconexão entre a camada de pacote e camada óptica, possibilitando o roteamento do caminho mais curto com custo mínimo por comprimento de onda. Desta forma, é possível o

desenvolvimento de um método capaz de realizar o planejamento e a restauração da rede ASON.

Por todos estes motivos é que se faz necessário o desenvolvimento de uma estratégia que visa o planejamento das redes de transportes na minimização dos custos e a maximização da capacidade de transporte presentes nos arcos para atender os serviços alocados de forma estruturada na rede.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Neste capítulo 1, é realizada a introdução deste documento, bem como a apresentação dos objetivos e as motivações que levaram à escolha do tema proposto no desenvolvimento da estratégia responsável pelo planejamento e o estudo da recomposição em redes de telecomunicações.

O capítulo 2 é responsável pela apresentação da fundamentação teórica e definições sobre a rede de telecomunicações, a estrutura de interligação entre os diversos tipos de redes que a compõem, em específico a rede de transporte SDH e a evolução para o modelo ASON. Nesse capítulo ainda são apresentados os conceitos da Teoria de Grafos, mostrando as relações entre os nós e os enlaces de uma rede, bem como as formas de representação através de listas e matrizes, além da apresentação dos conceitos dos métodos de solução computacional, tais como: algoritmo genético, algoritmo de Dijkstra e o conceito de rede fictícia na composição da estratégia.

O capítulo 3 apresenta a revisão bibliográfica, que inicialmente aborda o plano de controle em redes ASON, possibilitando a concepção da estratégia dedicada à implementação de métodos computacionais aplicados ao planejamento e estudo na recomposição da rede de transporte. Em seguida é realizada a análise de trabalhos relacionados à otimização em redes de telecomunicações, possibilitando o estudo do planejamento e recomposição da rede; breve revisão sobre programação linear, bem como a análise da complexidade da classe do problema envolvendo redes.

O capítulo 4 apresenta o problema alvo na recomposição das redes de transportes e a metodologia proposta na elaboração da estratégia responsável pela viabilidade do conjunto, planejamento e estudo da recomposição da rede, em caso de falha ou múltiplas falhas. Ou seja, é apresentado o detalhamento das estratégias, através de blocos funcionais elaborados para o planejamento e recomposição. Desta forma, possibilita-se a compreensão da utilização do algoritmo genético, responsável pela concepção das topologias, bem como a utilização do algoritmo de Dijkstra em conjunto com o conceito de rede fictícia na elaboração da função objetivo.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com a implementação da ferramenta computacional para execução da estratégia, com uso da base de dados pertencente à biblioteca dedicada a problemas de redes e de uma operadora de telecomunicações.

Finalmente, as conclusões são apresentadas no capítulo 6 e, em seguida, as referências bibliográficas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo destina-se à fundamentação teórica necessária para o entendimento da estratégia responsável pelo planejamento e recomposição em redes de telecomunicações, elaborada nessa dissertação. Inicialmente serão apresentados os conceitos e definições sobre redes de telecomunicações visando à evolução das redes de transportes, principalmente redes com tecnologia *Automatically Switched Optical Network* (ASON) conforme norma ITU-T G.8080/Y.1304 (ITU-T, 2001) e suas características, além dos mecanismos que visam à representação das redes de telecomunicações pela Teoria de Grafos, a utilização de matrizes e, por último, a revisão dos métodos de solução computacional. Os métodos são: Algoritmo Genético (recurso heurístico), algoritmo de Dijkstra e a abordagem do conceito de rede fictícia na solução de problemas com matrizes desconexas.

2.1 REDES DE TELECOMUNICAÇÕES

A rede de telecomunicações é formada por um conjunto integrado de equipamentos e *softwares* para prover serviços de comunicações (e.g. voz, vídeo e dados). Estas redes tipicamente são construídas considerando-se alguns aspectos básicos como capacidade, confiabilidade, flexibilidade, escalabilidade e capilaridade (TANENBAUM, 1997). Esses aspectos têm estimulado estudos e pesquisas, por fabricantes e centros universitários, na área de planejamento, otimização e restauração em redes, responsáveis pelo serviço de comunicações entre as redes de transportes das operadoras de telecomunicações.

Para o melhor entendimento da rede de telecomunicações, Guiotti (GUIOTTI, 2007), em sua dissertação, sugere a contextualização da rede de telecomunicações em três grandes

categorias: (i) acesso, (ii) plataforma ou comutação e (iii) transporte ou transmissão, conforme apresentado na Figura 2.1.

(i) Acesso: responsável pelo acesso de clientes/usuários a uma plataforma de atendimento. Normalmente disponibiliza meios físicos dedicados a cada cliente ou pequeno grupo de clientes, ou seja, baixa capacidade de multiplexação. Quando existe um maior compartilhamento de meios físicos passa a ser tratada como rede de transporte de acesso. Aspectos de capilaridade, capacidade e flexibilidade são mais relevantes;

(ii) Plataformas ou comutação: responsável pela otimização de recursos requeridos pelos usuários no estabelecimento dos serviços comutados, sejam eles orientados por conexão ou por pacotes com outros clientes ou serviços. Sua principal função é compartilhar os recursos disponíveis com os clientes que estão interligados via rede de acesso. Suas principais características são a capacidade de estabelecimento de conexões no menor tempo, flexibilidade para permitir vários serviços, confiabilidade e escalabilidade;

(iii) Transporte ou transmissão: responsável pela multiplexação e transporte das informações entre plataformas ou nós concentradores, em localizações distintas, com interesse comum em função do tráfego ou da arquitetura da rede de plataformas. Suas principais características são capacidade de escoamento, flexibilidade no roteamento de circuitos, escalabilidade e confiabilidade, garantindo menor tempo de resposta em caso de falha e capacidade de compartilhamento de recursos reserva.

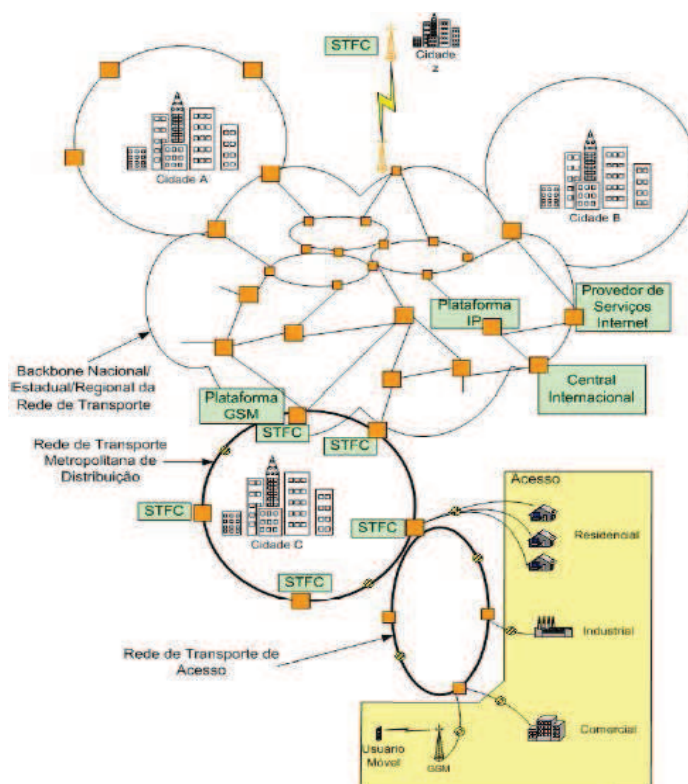


Figura 2.1 – Contextualização da rede de transporte conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007).

2.2 REDE DE TRANSPORTE DE TELECOMUNICAÇÕES

A rede de transporte de telecomunicações, segundo Ferreira (FERREIRA, 2000), é composta por vários nós, representados pelos elementos de redes (em inglês, *network Element- NE*) das seguintes tecnologias: ATM, IP, SDH e WDM. Conforme a combinação nas interligações entre os nós, a rede de transporte pode assumir topologias no formato de anel, estrela, barramento ou malha, conforme apresentado por Barreto (BARRETO, 2007). As interligações entre os nós são realizados através do uso de fibra óptica.

Na Figura 2.2 é apresentado um caso real de parte de uma rede de transporte constituída por rede óptica e rede de transporte SDH de uma empresa de telecomunicações, cujo objetivo é transportar vários conteúdos (e.g. circuitos TDM, ATM e IP) entre suas origens e seus destinos (VASSEUR *et al.*, 2004). Cada bloco com o nome de ANEL é

composto por outro subgrupo que contém no máximo 16 NE interligados entre si, formando outra topologia em anel. As linhas representam as interligações entre anéis formando arcos que possuem capacidade de tráfego limitada de acordo com os módulos óticos de transporte síncrono de fator “N”, STM-N, disponíveis conforme Amorim (AMORIM, 2006).

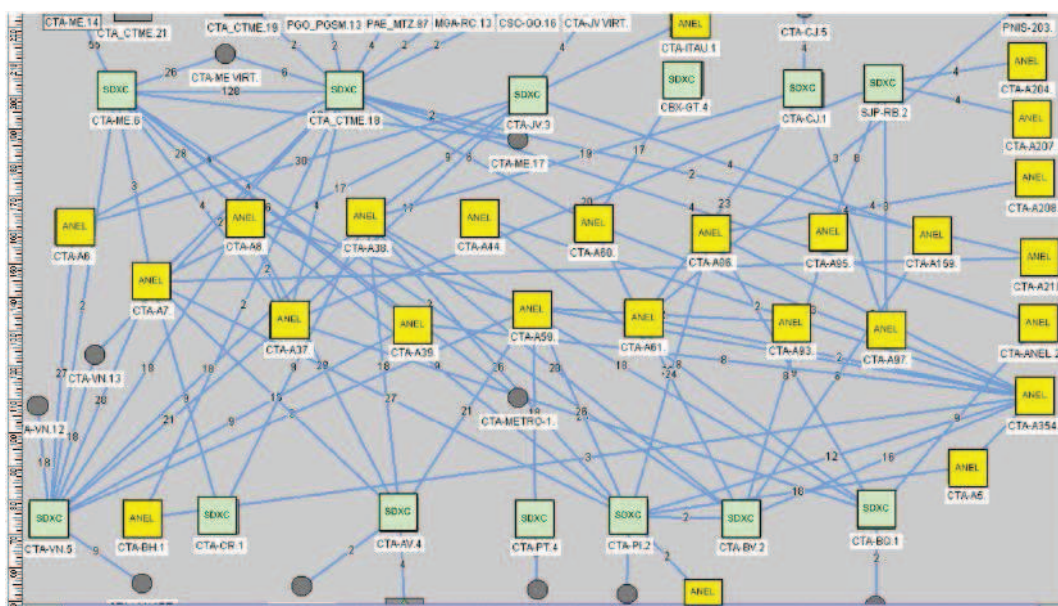


Figura 2.2 – Exemplo real de rede de transporte de telecomunicações conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007).

2.3 EVOLUÇÃO DAS REDES DE TRANSPORTE

Desde os primórdios da tecnologia que envolve o setor de telecomunicações, ocorre o aumento do volume de tráfego e da demanda, transportados pela rede de transporte de uma operadora de telecomunicações (WALDMAN *et al.*, 2009). Durante o mesmo período, o mercado das telecomunicações tornou-se altamente competitivo. Para lidar com esta situação e os novos desafios, as operadoras de rede de transporte buscam de forma contínua aumentar a eficiência da rede. Ao adotarem a tecnologia baseada na tecnologia WDM, as crescentes demandas por capacidade poderiam ser satisfeitas e os custos de transporte de banda reduzidos. No entanto, essas soluções não atribuíram qualquer funcionalidade aos outros tipos de rede. Para conseguir esse recurso os organismos de normalização e fórum como IETF e

OIF, respectivamente, estão trabalhando com um novo padrão de rede, denominado de ASON, conforme norma ITU-T G.8080/Y.1304 (ITUT-T, 2001).

2.3.1 Rede ASON

Em Piqueira (PIQUEIRA, 2008) a rede ASON é apresentada como uma arquitetura projetada para configurar as conexões fim-a-fim entre os NE da rede óptica, através de um sistema de controle e gerenciamento inteligente, satisfazendo os requisitos de proteção e restauração, engenharia de tráfego, controle de admissão e gerenciamento das conexões, para prover *Quality of Service* - QoS, confiabilidade e segurança às conexões. Sua topologia é definida pelo modelo em malha.

Os requisitos das redes ASON, conforme norma ITU-T, (ITUT-T, 2001). são:

- Prover a configuração rápida e eficiente do plano de transporte para o suporte de conexões comutadas ou semi-permanentes;
- Suporte à reconfiguração ou modificação das conexões previamente estabelecidas;
- Executar a função de restauração.

Com uma arquitetura de plano de controle bem idealizada, a rede ASON permite todo o tipo de controle que um operador de telecomunicações necessita. Seu plano de controle consiste de vários componentes que proporcionam funções específicas, incluindo a identificação e marcação de cada circuito ao longo da rede, possibilitando o provisionamento e a configuração dos recursos da rede em segundos e de forma automática.

É importante salientar que, conforme o trabalho de Piqueira (PIQUEIRA, 2008), antes da recomendação G.8080 ser aprovada, a ITU-T já sinalizava em reservar as redes *Synchronous Optical Network* (SONET) ou SDH para operar de acordo com as Redes de

Transporte Comutáveis Automaticamente (*Automatic Switched Transport Network – ASTN*). Desta forma, com o objetivo de torná-la uma espécie de Rede Óptica Genérica, denominada Rede de Transporte Óptica (OTN), que essencialmente englobaria as Redes Puramente Ópticas e as redes SONET/SDH, tornando a arquitetura ASON restrita às Redes Puramente Ópticas. No entanto, foi definido na ITU-T G.807 que a ASTN herdaria alguma das características da antiga rede de transporte com a intenção de compatibilizar as interfaces entre as redes ATM, SDH e PDH e adicionaria um conjunto de funções de controle para configuração das conexões e o encerramento destas. Em paralelo, definiu-se na ITU G.8080 que a ASON incorporaria as características das redes OTN e das redes SONET/SDH, bem como o protocolo de transporte *Digital Wrapper* definido na ITU-T G.709.

De acordo com a norma ITU-T G.8080 as camadas lógicas para as redes ASON são definidas como:

- Plano de transporte, (*ASON Transport Plan - ATP*), responsável por prover a transferência unidirecional ou bidirecional das informações dos usuários finais de um NE a outro e detectar as informações do estado das conexões;
- Plano de Gerenciamento (*ASON Management Plan – AMP*), responsável pelas funções de gerenciamento, tais como: falhas na rede, verificação de desempenho da rede, configuração dos NE;
- Plano de Controle (*ASON Control Plan - ACP*), responsável pelo desempenho das funções de controle das conexões e Engenharia de tráfego.

Logo, a rede ASON baseada nos três planos citados acima, tem a capacidade de escolher um caminho mais curto com custo mínimo, através da interconexão entre a camada de pacote e a camada óptica. Esta ação é possível, pois o sistema ASON habilita a configuração de cada *Digital Cross Connect (DXC)* escolhido e define um caminho óptico para transportar o tráfego orientado à conexão fim-a-fim. Ao ocorrer uma falha no DXC ou mesmo num enlace óptico, um conjunto de sinalização é trocado entre os planos ATP, AMP e ACP com a finalidade de reconfigurar um novo caminho óptico e manter o QoS exigido pelos usuários finais (VASSEUR *et al.*, 2004). Com o objetivo de ilustrar a arquitetura da rede de

transporte com tecnologia ASON, é apresentado na Figura 2.3, o *Framework* para redes ASON conforme ITU-T (ITUT-T, 2001).

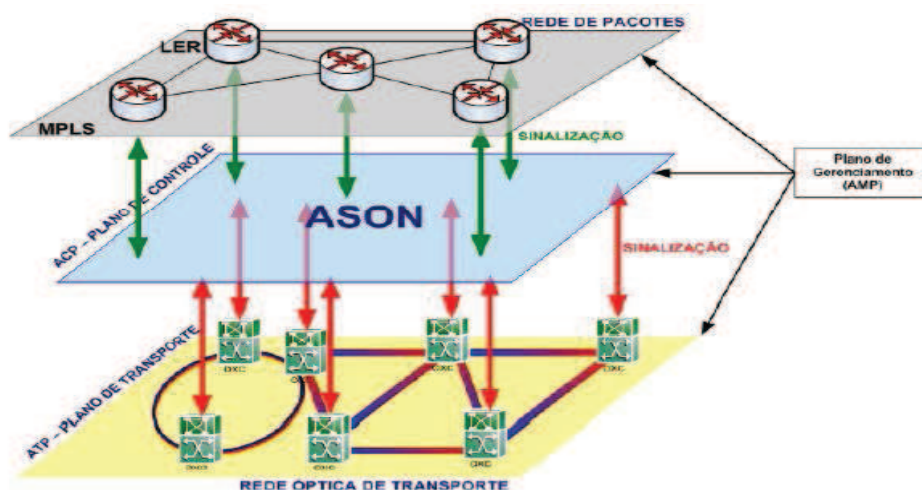


Figura 2.3 – Representação da arquitetura da rede ASON conforme Piqueira (PIQUEIRA, 2008).

Como o plano de controle da rede ASON constitui a inteligência da rede, um dos objetivos deste trabalho é a elaboração de estratégias que possibilitem o planejamento e o estudo da restauração em caso de múltiplas falhas neste plano, cujo detalhamento será apresentado no capítulo 4.

2.4 REPRESENTAÇÃO DE REDES DE TELECOMUNICAÇÕES

De acordo com Barreto (BARRETO, 2007), a rede de transporte é uma verdadeira camada fim a fim, que liga os pontos de origem ao destino atendendo as solicitações das demandas. Desta forma, são necessárias estratégias que possibilitem o conhecimento prévio do comportamento da rede em função do tratamento da demanda do tráfego, o estudo de casos na recomposição do tráfego na ocorrência de falhas pelos percursos físicos e a utilização de recursos computacionais, devido à explosão combinatória na busca da solução ótima ou valor aproximado.

Para Stainer (STAINER, 2004) a rede necessita de um conjunto com as demandas pelos caminhos ópticos constituindo a topologia virtual. A topologia virtual pode ser projetada a partir da topologia física e da demanda de tráfego dos clientes. Em seu trabalho, Piqueira (PIQUEIRA, 2008) salienta a importância do conhecimento da conectividade dos pontos (Origem-Destino) em um determinado espaço, possibilitando o conhecimento do conjunto de vizinhança e distâncias entre eles aplicadas à rede de telecomunicações.

Konak e Smith (KONAK e SMITH, 1999), Goldberg e Luna (GOLDBARG e LUNA, 2000) e Stainer (STAINER, 2004), com o propósito de tratar os problemas de otimização em redes, sugerem a modelagem da topologia física, lógica e a demanda de tráfego com a utilização da Teoria de Grafos.

Ferreira (FERREIRA, 2000), em seu trabalho, salienta a importância da representação de uma rede na sua fase inicial de elaboração, necessitando de informações a respeito dos nós e da estrutura dos arcos para compor a topologia da rede e as informações associadas aos enlaces, ou seja, referente aos custos, fluxos de tráfego e fluxos máximos permitidos por enlaces. Com o intuito de armazenar de forma simples e objetiva as informações relacionadas aos nós e aos arcos é proposto o tratamento da rede com a Teoria de Grafos.

Nas seções a seguir será apresentada a Teoria de Grafos e sua aplicação na representação gráfica e matemática na busca pela solução ótima, em problemas que envolvem planejamento e recomposição em redes de telecomunicações.

2.4.1 Teoria de Grafos

O conceito de grafos é a representação gráfica e a independência entre elementos que são representados por vértices e que simbolicamente são unidos pela aresta. Tem como representação matemática, $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de vértices da estrutura e E o conjunto das arestas ou ligações entre vértices (GOLDBARG e LUNA, 2000). Um grafo

cujos nós e/ou arestas têm valores associados é uma rede, conforme Arenales (ARENALES *et al.*, 2007).

Em Santos (SANTOS, 2009), os conceitos da Teoria de Grafos foram utilizados na representação do problema de definição de rotas explícitas em redes com arquitetura IP obtendo $G = (V, E)$. Os vértices ou nós, representados por $V = \{1, 2, \dots, |V|\}$ são os roteadores, e as arestas ou arcos representados por $E = \{(i, j)\}$, são os *links* existentes entre os roteadores.

Conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007) e Piqueira (PIQUEIRA, 2008), uma rede pode ser representada por um grafo, $G = (V, E)$, pois são estruturas para estudar as relações dos pares de elementos em um determinado conjunto. Um arco do nó i para o nó j é representado pela notação (i, j) . Os arcos podem apresentar duas características: orientados ou não orientados. A característica dos grafos ordenados está relacionada com o tráfego que só pode ser transportado no sentido da orientação e o não-orientado, com o tráfego que pode ser transportado em ambos os sentidos.

Conforme Piqueira (PIQUEIRA, 2008) os grafos são definidos da maneira descrita a seguir:

- Vértices são representados por pontos ou por nós;
- A ordem de um grafo é o número de seus vértices;
- Um enlace apresenta extremidades conectadas a vértices distintos;
- Um arco é desenhado como uma linha conectando dois vértices, chamados extremidades;
- Tamanho de um grafo é a quantidade de seus arcos;
- Um laço é um arco cujas extremidades estão conectadas a um único vértice;
- Um arco é múltiplo, se existe mais de um arco cujas extremidades estão conectadas aos mesmos vértices. Caso contrário, o arco é simples;

- Um grafo é simples, se não apresenta arcos múltiplos ou laços;
- Um grafo é não-orientado, quando não há distinção entre os dois vértices conectados por uma aresta, e orientado, quando as arestas são definidas como tendo sentido de um vértice para outro.

Para o desenvolvimento dessa dissertação serão utilizados grafos conectados e não-orientados, sendo $G = (V, E)$, onde $V = \{1, 2, \dots, n\}$ é o número finito de vértices representando os terminais ou estações de telecomunicações e $E = \{(i, j) \mid i, j \in V\}$ é o número de arcos, enlaces ou links utilizados pelas redes de transporte na interligação entre os terminais ou estações de telecomunicações, conforme apresentado por Gen (GEN *et al.*, 2005) e Routray (ROUTRAY *et al.*, 2007).

No trabalho de Piqueira (PIQUEIRA, 2008) um grafo conectado e não-orientado $G = (V, E)$ com vértices V , que neste caso representam os nós da rede, o número máximo possível de arestas E (*edges*) ou *links* (enlaces) da rede, é definido pela equação (1), abaixo:

$$E_{máx} = \frac{V(V-1)}{2}. \quad (1)$$

Para manipular matematicamente as informações obtidas pela representação geométrica de um grafo, que servirão de dados de entrada para a ferramenta computacional, o mesmo pode ser representado através de, pelo menos, quatro diferentes formas apresentadas por Goldbarg e Luna (GOLDBARG e LUNA, 2000), sendo:

- Matriz de adjacência;
- Matriz de incidência;
- Listas lineares ou encadeadas;
- Representação vetorial.

2.4.1.1 Representação de um Grafo por Matriz de Adjacência

Essa representação é simples, onde o grafo é expresso em uma matriz $A = [a_{ij}]$ através dos nós e de suas relações de vizinhança. As linhas e as colunas da matriz estão relacionadas aos nós do grafo. A matriz é, normalmente, *booleana*, ou seja, seus elementos são expressos por 0 e 1. Quando existirem arestas paralelas, o valor de $[a_{ij}]$ pode passar a representar o número de arcos paralelos.

Por definição, a matriz $A = [a_{ij}]$ é denominada como matriz de adjacência do grafo $G = (V, E)$ se:

$$\begin{cases} a_{ij} = 1 \text{ se e somente se existir ligação } (i,j), \\ a_{ij} = 0 \text{ se e somente se não existir ligação } (i,j). \end{cases}$$

Com o objetivo de ilustrar o uso da teoria de Grafos em redes de telecomunicações, segue abaixo, na Figura 2.4(a), um modelo típico de interligação da rede de transporte. Na Figura 2.4(b) é apresentada a rede de telecomunicações de acordo com a teoria de Grafos e na Figura 2.4(c) está à representação do Grafo com matriz de adjacência.

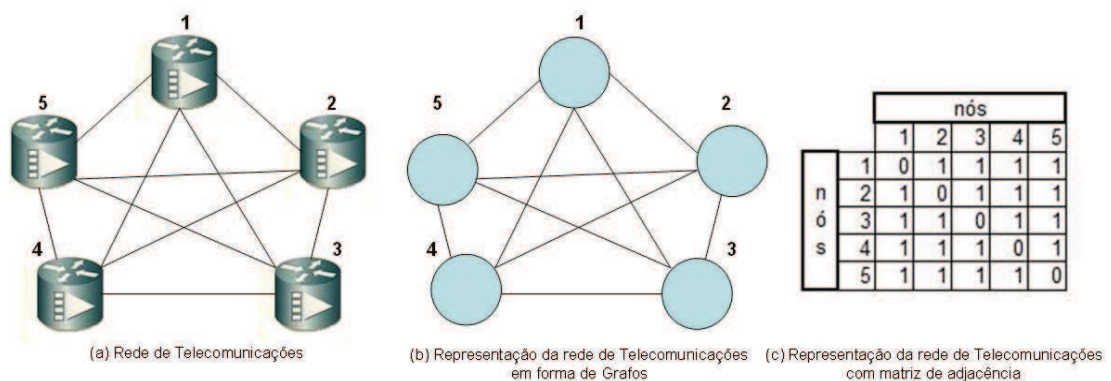


Figura 2.4 – Representação típica, por grafos e através da matriz de adjacência de uma rede de telecomunicações.

2.4.1.2 Representação de um Grafo por Matriz de Incidência

Para um determinado grafo de n vértices v_1, v_2, \dots, v_n , e m arestas a_1, a_2, \dots, a_m , e nenhum laço, a matriz de incidência é uma matriz $n \times m$, onde o valor de cada elemento e_{jk} da matriz é determinado da seguinte maneira:

$$e_{jk} = 1, \text{ se a aresta } a_k \text{ é incidente ao vértice } v_j; \text{ caso contrário } e_{jk} = 0.$$

Desta forma, a matriz de incidência apresenta algumas propriedades, tais como: (i) Cada aresta é incidente a exatamente dois vértices e cada coluna contém exatamente dois valores 1, (ii) O número de 1 em cada linha é igual ao grau do vértice correspondente, (iii) uma linha que contém somente 0 representa um vértice isolado.

Com o objetivo de ilustrar o uso da teoria de Grafos em redes de telecomunicações, segue abaixo, na Figura 2.5(a), um modelo típico de interligação da rede de transporte. Na Figura 2.5(b) é apresentada a rede de telecomunicações de acordo com a teoria de Grafos e na Figura 2.5(c) está à representação do Grafo com matriz de incidência.

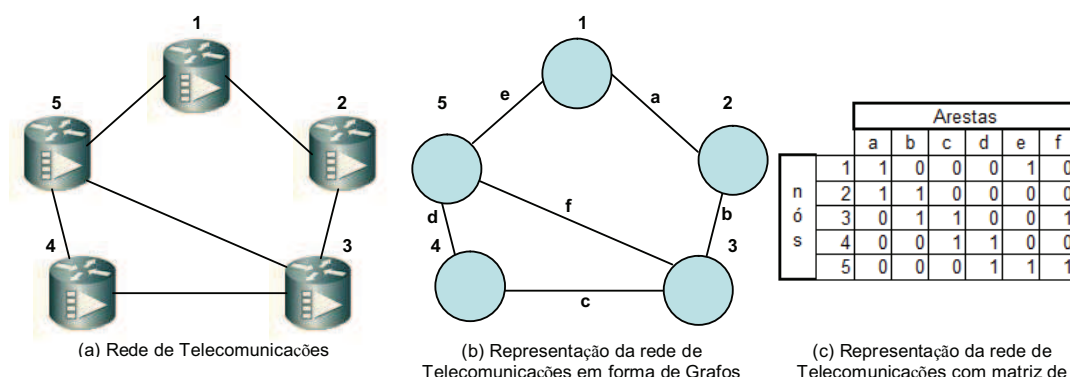


Figura 2.5 – Representação típica, por grafos e através da matriz de incidência de uma rede de telecomunicações.

No trabalho de Lemos (LEMOS, 2008), as informações na matriz de incidência podem ser representadas por uma lista, possibilitando o transporte de diferentes tipos de informações conforme Tabela 2.1. Nela é possível a verificação dos arcos com os vértices, a disponibilidade de valores que possibilitam a modelagem e o conhecimento da rede de telecomunicações (e.g. distância e taxa de transmissão) a ser avaliada.

Tabela 2.1 – Exemplo de levantamento de dados da rede de transporte com lista de incidência.

Arco	Vértice A	Vértice B	Distância (Km)	Taxa de Transmissão (Gbps)
a	1	2	40	2,5
b	2	3	30	2,5
c	3	4	10	2,5
d	4	5	70	2,5
e	5	1	56	2,5
f	5	3	120	10

2.4.1.3 Representação de um Grafo por Listas Lineares ou Encadeadas

Esta representação é extremamente conveniente para eficiência computacional de alguns algoritmos, bem como para economia de memória de armazenamento (FERREIRA, 2000). O modelo mais tradicional de lista encadeada possui uma configuração baseada nos vértices do grafo e em suas vizinhanças, conforme Figura 2.6(c). Na Figura 2.6(a) é apresentado o modelo típico de interligação da rede de transporte e na Figura 2.6(b) é apresentada a rede de telecomunicações de acordo com a teoria de Grafos.

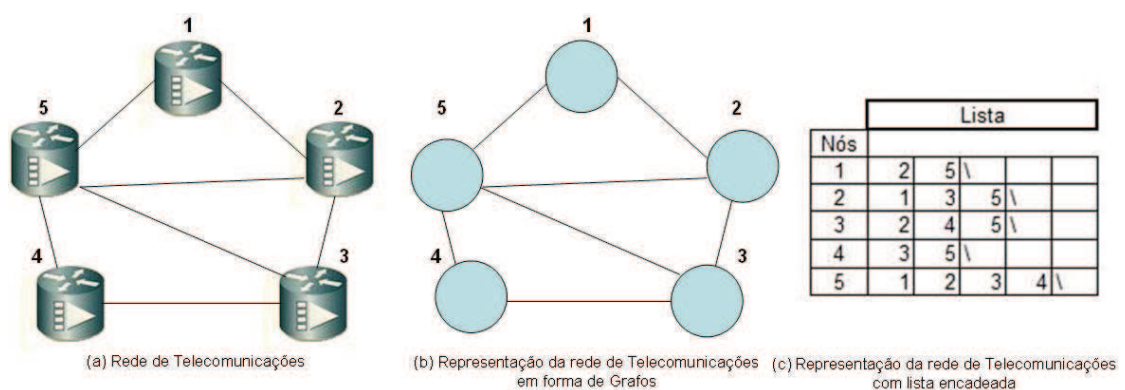


Figura 2.6 – Representação típica, por grafos e lista encadeada de uma rede de telecomunicações.

2.4.1.4 Representação de um Grafo por Vetorização

Esta representação é útil para o caso de grafos esparsos, representado na Figura 2.7(a), ou seja, com poucas arestas. São utilizados 2 vetores para resumir as informações de vizinhança. O vetor SX registra o número de vizinhos do nó correspondente a posição x_i , enquanto o vetor NX os enumera. Essa representação é apresentada na Figura 2.7(b).

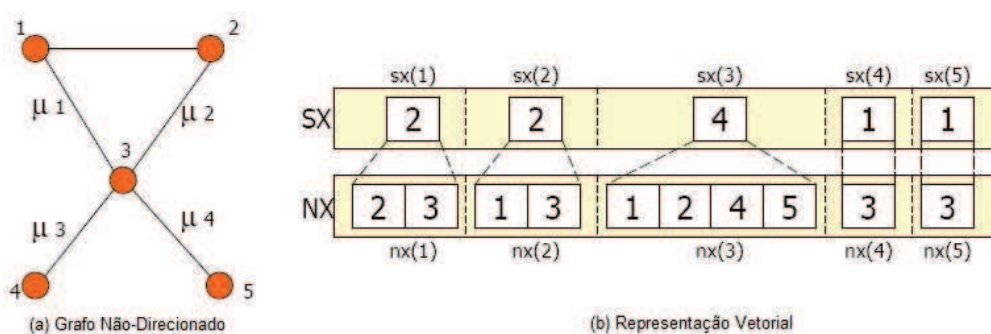


Figura 2.7 – Representação por vetorização de um grafo.

Conforme Ferreira (FERREIRA, 2000), as redes de transportes podem ser representadas da seguinte forma: grafo incidente de nó e arco, grafo nó-nó adjacentes. No grafo incidente de nó e arco, as informações são armazenadas em uma matriz A de dimensões $n \times m$, onde cada linha da matriz corresponde a um nó e cada coluna a um arco da rede. Devido à existência de poucos coeficientes não-nulos em A , este modelo de representação não é o mais adequado. Esse modelo de representação não é capaz de produzir algoritmos eficientes no contexto de projeto de otimização de redes, pois poucos elementos da matriz possuem valores não nulos. Para o grafo nó-nó adjacentes, o armazenamento é feito numa matriz A de dimensões $n \times n$, onde as linhas e as colunas da matriz correspondem aos nós da rede. A implementação de algoritmos de roteamento torna-se uma tarefa fácil devido à simplicidade dessa representação. Contudo, a representação é eficiente se a rede é suficientemente densa. Para redes com elevado grau de esparsidade essa representação não é adequada.

2.5 MÉTODOS DE SOLUÇÃO COMPUTACIONAL

Como um dos objetivos desta dissertação é a utilização do AG, Algoritmo de Dijkstra, e a utilização do conceito de rede fictícia no desenvolvimento de estratégias para realização do planejamento e recomposição em redes de telecomunicações, segue, nas seções seguintes, o resumo das técnicas a serem utilizadas.

2.5.1 Algoritmo Genético

Conforme Goldberg e Luna (GOLDBARG e LUNA, 2000), os algoritmos genéticos (AG) constituem métodos de busca baseados em mecanismos de seleção e evolução natural. Os primeiros trabalhos nessa linha são originados por John Holland e popularizados por um de seus alunos, David Goldberg, e objetivavam replicar os processos utilizados pelos sistemas auto-adaptativos em um contexto computacional. Charles Darwin (HILLIER e LIEBERMAN, 2005), desenvolveu a teoria explicando como o meio ambiente atua sobre os indivíduos, forçando uma seleção dos mais aptos. Somente as contribuições da genética, descobertas por Mendel, permitiram o conhecimento de genes e de mutação, o que possibilitou a explicação do processo evolutivo e as variedades das espécies.

Os objetivos do trabalho de Holland eram fundamentar uma teoria geral de sistemas de adaptação robusta, contudo, foi capaz de encontrar um caminho de grande e imediata aplicação prática na determinação de máximos e mínimos de funções matemáticas. Os AGs fazem parte da computação evolucionária, que possibilita aplicações e possuem as seguintes características gerais:

- Operar em um conjunto de pontos denominado população;
- Operar em um espaço de soluções codificadas ou diretamente no espaço de busca;

- Necessidade somente do valor de uma função objetivo;
- Utilização de transições probabilísticas e não regras determinísticas.

Os termos utilizados pelos AG, são:

- População: conjunto de indivíduos (ex: conjunto de soluções do problema);
- Cromossomo: representa um indivíduo na população (ex: uma configuração ou solução);
- *Fitness*: medida de aptidão de um indivíduo (ex: normalmente associada ao valor da função objetivo para uma dada solução);
- Gene: representa um componente do cromossomo (ex: variável do problema);
- Alelo: descreve os possíveis estados de um atributo do indivíduo (ex: os possíveis valores de uma variável do problema);
- *Locus*: representa a posição do atributo no cromossomo (ex: a posição da componente no vetor de componentes);
- Operadores genéticos: são as regras que permitem a manipulação dos cromossomos, que basicamente são:
 - Seleção: faz com que os indivíduos mais aptos na população tenham algum tipo de prioridade na escolha para reprodução, aumentando a probabilidade de transmitir seu código genético às próximas gerações;
 - *Crossover*: operador que permite a obtenção de indivíduos filhos a partir da combinação ou cruzamento dos cromossomos dos pais;
 - Mutação: permite a produção de um novo indivíduo por alterações diretas no cromossomo pai ou do filho gerado;

- Fenótipo: denota o cromossomo decodificado;
- Genótipo: representa a estrutura do cromossomo codificado;
- *Schema*: é o modelo de representação para uma família de cromossomos. Normalmente é representado por símbolos * dentro do cromossomo.

Bischoff (BISCHOFF, 2009) explica que o algoritmo é inicializado por um conjunto de soluções do problema representado por cromossomos ou por um genoma chamados população, população inicialmente aleatória. O AG, então, evolui com a aplicação de operadores genéticos como seleção, cruzamento e mutação, na busca de encontrar a melhor solução. As melhores soluções de uma população são classificadas formando uma nova base de população. Isto é motivado por um desejo de que a nova população seja melhor do que a anterior. Soluções escolhidas para formar novas soluções são selecionadas de acordo com o menor custo ou melhor aptidão, *fitness* – quanto mais aptos são, mais chances de reproduzir. O critério de escolha da melhor solução se repete até que alguma condição de parada seja satisfeita.

Com o objetivo de demonstrar o funcionamento do AG é apresentado na Figura 2.8 o pseudocódigo do AG simples, que serviu de base para López-Pastor (LÓPEZ-PASTOR, 2007) no desenvolvimento de sua tese.

```

BEGIN /* Algoritmo Genético Simples */
Gerar população inicial e calcular a função de avaliação de cada indivíduo
WHILE NOT Concluído DO
BEGIN /* Produzir nova geração */
FOR Tamanho população/2 DO
BEGIN /*Ciclo Reprodutivo */
Selecionar dois indivíduos da anterior geração para o crossover (probabilidade de seleção
proporcional à função de avaliação do indivíduo)
Cruzamento dos dois indivíduos obtendo dois descendentes
Efetuar mutação dos dois descendentes com certa probabilidade
Calcular a função de avaliação dos dois descendentes mutados
Inserir os dois descendentes mutados na nova geração
END
IF a população tem convergido THEN
Concluído:= TRUE
END
END

```

Figura 2.8 – Pseudocódigo do AG conforme López-Pastor (LÓPEZ-PASTOR, 2007).

No trabalho de Bischoff (BISCHOFF, 2009) é salientado que o AG funciona muito bem em problemas de otimização combinatória misto (e.g. contínuos e discretos). Eles são

menos suscetíveis a ficarem presos em um ótimo local, se comparados com outras técnicas de otimização. Hillier e Lieberman (HILLIER e LIEBERMAN, 2005) salienta que o AG possibilita considerar muitos pontos simultâneos no espaço de pesquisa que garantem uma rápida convergência próxima da solução ótima em muitos tipos de problema; em outras palavras, geralmente exibem uma chance reduzida de convergir para um mínimo local.

Na Figura 2.9 é apresentado o funcionamento do AG e sua capacidade de sair de um máximo local através da mutação e a convergência para um máximo local ou global através do cruzamento.

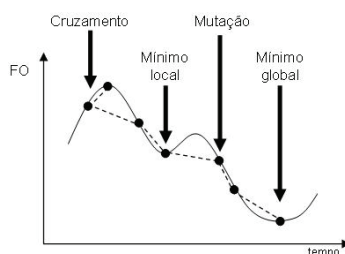


Figura 2.9 – Representa o gr fica dos resultados esperados com o uso de cruzamento e muta o (Modificado BISCHOFF, 2009).

Desta forma, a escolha por AG nesta disserta o se deve ao fato de que em muitos projetos de redes de telecomunica es os problemas s o dificeis de solucionar, conforme Poon (POON *et al.*, 2000). Ao contr rio dos m todos de otimiza o como programa o linear, o AG consegue obter um equil brio entre dois objetivos aparentemente conflitantes: o aproveitamento das melhores solu es, sem causar uma converg ncia prematura, e a explora o do espa o de busca, sem tornar a busca totalmente cega e aleat ria (L PEZ-PASTOR, 2007).

2.5.2 Algoritmo de Dijkstra

Para composi o das estrat gias relacionadas ao planejamento e a verifica o da restaura o da rede de transporte   necess rio a utiliza o de um algoritmo que realiza o caminho mais curto ou *shortest path*. Mencionado por Vasseur (VASSEUR *et al.*, 2004), a implementa o do algoritmo do caminho mais curto em sistemas de telecomunica es  

baseada no algoritmo de Dijkstra, sendo largamente empregado pelos fornecedores de tecnologia.

Conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007), as novas tecnologias de rede de transporte que são baseadas na topologia em malha utilizam o algoritmo de Dijkstra para restauração do tráfego.

O algoritmo de Dijkstra foi proposto por Edsger W. Dijkstra em 1956 e publicado em 1959 para resolver o problema de menor caminho em grafos. Na busca de custo uniforme, cada nó é explorado e é associado a um custo e sempre o nó de menor custo total acumulado até o momento é escolhido para continuar a exploração. A busca de custo uniforme também garante que a solução seja encontrada e que esta solução seja ótima, caso não haja custos negativos.

O objetivo de obter o caminho mais curto é a capacidade de medir o comprimento do caminho através de métricas, tais como distâncias geográficas, envolvimento dos custos operacionais, priorização na alocação de recursos na rede com redundância, garantia do SLA, entre outros fatores determinantes para uma operadora de telecomunicações.

Em Oliveira (OLIVEIRA et al., 2007) é dito que esse algoritmo aproveita a maturidade onde foi desenvolvido e testado ao longo dos anos por instituições de pesquisa e operadoras de serviços, mantendo-se também certo grau de interoperabilidade entre as camadas que compõem a rede de transporte.

Todos os algoritmos para determinação do caminho mais curto dependem da observação de que se o nó k é parte do caminho mais curto entre dois nós i e j , então o caminho mais curto entre i e j deve ser igual ao mínimo da soma dos caminhos entre os nós i e k e os nós k e j . Conforme Ferreira (FERREIRA, 2000), matematicamente tem-se:

$$d_{ij} = \min_k (d_{ik} + d_{kj}) . \quad (2)$$

O algoritmo de Dijkstra encontra o menor caminho entre quaisquer dois nós da rede, quando todos os arcos têm comprimento não-negativos. O algoritmo utiliza um procedimento iterativo e assim sucessivamente até que em alguma iteração o nó n seja atingido

(ARENALES *et al.*, 2007). Com o objetivo de demonstrar o funcionamento do algoritmo, na Figura 2.10 é apresentado o pseudocódigo, conforme Arenales (ARENALES *et al.*, 2007).

Dados:	
$G(N,E)$: Grafo em que $N = \{1, 2, \dots, n\}$
1	: nó inicial
n	: nó final do caminho
$c(i,j)$: comprimento do arco $(i,j) \in E$ (hipótese: $c(i,j) \geq 0$)
Saída:	
$D(n)$: menor distância do nó 1 ao nó n
C	: caminho mínimo entre o nó 1 e o nó n
Passo 1: Início	
$R = \{1\}$: inicialmente o nó 1 é rotulado
$NR = \{2, \dots, n\}$: os demais nós não são rotulados
$d(1) = 0$: a distância do nó 1 ao nó 1 é zero
$p(1) = 0$: o nó 1 é o inicial
Para $i \in NR$,	
$d(i) = +\infty$: a distância do nó 1 aos nós não rotulados é $+\infty$
$p(i) = n+1$: o nó i não tem predecessor
$a = 1$: último nó incluído em R
Passo 2:	
Para todo $i \in NR$, determine $d(i) = \text{mínimo} \{d(i), d(a) + c(a,i)\}$ e faça $p(i) = a$, caso $d(i) = d(a) + c(a,i)$.	
Se $d(i) = +\infty$ para todo $i \in NR$, então pare {não existe caminho de 1 a qualquer um dos nós em NR}.	
Se não, determine $k \in NR$ tal que $d(k) = \text{mínimo} \{d(i), i \in NR\}$. Exclua o nó k de NR (isto é, $NR \leftarrow NR - \{k\}$) e inclua-o em R (isto é, $R \leftarrow R \cup \{k\}$) e faça $a = k$.	
Passo 3:	
Se $a = n$, então recupere o caminho mínimo C a partir dos valores armazenados em $p(\cdot)$, iniciando por $k_1 = p(n)$, em seguida, $k_2 = p(k_1)$, até que o nó 1 seja atingido. Se não (isto é, $a \neq n$), retorne ao Passo 2.	

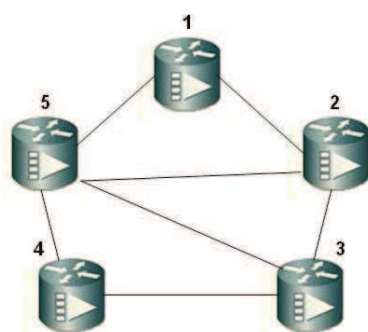
Figura 2.10 – Pseudocódigo do algoritmo de Dijkstra conforme Arenales (ARENALES *et al.*, 2007).

2.5.3 Conceitos de Rede Fictícia

Com intuito de resolver sistemas desconexos no planejamento de redes, especificamente redes de energia elétrica, Monticelli (MONTICELLI *et al.*, 1982) apresenta o conceito de rede fictícia, pois os modelos para o cálculo do fluxo de potência não podem ser facilmente aplicados em tais situações, desde que a matriz de admitância seja singular. Para

solucionar esse problema, Monticelli utiliza o conceito de superposição de redes, ou seja, é definida uma rede fictícia idêntica à rede atual para realização de análise. Canto dos Santos (CANTO DOS SANTOS *et al.*, 2004) apresenta, em seu artigo, a utilização do conceito de rede fictícia na recomposição em sistemas de energia elétrica, pois a rede fictícia possibilita que cada arco do sistema, que está fora de operação seja substituído por um arco fictício com impedância artificialmente elevada, possibilitando que a rede seja sempre conexa, não havendo matrizes singulares nas soluções do problema $Ax = b$, além de permitir a verificação de caminhos por onde há necessidade de fluxo de potência.

Com o intuito de demonstrar o conceito de rede fictícia aplicado em rede de telecomunicações, que servirá para o desenvolvimento da estratégia a ser apresentada no capítulo 4, seguem abaixo as devidas explicações para a utilização do conceito. Inicialmente, como descrito na seção 2.4.1.1, a rede de telecomunicações necessita de uma representação matricial para resolução do problema de forma computacional. Desta forma, na Figura 2.11(a) segue a apresentação da rede através de grafos e na Figura 2.11(b) a forma matricial.



(a) Rede de telecomunicações real

		Nós				
		1	2	3	4	5
N ó s	1	0	1	0	0	1
	2	1	0	1	0	1
	3	0	1	0	1	1
	4	0	0	1	0	1
	5	1	1	1	1	0

(b) Representação da rede de telecomunicações com matriz de adjacência

Figura 2.11 – Representação da rede de telecomunicações através de grafos e matriz de adjacência.

Como apresentado por Monticelli (MONTICELLI *et al.*, 1982) e Canto dos Santos (CANTO DOS SANTOS *et al.*, 2004), é realizada a superposição de redes, ou seja, é definida a rede fictícia idêntica à rede atual, conforme demonstrado na Figura 2.12(a) pela linha tracejada. É importante salientar que os arcos devem apresentar valores elevados (e.g. 10^4). Para a realização de cálculos computacionais, na Figura 2.12(c) é apresentada a rede fictícia de forma matricial, conforme a matriz de adjacência da rede real apresentada na Figura 2.12(b).

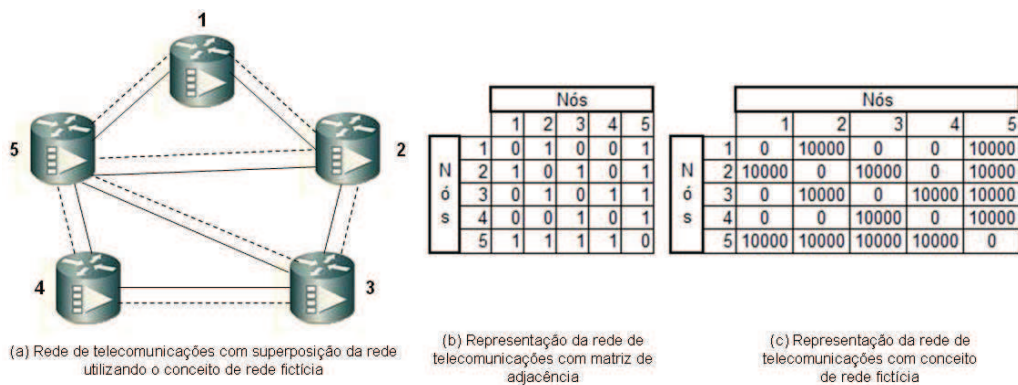


Figura 2.12 – Representação do conceito de rede fictícia na modelagem da rede.

A rede fictícia torna funcional qualquer procedimento que envolve operações matemáticas com matrizes. Com o objetivo de demonstrar tal funcionalidade, se vê na Figura 2.13(a) a ocorrência de uma falha entre os nós 5 e 2. Com a ocorrência da falha será necessária a consideração do valor da rede fictícia entre os nós 5 e 2, conforme demonstrado na Figura 2.12(c) para atualização da matriz de adjacência do problema. Na Figura 2.13(b) é apresentada a matriz de adjacência com os novos valores, possibilitando a realização de estudo e cálculo para elaboração da estratégia na análise da recomposição da rede.

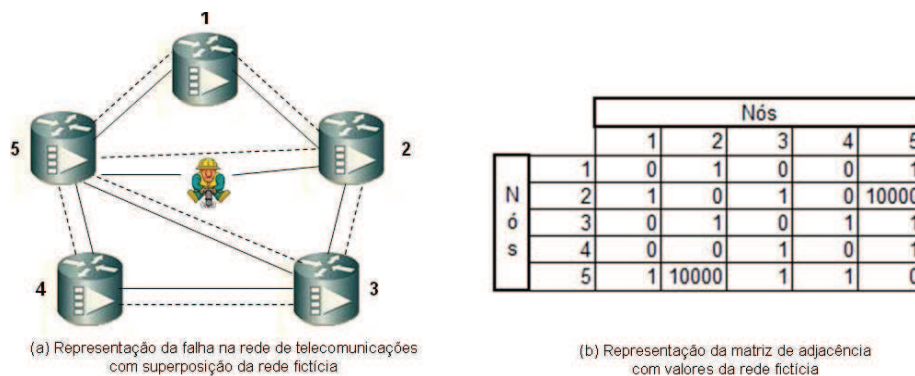


Figura 2.13 – Aplicação do conceito de rede fictícia em redes de telecomunicações.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será abordado inicialmente o plano de controle em redes ASON, pois o mesmo constitui a abstração entre a interface homem-máquina (sistema de gerência e equipamentos), possibilitando a implementação de métodos que visam futuras estratégias aplicadas ao planejamento e estudo na recomposição da rede de transporte. Em seguida, será realizada a análise de trabalhos relacionados, que serviram de base e de apoio no desenvolvimento da estratégia proposta no capítulo 4, focando especificamente a otimização e a resiliência³ da rede e a revisão de outros métodos também utilizados para otimizar recursos da rede. Finalmente, uma breve revisão sobre programação linear, pois tal técnica foi precursora no estudo de problemas que envolvem otimização, bem como a definição da classe do problema que envolve redes de telecomunicações.

3.1 PLANO DE CONTROLE EM REDES ASON

Conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007), outro ponto de visão sobre a rede de transporte é dado pela sua decomposição em três camadas lógicas: plano de transporte, plano de gerenciamento e plano de controle. O plano de transporte define a arquitetura da rede baseada na interligação física e lógica dos equipamentos envolvidos (ex: SDH através da G.803 e OTN através da G.872). O plano de gerenciamento também está organizado em camadas e tem como objetivo o gerenciamento da rede. O plano de controle ou sinalização tem como objetivo atender ao estabelecimento dinâmico de conexões com ou sem auxílio do plano de gerenciamento.

³ Resiliência ganhou um papel crítico na concepção de redes em telecomunicações, pois trata da capacidade de sobrevivência da mesma, ou seja, é a capacidade de recuperação do tráfego provocado por falhas uma vez que é crescente a concentração de mais tráfego em menos elementos de rede (DEMEESTER *et al.*, 1999).

Na tese de López-Pastor (LÓPEZ-PASTOR, 2007) o mesmo salienta que ASON não é um conjunto de protocolos, e sim uma arquitetura que define os componentes num plano de controle e as interações entre esses componentes. Na arquitetura de referência do modelo ASON, o plano de controle inclui as funcionalidades de descoberta da rede de forma automática, fatores de manutenção da topologia, aprovisionamento rápido e a restauração dos circuitos em redes compostas pela estrutura em malha.

De acordo com Oliveira (OLIVEIRA *et al.*, 2007) o plano de controle é a “inteligência” da rede óptica. Essa inteligência encontra-se distribuída na rede, nos controladores de conexão óptica (*Optical Network Controller – ONC*) e é realizada através de protocolos de sinalização e algoritmo de roteamento.

A atual preocupação das entidades de normatização, ITU-T, IETF e OIF, a respeito da rede de transporte, são as definições do plano de controle, que serão as maiores direcionadoras da evolução desta rede. Segundo Garcia (GARCIA, 2009), o plano de controle é responsável pela alocação, configuração e a manutenção dos recursos contidos no plano de transporte, ou seja, o recursos físicos dos NE.

Os recursos contidos no plano de transporte são responsáveis pelo estabelecimento das conexões orientadas por circuito ou pacotes, estabelecendo a comercialização dos serviços prestados pelas operadoras. Para que ocorra o estabelecimento de conexões na rede é necessária a utilização de algoritmos de roteamentos que visam à busca pelo melhor caminho, seja ele definido pela menor distância, custo ou tempo, possibilitando o aprovisionamento adequado do circuito na rede, bem como um caminho alternativo em caso de falha.

3.2 OTIMIZAÇÃO EM REDES DE TELECOMUNICAÇÕES

3.2.1 Planejamento Em Redes De Telecomunicações

Riedl (RIEDL, 1998), apresenta a utilização do AG aplicado ao problema da solução ótima para redes no planejamento de redes de comunicações, mais especificamente rede de transporte IP e ATM, com o objetivo de minimizar os custos na utilização dos dutos de fibra óptica. Nguyen (NGUYEN, 2009) comenta que o planejamento de redes é a arte de combinar a infraestrutura da rede e as estratégias operacionais para satisfazer a demanda de tráfego corretamente.

No trabalho de Ferreira (FERREIRA, 2000) é proposto o planejamento da rede de telecomunicações com a utilização de AG e Dijkstra para rede de transporte SDH com topologia em anel, visando à satisfação de todas as exigências de tráfegos de dados entre as estações⁴ envolvidas na análise do custo mínimo, baseado em árvore para solução de três tipos de problemas: (i) construção da topologia em árvore de custo mínimo na interligação para o problema específico de sintetização de rede, (ii) informar ao administrador de redes a melhor forma de redistribuir os circuitos entre as estações e (iii) o roteamento de todos os circuitos SDH entre as estações origem-destino. Para o valor de $n=10$, $n^{n-2} = 10^8$, existirão, portanto, cem milhões de possibilidades, necessitando de um algoritmo suficientemente estruturado com capacidade de buscar a solução ótima. Para isso as informações requeridas são o tráfego entre cada par de estações origem-destino e a função linear para transportar o tráfego sobre cada possível enlace entre os nós i e j . Com a utilização de algoritmo genético é realizada a geração de topologias de redes em árvore, dando origem à matriz de conectividade. O próximo passo é a avaliação para determinar os valores da variável de otimização e permitir a avaliação da função objetivo juntamente com o conjunto de restrições. Com o intuito de preservar o modelo da rede são utilizadas restrições, que estabelecem o

⁴ Estações são locais com infraestrutura suficiente, tais como: energia elétrica, sistema de no-break, climatização, e segurança para comportar todos os tipos de equipamentos utilizados pelas redes de telecomunicações.

fluxo da rede de acordo com as equações de conservação de Kirchoff. Outro fator importante a ser considerado são as instâncias, onde é necessário estabelecer a matriz de demanda entre estações, a matriz custo, o número total de estações e a matriz contendo os fluxos totais máximos permitidos nos enlaces. O autor salienta que a solução ótima global não é garantida, porém em seus experimentos obteve ótimos resultados.

Na dissertação de Stainer (STAINER, 2004) é proposto o planejamento de redes WDM com proteção para caminhos ópticos, sendo essa a camada responsável pela ampliação de canais de transmissão junto a rotas de fibra óptica. Esse modelo é importante como referência bibliográfica, pois trata do dimensionamento do tráfego, a utilização da programação inteira mista com formulações nó-arco e arco-caminho. A primeira formulação é expandida para incorporar a capacidade de proteção compartilhada. Neste trabalho é possível a verificação da ocupação dos arcos, possibilitando a minimização da carga e o melhor aproveitamento dos canais disponíveis na rede.

Na dissertação de Guiotti (GUIOTTI, 2007) é apresentado o algoritmo de Dijkstra, na busca da melhor alocação dos recursos para implementação da rede ASON, como o responsável pelo planejamento. Sem a ferramenta computacional o operador de rede pode levar horas para selecionar um caminho disponível, pois além de buscar o menor caminho, ainda deve verificar a disponibilidade de vias. Esse algoritmo foi aplicado a uma rede de 1.014 circuitos estruturados em VC⁵-12, que utilizam 33 redes SDH com a topologia em anel e com taxa de transmissão de 2,5Gbps e 10Gbps. Além disso, as redes analisadas contem 458 equipamentos, 195 seções de multiplexação, 274 interligações de equipamentos intra-estações e 2.960 *trails*⁶ estruturados em VC-4, resultando em 1755 arcos também estruturados em VC-4 e 1435 interligações entre equipamentos. Com o intuito de teste foram selecionados os circuitos que ocupam mais de 5 arcos e interconexões de equipamentos, resultando em 153 circuitos. Após a aplicação do Algoritmo proposto houve o ganho de 105 *trails* estruturados em VC-4. Após a realização da otimização dos circuitos em um caso real, existentes em uma operadora de telecomunicações, o resultado trouxe a readequação do tráfego e a redução dos pontos de gargalos na rede. Além de aprofundar a discussão sobre a viabilidade técnica fornecida pela rede de transporte e a elaboração de ações, no sentido de alcançar excelência na administração da rede por uma operadora de telecomunicações.

⁵ *Virtual Contêiner* é o compartilhamento responsável pelo transporte de informações na etapa de multiplexação e demultiplexação do tráfego dentro da estrutura SDH

⁶ *Trails* são circuitos ponto a ponto estruturados em VC-4 na rede SDH.

O problema de projetar redes de transportes com topologias em anéis pode ser descrito em três partes: roteamento, atribuição da capacidade do enlace e a determinação da topologia. Para resolver o problema de procura da solução ótima, White (WHITE *et al.*, 1999) apresenta em seu artigo o algoritmo genético que através da função *fitness* é incluído o custo do roteamento do tráfego ao longo de *trails* específicos, o custo de prover um link particular com determinada largura de banda e o custo presente na rede para formação de topologias em anel. E na utilização do AG, foi utilizada a permutação para realização da convergência da topologia em anel e os operadores de mutação e *crossover* foram modificados para obter um melhor desempenho no tratamento de problemas que envolvem transversalidade em grafos.

No artigo de Konak e Smith (KONAK e SMITH, 1999) é apresentado um modelo híbrido, formado pela utilização do AG e o algoritmo de busca local, com o objetivo de realizar o planejamento de redes de comunicações. O algoritmo híbrido desenvolvido permite a procura por soluções ótimas, com a finalidade de reduzir os custos responsáveis pelo planejamento *versus* custos operacionais sobre o aspecto e considerações quanto ao desempenho e sobrevivência da rede. O resultado é a capacidade do algoritmo de prover boas soluções globais para o problema de planejamento de *Backbones*⁷.

No artigo de Poon (POON *et al.*, 2000), publicado na *British Telecom Technology Journals* (BT), é apresentado o sucesso da aplicação do algoritmo genético no desenvolvimento de projetos e planejamento de redes de telecomunicações, dentro de uma das maiores operadoras de telecomunicações do mundo, mais especificamente na busca pela solução ótima ou valor aproximado, na obtenção da infraestrutura com o menor custo e respeitando as restrições referentes ao atendimento da demanda do tráfego, conforme o posicionamento dos cabos ópticos e os centros de feixes (CF) em função da localização dos clientes. A aplicação do AG consiste na escolha do sistema de codificação da informação referente à rede, a avaliação do *fitness*, a seleção dos cromossomos, a realização do *crossover* e a realização da mutação dentro de um determinado espaço de procura da solução, sendo o problema de características com custo não-linear e restrições impostas pela distribuição da rede pelos CF.

⁷ *Backbones*, traduzindo para português como espinha dorsal, é a designação do esquema de ligações centrais de um sistema mais amplo, tipicamente de elevado desempenho (Wikipédia, 2010).

Em Bassam (BASSAM *et al.*, 2006) é apresentado um tutorial para realização de projetos de redes usando algoritmo genético. No tutorial é apresentado o AG com a utilização de dois importantes critérios, sendo o primeiro a minimização do comprimento entre os enlaces e o segundo a minimização do fluxo do tráfego uma vez conhecida a capacidade de transporte do enlace. Esses critérios auxiliam no desenvolvimento de topologias de rede com estrutura em malha, ou seja, *mesh network*. A primeira medida é responsável pela redução do custo na passagem de cabos, enquanto que a segunda é responsável pela medida do custo nos enlaces, conforme a ocupação do enlace. Neste tutorial é apresentado em quatro etapas o princípio de genética aplicado a redes de comunicações, sendo: (i) apresentação dos princípios básicos no planejamento de redes, (ii) apresentação dos requerimentos de projetos, (iii) modelagem dos projetos de redes com a utilização do algoritmo genético canônico, (iv) avaliação da rede quanto à tolerância à falha.

No trabalho de Amorim (AMORIM, 2006) são apresentados os problemas de programação inteira em redes ópticas de telecomunicações, impulsionadas pelo crescimento do mercado corporativo e pela prestação de serviços para grandes clientes. Nesse cenário foram utilizados dois modelos de programação inteira, visando à minimização de custos. O primeiro para o problema de planejamento de redes e o segundo visando à solução ótima das configurações de *trails*, nas redes SDH.

Em Piqueira (PIQUEIRA, 2008) é apresentada a metodologia do uso de programação inteira mista e modelo heurístico, para migração de uma rede convencional de transporte composta por rede óptica e SDH para arquitetura ASON. Esse modelo apresenta facilidades de operação, robustez e novos desafios aos projetistas. Além disso, permite a avaliação do impacto se e somente se ocorrerem dupla falha na topologia com o menor custo possível e utilização de métodos de proteção em malha, justificando a necessidade do auxílio computacional para realização dos cálculos envolvidos.

Em Oliveira Lima (OLIVEIRA LIMA *et al.*, 2009) é apresentada uma nova formulação com o uso de programação linear inteira mista para elaboração de um modelo eficiente, focado em projetos para redes ópticas. Tal estratégia possibilita uma modelagem ampla, que engloba o projeto da topologia da rede, o roteamento das demandas de tráfego, além do roteamento dos caminhos ópticos e a alocação de comprimentos de onda. O modelo utiliza a minimização do número de saltos físicos como função objetivo.

Em um dos modelos apresentados por Goldberg e Luna (GOLDBARG e LUNA, 2000), para o tratamento de projeto de redes, pode-se utilizar a modelagem do Fluxo de Redes, onde em muitas ocasiões é interessante considerar o equilíbrio de fluxo associado a um vetor de oferta ou de demanda em cada nó. Podendo ser reescrito como:

“Fluxo que chega ao vértice + Fluxo produzido no vértice = Fluxo que sai do vértice + Fluxo consumido no vértice”

Tendo a formulação geral, onde d_i corresponde ao balanço final entre o que é produzido e consumido dentro de cada nó, dada por:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_{(i,j) \in E} x_{ij} - \sum_{(k,i) \in E} x_{ij} = d_i, \quad i = 1, \dots, n; \quad (3)$$

$$l_{ij} \leq x_{ij} \leq L_{ij}; \quad \forall (i, j) \in E. \quad (4)$$

Em Iryanto (IRYANTO, 1998) o problema de otimização de circuitos em redes de comunicações é tratado com o uso de algoritmo genético e Programação Linear com o objetivo de minimizar o fluxo pela rede. A implementação da solução é realizada em dois estágios, sendo o primeiro a geração aproximada da topologia da rede com o uso do algoritmo genético. Ele por si só não consegue gerar bons resultados, sendo assim o próximo estágio é a utilização de Programação Linear na otimização dos fluxos da rede, considerando o fluxo máximo por arco, grau de serviço, a capacidade máxima por nó e a necessidade de redundância, possibilitando a diversidade de proteção do tráfego em caso de falha.

Em Bergamaschi (BERGAMASCHI, 2001) é apresentada a criação de um novo modelo matemático, que representa os problemas referentes às várias etapas de planejamento de redes de transportes que utilizam a tecnologia SDH. Neste novo modelo, são utilizados métodos exatos e heurísticos, responsáveis pela avaliação do tráfego local de cada Centro de Feixe (CF), possibilitando o agrupamento do fluxo de tráfego e, por consequência, a elaboração de uma rede de transporte para interligação dos CFs em forma de clusterização. Porém, é necessário o conhecimento da matriz de demanda entre os CFs, o levantamento dos custos, a capacidade dos equipamentos de transmissão e a pontualização do tipo de topologia.

Para cada candidato é calculado o fluxo máximo com possibilidade de ser escoado pelo arco. Este fluxo é obtido pela soma das demandas que utilizam este arco como rota. Essa condição é necessária para avaliação da ocupação, pois ela será somada apenas uma vez e a taxa de transmissão mais alta para o enlace será suficientemente capaz de escoar o fluxo. Devido ao caráter exponencial dos problemas que envolvem otimização em redes de transportes, o autor apresenta a dificuldade do tratamento computacional com o recurso de Programação Linear Inteira Mista, na manipulação de um grande número de variáveis inteiras.

Em Waldman (WALDMAN *et al.*, 2009) é realizado o dimensionamento de tráfegos em redes ópticas WDM estáticas, utilizando projetos de topologia virtual. Para essa análise foram aplicados métodos heurísticos em busca do dimensionamento do tráfego atual e futuro em função da capacidade de canal C da rede. Os resultados obtidos sugerem a possibilidade de dimensionar a rede para um tráfego futuro, sem configuração de caminhos ópticos, desde que a capacidade adequada seja estabelecida na fase de planejamento. O método utilizado foi aplicado na formulação da Programação Linear Inteira Mista na busca da solução ótima da topologia virtual, proposta por Ramaswamy (RAMASWAMY, 1996). Para dimensionamento do tráfego atual e futuro foram realizadas alterações na proposta anterior. Com o objetivo de atender à demanda atual e à demanda futura, com o recurso disponível, foram utilizadas duas heurísticas de maximização de atendimento do tráfego.

Em López-Pastor (LÓPEZ-PASTOR, 2007) são apresentados a criação, o desenvolvimento e a aplicação de um novo algoritmo híbrido, que utiliza o recurso de heurística e algoritmo genético para a otimização dos mecanismos de alocação de rota e comprimento de onda em redes WDM. De forma dinâmica, visando à sobrevivência e à orientação da alocação da reserva na capacidade da rede, baseado em compartilhamento de rotas de proteção aplicados diretamente em redes de transportes IP sobre WDM.

Routray (ROUTRAY *et al.*, 2007) em seu artigo, alega que não há um algoritmo específico que garanta a solução ótima devido ao número de restrições impostas para cada problema envolvendo a otimização das redes de transportes. Em seu artigo, o autor utiliza o AG para otimização dos recursos físicos (ex: dutos de fibra óptica, localização das estações e equipamentos) no planejamento de redes de transportes, mais especificamente em *Backbones* ATM, com o objetivo de obter a rede com o menor custo, considerando as implicações financeiras e estratégias operacionais como obstáculos para prover os serviços de

telecomunicações. A utilização do AG é descrita com a seguinte estrutura: codificação, inicialização, evolução, reprodução, *crossover*, mutação e critério de parada, possibilitando ao projetista de rede o estudo de caso para vários cenários.

3.2.2 Recomposição Em Redes De Telecomunicações

Guiotti (GUIOTTI, 2007), em seu trabalho, apresenta a preocupação de garantir a resiliência da rede de transporte conforme seu dimensionamento, pois é necessário garantir, no melhor caso, nenhuma perda de tráfego, ou no pior, a perda mínima de tráfego. Por isso é necessária a otimização dos circuitos, *trails*, que utilizam a rede de transporte para tráfego de dados pela rede de telecomunicações.

Jun e Huiyou (JUN e HUIYOU, 2009) apresentam um novo algoritmo baseado em *Particle Swarm Optimization* (PSO), onde há convergência para solução ótima local facilmente. O algoritmo utiliza o operador de mutação do algoritmo genético fazendo com que o PSO melhore a solução do problema de restauração da capacidade. Para formulação do problema, inicialmente são modelados todos os parâmetros da rede, desde o custo do enlace até sua capacidade, necessitando de restrições no modelo que possibilitem a requisição de novos enlaces em caso de falha. O algoritmo tem como função objetivo a minimização do custo em função da ocupação dos enlaces por cada comprimento de onda, pertencente à rede óptica.

3.3 OUTROS MÉTODOS

Em Luo (LUO *et al.*, 2009) são apresentados três novos algoritmos de roteamento para arquitetura hierárquica ASON: o *Multi Layer Least Loaded Routing Algorithm* (MLLR), *Multi Layer Least Congestion Algorithm* (MLCR) e *Multi Layer Routing Algorithms based on*

backtracking (MROB). A utilização desses três algoritmos possibilita a coordenação dos recursos e balanceamento da rede composta por multicamadas e multidomínio, suportando a otimização de roteamento. Os dois primeiros algoritmos utilizam o método de carga de balanceamento e o terceiro utiliza métodos heurísticos como foco para aproximação de valores. Como a rede é representada por um grafo orientado, é constituída uma tabela contendo cada roteamento por área em cada camada, da mais inferior à última, possibilitando, desta forma, a formação de um vetor com todas as alternativas de rotas da Origem ao Destino. No MLLR é realizada a busca do menor caminho de apenas uma camada, no MLCR é realizada a busca pela melhor rota que possui a menor ocupação do *payload*. Para o algoritmo MROB fica a responsabilidade de realizar a exploração do menor caminho entre todas as camadas, através de heurística com mecanismo de rastreamento reverso. A grande vantagem é a possibilidade de realizar a simulação com vários domínios de rede.

Em Carvalho (CARVALHO *et al.*, 2009) é apresentado um *framework* baseado na metaheurística *Ant Colony Optimization* (ACO), que tem como objetivo a otimização dos circuitos pertencentes à rede (da melhor maneira). Conforme o autor, o algoritmo ACO pode eficientemente resolver problemas de roteamento em redes de telecomunicações com alta qualidade, porém não garante soluções num curto prazo de tempo. Primeiramente, o ACO é aplicado no roteamento dos circuitos na rede de acordo com o planejamento realizado pela operadora de telecomunicações. Desta forma é possível a avaliação e sinalização dos pontos de congestionamentos da rede. Para realização da otimização é verificado o status dos feromônios em cada nó, possibilitando a atualização de cada nó sobre sua capacidade de escoamento do tráfego. Esse processo é realizado nó a nó, possibilitando a criação de um novo caminho da origem até o destino.

Em Costa (COSTA *et al.*, 2009) é proposta uma nova política ótima que maximiza o número médio de canais utilizados no anel, através do processo markoviano de decisão (MDP) para cada nó, realizando a interação nó a nó. Desta forma é possível a alocação dinâmica de comprimentos de onda em redes ópticas, considerando um anel óptico unidirecional com quatro nós e tráfego homogêneo entre os diferentes pares origem-destino. Para cada estado é definido um conjunto de valores a variável *ev* correspondente ao último evento ocorrido no sistema. Para cada estado são apresentados dois valores, chegada ou término. Para finalizar o MDP é necessária a definição de uma função de retorno, que corresponde ao número de chamadas sendo transitadas no estado corrente.

3.4 PROGRAMAÇÃO LINEAR

A programação linear (PL), subitem da programação matemática, é utilizada em pesquisa operacional para desenvolver modelos de otimização que permitam alocar recursos escassos ou limitados a atividades concorrentes, visando maximizar, ou minimizar, um determinado objetivo, como lucro, custo ou fluxo (LACHTERMACHER, 2002).

Os modelos de programação Linear conforme Goldberg e Luna (GOLDBARG e LUNA, 2000) e Hillier e Lieberman (HILLIER e LIEBERMAN, 2005) são implementados por meio da elaboração de sistemas lineares, constituídos de um conjunto de equações e inequações que descrevem as restrições do sistema real em estudo e uma equação para descrever a função objetivo, que expressa o parâmetro a ser maximizado ou minimizado. Em seu trabalho, Piqueira (PIQUEIRA, 2008) utilizou a variação do problema geral de otimização como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x) \\ & \text{Sujeito a: } g(x) \geq 0 & (4) \\ & H(x) = 0 & (5) \\ & x \in \mathfrak{R}_+^n & (6) \end{aligned}$$

onde $f: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ é a função objetivo, $g: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^p$ e $h: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^p$ são restrições que limitam o espaço de soluções factíveis, e x é o vetor das variáveis de decisão.

4 PROBLEMA ALVO E MÉTODO PROPOSTO

Neste capítulo, é enfatizado o problema da recomposição das redes de transportes utilizadas por empresas de telecomunicações, ou seja, um problema real caracterizado pela explosão combinatória das soluções possíveis, necessitando de conhecimento prévio sobre a sobrevivência da rede dado as falhas relatadas por Heegaard e Trivedi (HEEGAARD e TRIVEDI, 2009). Com o objetivo de amenizar problemas futuros com a rede é necessário obter o conhecimento sobre a rede previamente na realização do planejamento. Na etapa do planejamento, um dos objetivos é a obtenção da solução ótima ou valor aproximado da topologia de rede que possibilite a sobrevivência da rede com o menor impacto na perda de tráfego. Desta forma são apresentados, nas seções seguintes, o problema enfocado e o método proposto para elaboração de topologias de rede e o estudo da recomposição em caso de falhas. O método proposto está baseado na elaboração de uma estratégia que utiliza recursos heurísticos na solução.

4.1 PROBLEMA ALVO

Com o crescimento da demanda do tráfego impulsionado pela comercialização e utilização dos recursos de acesso a *Internet* por banda larga móvel ou fixa, telefonia celular e serviços de dados para transmissão de mídias em tempo real, tais como: operações bancárias, financeiras e telemedicina ofertados pelas empresas de telecomunicações, as operadoras necessitam implementar mecanismos que agreguem confiabilidade e possibilitem o estudo da sobrevivência da rede.

A sobrevivência da rede é a capacidade do sistema fornecer continuamente os serviços em conformidade com os requisitos indicados na presença de falhas e outros eventos

indesejáveis conforme Heegaard e Trivedi (HEEGAARD e TRIVEDI, 2009). Conforme López-Pastor (LÓPEZ-PASTOR, 2007), o conceito de sobrevivência se refere à capacidade da rede transferir o serviço interrompido sobre a capacidade reserva presente na rede para restabelecer a contingência de falha. Pois a confiabilidade do serviço fornecido está relacionada com a sobrevivência. Desta forma, o dever de manter o nível aceitável de serviço quando a ocorrência de falha é um dos maiores desafios às operadoras de redes de telecomunicações. Pois o nível de serviço está associado com o sistema de proteção e restauração durante o estabelecimento do caminho.

Com o objetivo de buscar uma padronização no tratamento da falha, Guiotti (GUIOTTI, 2007) sinaliza que o sistema de recuperação de falha na rede seja classificado em sistemas de proteção e de restauração conforme Figura 4.1.

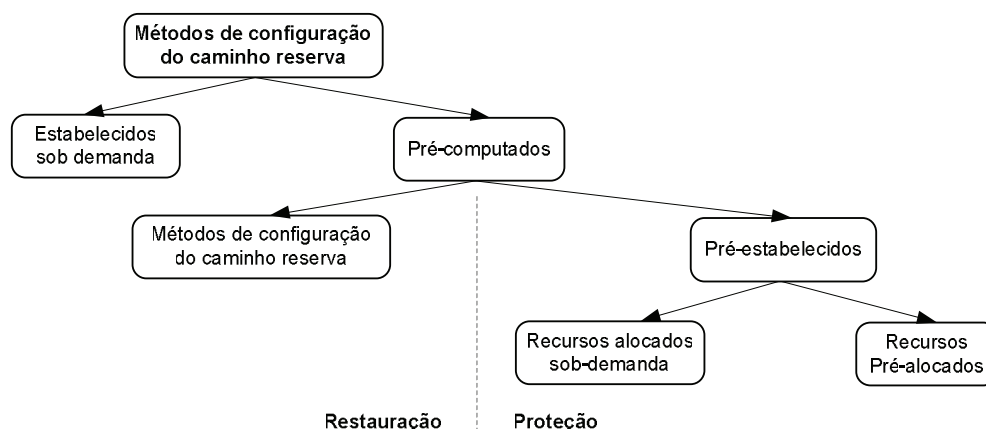


Figura 4.1 – Representação dos métodos de configuração do caminho reserva em rede de transporte conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007).

De acordo com a norma ITU-T G.841, os anéis SDH incorporam mecanismos de proteção que detectam falhas e rapidamente comutam o tráfego pelos canais reserva (AMORIM, 2006). O recurso reserva de proteção pode ser dedicado, onde cada caminho criado possui seu par de proteção pelo complemento do anel ou podem ser compartilhados, com reuso de recurso de *payload* (LÓPEZ-PASTOR, 2007). Os métodos de uso dos recursos reservas são apresentados conforme Figura 4.2.



Figura 4.2 – Representação do uso dos recursos de reservas em rede de transporte conforme Guiotti (GUIOTTI, 2007).

O esquema de proteção é derivado do protocolo para proteção por comutação automática (APS) padronizado pela norma ITU-T G.841, referente à rede de transporte com arquitetura SDH. É extremamente importante salientar a confiabilidade, interoperabilidade e velocidade de comutação para o sistema de proteção, com valor menor ou igual a 50 milissegundos (ms). Estes foram os principais motivos pelos quais as topologias em anéis foram preferencialmente implementadas em todas as redes.

Para o sistema de restauração, o seu início se deve aos protocolos de *Internet* onde os caminhos são calculados sob demanda. A flexibilidade de administração de recursos reserva e de tráfego, em conjunto com a padronização de protocolos para redes ASTN/ASON, indicam forte tendência de migração das topologias de rede de transporte de anéis para topologias em malha. Estas permitem resiliência a múltiplas falhas dependendo apenas de caminhos e capacidades disponíveis.

A arquitetura da rede ASON permite o controle centralizado ou distribuído conforme norma ITU-T G.7715 (2002), e também vários esquemas de proteção e de restauração além das variações de número de falhas suportadas.

Para redes ASON, a proteção através de um caminho reserva, que é pré-estabelecido para ser usado tão logo seja detectada uma falha na rede, apresenta a vantagem do tempo de comutação do caminho principal e a desvantagem na alocação de recursos na rede. No caso de constituição de um novo caminho tão logo seja detectada a falha na rede é definido como caso de restauração, apresentando a vantagem de requerer menos recursos da rede e a desvantagem de apresentar um tempo de estabelecimento muito superior à proteção, podendo chegar a segundos.

Como um dos objetivos deste trabalho é o estudo da atuação dos mecanismos de recomposição na rede ASON conforme processo de restauração apresentados na norma ITU-T (ITU-T, 2001) e por Piqueira (PIQUEIRA, 2008), a restauração distribuída pode ser subdividida em três categorias:

- **Reparo Global:** o reparo é feito pelo elemento de rede que iniciou o caminho óptico. Na Figura 4.3, o cliente A estava se comunicando com o cliente B através do caminho ABCG estabelecido pelo NE terminal A quando houve uma falha no enlace BC. Neste momento, o NE envia um *Failure Indication Signal* (FIS) para o NE terminal A que restaura a conexão através do estabelecimento de um novo caminho óptico AEEFG. O atraso na propagação do sinal FIS é desprezível. Nesta categoria há a vantagem de utilização otimizada dos recursos de rede, pois o NE terminal A tem o conhecimento da topologia da rede e utiliza os protocolos de sinalização e roteamento para obter um novo caminho óptico de menor custo;

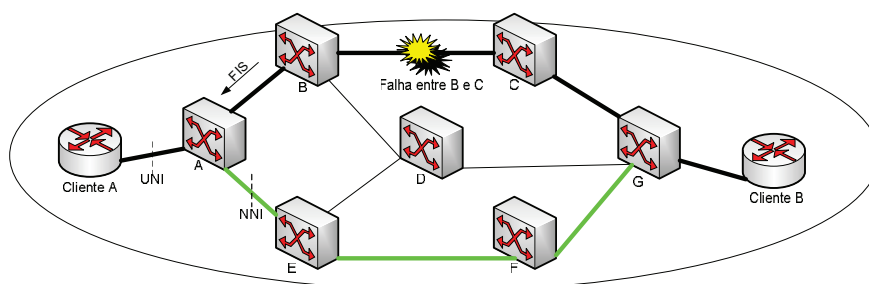


Figura 4.3 – Restauração distribuída – Reparo Global.

- **Reparo Local:** o reparo é feito pelo NE transmissor de dados que está conectado ao enlace danificado. Na Figura 4.4, o próprio NE B procura estabelecer um novo caminho óptico, ABDG, para restauração da conexão fim-a-fim entre os clientes A e B. A obtenção desta nova rota é dada pelo sistema de gerência distribuído entre os NE adjacentes que trocam suas tabelas de roteamento. Esse modelo apresenta a vantagem de restaurar uma conexão com melhor tempo comparado com o método “Reparo Global”, porém não utiliza de forma otimizada os recursos da rede;

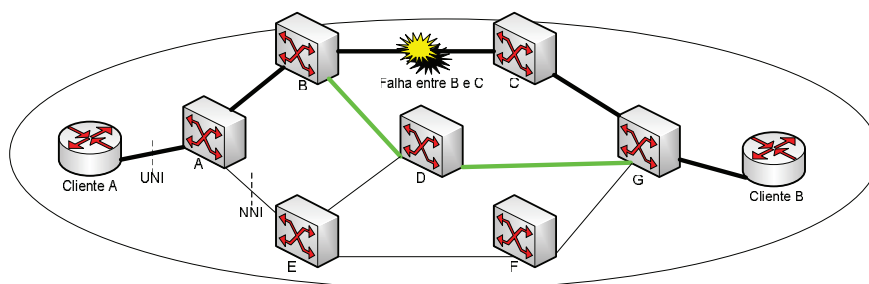


Figura 4.4 – Restauração distribuída – Reparo Local.

- **Pré-planejamento:** esta categoria permite planejar antecipadamente os recursos de reserva que serão utilizados sem alocá-los efetivamente como é feito no mecanismo de proteção. O objetivo deste pré-planejamento é identificar os NE e os recursos de rede que serão utilizados na restauração de uma conexão. Estes recursos de rede poderão ser compartilhados com outros caminhos pré-planejados. A configuração do caminho principal e o cálculo do caminho pré-planejado serão obtidos durante o tempo de provisionamento do serviço. Na Figura 4.5(a), ocorreu uma falha no enlace BC e o caminho principal ABCG foi interrompido. Neste momento, o NE terminal A inicia o cálculo dos recursos de rede do caminho pré-planejado AEEFG, ativando os NE que compõem esta rota. Uma vez configurada, a restauração da conexão é realizada e um novo caminho pré-planejado, ABDG, é obtido conforme Figura 4.5(b). Ou seja, com este modelo é possível planejar a rede de tal modo que ela possa suportar a restauração de determinadas conexões prioritárias, integração com vários mecanismos de proteção e a flexibilidade na escolha dos caminhos alternativos de restauração. Porém o tempo de restauração é levemente superior ao método “Reparo Global” haja visto que o NE precisa também calcular um novo caminho pré-planejado. Outro ponto negativo deste modelo é no caso de ocorrência de múltiplas falhas e caso os caminhos pré-planejados forem compartilhados, além de utilizar os mesmos recursos, tais como duto ou cabo de fibra óptica. Desta maneira essa restauração deve ser aplicada em conexões prioritárias cuja flexibilidade é inerente a este tipo de restauração.

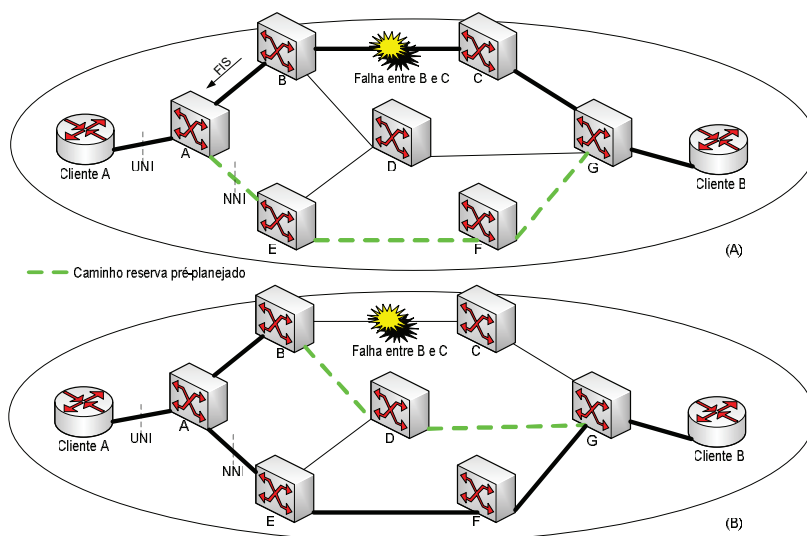


Figura 4.5 – Restauração distribuída – Pré-planejamento.

Na ocorrência da restauração distribuída conforme reparo global, local ou de acordo com o pré-planejamento, é necessário realizar previamente o planejamento da rede de transporte como um todo, conforme os custos envolvidos para implementação de projetos que envolvem redes de telecomunicações. No entanto, é necessária a análise da rede quanto à capacidade de recomposição, garantindo a sobrevivência da mesma. Para realização desta análise é necessária a realização de simulações na topologia de rede para verificação das falhas apresentadas por Heegaard e Trivedi (HEEGAARD e TRIVEDI, 2009).

Com o propósito de realizar o planejamento e o estudo da recomposição da rede de transporte, na seção a seguir, é apresentado o método proposto. Ou seja, as estratégias que possibilitam o planejamento de redes de transportes com tecnologia ASON bem como o estudo da recomposição na presença de falha ou múltiplas falhas com o sistema de restauração distribuída por reparo local, conforme apresentado na Figura 4.4, através dos métodos de solução computacionais citados nas seções 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3.

4.2 MÉTODO PROPOSTO

Com o objetivo de explorar a complexidade de uma rede de transporte real para o desenvolvimento da estratégia, é apresentado, na Figura 4.6, o modelo funcional da rede de transporte. Principalmente do ponto de vista das operadoras e sua estrutura técnica. A estrutura é basicamente composta pelos seguintes departamentos:

- Centro de supervisão e monitoração: responsável pela supervisão da rede como um todo;
- Departamento de Engenharia: responsável pelo estudo das viabilidades técnicas de novos projetos e ampliações das rotas existentes;
- Departamento de Operações: responsável pela operação e manutenção da rede conforme os contratos acordados, entre a operadora com as equipes de manutenção terceirizadas e clientes conforme produto comercializado. Respeitando os valores de SLA firmados em contrato.

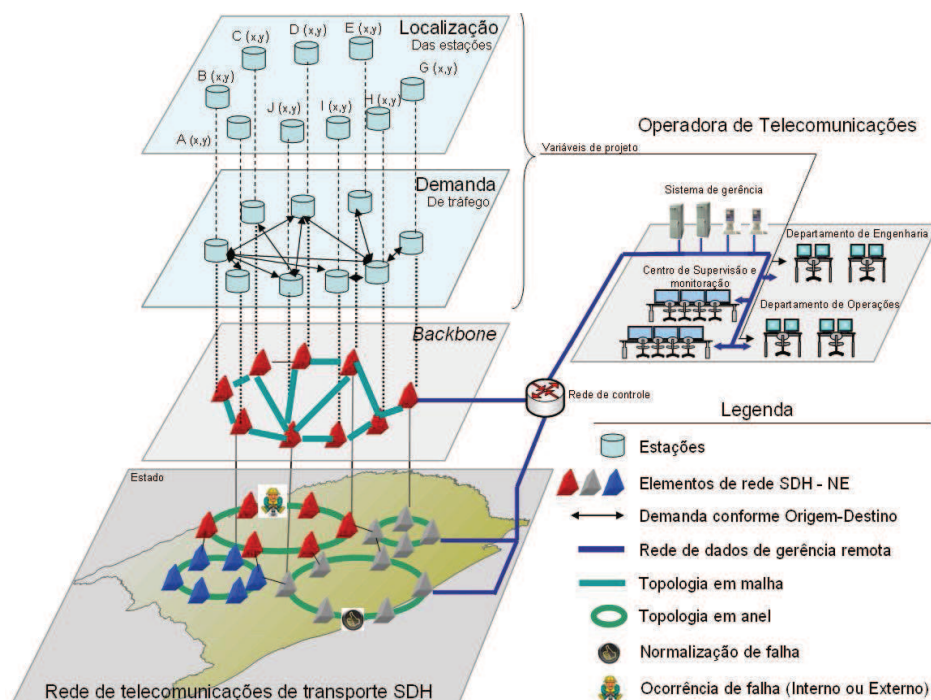


Figura 4.6 – Representação gráfica de uma rede de transporte modificado por Barreto (BARRETO, 2007).

Cabe ao departamento de operações a realização da otimização dos circuitos existentes com a finalidade de buscar o equilíbrio nos *links* que atendem cada estação e a avaliação da capacidade de resiliência da rede na atuação da restauração do tráfego em caso de falhas.

A rede de transporte é composta por duas camadas, sendo a primeira constituída pela rede de distribuição óptica formada por fibra óptica e a segunda pelas redes de transporte SDH representados por triângulos que compõem a rede propriamente dita com o arranjo da interligação dos equipamentos denominados de NE com a rede óptica. De acordo com as interligações ocorridas entre os NE é constituída a topologia da mesma conforme demonstração na seção 2.2.

Esse modelo de rede possui um sistema centralizado denominado de *Network Operation Center* (NOC) que consiste no armazenamento e gerenciamento das informações quanto ao status dos equipamentos, *links*, *trails*, configurações das topologias envolvidas no Estado e os *Backbones* juntamente com os circuitos, demanda de tráfego, existentes numa base de dados centralizada. Esses dados, com as identificações das redes, são vitais à modelagem do problema, pois correspondem à elaboração da estratégia para conhecimento futuro do plano de controle, visto na seção 3.1.

Na composição deste trabalho não serão considerados a capacidade de comutação interna dos equipamentos ADM ou DXC, que compõem os nós da rede, e sim a disponibilização das interligações através dos *links* entre equipamentos. Os mesmos representam os arcos, que constituem a topologia da rede a ser analisada, ou seja, a modelagem da rede SDH com utilização da Teoria de Grafos conforme apresentado na seção 2.4.1.

Nesse trabalho será abordado o problema do planejamento de redes de transportes SDH utilizando os conceitos da rede ASON, vistos na seção 2.3.1, sob o ponto de vista da análise da perda da demanda na presença de múltiplas falhas. Disponibilizando informações referentes às características técnicas da rede aos projetistas, administradores e operadores de redes para tomada de decisão.

Na Figura 4.7 é apresentado um fluxograma em alto nível para composição das estratégias nível a nível. Na elaboração dessas estratégias, é necessária a utilização dos

recursos de busca tais como: AG, algoritmo de Dijkstra e conceito de rede fictícia de forma efetiva e eficiente na busca aleatória e probabilística da solução ótima referente à topologia de rede de transporte.

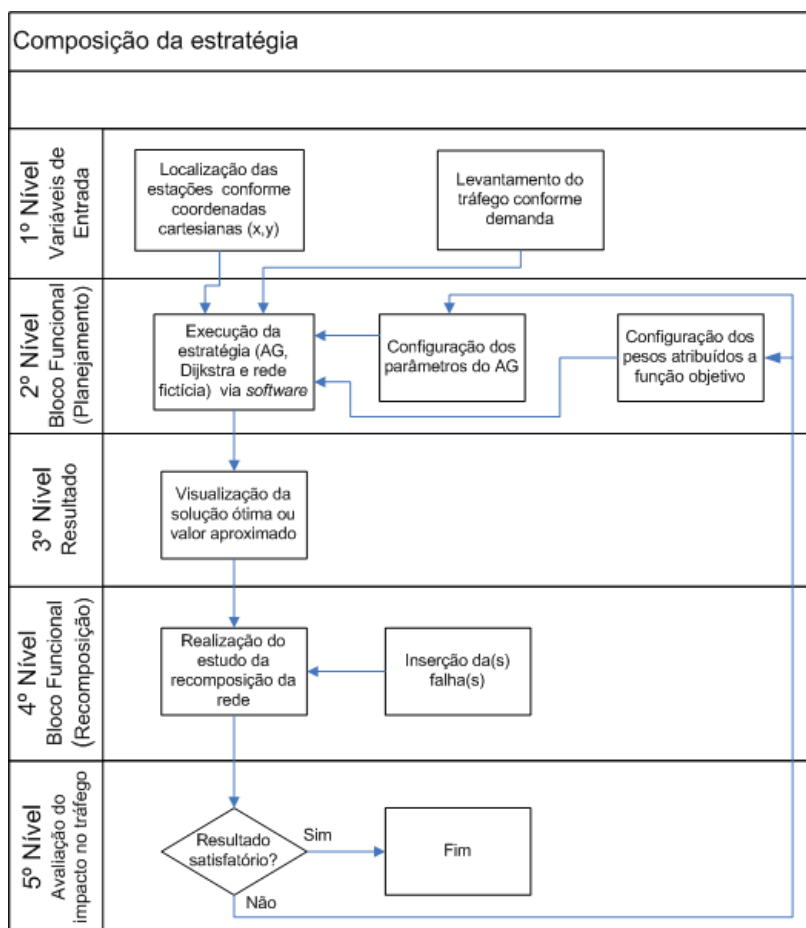


Figura 4.7 – Fluxograma da estratégia principal.

Segue um breve resumo dos respectivos níveis e suas atribuições.

No 1º nível ocorre a realização do levantamento das variáveis do projeto dos dados responsáveis pela localização das estações de acordo com os pontos ou nós a serem analisados conforme coordenada cartesiana e dos circuitos responsáveis pela demanda do tráfego com as referências dos nós de origem e destino.

No 2º nível ocorre a utilização do AG, algoritmo de Dijkstra e os conceitos de rede fictícia vistos nas seções 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3, de forma computacional, respectivamente para geração das topologias de rede de acordo com a definição dos parâmetros do AG e atribuição

de pesos na função objetivo. Com o objetivo de verificar o resultado obtido graficamente é realizado no 3º nível a verificação da topologia.

Já no 4º nível ocorre a avaliação do tráfego pela rede de acordo com a inserção de falhas, resultando o estudo da recomposição na topologia e finalmente no 5º nível, ocorre à realização da análise dos resultados obtidos. Caso os valores não forem adequados, se faz necessário a repetição do 2º nível até a obtenção dos valores que satisfaçam os critérios de projeto, uma vez que os valores são analisados e validados por especialistas.

Para um melhor entendimento da composição da estratégia, cada nível citado acima será explicado detalhadamente nas próximas seções deste trabalho.

4.2.1 Variáveis de Entrada

Para composição da estratégia responsável pelo planejamento é necessário inicialmente avaliar as instâncias de entrada do problema, pois elas formam o primeiro conjunto de dados a ser utilizado pelos algoritmos que compõem a estratégia. Nesta dissertação, as instâncias são formadas por dois arquivos fundamentais de dados, a localização e a demanda. O primeiro corresponde à localização de cada estação conforme plano cartesiano, ou seja, para cada estação está vinculado um valor no eixo das abscissas e no eixo das ordenadas, conforme apresentado na Tabela 4.1(a). O segundo corresponde à quantidade de demanda presente na rede e os valores demandados pelo tráfego entre as estações de origem e destino, conforme apresentado na Tabela 4.1(b).

Tabela 4.1 – Apresentação das instâncias de entrada, localização e demanda.

Estações	Localização X	Localização Y
A	Valor X_1	Valor Y_1
B	Valor X_2	Valor Y_2
C	Valor X_3	Valor Y_3
⋮	⋮	⋮
J	Valor X_n	Valor Y_n

(a) localização

Circuitos	Estação de Origem	Estação Destino	Demanda
1	B	A	1
2	B	H	2
3	J	D	7
⋮	⋮	⋮	⋮
m	D	H	7

(b) Demanda

4.2.2 Bloco Funcional do Planejamento

Com o objetivo de tratar as instâncias de entrada, modelar e resolver o problema de redes é proposta a utilização do método da Teoria de Grafos, conforme apresentação na seção 2.4.1, para representação gráfica e matemática, pois a rede de transporte pode ser representada por um grafo $G = (V, E)$ sendo as estações representadas pelos nós, $V = \{1, 2, \dots, \|V\|\}$, dado o posicionamento cartesiano apresentado pela instância de entrada e os arcos do nó ou estação i para o nó ou estação j , representados pela notação (i, j) , sendo $E = \{(i, j)\}$, os *links* existentes entre as estações formando a topologia da rede e por onde tráfegarão as demandas. Desta forma possibilitando o conhecimento prévio do número de estações, $\|V\|$, e o número máximo de *links* ou arcos envolvidos no problema definido pela equação (1).

Dado o conhecimento da instância referente à localização de cada estação, V , quanto ao número de estações, $V_n(x_n, y_n)$, envolvidas no problema, o próximo passo é a realização do cálculo e o armazenamento da distância entre todas as estações apresentados por Bassam (BASSAM *et al.*, 2006) e Routray (ROUTRAY *et al.*, 2007) conforme equação abaixo:

$$d = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad . \quad (7)$$

O armazenamento das distâncias é realizado numa matriz A com dimensões $n \times n$, onde as linhas e as colunas, n , da matriz correspondem às estações da rede.

Outro fator abordado na composição da estratégia, pois está diretamente relacionado à codificação da topologia de rede, é a identificação do número máximo de interligações possíveis entre todas as estações, ou seja, o número máximo de arcos presentes no grafo conforme valor calculado pela equação (1), dado grafo $G = (V, E)$. Como já explicado na seção 2.4.1, são utilizados grafos simples e não-orientados possibilitando a leitura da conexão entre estações apenas uma vez, reduzindo o número de valores a serem armazenados no vetor responsável pelo cadastro dos arcos conforme apresentação na Figura 4.8. Com o objetivo de otimizar o processo de busca dos valores contidos na matriz A , as distâncias entre as estações

estão referenciadas com os indicadores contidos no vetor dos arcos possibilitando a leitura das distâncias de forma direta ao ler os dados de um arco.

[A B]	[A C]	[B D]	...	[<i>n-1 n</i>]
-------	-------	-------	-----	------------------

Figura 4.8 – Identificação do número máximo de arcos

4.2.2.1 Definição da Estratégia

Com o tratamento das variáveis de entrada apresentado na seção 4.2.1 e 4.2.2, os dados referentes à localização e a demanda são inseridos no bloco funcional responsável pelo planejamento. Sendo esse bloco a própria estratégia com a utilização do AG canônico, apresentado na seção 2.5.1.

O bloco funcional do planejamento tem como objetivo encontrar a solução ótima ou valor aproximado, fazendo uso da capacidade evolutiva dos indivíduos mais aptos. Para que tal funcionalidade ocorra é necessário a transcodificação do problema de otimização para um modelo computacional possibilitando a realização do processo evolucionário. Para execução do processo evolucionário é necessária a codificação do problema, possibilitando a manipulação genética em um conjunto de soluções denominado de população. Essa população é formada por cromossomos que são responsáveis pela representação da solução, e seus genes representam as variáveis do problema, possibilitando a medida de aptidão de um indivíduo, denominada de *fitness*, na busca do melhor indivíduo, ou seja, a solução do problema. Com o intuito de melhorar a solução medida pelo valor da função objetivo, *fitness*, são definidas regras que permitem a manipulação dos cromossomos pelos seguintes operadores genéticos: seleção, responsável pela escolha dos indivíduos mais aptos; *crossover*, responsável pelo cruzamento ou combinação dos cromossomos pais e a mutação responsável por alterações dos possíveis estados de um atributo do indivíduo diretamente no *locus* dos cromossomos filhos gerados. Além do critério de parada, possibilitando o número máximo de gerações. Nas seções abaixo segue o detalhamento do modelo computacional.

4.2.2.1.1 Codificação

Dado o objetivo dessa dissertação, é necessário escolher a forma adequada de representação da solução, pois através de um indivíduo ou cromossomo, da variável do problema ou gene e seus possíveis estados possibilitam o planejamento da topologia sem a necessidade de decodificação respectivamente.

Para a topologia de rede representada pelo Grafo $G = (V, E)$, o gene pode assumir dois estados, ausência ou existência de conexão, na representação de seus respectivos arcos ou *links* existentes entre as estações dado por $E_n = \{(i_n, j_n)\}$ possibilitando o uso da notação binária, onde o número “0” representa a ausência e o “1” representa a existência do *link* entre as estações. Ou seja, o *link* é um gene. Conseqüentemente, na *string* binária formada pela seqüência de genes é que consiste o cromossomo responsável pela representação e possibilidade de solução do problema à topologia da rede. Com o propósito de apresentar a codificação da topologia de rede conforme processos evolucionários, são apresentados na Figura 4.9 dois exemplos de topologia de rede e suas variáveis.

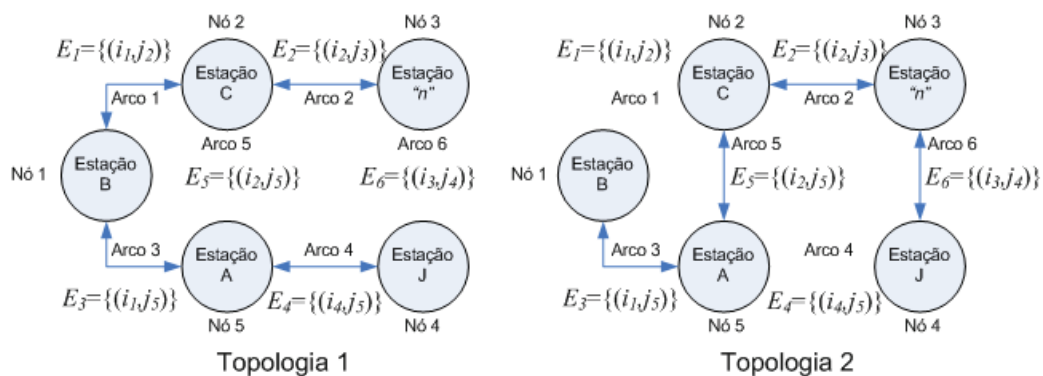


Figura 4.9 – Exemplos de topologia de rede.

O resultado da codificação das topologias presentes na Figura 4.9 é apresentado na Tabela 4.2. com a equivalência entre os arcos e os cromossomos bem como os valores binários de cada topologia.

Tabela 4.2 – Resultado da codificação da topologia de rede.

ARCOS	1	2	3	4	5	6
Cromossomo	$E_1=\{(B,C)\}$	$E_2=\{(C,n)\}$	$E_3=\{(B,A)\}$	$E_4=\{(A,J)\}$	$E_5=\{(C,A)\}$	$E_6=\{(n,J)\}$
Valor Binário						
Topologia 1	1	1	1	1	0	0
Topologia 2	0	1	1	0	1	1

4.2.2.1.2 Geração da População Inicial

De forma aleatória é realizada a geração da população inicial de tamanho $n \times m$, onde “ n ” corresponde ao tamanho da população inicial (P_i) e “ m ” corresponde ao número de arcos envolvidos no problema. Desta forma a população inicial corresponde a um subconjunto do espaço total de configurações representando possíveis soluções do problema a ser avaliado. São apresentados na Tabela 4.3 exemplos de valores da P_i .

Tabela 4.3 – Valores presentes após geração da população inicial (P_i).

População Inicial (P_i)	ARCOS					
	1	2	3	4	5	6
Topologia 1	1	1	1	1	0	0
Topologia 2	0	1	1	0	1	1
Topologia ...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Topologia n	1	0	0	1	1	1

Este processo de geração da população inicial aleatoriamente pode ocasionar cromossomos com seqüência de vários genes com o valor “0”, ou seja, não existindo conexões de algumas estações com a rede propriamente dita, gerando estações desconexas com o sistema ou simplesmente tornando a estação ilhada. Para o tratamento desse problema, nesta dissertação, é apresentada na seção 2.5.3 o conceito de rede fictícia que tem por objetivo tratar o problema de matrizes desconexas que será um dos componentes de avaliação da função objetivo, conforme descrição na seção 4.2.2.1.3.

4.2.2.1.3 Fitness

Para realização da avaliação dos cromossomos, ou seja, das topologias propostas, é calculado o *fitness* uma vez que a avaliação de um cromossomo no AG significa determinar o seu nível de aptidão de sobrevivência em relação aos demais indivíduos da população. Nessa etapa cada indivíduo é associado a um valor real numérico indicando a sua qualidade como uma solução para o problema. Nesta etapa do AG encontra-se a ligação entre a estratégia e o problema em redes de transportes propriamente dito.

Nesta dissertação, com o propósito de encontrar a solução ótima ou o valor aproximado para a melhor topologia com o menor custo conforme função objetivo, o problema é associado a minimização dos custos. Os custos envolvidos são a obtenção da distância total entre todas as estações, rede fictícia, roteamento da demanda pela topologia em avaliação e o tráfego por distância de cada enlace, conforme avaliação de cada cromossomo consistindo em vários componentes ponderados à função objetivo no planejamento de redes.

O primeiro componente da função objetivo é o cálculo do custo total da distância entre as estações. A obtenção do custo total presente no cromossomo é realizada pelo somatório do estado de cada gene presente no cromossomo.

$$\text{Tem-se } F1 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} Q_{ij}, \text{ onde:} \quad (8)$$

d_{ij} representa a distância entre os nós i e j ;

Q representa o cromossomo, ou seja, a topologia em avaliação;

$Q_{ij} = 1$, se o valor do gene é 1; caso contrário $Q_{ij} = 0$.

O segundo componente da função objetivo é a aplicação do conceito de rede fictícia, conforme apresentado na seção 2.5.3, tornando funcional qualquer procedimento que envolva operações matemáticas com matrizes. O conceito de rede fictícia tem o objetivo de resolver o problema de topologias que apresentam estações ilhadas ou desconexas à rede, na etapa do

planejamento, também relatado nos trabalhos de Ferreira (FERREIRA, 2000), Piqueira (PIQUEIRA, 2008) e Lemos (LEMONS, 2008) sobre o problema de matrizes desconexas. Desta forma, o custo da rede fictícia é calculado pelo somatório do estado presente no gene do cromossomo em avaliação.

$$\text{Tem-se } F2 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n RF_{ij} Q_{ij}, \text{ onde:} \quad (9)$$

RF_{ij} é o valor de referência para realização de cálculos (Por exemplo: 1×10^4);

Q representa o cromossomo, ou seja, a topologia em avaliação;

$Q_{ij} = 1$, se o valor do gene é 0; caso contrário $Q_{ij} = 0$.

O terceiro componente da função objetivo é o somatório de todos os custos, ou seja, o valor total das distâncias envolvidas no roteamento de cada circuito na topologia em avaliação conforme demanda apresentada pelas variáveis de entrada sobre a quantidade de circuitos demandados. Inicialmente para cada circuito demandado, Tabela 4.1(b), é realizado o roteamento a partir da estação de origem até a estação destino avaliando o menor percurso com auxílio do algoritmo de Dijkstra, simulando o comportamento do roteamento conforme o funcionamento real de uma rede de telecomunicações apresentado na seção 2.5.2 na topologia em avaliação. A concluir o roteamento demandado, o valor da terceira componente será o somatório de todos os custos envolvidos por circuito pelo total demandado.

$$\text{Tem-se: } F3 = \frac{\sum \text{Custo_do_roteamento_por_circuito}}{\text{Quantidade_de_circuitos_demandados}}, \quad (10)$$

Durante o cálculo do *fitness*, cada topologia proposta é avaliada por quatro componentes que compõem a função objetivo e ao realizar a terceira componente onde é realizada a análise da demanda através do algoritmo de Dijkstra, os valores da demanda entre as estações origem e destinos são armazenados informando o tráfego entre os *links* existentes dados por $E = \{(i,j)\}$. Desta forma é possível a avaliação do tráfego pela quarta componente da função objetivo. A quarta componente da função objetivo é responsável pela avaliação do

tráfego pela distância existente nos *links* com o objetivo de restringir, caso necessário, a capacidade máxima de tráfego por *link*.

$$\text{Tem-se } F4 = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{T_{ij}}{d_{ij}} \cdot Q_{ij}, \text{ onde:} \quad (11)$$

T_{ij} representa o tráfego entre os nós i e j ;

d_{ij} representa a distância entre os nós i e j ;

Q representa o cromossomo, ou seja, a topologia em avaliação;

$Q_{ij} = 1$, se o valor do gene é 1; caso contrário $Q_{ij} = 0$.

Nesta dissertação foi implementada a quarta componente da função objetivo com o objetivo de manter o equilíbrio de tráfego entre todos os *links* apresentados pela topologia. Outro fator, é a possibilidade de integração da estratégia para avaliação de outros modelos de redes conforme seção 2.2. possibilitando a análise entre redes SDH, IP, ATM e inclusive com WDM.

Desta forma, a função objetivo é definida pelo somatório dos quatro componentes, originando a seguinte equação simbólica na avaliação do cromossomo (topologia):

$$FO = \sum_{i=1}^4 Fi . \quad (12)$$

Com o objetivo de adequar a função objetivo em função das grandezas numéricas envolvidas em cada custo é utilizado o mecanismo de pesos (P), possibilitando o manuseio de cada componente da função objetivo sobre os valores das soluções encontradas, possibilitando a formação de topologias com alto grau de conexão entre as estações:

$$FO = \sum_{i=1}^4 PiFi . \quad (13)$$

4.2.2.1.4 Seleção

A seleção desempenha o papel da seleção natural na evolução, selecionando para sobreviver e reproduzir os organismos adaptados ao meio. Neste trabalho, a seleção dos melhores indivíduos, cromossomos e feita conforme o método utilizado na avaliação da aptidão, possibilitando assim a seleção dos melhores indivíduos para geração de uma nova população conforme valor retornado pela função objetivo.

Para realização do processo de seleção, nessa dissertação, é utilizada a combinação do método de classificação com o método elitista, possibilitando a ordenação crescente dos valores obtidos no *fitness* e o truncamento das soluções, forçando o AG a preservar os melhores indivíduos a cada geração, enquanto os filhos substituem os indivíduos menos aptos. Desta forma, os valores apresentados na componente do custo da rede fictícia conforme apresentação da seção 2.5.3., tornam a seleção mais criteriosa, eliminando topologias com falhas, pois a estratégia prevê a eliminação de topologias que apresentam valores elevados na componente da função objetivo. Para realização do elitismo o valor da seleção deve estar preestabelecido, ou seja, entre o menor valor e valor máximo definidos pelo truncamento. Na Tabela 4.4 é apresentado o resultado dos dois métodos utilizados na elaboração da estratégia.

Tabela 4.4 – Apresentação dos resultados conforme métodos de seleção.

		ARCOS				Resultado numérico dos valores do <i>fitness</i>
Seleção - Classificação e Elitismo		1	2	...	<i>m</i>	
Seleção Por elitismo	Topologia 1	1	1	⋮	1	100
	Topologia 2	0	1	⋮	0	Valores intermediários
	Topologia ...	⋮	⋮	⋮	⋮	
	Topologia <i>n</i>	1	0	⋮	1	100.000

4.2.2.1.5 Crossover

O processo de *crossover* possibilita a recombinação das estruturas genéticas dos cromossomos pais da população obtida pela seleção originando novos cromossomos filhos ou pontos no espaço de busca da otimização. Para realização da recombinação é escolhido o ponto comum onde os cromossomos são cortados e suas cargas genéticas recombinadas possibilitando a geração de novos indivíduos. Na Tabela 4.5 são apresentados os cromossomos pais, o ponto de corte (*crossover*) e os filhos com a mudança dos Genes possibilitando a compreensão.

Tabela 4.5 – Representação do *crossover* com os cromossomos pais selecionados.

Reprodução	ARCOS					
	1	2	Crossover		5	6
PAI 1	A1	A2	A3	A4	A5	A6
PAI 2	B1	B2	B3	B4	B5	B6
FILHO 1	A1	A2	A3	B4	B5	B6
FILHO 2	B1	B2	B3	A4	A5	A6

4.2.2.1.6 Mutação

A mutação é a operação da perturbação numa configuração que tem por objetivo modificar o gene de algum indivíduo. A operação ocorre de forma aleatória, pois a intenção deste procedimento é permitir que o algoritmo não fique preso a mínimos ou máximos locais. Para um melhor entendimento sobre o processo de mutação, na Tabela 4.6, é apresentado o ponto de mutação nos cromossomos filhos, no 4º e 6º *locus* do cromossomo filho 1 e *n* respectivamente.

Tabela 4.6 – Representação da mutação na nova população de cromossomos filhos.

Mutação	ARCOS					
	1	2	3	4	5	6
FILHO 1	A1	A2	A3	B4	B5	B6
FILHO ...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
FILHO <i>n</i>	B1	B2	B3	A4	A5	A6

4.2.2.1.7 Crit rio de parada

O crit rio de parada tem como objetivo a verifica o da condi o de finaliza o estabelecida pela estrat gia. Neste caso, a estrat gia aborda o n mero m ximo de gera o, pois os procedimentos de *fitness*, sele o, *crossover* e muta o correspondem a uma gera o ou itera o e caso a condi o n o seja atendida ocorre   repeti o desses procedimentos por certo n mero de vezes. O processo de repeti o possibilita salvar numa estrutura de dados o resultado do melhor indiv duo de todas as popula es geradas.

4.2.2.2 Resultados Obtidos do Planejamento

Nesta etapa os valores da fun o objetivo obtidos e o resultado da estrutura de dados com os dados de cada indiv duo com a representa o da topologia, s o armazenados em arquivos para tratamento futuro e realiza o de estudos da recomposi o. Al m de que, nesta etapa   poss vel a visualiza o da topologia de forma gr fica possibilitando aos projetistas de rede   visualiza o de forma clara e objetiva a topologia sugerida conforme os par metros definidos no *fitness*.

Com a finalidade de sintetizar a composi o da estrat gia, segue na Figura 4.10, o detalhamento do bloco funcional do planejamento de acordo com os tr s primeiros n veis apresentados na Figura 4.7.

PLANEJAMENTO

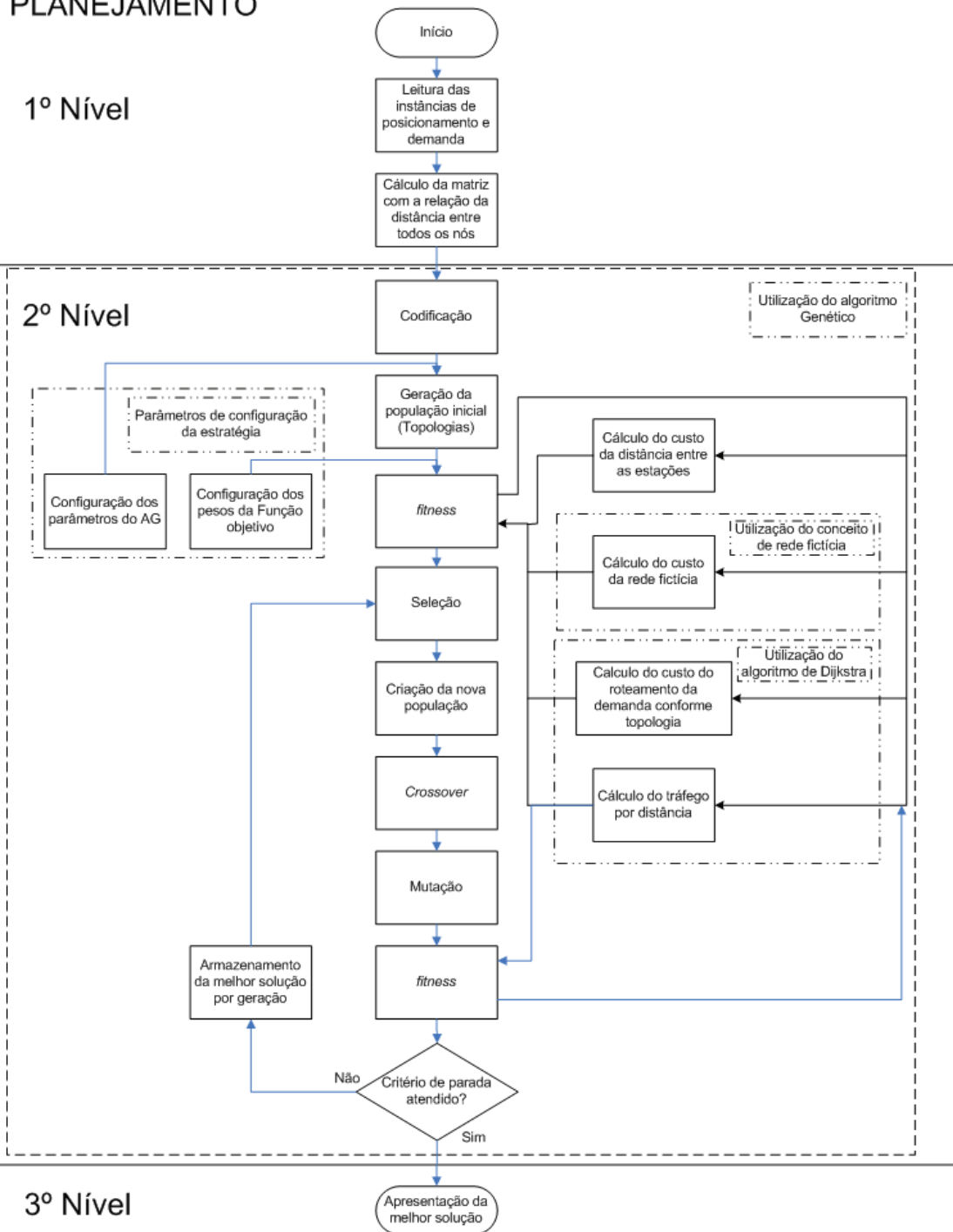


Figura 4.10 – Detalhamento da estratégia referente ao planejamento.

4.2.3 Bloco Funcional da Recomposição

Dados os objetivos desta dissertação, é necessário na composição da estratégia prever o uso de algoritmos que possibilitem o estudo da recomposição. Como premissa, o algoritmo utilizado na composição da estratégia para o planejamento também deve ser utilizado pela recomposição, principalmente de forma análoga, simular a tecnologia existente presente nas redes das operadoras de telecomunicações mencionada por Vasseur (VASSEUR *et al.*, 2004) e Oliveira (OLIVEIRA *et al.*, 2007) em seus trabalhos. Para realização do estudo de caso da recomposição é proposto o algoritmo de Dijkstra (menor caminho) bem como o conceito de rede fictícia no tratamento de matrizes desconexas e a capacidade de inserção de falhas na rede.

4.2.3.1 Definição da Estratégia

A rede, ou topologia proposta pelo bloco funcional do planejamento, pode apresentar falha ou múltiplas falhas nas interligações entre as estações necessitando de avaliação prévia do tráfego provocado pelo impacto das falhas. Conforme mencionado na seção 4.1, a rede de transporte é responsável pelo tráfego de serviço de banda larga fixa ou móvel, telefonia celular e serviços de dados que necessitam de mecanismos que agreguem confiabilidade e possibilitam o estudo da sobrevivência da rede garantindo os SLAs contratados pelos clientes.

O estudo da sobrevivência está relacionado com a capacidade de recomposição da rede no caso da ocorrência de restauração distribuída com reparo local, apresentado na seção 4.1, sendo necessária a utilização de métodos de solução computacional possibilitando a análise do impacto do tráfego quanto ao percurso e custo de cada circuito. Com objetivo de analisar o percurso e o custo de cada circuito, a estratégia é composta pelo uso do algoritmo de Dijkstra em conjunto com o conceito de rede fictícia, conforme descrito anteriormente.

Com a ocorrência de falha ou falhas na rede, a estratégia prevê a sobreposição da rede conforme o conceito de rede fictícia apresentado na seção 2.5.3., possibilitando operações matemáticas com matrizes, ou seja, a matriz inicialmente desconexa devido à presença de falha torna-se conexa com o valor preestabelecido pela rede fictícia possibilitando a análise do percurso e custo pelo algoritmo de Dijkstra. Na Figura 2.13(b) foi apresentado um exemplo da matriz de conexão.

Com a inserção do valor, definido pela rede fictícia na matriz de adjacência responsável pela distância entre as estações, é realizada pelo algoritmo de Dijkstra a análise do percurso e custo presente na rede, bem como a classificação das estações, conforme a demanda proposta pelas variáveis de entrada, demonstrando o grau de importância de cada estação no restabelecimento do tráfego.

Com a topologia proposta no bloco funcional do planejamento e a inserção da(s) falha(s) na rede, para cada circuito demandado, conforme Tabela 4.1(b), é realizada uma nova avaliação do percurso pelo algoritmo. Pois o *link* responsável pela conexão entre as estações em análise pode ter seu valor da distância previamente definido alterado pelo valor da rede fictícia, ocasionando o aumento do custo da distância no percurso caso a estação não possua *links* com outras estações. Caso a estação possua conexões com outras estações o algoritmo realizará nova avaliação do menor caminho entre as estações origem e destino. Desta forma, simulando o comportamento de um novo roteamento do circuito semelhante ao funcionamento de uma rede de telecomunicações real.

Na Figura 4.11 é apresentada a aplicação da estratégia no estudo da recomposição da rede. Pois na condição de falha ou múltiplas falhas nos *links* é possível ocorrer uma nova avaliação do percurso, permitindo a avaliação dos custos envolvidos no novo roteamento dos circuitos.

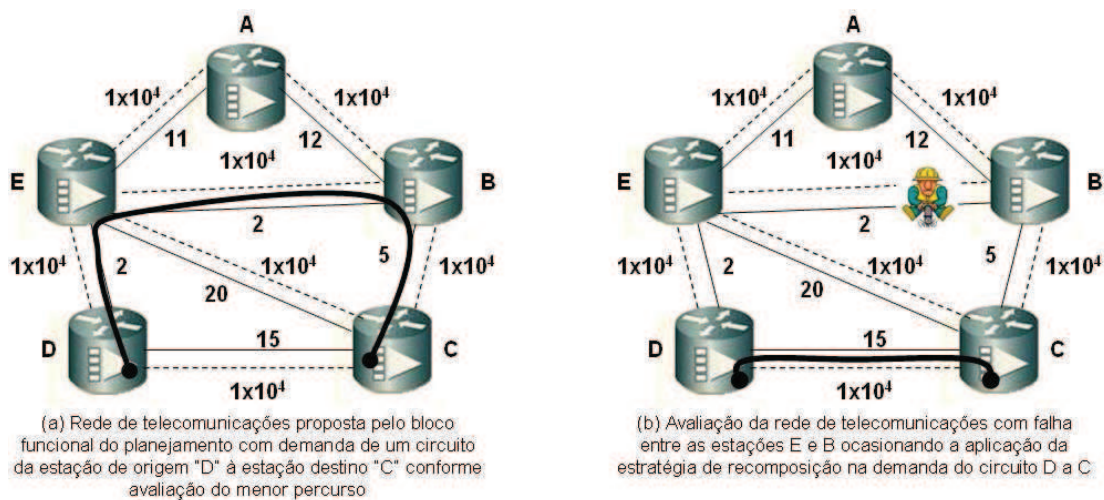


Figura 4.11 – Aplicação da estratégia no estudo da recomposição da rede.

4.2.3.2 Resultados Obtidos do Estudo da Recomposição

Nesta etapa é realizada a apresentação dos dados referentes ao percurso, custo da distância total, a realização de simulações com a inserção de falhas na rede possibilitando a avaliação da topologia proposta pelo bloco funcional do planejamento bem como a classificação das estações conforme grau de atendimento da demanda.

Com a finalidade de sintetizar a composição da estratégia, segue na Figura 4.12, o detalhamento do bloco funcional da recomposição de acordo com os dois últimos níveis apresentados na Figura 4.7.

RECOMPOSIÇÃO

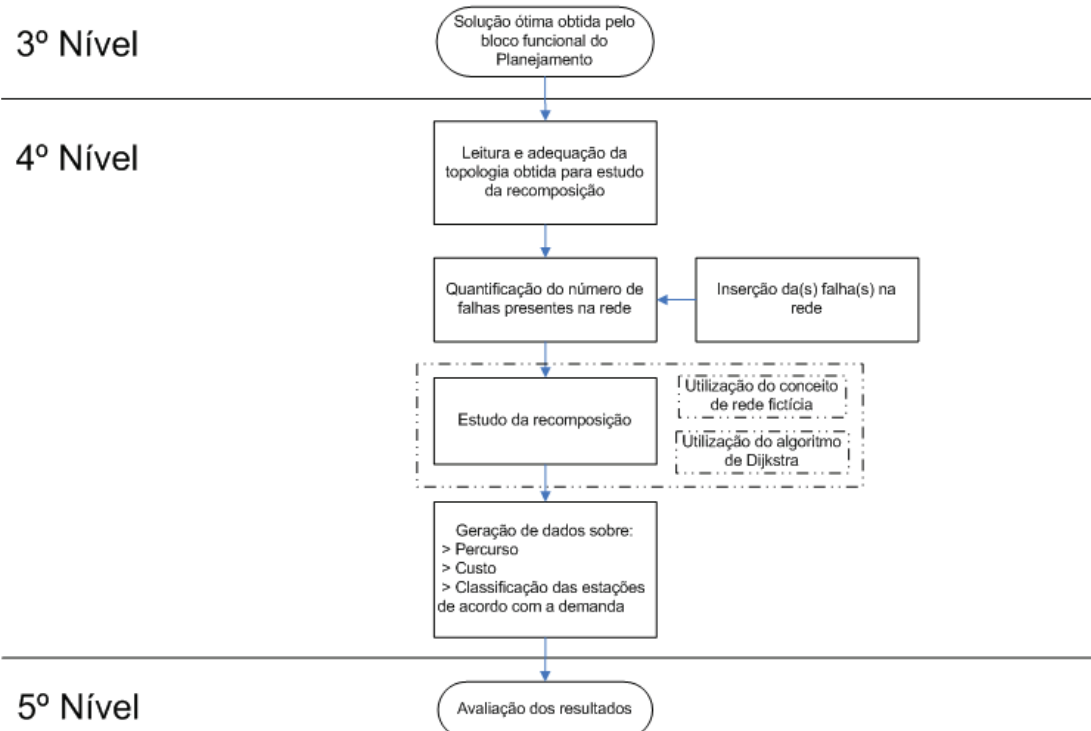


Figura 4.12 – Detalhamento da estratégia no estudo da recomposição.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Conforme revisão prévia no capítulo 3, o problema de planejamento e recomposição em redes necessitam de métodos matemáticos para tratamento devido a complexidade do problema. O tratamento idealizado pela estratégia apresentada na seção 4.2.2.1 visa à obtenção da solução ótima através do processo evolucionário, método heurístico, necessitando de uma ferramenta computacional. Essa ferramenta possibilitará a manipulação genética em um conjunto de soluções, a transcodificação do problema de redes para um determinado modelo e a realização de simulações possibilitando a análise dos resultados para tomada de decisão. Nas seções 4.3.1 e 4.3.2 são apresentadas a ferramenta computacional desenvolvida bem como a aplicação da estratégia de forma experimental conforme apresentado na Figura 4.7.

4.3.1 Ferramenta Computacional

Com o propósito de implementar o modelo computacional responsável pela execução da estratégia proposto pelo fluxograma da seção 4.2, a escolha do *software* MATLAB se dá através da facilidade em manipular vetores, matrizes e gráficos no desenvolvimento de um aplicativo que possibilita a condição de expressar os problemas quase exatamente como eles são escritos matematicamente. A semelhança, portanto, entre o formato de entrada e saída dos dados e a simbologia matemática conhecida traduz a simplicidade de operação do programa (CHAPMAN, 2003).

4.3.2 Aplicação da Estratégia de Forma Experimental

Esta seção tem o objetivo de comparar o valor da solução ótima obtida manualmente referente ao menor custo, ou seja, a menor distância na interligação de todas as estações presentes no conjunto das variáveis de entrada com a solução obtida através da aplicação da estratégia descrita na seção 4.2. O conjunto das variáveis de entrada referente à localização e à demanda do tráfego são as mesmas utilizada por Bassam (BASSAM *et al.*, 2006), Tabela 4.7, composta de 5 nós possibilitando 125 combinações possíveis de solução conforme apresentado na seção 3.1.1 - (FERREIRA, 2000) tornando possível a obtenção da solução sem a utilização do recurso computacional.

Tabela 4.7 – Variáveis de entrada utilizada por Bassam (BASSAM *et al.*, 2006).

Estações	Localização X	Localização Y	Circuitos	Estação de Origem	Estação Destino	Demanda
1	1	3	1	1	2	70
2	3	5	2	1	3	80
3	3	1	3	1	4	5
4	5	5	4	1	5	7
5	5	1	5	2	3	20
			6	2	4	60
			7	2	5	10
			8	3	4	10
			9	3	5	100
			10	4	5	120

(a)

(b)

Com a aplicação da equação (7) sobre os valores apresentados na Tabela 4.7(a), são apresentados, na Tabela 4.8, os valores das distâncias entre todas as estações ou nós, bem como a identificação dos enlaces referentes à topologia da rede de acordo com os nós de origem e destino.

Tabela 4.8 – Tabela com os valores das distâncias por enlaces.

Enlace	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nó Origem	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4
Nó destino	2	3	4	5	3	4	5	4	5	5
Distância	2,83	2,83	4,47	4,47	4,00	2,00	4,47	4,47	2,00	4,00

Com o objetivo de representar a rede de telecomunicações graficamente, na Figura 4.13(a) segue a representação das estações conforme plano cartesiano disponibilizando a localização das estações no plano X,Y possibilitando o tratamento do problema com a utilização da Teoria de Grafos apresentada na seção 2.4.1.

Para obtenção da solução ótima dado grafo $G = (V, E)$ são representados na Figura 4.13(b) os valores das distâncias envolvidas entre as estações, de acordo com os valores apresentados na Tabela 4.8 entre as estações de origem e destino. Já a Figura 4.13(c) destina-se a representação gráfica da demanda entre as estações.

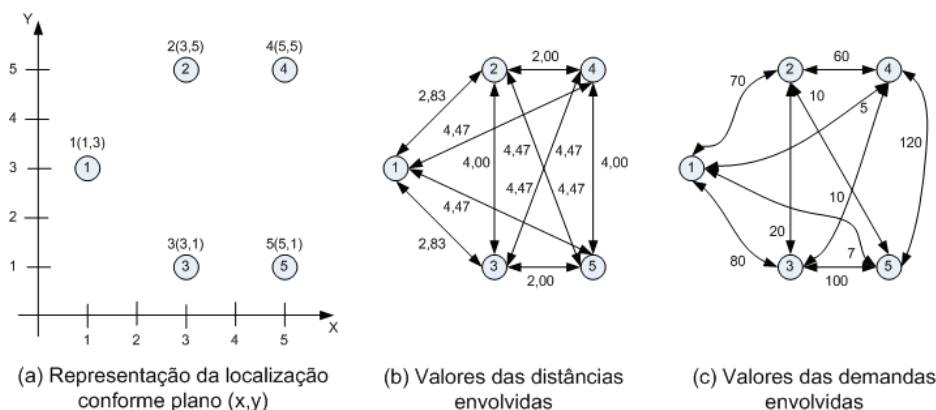


Figura 4.13 – Representação gráfica das variáveis de entrada utilizada por Bassam (BASSAM *et al.*, 2006).

O resultado obtido manualmente para solução ótima através do menor custo entre as distâncias é apresentado na Figura 4.14 representando a futura topologia de rede, a mesma descrita por Bassam (BASSAM *et al.*, 2006). Com a solução ótima encontrada, ou seja, a topologia de rede propriamente dita, os valores apresentados pela demanda são distribuídos pelos enlaces 1, 2, 6 e 9 apresentados na Tabela 4.8.

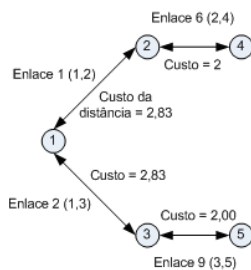


Figura 4.14 – Representação da solução ótima obtida de forma manual com as distâncias.

A topologia proposta é representada pelo modelo de barramento formado pela interligação entre os 5 NEs ou estações de forma contínua, ou seja, a estação 4 é interligada com a estação 2, a estação 2 com a estação 1, a estação 1 com a estação 3 e finalmente a estação 3 com a estação 5, conforme descrito na seção 2.2. Para realização do estudo da recomposição da rede neste caso, torna-se fácil devido a topologia em barramento, pois na ocorrência de qualquer falha em um dos enlaces ou nó todos os circuitos demandados que utilizam o enlace ou a estação como meio de passagem apresentará perda de tráfego. Pois para topologia proposta, conforme Figura 4.14, não está previsto rotas alternativas para escoamento do tráfego. No caso de redes com número maior que 5 nós, só através de um conjunto de estratégias será possível a realização do estudo da recomposição de forma sistemática, pois haverá inúmeras soluções para avaliação do impacto do tráfego necessitando de métodos computacionais para avaliação.

Para utilização da estratégia com o objetivo de obter a solução ótima, inicialmente é necessária a configuração dos parâmetros do AG em relação ao tamanho da população inicial, a taxa de seleção do elitismo e o número de gerações como critério de parada. Já o *crossover* está definido em apenas um ponto de corte do cromossomo e a mutação com taxa de ocorrência em 1% conforme apresentado por Viana (VIANA, 1998).

O resultado da estratégia obtido pelo bloco funcional do planejamento é apresentado na Figura 4.15. Ou seja, o resultado é igual ao encontrado manualmente, conforme apresentada pela Figura 4.14, e o mesmo apresentado por Bassam (BASSAM *et al.*, 2006).

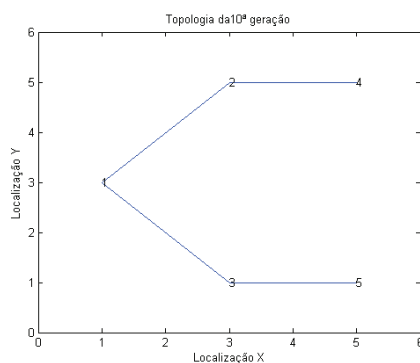


Figura 4.15 – Representação gráfica da solução ótima obtida com a utilização da estratégia.

Inicialmente na Tabela 4.9 são apresentados os circuitos, conforme demanda presente na Tabela 4.7(b), o percurso entre a origem e destino e o custo inicial conforme o modelo de topologia proposta com a menor distância entre os pontos sem a presença de falhas.

Tabela 4.9 – Apresentação da tabela com os circuitos, percursos e custos iniciais.

Circuito	Percurso					Custo inicial
	Origem	Destino	Destino	Destino	Destino	
1	1	2	0	0	0	2,83
2	1	3	0	0	0	2,83
3	1	2	4	0	0	4,83
4	1	3	5	0	0	4,83
5	2	1	3	0	0	5,66
6	2	4	0	0	0	2
7	2	1	3	5	0	7,66
8	3	1	2	4	0	7,66
9	3	5	0	0	0	2
10	4	2	1	3	5	9,66

Conforme fluxograma apresentado pela Figura 4.7, com auxílio da estratégia é possível realizar o estudo do impacto da perda de tráfego da rede na presença de falhas

através do bloco funcional responsável pelo estudo da recomposição, apresentada na Figura 4.12. Este bloco funcional também possibilita a classificação das estações através do somatório do tráfego presente em cada nó da rede permitindo a análise do fluxo do tráfego. Caso a rede apresente o estado de *blackout* geral o administrador da rede pode determinar a seqüência de inicialização do tráfego conforme o critério de prioridade previamente calculado. É apresentada, na Tabela 4.10, a seqüência de prioridade e os valores obtidos do somatório do tráfego de cada estação para rede de Bassam (BASSAM *et al.*, 2006) no caso de *blackout* geral.

Tabela 4.10 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede.

Prioridade	1	2	3	4	5
Estação	3	1	2	5	4
Valor	484	482	430	237	195

Conforme a seqüência de prioridade apresentada na Tabela 4.10, as estações 3 e 1 apresentam os maiores valores de tráfego. E com o objetivo de avaliar o recurso responsável pelo estudo de casos da recomposição do tráfego através da aplicação do conceito de rede fictícia do bloco funcional da recomposição, descrita na seção 2.5.3., é apresentada na Tabela 4.11 a inserção do valor de RF na topologia proposta.

Tabela 4.11 – Apresentação das distâncias envolvidas na topologia com o conceito de rede fictícia.

Enlace	1	2	6	9
Nó Origem	1	1	2	3
Nó destino	2	3	4	5
Distância	2,83	Valor RF	2	2

Na Figura 4.16 é apresentada graficamente a topologia de rede com falha entre as estações 1 e 3 e os custos envolvidos, bem como a aplicação do conceito da rede fictícia.

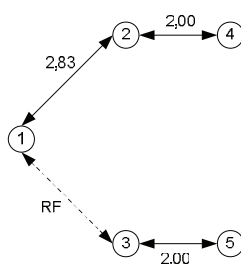


Figura 4.16 – Representação gráfica da rede de Bassam (BASSAM *et al.*, 2006) com o conceito de rede fictícia na presença de falha entre as estações 1 e 3.

Com a aplicação da rede fictícia sobre a topologia com falha é possível a realização do roteamento dos circuitos conforme descrição na seção 4.2.3.1 possibilitando o estabelecimento de novos percursos para cada circuito apresentado na Tabela 4.7(b) através do algoritmo de Dijkstra.

Como a estação em estudo não possui rotas alternativas com outras estações é apresentada na Tabela 4.12 o custo final dos circuitos provisionados na topologia proposta, ou seja, o custo final dos circuitos afetados será recalculados pelo algoritmo de Dijkstra e terá o acréscimo do custo da rede fictícia. Desta forma, dos 10 circuitos presente na rede, 6 serão afetados na presença da falha ocasionando o impacto em 60% dos circuitos e afetando a demanda em 51% conforme os valores apresentados na Tabela 4.7(b).

Tabela 4.12 – Tabela com a distribuição da demanda e custos envolvidos por percurso na presença de falha.

Circuito	Percurso					Custo inicial	Custo final
	Origem	Destino	Destino	Destino	Destino		
1	1	2	0	0	0	2,83	2,83
2	1	3	0	0	0	2,83	10000
3	1	2	4	0	0	4,83	4,83
4	1	3	5	0	0	4,83	10002,00
5	2	1	3	0	0	5,66	10002,83
6	2	4	0	0	0	2	2
7	2	1	3	5	0	7,66	10004,83
8	3	1	2	4	0	7,66	10004,83
9	3	5	0	0	0	2	2
10	4	2	1	3	5	9,66	10006,83

Assim, pode-se concluir que a estratégia, apresentada na Figura 4.7, obteve para o planejamento da rede a mesma solução ótima, apresentada pela Figura 4.15, conforme o resultado obtido manualmente apresentados por Bassam (BASSAM *et al.*, 2006), apresentada pela Figura 4.14, além de prover o estudo da recomposição do tráfego em caso de falha e os custos envolvidos.

5 TESTES E RESULTADOS

Com a finalidade de avaliar o desempenho, a funcionalidade e a eficiência da estratégia demonstrada no capítulo anterior, neste capítulo será abordada a descrição dos testes realizados, bem como a demonstração dos resultados obtidos, através do recurso de simulação para realização do planejamento e estudo da recomposição da rede. Para realização da simulação foram utilizados 2 tipos de redes, sendo a primeira composta por um conjunto de 11 nós com demanda de 22 circuitos, e a segunda rede composta por 27 nós e demanda de 45 circuitos. Essa última representa uma rede real, denominada de *backbone*, em empresa brasileira de telecomunicações conforme apresentado por Piqueira (PIQUEIRA, 2008).

5.1 PLANEJAMENTO

Para realização dos testes e avaliação dos resultados, na etapa de planejamento, inicialmente é necessária a configuração dos parâmetros que compõem o AG, tais como: definição do tamanho da população inicial, taxa de seleção dos melhores indivíduos, definição do número de gerações e a taxa de mutação. O parâmetro *crossover* está definido em apenas um ponto de corte, conforme apresentação da seção 4.2.2.1.5 na composição das estratégias.

Com os parâmetros do AG definidos previamente, o algoritmo realiza a leitura dos dados fundamentais responsáveis pelo posicionamento das estações, de acordo com o plano de coordenadas no formato cartesiano e a quantidade dos circuitos responsáveis pela demanda do tráfego pela rede com os pontos de origem e destino conhecidos. Desta forma, a estratégia, implementada via *software* conforme seção 4.3.1, realiza a leitura, o cálculo da distância entre todos os pontos e o preenchimento da matriz responsável pela distância com todos os valores possíveis das distâncias entre os pontos i e j conforme equação (7). Os valores contidos na matriz das distâncias são os utilizados pelo AG na busca da solução ótima conforme os critérios de avaliação do *fitness* apresentados pela equação (13).

Os resultados obtidos como solução ótima são definidos pelos parâmetros do AG citados acima e, principalmente, pela composição da função objetivo na avaliação do *fitness*. Outra característica da estratégia é a abordagem do critério de parada definido pelo número máximo de geração, devido aos objetivos dessa dissertação. Desta forma, a solução com o menor custo é obtida através da execução da estratégia implementada, com o auxílio da ferramenta computacional apresentada na seção 4.3.1.

Com o intuito de realizar a avaliação da estratégia com número maior do que 5 estações, apresentado na seção 4.3.2, nas seções subseqüentes são apresentados dois estudos de casos, uma rede de 11 nós possibilitando $214.358.881 \times 10^6$ combinações possíveis e outra rede de 27 nós possibilitando $6,08 \times 10^{35}$ combinações possíveis conforme apresentado na seção 3.1.1 - (FERREIRA, 2000).

5.1.1 Planejamento em Rede de 11 Nós

Com o objetivo de referência para testar, avaliar e comparar modelos de projetos de rede e algoritmos, possibilitando o compartilhamento da informação entre os pesquisadores e profissionais que trabalham nesta área, Michal Pióro (PIÓRO e MEDHI, 2004), apresenta na 5th *International Workshop on Design of Reliable Communication Networks* (DCRN) a biblioteca SNDlib composta por instâncias de testes aplicadas a problemas de otimização que envolve redes de telecomunicações. Desta forma, a instância denominada de Di Yuan, formada inicialmente por 11 nós e demanda composta por 22 circuitos, foi escolhida para realização dos testes e simulação em função de apresentar 2,2 vezes o número de estações, saltando de 125 combinações possíveis de solução para $214.358.881 \times 10^6$ combinações.

Para a realização dos testes foram utilizados como variáveis de entrada apenas os nós presentes na rede a demanda com o propósito de obter a solução ótima proposta pela estratégia descrita na seção 4.2.2, no planejamento da topologia de rede.

Com o objetivo de apresentar as variáveis de entrada da rede denominada de Di Yuan, são apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2 as coordenadas entre os pontos i e j e os valores da demanda, conforme estações de origem e destino, respectivamente.

Tabela 5.1 – Representação das coordenadas cartesianas da rede de 11 nós.

Estação	X	Y
1	359.00	375.00
2	223.00	255.00
3	406.00	233.00
4	384.00	37.00
5	394.00	137.00
6	223.00	71.00
7	56.00	347.00
8	14.00	193.00
9	210.00	456.00
10	164.00	374.00
11	106.00	37.00

Tabela 5.2 – Representação da demanda entre os nós de origem e destino da rede de 11 nós.

Circuitos	Nó Origem	Nó Destino	Demanda
1	1	2	2
2	1	5	3
3	1	6	3
4	1	8	4
5	2	3	1
6	5	6	2
7	5	7	2
8	4	5	1
9	4	10	1
10	1	11	1
11	6	11	3
12	7	11	2
13	1	7	1
14	7	9	4
15	3	10	5
16	2	10	2
17	4	9	1
18	8	10	3
19	3	4	1
20	3	7	3
21	9	11	5
22	7	8	3

Com o objetivo de avaliar a estratégia para rede Di Yuan, foi elaborada 4 conjuntos de simulações com variação do critério de parada em 500, 750, 1500 e 3000 gerações e, principalmente, com a atribuição de pesos na equação (13) referente à função objetivo,

descritos na seção 4.2.2.1.3. Os valores utilizados foram 0,6; 0,01; 0,2 e 0,19 referentes aos pesos P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Desta forma foram realizadas 35 avaliações prevendo a alternância da população inicial e a variação da taxa de seleção (elitismo).

Para a avaliação dos resultados obtidos, nas tabelas 5.3 e 5.4 é apresentado o valor obtido da solução ótima para cada conjunto de teste considerando o critério de parada, ou seja, número de gerações. Neste conjunto de simulação a taxa de mutação foi fixada em 1% e o *crossover* em apenas um ponto de corte com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo.

Para as simulações com critério de parada em 500 gerações o valor da solução ótima obtido foi de 5364,468849 unidades de distância sendo que a 1ª simulação obteve a solução ótima na 21ª geração com população inicial de 250 indivíduos e com taxa de seleção em 10%. Já a 20ª simulação obteve a solução ótima na 72ª geração com população inicial de 100 indivíduos e com taxa de seleção de 50%. Outro fator é que os cinco melhores resultados foram obtidos com população inicial entre 100 a 250 indivíduos e com taxa de seleção entre 10% a 20%, conforme apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores obtidos com o critério de parada em 500 gerações.

Simulação Identificador	Configuração do AG			Resultado	
	População	Taxa de Seleção (Elitismo)	Gerações	Geração com o melhor resultado	Valor da Melhor Solução
29	250	0.10	500	21	5364,468849
30	250	0.20	500	23	5364,468849
15	150	0.10	500	24	5364,468849
22	200	0.10	500	24	5364,468849
8	100	0.10	500	30	5364,468849
34	250	0.40	500	31	5364,468849
23	200	0.20	500	34	5364,468849
16	150	0.20	500	35	5364,468849
1	50	0.10	500	36	5364,468849
9	100	0.20	500	37	5364,468849
21	150	0.50	500	38	5364,468849
2	50	0.20	500	39	5364,468849
27	200	0.40	500	40	5364,468849
35	250	0.50	500	44	5364,468849
28	200	0.50	500	45	5364,468849
13	100	0.40	500	47	5364,468849
20	150	0.40	500	48	5364,468849
7	50	0.50	500	56	5364,468849
6	50	0.40	500	67	5364,468849
14	100	0.50	500	72	5364,468849

As simulações com critério de parada em 750 gerações o valor da solução ótima obtido foi de 5364,468849 unidades de distância, sendo que a 1ª simulação obteve a solução ótima na 28ª geração com população inicial de 200 indivíduos e com taxa de seleção em 30%. Já a 5ª simulação obteve a solução ótima na 48ª geração com população inicial de 50 indivíduos e com taxa de seleção de 30%, conforme apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores obtidos com o critério de parada em 750 gerações.

Simulação	Configuração do AG			Resultado	
	Identificador	População	Taxa de Seleção (Elitismo)	Gerações	Geração com o melhor resultado
24	200	0.30	750	28	5364,468849
31	250	0.30	750	28	5364,468849
17	150	0.30	750	31	5364,468849
10	100	0.30	750	35	5364,468849
3	50	0.30	750	48	5364,468849

Para avaliação da variação do resultado obtido ao longo das gerações, nas tabelas 5.5 e 5.6, é apresentado o valor obtido da solução ótima com critério de parada acima de 1000 gerações, sendo que neste conjunto de simulação a taxa de mutação e o *crossover* são os mesmos apresentados nos testes para 500 e 750 gerações.

Para as simulações com critério de parada em 1500 gerações o valor da solução ótima obtido foi de 5364,468849 unidades de distância, sendo que a 1ª simulação obteve a solução ótima na 22ª geração com população inicial de 200 indivíduos e com taxa de seleção em 30%. Já a 5ª simulação obteve a solução ótima na 63ª geração com população inicial de 50 indivíduos e com taxa de seleção de 30%, conforme apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores obtidos com o critério de parada em 1500 gerações.

Simulação	Configuração do AG			Resultado	
	Identificador	População	Taxa de Seleção (Elitismo)	Gerações	Geração com o melhor resultado
25	200	0.30	1500	22	5364,468849
32	250	0.30	1500	30	5364,468849
18	150	0.30	1500	35	5364,468849
11	100	0.30	1500	41	5364,468849
4	50	0.30	1500	63	5364,468849

Para as simulações com critério de parada em 3000 gerações, o valor da solução ótima obtido foi de 5364,468849 unidades de distância, sendo que a 1ª simulação obteve a solução

ótima na 29ª geração com população inicial de 150 indivíduos e com taxa de seleção em 30%. Já a 5ª simulação obteve a solução ótima na 44ª geração com população inicial de 50 indivíduos e com taxa de seleção de 30%, conforme apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Valores obtidos com o critério de parada em 3000 gerações.

Simulação Identificador	Configuração do AG			Resultado	
	População	Taxa de Seleção (Elitismo)	Gerações	Geração com o melhor resultado	Valor da Melhor Solução
19	150	0.30	3000	29	5364,468849
12	100	0.30	3000	33	5364,468849
33	250	0.30	3000	33	5364,468849
26	200	0.30	3000	39	5364,468849
5	50	0.30	3000	44	5364,468849

Com o objetivo de ilustrar a topologia obtida pela estratégia em todos os 4 conjunto de simulações com o menor custo, no valor de 5364,468849 unidades de distância, é apresentada à solução ótima graficamente na Figura 5.1.

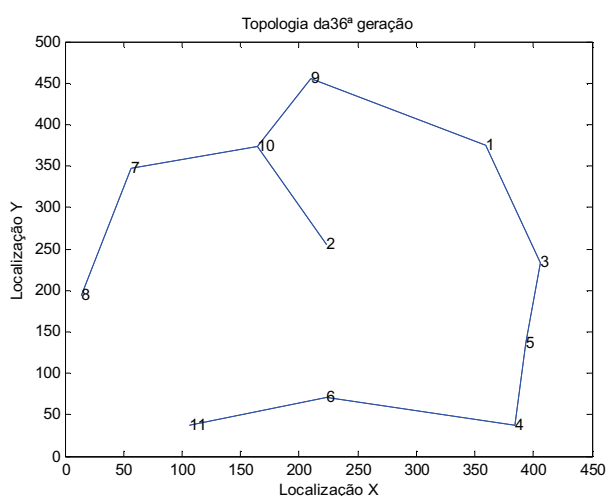


Figura 5.1 – Topologia de rede proposta pela estratégia para 11 nós com o menor custo.

Com o objetivo de avaliar o desempenho da estratégia com novos parâmetros nos pesos da equação (13) e novas taxas de mutação, são apresentados na Tabela 5.7 os valores obtidos como solução ótima, ou valor aproximado para as 6 novas simulações. Sendo previstos novos valores de 0,8; 0,008; 1 e 1 atribuídos aos pesos de P1, P2, P3 e P4, respectivamente, e a variação da taxa de mutação em 20%, 50% e 70%.

Tabela 5.7 – Valores obtidos para as 6 simulações da rede de 11 nós.

Parâmetros de simulação	Simulação					
	1	2	3	4	5	6
População inicial	100	100	100	100	100	100
Elitismo (%)	30	50	30	50	30	50
Taxa de mutação (%)	20	20	50	50	70	70
Critério de parada (gerações)	200	200	200	200	200	200
Custo	5050,3092	5050,3092	5050,3092	5050,7862	5058,4573	5054,5970
Geração com o melhor resultado	158	109	28	145	27	47

Na Figura 5.2 é apresentado o resultado da função objetivo graficamente para cada simulação no decorrer de 200 gerações conforme o critério de parada.

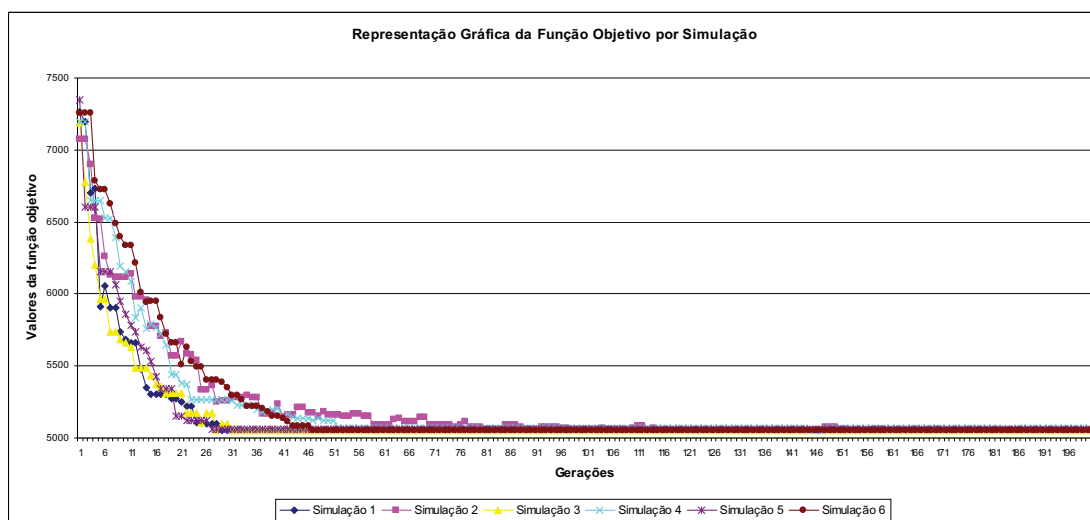


Figura 5.2 – Representação gráfica da convergência das funções objetivo para rede de 11 nós.

Com o objetivo de comprovar a convergência do resultado obtido como solução ótima em cada simulação realizada pela estratégia, é apresentada na Figura 5.3 o gráfico truncado na 100ª geração.

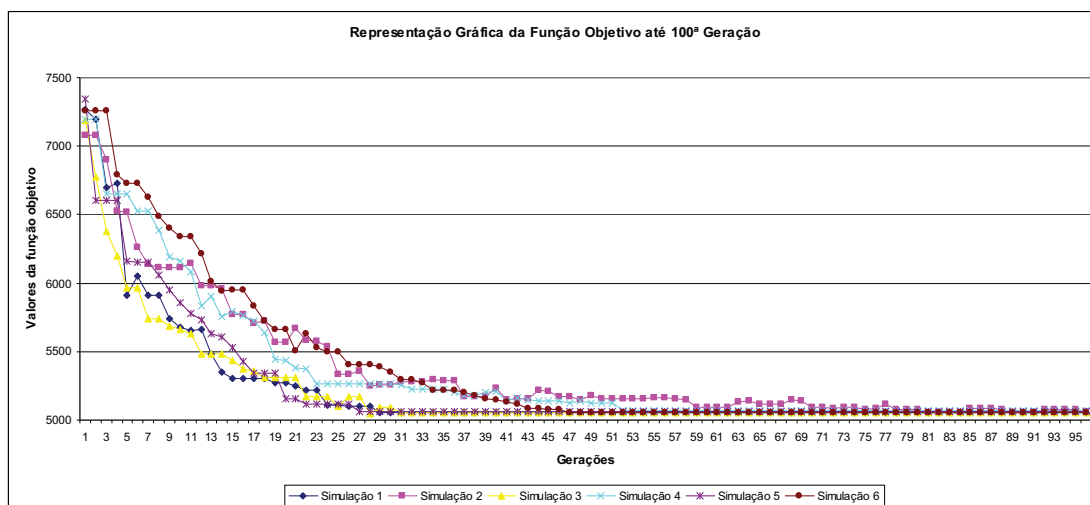


Figura 5.3 – Representação gráfica da convergência das funções objetivo truncada na 100ª geração.

Como o valor da solução ótima está associado à topologia de rede, na Figura 5.4 é apresentada a proposta de topologia pelo bloco funcional do planejamento para cada simulação, conforme resultado obtido e apresentado na Tabela 5.7.

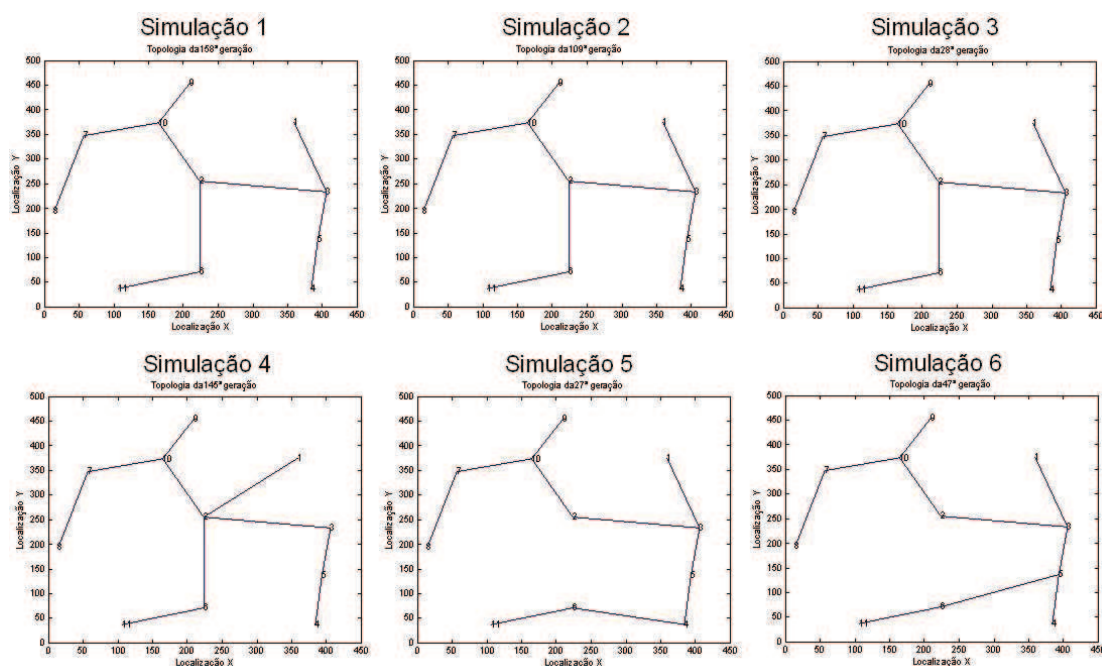


Figura 5.4 – Representação gráfica da função objetivo das 6 simulações para rede de 11 nós.

Para a realização do conjunto das 4 simulações demonstradas nas Tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 foram necessárias 16 horas e 19 minutos e para as 6 novas simulações foram necessários 45 minutos de processamento em microcomputador Dell, modelo Optiplex 360

com processador Intel Core 2 Duo E7500, *clock* de 2,93 GHz e 4 *Gigabyte* de memória RAM DDR2 com sistema operacional *Windows XP* e *software* MATLAB versão 7.8.0.347.

A título de validação dos resultados obtidos para o planejamento da rede de 11 nós o resultado do planejamento será comparado ao apresentado pela instância denominada de Di Yuan, inicialmente representada pela Figura 5.5(a), resolvida por Christian Raack através da formulação com restrição nos arcos com o uso da programação linear. A solução encontrada é apresentada na Figura 5.5(b) com custo da solução final em 553.700,00. Para solução do problema foi computada a restrição da capacidade das interfaces de linha e custos pré-definidos pela instância do problema. Para utilização da estratégia foi utilizada apenas a localização e a demanda resultando a solução ótima conforme apresentado na Figura 5.5(c).

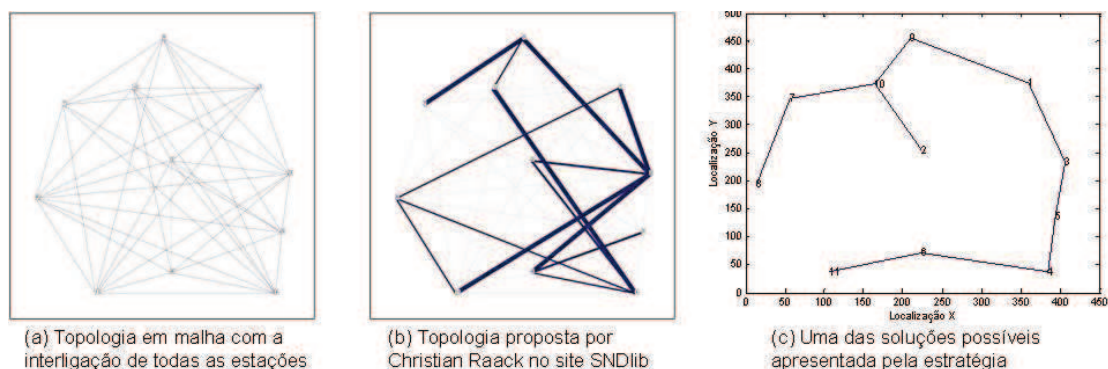


Figura 5.5 – Representação gráfica dos resultados obtidos por PL e AG para instância de 11 nós.

5.1.2 Planejamento em Rede de 27 Nós

Com a finalidade de avaliar a estratégia em uma rede real é proposto o estudo de caso com a rede utilizada por Piqueira (PIQUEIRA, 2008), composta por 27 nós e com demanda de 22 circuitos por apresentar 5,4 vezes o número de estações apresentada na seção 4.3.2, saltando de 125 combinações possíveis de solução para $6,08 \times 10^{35}$ combinações.

A localização das estações da rede apresentada por Piqueira (PIQUEIRA, 2008) apresentavam coordenadas georeferenciadas com latitude e longitude em graus, minutos e

segundos necessitando inicialmente da conversão para o modelo cartesiano transformando em graus decimais conforme apresentado na seção 4.2.1. Os valores finais correspondentes às coordenadas entre os pontos i e j são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Representação das coordenadas cartesianas da rede de 27 nós.

Estação	X	Y
1	30,03	51,19
2	30,03	51,23
3	26,92	49,07
4	27,60	48,55
5	27,82	50,33
6	25,42	49,29
7	25,41	49,26
8	23,43	51,94
9	23,41	51,90
10	18,79	52,62
11	23,55	46,64
12	19,87	43,94
13	22,88	43,23
14	22,72	43,66
15	22,22	54,81
16	20,44	54,65
17	22,23	53,34
18	20,82	51,72
19	17,97	50,34
20	17,73	49,10
21	15,94	52,27
22	16,47	54,64
23	16,68	49,25
24	15,79	47,91
25	15,78	47,93
26	16,18	55,96
27	15,63	56,06

Já os valores correspondentes à demanda do tráfego, conforme as estações de origem e destino, são apresentadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Representação da demanda entre os nós de origem e destino da rede de 27 nós.

Circuitos	Nó Origem	Nó Destino	Demanda
1	1	2	20
2	1	3	1
3	1	4	1
4	1	6	4
5	1	7	2
6	2	4	29
7	2	6	52
8	2	7	1
9	2	24	29
10	3	4	12
11	3	7	1
12	3	9	1
13	3	10	3
14	3	24	2
15	4	6	31
16	4	7	2
17	4	10	1
18	6	7	14
19	6	8	15
20	6	9	4
21	6	10	17
22	6	11	42
23	6	24	31
24	7	9	2
25	7	10	2
26	7	16	1
27	7	23	1
28	7	25	1
29	8	9	3
30	9	10	1
31	9	16	1
32	9	19	1
33	10	16	5
34	10	19	1
35	10	24	1
36	11	24	21
37	11	25	21
38	16	24	14
39	16	25	1
40	16	27	1
41	21	27	1
42	22	27	2
43	23	24	24
44	24	25	4
45	24	27	17

Com o objetivo de avaliar o desempenho da estratégia para rede de 27 nós foram realizadas 6 simulações prevendo a alteração da taxa de mutação em 20%, 50% e 70% e atribuindo os valores de 0,8, 0,0003, 1 e 1 aos pesos de P1, P2, P3 e P4, respectivamente, da equação (12). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Valores obtidos para as 6 simulações da rede 27 nós.

Parâmetros de simulação	Simulação					
	1	2	3	4	5	6
População inicial	100	100	100	100	100	100
Elitismo (%)	30	50	30	50	30	50
Taxa de mutação (%)	20	20	50	50	70	70
Critério de parada (gerações)	200	200	200	200	200	200
Custo	1295,9370	1327,8578	1287,0960	1349,6470	1300,5554	1360,5484
Geração com o melhor resultado	197	200	200	199	198	198

Na Figura 5.6 é apresentado o resultado da função objetivo graficamente para cada simulação no decorrer de 200 gerações conforme o critério de parada.

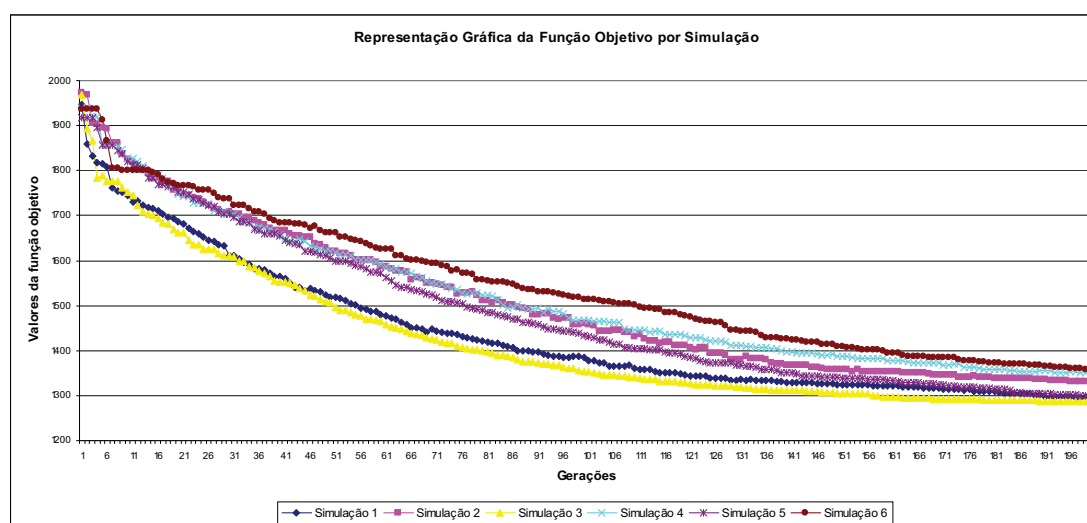


Figura 5.6 – Representação gráfica da convergência das funções objetivo da rede de 27 nós.

Como o valor da solução ótima está associado à topologia de rede, na Figura 5.7 é apresentada a proposta de topologia pelo bloco funcional do planejamento para cada simulação, conforme resultado obtido e apresentado na Tabela 5.10.

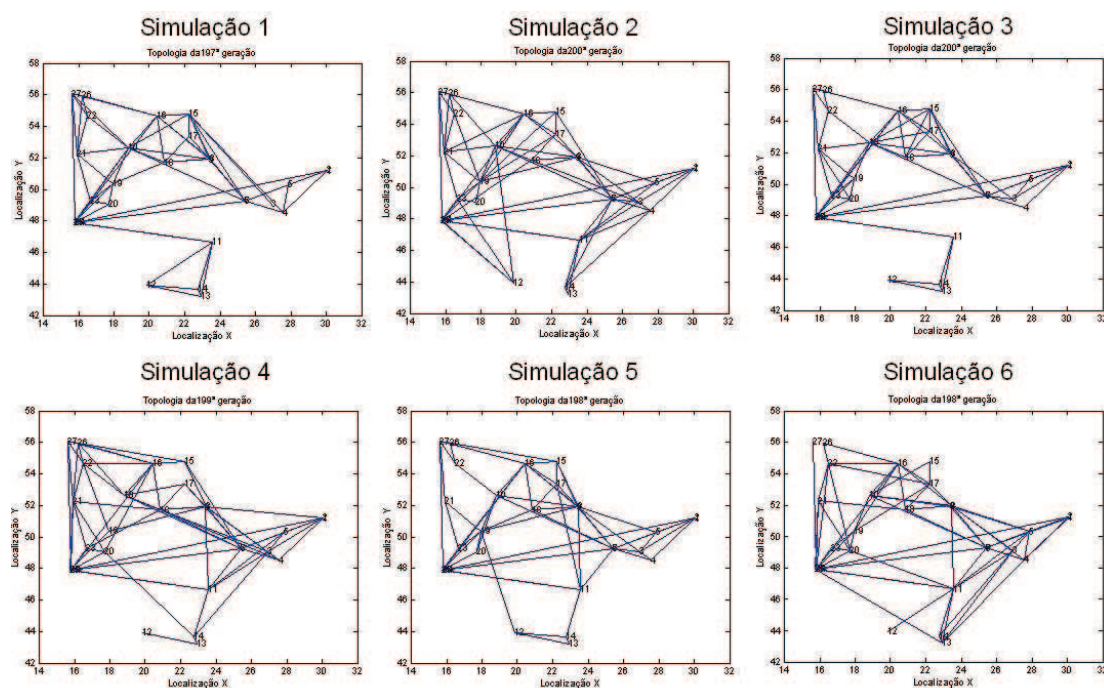


Figura 5.7 – Representação gráfica da função objetivo das 6 simulações da rede de 27 nós.

Para a realização das 6 simulações foram necessárias 3 horas de processamento em microcomputador Dell, modelo Optiplex 360 com processador Intel Core 2 Duo E7500, *clock* de 2,93 GHz e 4 *Gigabyte* de memória RAM DDR2 com sistema operacional *Windows XP* e *software* MATLAB versão 7.8.0.347.

A título de validação dos resultados obtidos para o planejamento da rede de 27 nós, o resultado do planejamento não pode ser comparado porque a rede em análise não pertence a nenhuma instância de problema, pois representa uma rede real de telecomunicações. Esta rede foi obtida através de constantes ampliações no *backbone* desde o ano de 2000 com a finalidade de atender a demanda de tráfego entre as estações presente na Tabela 5.8.

5.2 RECOMPOSIÇÃO

Para a realização do estudo da recomposição da rede conforme fluxograma da estratégia apresentado na seção 4.2 e representado pela Figura 4.7, é necessária a obtenção da

topologia proposta pelo bloco funcional do planejamento, para que o bloco funcional da recomposição, descrito na seção 4.2.3, possa realizar o roteamento da demanda. O roteamento da demanda é executado com auxílio do algoritmo de Dijkstra na obtenção do menor custo presente na rede, ou seja, a menor distância entre as estações de origem e destino. Caso ocorrer falha no enlace em avaliação, a estratégia realizará um novo roteamento para o circuito, caso a estação possua outras conexões com outras estações. Caso não for possível a execução do novo roteamento, a estratégia realizará o roteamento com a adição do valor da rede fictícia, elevando o custo.

5.2.1 Estudo de Caso com Rede de 11 Nós

Para a realização do estudo de caso com a rede de 11 nós, denominada de Di Yuan, a topologia proposta é a mesma apresentada na Tabela 5.7, pelas soluções ótimas obtidas nas simulações 1, 2 e 3, pois apresentam a mesma topologia, possibilitando a avaliação do impacto de falhas na topologia, conforme demonstração realizada na seção 4.3.2.

Com o objetivo de exemplificar o roteamento do menor custo executado pelo algoritmo de Dijkstra, é apresentada na Figura 5.8 a descrição de 3 circuitos, sendo que para o 1º circuito, o percurso envolve o início na estação de origem “1” com passagem pela estação “3” e finalizando na estação destino “2” com o custo inicial de 333,8937 unidades de distância. Para o 12º circuito o percurso envolve o início na estação “7” com passagem pelas estações 10, 2, 6 e finalizando na estação destino “11” com custo de 549,9871 unidade de distância. Para o 22º circuito o percurso envolve apenas o *link* entre as estações 7 e 8 com custo de 159,6246 unidade de distância.

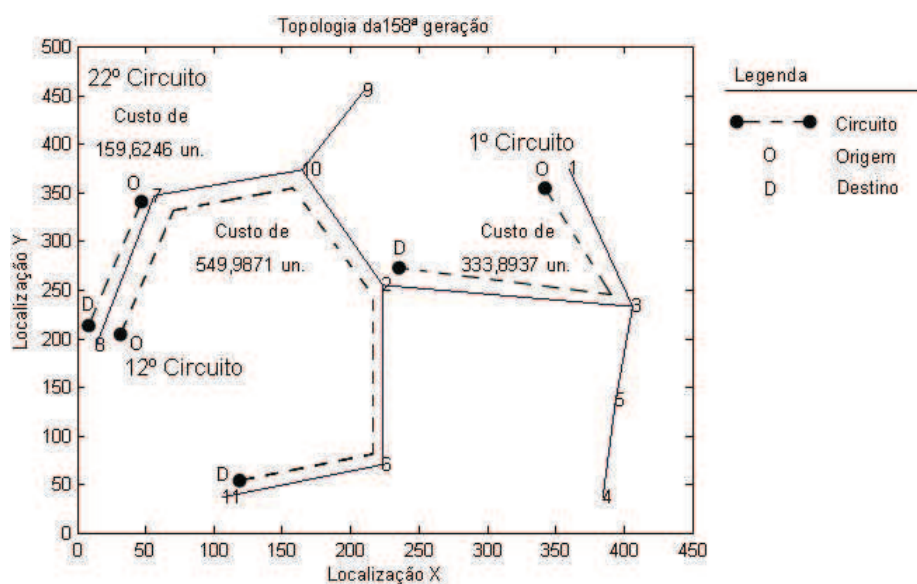


Figura 5.8 – Representação gráfica da topologia e o roteamento dos circuitos para rede de 11 nós.

Na Tabela 5.11 são apresentados os percursos e os custos, calculados conforme equação (13), envolvidos no roteamento dos circuitos pelo bloco funcional responsável pelo planejamento conforme demanda apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.11 – Custos e percursos obtidos para rede de 11 nós sem a presença de falhas.

Circuito	Percurso						Custo inicial
	Origem	Destino	Destino	Destino	Destino	Destino	
1	1	3	2				333,8937
2	1	3	5				246,3232
3	1	3	2	6			517,8937
4	1	3	2	10	7	8	737,6653
5	2	3					184,3177
6	5	3	2	6			465,0648
7	5	3	2	10	7		525,2118
8	4	5					100,4988
9	4	5	3	2	10		514,3867
10	1	3	2	6	11		639,7338
11	6	11					121,8401
12	7	10	2	6	11		549,9871
13	1	3	2	10	7		578,0408
14	7	10	9				205,3451
15	3	2	10				317,1409
16	2	10					132,8232
17	4	5	3	2	10	9	608,4080
18	8	7	10				270,9484
19	3	5	4				197,2458
20	3	2	10	7			428,4647
21	9	10	2	6	11		532,6845
22	7	8					159,6246

Como a estratégia prevê a classificação das estações com o objetivo de informar a prioridade das estações em caso de *blackout*, é apresentado na Tabela 5.12 a classificação das estações presentes na rede de Di Yuan de acordo com o somatório do tráfego por estação.

Tabela 5.12 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede para rede de 11 nós.

Prioridade (P)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Estação (E)	2	10	3	7	6	5	1	11	9	8	4
Somatório do tráfego por estação (D)	65	55	50	29	24	14	14	11	10	10	4

Como um dos objetivos desta dissertação é a realização do estudo da recomposição, previsto na seção 4.2.3, na incidência de múltiplas falhas na topologia, na Figura 5.9 são apresentados a incidência de 4 falhas de forma seqüencial na topologia. A 1ª falha é aplicada no enlace que interliga as estações 7 e 8, ocasionando o acréscimo do custo pelo valor definido no custo da rede fictícia no 4º, 18º e 22º circuito, pois como não existem rotas alternativas, a estratégia implementa o conceito da rede fictícia na matriz responsável pela conectividade da rede, possibilitando o tratamento matemático na obtenção dos custos envolvidos. Na ocorrência da 2ª falha no enlace que interliga as estações 7 e 10 ocorre a adição do custo da rede fictícia ao custo inicial apresentado na Tabela 5.11 no 7º, 12º, 13º, 14º, 20º e o 22º circuito, porém nos custos do 4º e o 18º circuito são adicionados novos valores do custo da rede fictícia, ou seja, o custo dobrou. A ocorrência da 1ª e 2ª falha na rede também pode ser interpretada como perda total de conexão da estação 7, com o restante da rede totalizando em 42% a perda de tráfego ocasionada pela falha em 8 circuitos, conforme apresentado na Tabela 5.13. A 3ª falha presente nos enlaces que interligam as estações 6 e 11 ocasiona a falha em 11 circuitos totalizando o impacto de 58% do tráfego e o acréscimo do custo pela rede fictícia no 12º circuito, já os custos para o 4º, 7º, 10º, 11º, 13º, 14º, 18º, 21º e 22º permanecem com os valores apresentados na 2ª falha. A última falha aplicada no enlace que interliga as estações 2 e 3 atinge a totalidade de 87% da perda de tráfego através da falha de 18 circuitos. Nesta última falha, o roteamento do 4º circuito é afetado pela 3ª vez com o acréscimo do custo da rede fictícia e o 7º, 10º, 13º e 20º circuito são afetados pela 2ª vez consecutiva, dobrando os custos em função da incidência do custo da rede fictícia, restando apenas o 2º, 8º, 16º e 19º circuito intactos na rede.

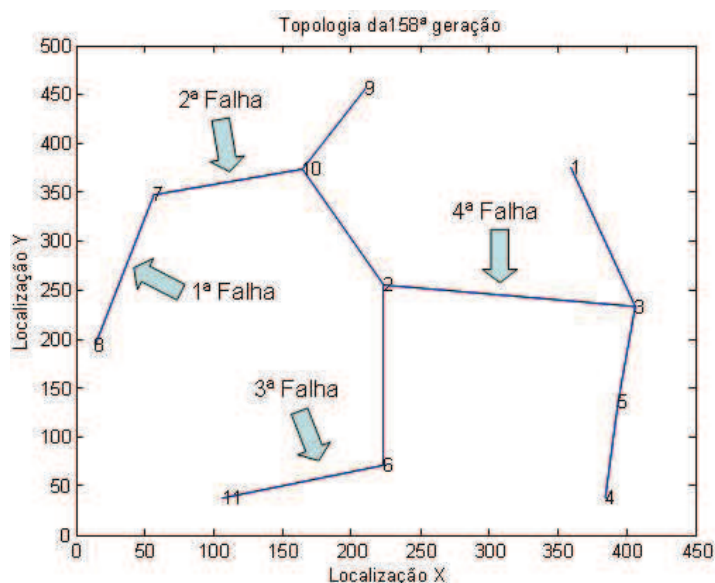


Figura 5.9 – Representação gráfica da incidência de 4 falhas na rede de 11 nós.

Na Tabela 5.13 são apresentados os valores obtidos dos custos finais após a incidência de 4 falhas seqüenciais.

Tabela 5.13 – Valores obtidos com a incidência de falhas na rede de 11 nós

Circuitos	Percurso						1ª Falha Enlace (7,8) Custos envolvidos	2ª Falha Enlace (7,10) Custos envolvidos	3ª Falha Enlace (6,11) Custos envolvidos	4ª Falha Enlace (2,3) Custos Finais
	O	D	D	D	D	D				
1	1	3	2				333,8937	333,8937	333,8937	10149,5761
2	1	3	5				246,3232	246,3232	246,3232	246,3232
3	1	3	2	6			517,8937	517,8937	517,8937	10333,5761
4	1	3	2	10	7	8	10578,0408	20466,7169	20466,7169	30282,3993
5	2	3					184,3177	184,3177	184,3177	10000,0000
6	5	3	2	6			465,0648	465,0648	465,0648	10280,7471
7	5	3	2	10	7		525,2118	10413,8879	10413,8879	20229,5703
8	4	5					100,4988	100,4988	100,4988	100,4988
9	4	5	3	2	10		514,3867	514,3867	514,3867	10330,0690
10	1	3	2	6	11		639,7338	639,7338	10517,8937	20333,5761
11	6	11					121,8401	121,8401	10000,0000	10000,0000
12	7	10	2	6	11		549,9871	10438,6632	20316,8232	20316,8232
13	1	3	2	10	7		578,0408	10466,7169	10466,7169	20282,3993
14	7	10	9				205,3451	10094,0213	10094,0213	10094,0213
15	3	2	10				317,1409	317,1409	317,1409	10132,8232
16	2	10					132,8232	132,8232	132,8232	132,8232
17	4	5	3	2	10	9	608,4080	608,4080	608,4080	10424,0903
18	8	7	10				10111,3239	20000,0000	20000,0000	20000,0000
19	3	5	4				197,2458	197,2458	197,2458	197,2458
20	3	2	10	7			428,4647	10317,1409	10317,1409	20132,8232
21	9	10	2	6	11		532,6845	532,6845	10410,8445	10410,8445
22	7	8					10000,0000	10000,0000	10000,0000	10000,0000

A título de validação dos resultados obtidos no estudo da recomposição da rede de 11 nós, o resultado não poderá ser comparado ao apresentado pela instância denominada de Di Yuan, pois inicialmente a instância é proposta para planejamento.

5.2.2 Estudo de Caso com Rede de 27 Nós

Para a realização do estudo de caso com a rede de 27 nós utilizada por Piqueira (PIQUEIRA, 2008), a topologia proposta para análise é a mesma apresentada na Tabela 5.10 pela simulação nº 3, pois apresenta o menor custo entre as demais simulações. Na Figura 5.10 é apresentada a topologia.

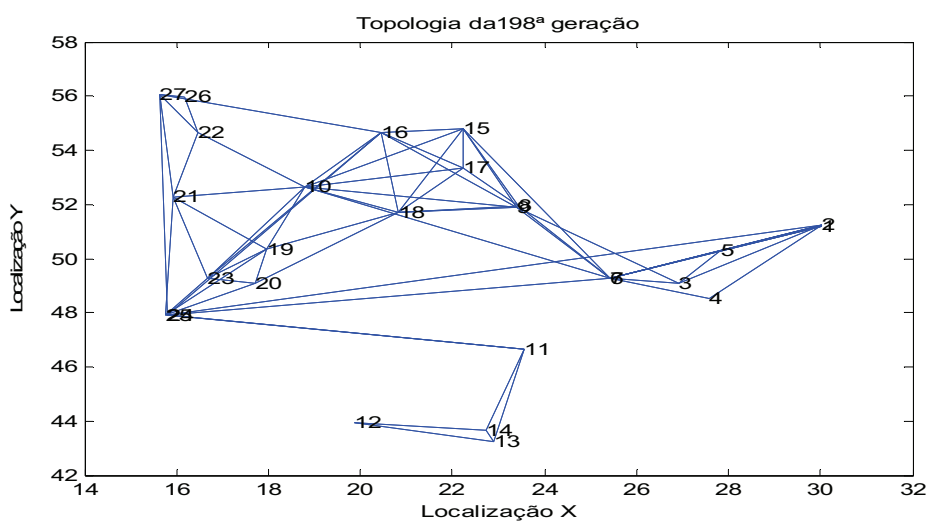


Figura 5.10 – Topologia de rede proposta pela estratégia para 27 nós com o menor custo.

Na Tabela 5.14 são apresentados os percursos e os custos, calculados conforme equação (13), envolvidos no roteamento dos circuitos conforme demanda apresentada na Tabela 5.9.

Tabela 5.14 – Custos e percursos obtidos para rede de 27 nós sem a presença de falhas.

Circuitos	Percurso					Custo Inicial
	Origem	Destino	Destino	Destino	Destino	
1	1	6	2			9,9906
2	1	6	3			6,5047
3	1	7	4			7,3018
4	1	6				4,9899
5	1	7				5,0079
6	2	4				3,6192
7	2	6				5,0007
8	2	7				5,0189
9	2	24				14,6269
10	3	2	4			7,4078
11	3	2	7			8,8074
12	3	9				4,5073
13	3	6	10			8,9329
14	3	6	24			11,2486
15	4	2	6			8,6199
16	4	7				2,2939
17	4	7	15	10		12,7585
18	6	1	7			9,9977
19	6	8				3,3169
20	6	9				3,2914
21	6	10				7,4181
22	6	24	11			17,5988
23	6	24				9,7338
24	7	15	9			9,5454
25	7	15	10			10,4646
26	7	15	16			8,187
27	7	15	10	23		14,4427
28	7	15	10	23	25	16,041
29	8	18	9			5,2153
30	9	10				4,6737
31	9	16				4,0468
32	9	18	19			5,7649
33	10	16				2,6102
34	10	19				2,428
35	10	16	24			10,8016
36	11	24				7,8649
37	11	25				7,8774
38	16	24				8,1915
39	16	23	25			8,1746
40	16	27				5,0193
41	21	27				3,8018
42	22	27				1,6571
43	23	16	24			14,7678
44	24	11	25			15,7423
45	24	27				8,1561

Como a estratégia prevê a classificação das estações com o objetivo de informar a prioridade das estações em caso de *blackout*, é apresentada, na Tabela 5.15, a classificação das estações presentes na rede de 27 nós de acordo com o volume da demanda por estação. Com o critério de diagramação as letras P, E e D correspondem à prioridade, estação e a demanda que passa através da estação.

Tabela 5.15 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede de 27 nós.

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
E	6	24	2	11	4	16	1	10	7	23	25	27	3	8	15	9	18	22	19	21	26	20	17	14	13	12	5
D	262	227	219	92	76	73	56	35	31	29	27	21	20	18	16	13	8	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0

Para rede composta por 27 nós, é proposta uma seqüência de 3 testes com o objetivo de avaliar a capacidade de resiliência da topologia proposta pelo bloco funcional do planejamento. O 1º teste consiste em escolher a estação com maior prioridade conforme o somatório do tráfego que sirva de base para provocar uma falha na rede e avaliar o impacto da perda de tráfego, quantidade de circuitos afetados e a visualização dos novos roteamentos, caso possível. O 2º teste consiste em provocar múltiplas falhas presente nas conexões da estação alvo com as demais estações, ou seja, em quase todos os enlaces presentes na estação escolhida no 1º teste deixando apenas a estação com 1 enlace ativo. Com o propósito de avaliar o que ocorre com os circuitos e o impacto provocado pela perda do tráfego caso a estação em avaliação apresentar o estado de isolamento ou desconexão com a rede após o 2º teste, é realizado o 3º e último teste. Esta seqüência de testes tende estressar ao máximo a topologia de rede, ou seja, realizar o estudo da viabilidade técnica de topologia proposta pelo bloco funcional do planejamento e o estudo da demanda perante falhas pelo bloco funcional da recomposição em redes de telecomunicações.

A escolha da estação que passará pelo 1º teste e pelos 2 testes conseqüentemente, deve-se a classificação da estação de acordo com prioridade em caso de *blackout* apresentada na Tabela 5.15. Ou seja, a estação 6, pois possui 262 unidades de tráfego distribuídas em seus 10 enlaces. Além de que, os circuitos que apresentam as 4 maiores demandas estão presentes inicialmente no 7º circuito com 52 unidades de tráfego entre as estações 2 e 6, o 22º circuito com 42 unidades de tráfego entre as estações 6 e 11, o 15º e 23º circuito sendo que cada um possui 31 unidades de tráfego entre as estações 4 e 6 e 6 e 24, respectivamente. Desta forma totalizando em 35,37% a capacidade de demanda na rede. Definido a estação, a próxima etapa é a escolha do enlace no qual será inserida a falha, e como já relatado anteriormente, o 7º

circuito é mais importante pela demanda, como descrito na Tabela 5.20(e). Desta forma o 1º teste é aplicado no enlace que interliga as estações 2 e 6. Após a incidência da falha, a estratégia realiza a avaliação dos circuitos que utilizam como transporte a interligação entre as estações 2 e 6 sendo o 1º, 7º e 15º circuitos beneficiados com novo roteamento não existindo a perda de tráfego na rede. Ou seja, o 1º circuito inicialmente utiliza o percurso 1, 6 e 2 e após a falha passa a utilizar o percurso 1, 6, 5, e 2, o 7º circuito inicialmente utiliza o percurso 2 e 6 e após a falha passa a utilizar o percurso 2, 5 e 6, e para o 15º circuito que inicialmente utiliza o percurso 4, 2, e 6 e após a falha passa a utilizar o percurso 4, 2, 5, 6. Na avaliação de novas rotas, a estratégia encontrou outro enlace que possibilita a interligação entre as estações 2 e 6 com o menor custo previamente calculado através do *fitness* presente no bloco funcional do planejamento. O enlace proposto pela estratégia garante através da estação 5 a passagem dos circuitos afetados não impactando na perda de tráfego e com o objetivo de avaliar a alteração dos percursos é apresentada na Tabela 5.19(b) os novos roteamentos realizados e os novos custos na Tabela 5.20(b).

Após a realização do 1º teste, outra funcionalidade prevista na estratégia responsável pelo estudo da recomposição é a reclassificação das prioridades por estações após a incidência da falha e dos novos roteamentos realizados na rede. Pois a estação 6 continua com prioridade máxima e a estação 5 que inicialmente não tinha prioridade, conforme Tabela 5.15, passa a ter a 4ª prioridade com valor de 206 unidades de tráfego. Na Tabela 5.16 é apresentada a prioridade das estações conforme demanda na incidência de falha no enlace que interliga as estações 2 e 6.

Tabela 5.16 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede de 27 nós após falha no enlace entre as estações 2 e 6.

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
E	6	24	2	5	11	4	16	1	10	7	23	25	27	3	8	15	9	18	22	19	21	26	20	17	14	13	12
C	262	227	219	206	92	76	73	56	35	31	29	27	21	20	18	16	13	8	2	2	1	0	0	0	0	0	0

Conforme já comentado anteriormente, o objetivo do 2º teste consiste em inserir 8 novas falhas possibilitando a simulação de múltiplas falhas na rede entre as estações 1, 3, 4, 8, 9, 10, 11 e 24 com a estação 6 possibilitando o estudo da recomposição em 13 circuitos. Para o 1º circuito com percurso alternativo definido no 1º teste, o percurso é recalculado passando por novo roteamento alterando o percurso e o custo existente. O 2º circuito também tem seu percurso e custo recalculados, já para o 4º circuito, com a incidência de múltiplas falhas, o percurso inicialmente formado pelas estações 1 e 6 é recalculado formando um novo percurso

com a passagem pelas estações 1, 7, 2, 5, e 6 e novo custo. O 7º e o 15º circuito não são afetados permanecendo com o mesmo percurso e custo apresentados no 1º teste. O 13º circuito inicialmente com o percurso 3, 6 e 10 é recalculado para 3, 9 e 10 e o 14º circuito é recalculado de 3, 6 e 24 para 3, 9, 16 e 24. O 18º circuito inicialmente com o percurso 6 e 1 e 7 é recalculado para 6, 5, 2 e 7, o 19º circuito de 6, 8 para 6, 5, 3 e 9, o 20º circuito de 6 e 9 para 6, 5, 3, 9, o 21º circuito de 6 e 10 para 6, 5, 3, 9 e 10, o 23º circuito de 6 e 24 para 6, 5, 2 e 24. A eficiência da análise da recomposição na topologia é comprovada no novo roteamento do 22º circuito onde o percurso inicial utiliza as estações 6, 24 e 11 é recalculado para 6, 5, 3, 9, 18, 20, 25 e 11 buscando todas as possibilidades, caso existir. Os valores para os novos percursos e dos custos são apresentados nas Tabelas 5.19(c) e 5.20(c), respectivamente. Como já citado anteriormente a estratégia possibilita a análise da reclassificação das estações após a incidências de falhas sendo que na aplicação de múltiplas falhas, a estação com maior prioridade torna-se a 5 e a estação 6 torna-se a 3ª prioridade. Outro fator que deve ser salientado é a estação 20 que inicialmente não tinha prioridade torna-se a 10ª prioridade. A alteração das prioridades é apresentada na Tabela 5.17 após a incidência de múltiplas falhas.

Tabela 5.17 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede de 27 nós após aplicação de múltiplas falhas nos enlaces com a estação 6.

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
E	5	2	6	3	9	24	18	25	11	20	7	16	4	10	23	1	27	8	15	22	19	21	26	17	14	13	12
C	420	319	210	176	171	143	122	111	92	84	81	77	76	35	29	28	21	18	16	2	2	1	0	0	0	0	0

Para realização do 3º teste, é inserida a falha no último enlace ativo entre as estações 5 e 6 fazendo com que a estação 6 esteja fisicamente isolada da rede proposta, necessitando previamente o estudo sobre o impacto no tráfego. O 1º, 2º, 13º e 14º circuito não apresentam perda de tráfego com o isolamento da estação 6, permanecendo com os percursos e custos do 2º teste, conforme valores apresentados na Tabela 5.20(d). Como a estratégia prevê a utilização do conceito da rede fictícia, é possível a avaliação do percurso e custo de todos os circuitos afetados, pois o custo da falha é o próprio valor previsto pelo custo da rede fictícia no 4º, 7º, 15º, 19º, 20º, 21º, 22º e 23º circuitos, conforme apresentado na Tabela 5.20(d). Em relação aos percursos, os próprios percursos são os enlaces com falha, pois apresentam o custo em função dos valores apresentados pelos caminhos da rede fictícia, conforme Tabela 5.19(d). Um fato interessante é o ocorrido com o 18º circuito onde a estratégia encontrou um novo percurso e custo com o isolamento da estação 6. Com o isolamento da estação 6 o impacto da perda de tráfego representa 52% do total da demanda. Em relação à reclassificação das estações, a estação com maior prioridade é a estação 6, porém já está com perda total de

tráfego tornando a estação 2 a 2ª maior prioridade, além das estações 5 e 20 tornarem-se sem prioridade. As novas prioridades das estações no 3º teste são apresentadas na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Classificação das estações conforme fluxo do tráfego na rede de 27 nós após falha total nos enlaces com a estação 6.

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
E	6	2	24	4	11	16	7	10	23	1	25	9	27	3	8	15	18	22	19	21	26	20	17	14	13	12	5
C	210	159	143	104	92	77	73	35	29	28	27	23	21	20	18	16	8	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0

A título de validação dos resultados obtidos no estudo da recomposição da rede de 27 nós, o resultado não poderá ser comparado, pois no trabalho de origem apresentado por Piqueira (PIQUEIRA, 2008) a rede é modelada com sistema reserva de proteção nos enlaces.

Segue abaixo, as Tabelas 5.19 e 5.20, os percursos e os valores dos custos envolvidos com a aplicação de falhas na rede, respectivamente.

Tabela 5.19 – Percursos obtidos com a incidência de falhas na rede de 27 nós.

Circuito	Percursos					Percursos					Percursos								Percursos						
	Percurso inicial					Falha no enlace (2,6)					Falha nos enlaces (1,6), (3,6), (4,6), (6,8), (6,9), (6,10), (6,11) e (6,24)								Falha no enlace (5,6)						
	O	D	D	D	D	O	D	D	D	D	O	D	D	D	D	D	D	D	D	D	O	D	D	D	D
1	1	6	2			1	6	5	2	0	1	7	2							1	7	2			
2	1	6	3			1	6	3	0	0	1	7	2	3						1	7	2	3		
3	1	7	4			1	7	4	0	0	1	7	4							1	7	4			
4	1	6				1	6	0	0	0	1	7	2	5	6					1	6				
5	1	7				1	7	0	0	0	1	7								1	7				
6	2	4				2	4				2	4								2	4				
7	2	6				2	5	6			2	5	6							2	6				
8	2	7				2	7				2	7								2	7				
9	2	24				2	24				2	24								2	24				
10	3	2	4			3	2	4			3	2	4							3	2	4			
11	3	2	7			3	2	7			3	2	7							3	2	7			
12	3	9				3	9				3	9								3	9				
13	3	6	10			3	6	10			3	9	10							3	9	10			
14	3	6	24			3	6	24			3	9	16	24						3	9	16	24		
15	4	2	6			4	2	5	6		4	2	5	6						4	6				
16	4	7				4	7				4	7								4	7				
17	4	7	15	10		4	7	15	10		4	7	15	10						4	7	15	10		
18	6	1	7			6	1	7			6	5	2	7						6	4	7			
19	6	8				6	8	0			6	5	3	9	18	8				6	8				
20	6	9				6	9	0			6	5	3	9						6	9				
21	6	10				6	10	0			6	5	3	9	10					6	10				
22	6	24	11			6	24	11			6	5	3	9	18	20	25	11		6	11				
23	6	24				6	24	0			6	5	2	24						6	24				
24	7	15	9			7	15	9			7	15	9							7	15	9			
25	7	15	10			7	15	10			7	15	10							7	15	10			
26	7	15	16			7	15	16			7	15	16							7	15	16			
27	7	15	10	23		7	15	10	23		7	15	10	23						7	15	10	23		
28	7	15	10	23	25	7	15	10	23	25	7	15	10	23	25					7	15	10	23	25	
29	8	18	9			8	18	9			8	18	9							8	18	9			
30	9	10				9	10	0			9	10								9	10				
31	9	16				9	16	0			9	16								9	16				
32	9	18	19			9	18	19			9	18	19							9	18	19			
33	10	16				10	16	0			10	16								10	16				
34	10	19				10	19	0			10	19								10	19				
35	10	16	24			10	16	24			10	16	24							10	16	24			
36	11	24				11	24	0			11	24								11	24				
37	11	25				11	25	0			11	25								11	25				
38	16	24				16	24	0			16	24								16	24				
39	16	23	25			16	23	25			16	23	25							16	23	25			
40	16	27				16	27	0			16	27								16	27				
41	21	27				21	27	0			21	27								21	27				
42	22	27				22	27	0			22	27								22	27				
43	23	16	24			23	16	24			23	16	24							23	16	24			
44	24	11	25			24	11	25			24	11	25							24	11	25			
45	24	27				24	27	0			24	27								24	27				

(a)

(b)

(c)

(d)

Tabela 5.20 – Valores obtidos dos custos com a incidência de falhas na rede de 27 nós.

circuitos	Custo Inicial	1º Teste	2º Teste	3º Teste	Demanda
		Falha no enlace (2,6)	Múltiplas falhas	Falha no enlace (5,6)	
1	9,9906	9,9909	10,0267	10,0267	20
2	6,5047	6,5047	13,8153	13,8153	1
3	7,3018	7,3018	7,3018	7,3018	1
4	4,9899	4,9899	15,0277	10000,0000	4
5	5,0079	5,0079	5,0079	5,0079	2
6	3,6192	3,6192	3,6192	3,6192	29
7	5,0007	5,0010	5,0010	10000,0000	52
8	5,0189	5,0189	5,0189	5,0189	1
9	14,6269	14,6269	14,6269	14,6269	29
10	7,4078	7,4078	7,4078	7,4078	12
11	8,8074	8,8074	8,8074	8,8074	1
12	4,5073	4,5073	4,5073	4,5073	1
13	8,9329	8,9329	9,1810	9,1810	3
14	11,2486	11,2486	16,7456	16,7456	2
15	8,6199	8,6202	8,6202	10000,0000	31
16	2,2939	2,2939	2,2939	2,2939	2
17	12,7585	12,7585	12,7585	12,7585	1
18	9,9977	9,9977	10,0199	10002,2939	14
19	3,3169	3,3169	13,8788	10000,0000	15
20	3,2914	3,2914	8,6635	10000,0000	4
21	7,4181	7,4181	13,3372	10000,0000	17
22	17,5988	17,5988	25,4659	10000,0000	42
23	9,7338	9,7338	19,6279	10000,0000	31
24	9,5454	9,5454	9,5454	9,5454	2
25	10,4646	10,4646	10,4646	10,4646	2
26	8,1870	8,1870	8,1870	8,1870	1
27	14,4427	14,4427	14,4427	14,4427	1
28	16,0410	16,0410	16,0410	16,0410	1
29	5,2153	5,2153	5,2153	5,2153	3
30	4,6737	4,6737	4,6737	4,6737	1
31	4,0468	4,0468	4,0468	4,0468	1
32	5,7649	5,7649	5,7649	5,7649	1
33	2,6102	2,6102	2,6102	2,6102	5
34	2,4280	2,4280	2,4280	2,4280	1
35	10,8016	10,8016	10,8016	10,8016	1
36	7,8649	7,8649	7,8649	7,8649	21
37	7,8774	7,8774	7,8774	7,8774	21
38	8,1915	8,1915	8,1915	8,1915	14
39	8,1746	8,1746	8,1746	8,1746	1
40	5,0193	5,0193	5,0193	5,0193	1
41	3,8018	3,8018	3,8018	3,8018	1
42	1,6571	1,6571	1,6571	1,6571	2
43	14,7678	14,7678	14,7678	14,7678	24
44	15,7423	15,7423	15,7423	15,7423	4
45	8,1561	8,1561	8,1561	8,1561	17

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Com o crescimento do tráfego dos serviços de banda larga, telefonia fixa e móvel nas redes de telecomunicações, a necessidade de demandar esforços no planejamento e estudo da recomposição da rede, em especial redes de transporte, torna-se elevada. Pois, atualmente, os níveis de complexidade para atender diversas localidades com qualidade, respeitando os SLAs contratados, demandam dos departamentos de Engenharia e Operação horas de planejamento e o estudo de caso para determinar quão crítica é uma determinada situação de falha na rede projetada, provocando a mínima perda de tráfego. Para tornar possível o planejamento e o estudo da recomposição da rede, é fundamental a utilização de recursos computacionais pelos departamentos responsáveis pelos projetos e operação da rede na implementação de rede com arquitetura ASON, como é o caso do método proposto neste trabalho.

Nesta dissertação foi proposto um conjunto de estratégias que utilizam os recursos computacionais para realização do planejamento, de acordo com as variáveis de entrada, localidades e demanda de tráfego, bem como o estudo da capacidade de recomposição da rede diante de múltiplas falhas que possam ocorrer de fato na rede. A estratégia principal foi fundamentada no laço composto pela entrada da instância, variáveis de entrada, pelo processamento das informações e pela realização da análise dos resultados. Caso os resultados não sejam satisfatórios, a estratégia possibilita uma nova avaliação conforme alteração dos parâmetros de configuração dos blocos funcionais, responsáveis pela estratégia de planejamento e pela estratégia de estudo da recomposição, demonstrando que os resultados obtidos no capítulo 5 foram satisfatórios.

A composição da estratégia principal foi através do AG canônico, responsável pela geração das topologias, onde foi observada, inicialmente, a dificuldade de codificação do

problema real em parâmetros biológicos, resultando em problemas futuros na formulação das matrizes, responsáveis pela avaliação dos nós (estações) ou dos arcos (enlace), necessitando de transcodificação, impactando no desempenho do recurso computacional, ou seja, impactando no tempo de resposta. Desta forma, foi necessário elaborar previamente o método de programação das matrizes responsáveis pela distância, codificação dos arcos, demanda, percurso e custo, possibilitando o processamento do conjunto de 6 simulações para redes de 11 e 27 nós em 45 minutos e 3 horas, respectivamente, como observado no capítulo 5. Ou seja, permitindo à equipe de projetistas o estudo de no mínimo 6 topologias propostas como solução ótima, ou valor aproximado em uma jornada de trabalho de 8 horas ou possibilitando a análise de 30 topologias em uma semana. Outro fator importante que compõe a estratégia principal é a possibilidade de configuração dos parâmetros do AG, tais como: população inicial (P_i), a taxa de seleção (Elitismo), critério de parada e a taxa de mutação; além da atribuição de pesos na função objetivo, possibilitando aos projetistas um maior conhecimento sobre a topologia em análise e sobre os efeitos das alterações de suas características e dos requisitos de desempenho, possibilitando um melhor conhecimento da rede e permitindo a tomada de decisões com melhores critérios.

A importância do método no desenvolvimento da estratégia responsável pelo planejamento, neste trabalho, foi na utilização conjunta dos recursos de busca de forma efetiva e eficiente, empregando heurísticas e efetuando escolhas de forma aleatória e probabilística, com utilização do AG e de algoritmo de Dijkstra no tratamento da solução para problemas de otimização combinatória. Na função objetivo, os valores responsáveis pela obtenção da solução ótima ou valor aproximado, referente à topologia, são obtidos através do cálculo da menor distância entre as estações, do cálculo dos valores atribuídos com a utilização do conceito de rede fictícia e, principalmente, pela avaliação da demanda dos circuitos na rede e avaliação do tráfego pela distância, que foram obtidos através do algoritmo de Dijkstra, simulando a funcionalidade da rede de telecomunicações.

O sucesso da estratégia responsável pelo bloco funcional do estudo da recomposição deve-se à utilização do conceito de rede fictícia na modelagem e solução computacional. Isto possibilitou a análise prévia do tráfego, através do roteamento dos circuitos pelo algoritmo de Dijkstra, na rede proposta pelo bloco funcional do planejamento sobre a incidência de falhas. Este foi o principal diferencial desta dissertação no tratamento de matrizes desconexas com a utilização do conceito de rede fictícia, possibilitando o tratamento matemático adequado ao

estudo da recomposição e também do planejamento. O resultado é comprovado nos 3 tipos de testes executados na rede de 27 nós.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros pode-se prever a continuidade do desenvolvimento da pesquisa na elaboração da estratégia de planejamento e estudo da recomposição com a implementação de outros métodos heurísticos, tais como: Busca Tabu, PSO e ACO, possibilitando o comparativo entre os métodos de solução, bem como o aperfeiçoamento do AG para um modelo híbrido, que possibilite melhorar o desempenho do algoritmo para tratamento em redes cruzadas com a alteração do método de *crossover*, a atribuição de novos critérios de parada e, principalmente, o refinamento do cromossomo na associação da capacidade de comutação interna dos equipamentos ADM ou DXC.

Outro foco de estudo é a adição de novas matrizes, responsáveis pela alocação dos recursos financeiros previstos nos orçamentos de CAPEX e OPEX de uma empresa de telecomunicações, nas restrições do problema, possibilitando o estudo econômico dos investimentos, bem como a atribuição operacional com a adição da restrição nos arcos.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, R., F.; **Problemas de Programação Inteira em Redes Ópticas de Telecomunicações**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORABITO, R., YANESSE, H.; **Pesquisa Operacional**. 4ª reimpressão, Rio de Janeiro – ELSEVIER, 2007.
- BARRETO, M. B.; **Análise de desempenho de uma rede estatística sobre rede de transporte síncrona**. Trabalho de conclusão – Unisinos, Departamento de Engenharia Elétrica, São Leopoldo, 2007.
- BASSAM, AL-BASSAM, ABDULMOHSEN A., SAAD, H. B., **A Tutorial on Using Genetic Algorithms for the Design of Network Topology**. International Journal of Network Management, vol. 16, pag. 253-262, 2006
- BERGAMASCHI, M., A.; **Planejamento de redes de transmissão SDH dividido em camadas funcionais**. Tese de doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, 2001.
- BISCHOFF, E.; **Estudo da utilização de Algoritmos Genéticos para Seleção de Redes de Acesso**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-372/09, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142p. 2009.
- CANTO DOS SANTOS, J. V., GARCIA, A. **Um Método para Auxiliar Processos de Restauração de Sistemas de Potência**. Revista Controle e Automação, Vol. 15 no.1/Jan. Fev. E Março 2004
- CARVALHO, J., P., PIRES, J., PEDRO, J.; **Ant Colony Optimization for Distributed Routing Path Optimization in Optical Burst-Switched Networks**. International Fuzzy Systems Association-European Society for Fuzzy Logic and Technology, Artigo 41, 2009.
- CHAPMAN, STEPHEN J.; **Programação em MATLAB® para engenheiros**. Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2003.
- COSTA, J., C., W., R., LEAL, C., F., FRANCÊS, C., R., L., CARVALHO, S., V., DA ROSA, A., N., F., **Modelo Markoviano de Decisão para Alocação Dinâmica de Recursos e Controle Justo em Redes Ópticas WDM**. XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT, V.18, Blumenau, 2009.
- DEMEESTER, P., GRYSSEELS, M., AUTENRIETH, A., BRIANZA, C., CASTAGNA, L., SIGNORELLI, G., CLEMENTE, R., RAVERA, M., JAJSZCZYK, A., JANUKOWICZ, D., DOORSELAERE, V. K., HARADA, Y., **Resilience in Multilayer Networks**. IEEE Communications Magazine vol.99, pág. 70-76, 1999.

- FERREIRA, M. S.; **Algoritmos de otimização para redes de Telecomunicações.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Minas Gerais, 2000.
- GARCIA, A. S.; **TIAMHAT – Tecnologias de Aprovisionamento dinâmico de Conexões para redes Híbridas.** Apresentação do trabalho pelo projeto da LabTel em 2009. Disponível em WWW.labtel.ele.ufes.br em 03/04/09. Acessado em 15/03/2010.
- GEN, M., KUMAR, A., KIM, J., R.; **Recent Network Design Techniques using Evolutionary Algorithms.** Int. J. Production Economics, vol. 98, pag. 251-261, 2005.
- GOLDBARG M., CESAR; LUNA, H. PACCA; **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos.** Rio de Janeiro: Campus 2000.
- GUIOTTI, F. G.; **Otimização de Recursos Através da Gestão Integrada da Rede de Transporte.** Dissertação de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-045A/07, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96p. 2007.
- HEEGAARD P.E., TRIVEDI K.S.,; **Network survivability modeling.** 53nd Computer Networks. Pages: 1215-1234 Elsevier Março 2009.
- HILLIER, FREDERICK S., GERALD J. LIEBERMAN; **Introduction to Operations Research.** 8th ed. McGraw-Hill, 2005.
- ITU-T Recommendation, G.8080/Y.1304, “**Architecture for the automatically switched optical network (ASON)**” Nov. 2001.
- ITU-T Recommendation, G.8080/Y.1304, “**Architecture for the automatically switched optical network (ASON)**” Amendment 2. Fev. 2005.
- ITU-T Recommendation, G.8080/Y.1304, “**Architecture for the automatically switched optical network (ASON)**” Jun. 2006.
- IRYANTO, MAWENGKANG, H.; **Optimization Models for Communication Network Design.** IEEE Xplore 1998.
- JUN, XU; HUIYOU, CHANG; **Improved PSO Algorithm to Solve Restoration Capacity Problem on ASON.** The International Symposium on Photonics and Optoelectronics – SOPO, Wuhan – China, 2009.
- KIM, H., KIM, Y., KIM, K.; **A Multi-Layer Recovery Scheme in ASON/GMPLS Networks.** Fifth International Conference on Computational Science and Applications., Kuala Lumpur, Malasia. 2007.
- KONAK, A., SMITH, A., E.; **A Hybrid Genetic Algorithm Approach for Backbone Design of Communication Networks.** Congress on Evolutionary Computation – CE99. Vol.3, 1999.

KOROTKY, K., STEVEN, OLKHOVETS, A., McCAUGHAN, L., BHARDWAJ, M.; **Simulation and Modeling of the Temporal Performance of Path-Based Restoration Schemes in Planar Mesh Networks.** Journal of Optical Networking, Vol. 5, No. 12, Dezembro, 2006.

LACHTERMACHER, GERSON; **Pesquisa Operacional na tomada de decisões.** Rio de Janeiro: Campus 2002.

LEMOS, R., M.; **Ambiente para otimização de redes multimídia utilizando algoritmo genético.** Publicação PPGENE.DM – 046/08. Departamento Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 91p. 2008.

LÓPEZ-PASTOR, E., T.; **Algoritmo de RWA com considerações de sobrevivência baseado em Heurísticas-Algoritmo Genético para Redes IP/WDM.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE. TD – 016 A/07, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília: DF, 236p, 2007.

LUO, P., HUANG, S., LIAN, W., LI, B., GU, W.; **Novel Routing Algorithms for Hierarchical Architecture in ASON.** WASE International Conference on Information Engineering, 2009.

MONTICELLI, A., SANTOS, JR, A., PEREIRA, M. V. F., CUNHA, S. H., PARKER, B. J., PRAÇA, J. C. G.; **Iterative Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion.** IEEE Transactions on *PAS*, EUA, 101(10): 3919-3925, 1982.

NGUYEN, N., HOANG.; **Survivable Mesh-Network Design & Optimization to Support Multiple QoS Services Classes.** Tese de doutorado – Escola de Engenharia Edith Cowan University- Faculdade de Computação, Saúde e Ciência – Austrália, 2009.

OLIVEIRA, J., COSTA, A., RAMIDE, D., SOUTO, E., KAMIENSKI, C., SADOK, D.; **Integração de Redes IP com Rede Ópticas.** Mini-curso realizado no Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – SBRC 2007 Belém-PA, 2007.

OLIVEIRA LIMA, F., LIMA, O. M., SEGATTO, V., E., M.; **Um Modelo Eficiente para o Projeto Completo de Redes Ópticas.** XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Porto Seguro, BA, 2009.

PAPADIMITRIOU, C. H.; LEWIS, H. R.; **Elementos de Teoria da Computação, 2^{ed}** Prentice-Hall, SP, 1998.

PIÓRO, M., MEDHI, D.; **Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks.** 1st ed. ELSEVIER, Rio de Janeiro, 2004.

PIQUEIRA, A.; **Metodologia para evolução topológica de redes ópticas de transmissão – Implantação da Tecnologia ASON.** Publicação PPGENE.DM – 059/08. Departamento Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 83p. 2008.

POON, K., F, CONWAY, A., WARDDROP, G., MELLIS., J.; **Successful application of genetic algorithms to network design and planning.** BT Technology Journals, vol. 18, 32-41. 2000.

RAMASWAMY, K. N. S.; **Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks**. IEEE J. Sel. Areas Communications, vol. 14, pag. 840-851, 1996.

RIEDL, A.; **A Versatile Genetic Algorithm for Network Planning**, EUNICE-98, Summer School – Technical Program, Páginas 97 – 103. 1998.

ROUTRAY, S., SHERRY, A. M., REDDY, B. V. R.; **ATM network planning: A genetic Algorithm Approach**, Journal of Applied & Theoretical Information Technology (JATIT), available through EBSCO Publishing USA, Volume 3 No.4, pp 72-79. 2007.

SANTOS, FERNANDO AFONSO; **Otimização multi-objetivo aplicada à alocação dinâmica de rotas em redes de telecomunicações**. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Minas Gerais, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Minas Gerais, 2009.

STAINER, RENATO MIRANDA; **Planejamento de Redes WDM com Proteção para Caminhos Ópticos**. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, 2004.

TANENBAUM, ANDREW S.; **Redes de Computadores**. Rio de Janeiro: Campus 1997.

VASSEUR, JEAN-PHILIPPE, PICKAVET, M., DEMEESTER, P., **Network Recovery – Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS**. Morgan Kaufmann Series in Networking – ELSEVIER, 2004.

VERBRUGGE, S., OOTEGHEM, J. VAN., HEYSE, C., COLLE, D., PICKAVET, M., DEMEESTER, P.; **Risk analysis for optical network operator facing uncertain traffic costs**. PS '06, Photonics in Switching, International conference on Herakleion, Grécia. 2006.

VIANA, G. V. R.; **Meta-Heurísticas e Programação Paralela em Otimização Combinatória**. Edições UFC, Fortaleza, 1998.

WALDMAN, H., ASSIS, KARCIUS, D. R., CRUZ, C. KELLY.; **Heurísticas para o Planejamento de Redes Ópticas em Função da Incerteza da Demanda de Tráfego**. XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Porto Seguro, BA, 2009.

WHITE, A. R. P., MANN, J. W., SMITH, G. D.; **Genetic Algorithms and Network Ring Design**. Annals of Operations Research vol. 86. Páginas 347 - 371. Ano 1999.

ZULIANI, L. G.; **Arquitetura e implementação de um serviço de informações e de engenharia de tráfego para sistemas RWA**. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, 2006.