

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AMBIENTE PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES
MULTIMÍDIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO.**

RICARDO MARTINS LEMOS

ORIENTADOR: PAULO HENRIQUE PORTELA CARVALHO

CO-ORIENTADORA: PRISCILA AMÉRICA SOLIS MENDEZ

BARRETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 046/2008

BRASÍLIA/DF: JANEIRO – 2008

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AMBIENTE PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES MULTIMÍDIA
UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO
RICARDO MARTINS LEMOS**

**TRABALHO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Paulo Henrique Portela Carvalho (ENE-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Dr. Rafael Timóteo de Sousa Jr. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim (CIC/UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 25 DE JANEIRO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

LEMOS, RICARDO MARTINS

AMBIENTE PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES MULTIMÍDIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO. [Distrito Federal] 2008. xvi, 91p., 210 x 297 mm

(ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, Comunicação(2008).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Redes de Pacotes

2. Otimização de redes

3. Topologia

4. Planejamento de redes

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEMOS, R.M. (2008). Ambiente para otimização de redes multimídia utilizando algoritmo genético.

Publicação PPGENE.DM-046/08, Departamento Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 91p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: RICARDO MARTINS LEMOS.

TÍTULO: AMBIENTE PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES MULTIMÍDIA UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO.

GRAU: Mestre

ANO: 2008

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ricardo Martins Lemos

SQN 211, Bloco D, Apt. 205

Brasília - DF

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à minha esposa,
aos meus filhos
e à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Henrique Portela Carvalho pelo constante incentivo, acompanhamento e exigência, elevando sempre a meta sem perder jamais a gentileza.

À minha co-orientadora, Prof^ª. Dr.^a. Priscila América Solis Mendez Barreto, pela colaboração, pelas sugestões e por fornecer uma base consistente para apoiar este trabalho.

Aos companheiros do grupo de trabalho GETRI do LEMOM, que direta ou indiretamente contribuíram para a concretização desta dissertação com seu apoio, incentivo e principalmente, por acreditarem neste trabalho. As revisões e conversas com Márcio de Deus e Paulo Ubiratan foram fundamentais para a evolução deste trabalho.

Aos colegas do Mestrado Profissionalizante em Engenharia Elétrica da UnB, pelo companheirismo e por compartilharem angústias, dúvidas e alegrias. Esdras Simões, Alexandre Piqueira, Henrique Primo, Sandro de Castro e Fabio Grodzki provaram o valor do trabalho em equipe.

A todos os professores e funcionários do Mestrado Profissionalizante em Engenharia Elétrica da UnB pelos ensinamentos, disposição, cooperação e ajuda durante e após as aulas e atividades desenvolvidas.

Aos colegas de trabalho na Brasil Telecom, pelo apoio e ajuda. Agradeço a Frederico Costa, Lupercio Simões e Humberto Caramujo pela compreensão e colaboração.

Obrigado a meus superiores, Paulo César Nunez Richter e Francisco Aurélio Santiago, pela oportunidade proporcionada ao patrocinarem minha participação neste curso.

Aos amigos pelo incentivo e exemplo. Pedindo desculpas àqueles que não foram citados, agradeço a Rodrigo Uchoa e Gylwander Peres por me mostrarem que podemos e devemos almejar ser um pouco melhores a cada dia.

À todos da família, que mesmo distantes e dispersos por vários pontos do país e do mundo, sempre me incentivaram e torceram por mim.

Aos meus pais Conrada e Cassio (in memoriam), obrigado por tanto amor e compreensão. Obrigado a meus irmãos Cassilda e Rinaldo que colaboram com meus “trabalhos” desde sempre.

E..... Especialmente à minha esposa Kátia e aos meus filhos Bruna e Cassio pelo apoio, paciência e compreensão. A participação de vocês foi imprescindível e aparece em cada linha deste trabalho. Muito obrigado pelo incentivo amoroso e incondicional.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver ferramentas computacionais para a obtenção de um ambiente que permita a busca de topologias ótimas para interligação dos nós de uma rede multimídia. Isto será realizado com base na quantidade de tráfego a ser transportado, nas informações de custo e confiabilidade dos tipos de interfaces de transmissão disponíveis e na distância entre os nós. Topologia ótima é aquela que pelo menor custo atenda aos requisitos de confiabilidade mínima, ocupação máxima de enlaces, atraso de enfileiramento máximo e perda máxima de pacotes definidos pelo planejador. Os cálculos para atraso e perda foram baseados nos modelos de Poisson e Auto-similar. A ferramenta utilizada no processo de otimização é o algoritmo genético mono-objetivo, que permite, neste contexto, avaliar um menor número de opções e ainda assim encontrar topologias ótimas ou soluções próximas a estas. Foram feitos experimentos com diferentes configurações de rede e os resultados obtidos permitem validar a metodologia proposta, mostrando a possibilidade de aplicação da ferramenta em redes reais, com um baixo custo computacional.

Palavras chave: Topologia, otimização, confiabilidade, carga de enlaces, algoritmo genético, tráfego auto-similar.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop computational tools to create an environment that permits to search for optimal topologies to interconnect multimedia network nodes. The searching process uses links parameters, based on the amount of transported traffic and also reliability, cost and distance between nodes. The optimal topology is the one that fulfills the requirements of minimal reliability, maximum link load, maximum buffer delay and maximum packet loss, defined by the network planner. The calculus of packet loss and delay are based on the Poisson and self-similar models. The tool used in the optimization process is a mono-objective genetic algorithm, that aloud in this context, evaluate a smaller number of options and find a optimal or sub-optimal solution. The experiments made with different network configurations and their results validate the proposed methodology, showing the possibility of application of this tool in real networks with a low computational cost.

Key words: Topology, optimization, reliability, link loaks, genetic algorithm, self-similar traffic.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.3	ETAPAS DO PROJETO	4
1.4	ORGANIZAÇÃO DESTE DOCUMENTO	4
2.	ELEMENTOS TEÓRICOS E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	6
2.1	INTRODUÇÃO.....	6
2.2	TEORIA DE GRAFOS	7
2.2.1.	Estruturas matriciais	10
2.3	ESTRUTURA HIERÁRQUICA DA REDE.....	12
2.4	ALGORITMOS DE ROTEAMENTO POR MENOR CAMINHO.....	14
2.5	ESTIMAÇÃO DA MATRIZ DE TRÁFEGO.....	15
2.6	REQUISITOS DE DESEMPENHO.....	17
2.6.1.	Confiabilidade da rede.....	17
2.6.2.	Atraso e perda de pacotes para tráfego com características de Poisson.	19
2.6.3.	Atraso e perda de pacotes para tráfego auto-similar.....	21
2.6.4.	Carga nos enlaces	23
2.7	RESUMO DO CAPÍTULO	26
3.	ALGORITMO GENÉTICO	28
3.1	INTRODUÇÃO.....	28
3.2	INICIALIZAÇÃO	32
3.3	AVALIAÇÃO DE APTIDÃO	32
3.4	SELEÇÃO	32
3.4.1.	Seleção por roleta	33
3.4.2.	Seleção por torneio	33
3.5	REPRODUÇÃO	33
3.5.1.	Cruzamento.....	34
3.5.2.	Mutação	35
3.6	RESUMO DO CAPÍTULO	36

4.	AMBIENTE PARA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	37
4.1	INTRODUÇÃO.....	37
4.2	METODOLOGIA DE BUSCA DE TOPOLOGIA.....	38
4.2.1.	Levantamento da configuração atual.....	40
4.2.2.	Definição das demandas de tráfego.....	41
4.2.3.	Definição dos tipos de transmissão	42
4.2.4.	Definição dos critérios de desempenho	43
4.2.5.	Busca pela topologia ótima.....	44
4.3	INFORMAÇÕES DA REDE EM ESTUDO	45
4.3.1.	Lista de capacidades	46
4.3.2.	Informações de topologia	47
4.3.3.	Informações de tráfego	48
4.3.4.	Requisitos de desempenho	49
4.4	ALGORITMO GENÉTICO	50
4.4.1.	Primeira geração de indivíduos	50
4.4.2.	Avaliação de aptidão	53
4.4.3.	Seleção de indivíduos	53
4.4.4.	Reprodução.....	54
4.4.5.	Condição de terminação do Algoritmo Genético	55
4.5	VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS IMPLEMENTADOS	55
4.5.1.	Validação do cálculo de confiabilidade.....	55
4.5.2.	Validação do cálculo de atraso com tráfego de Poisson.....	58
4.5.3.	Validação do cálculo de agregação de tráfego auto-similar.....	62
4.5.4.	Validação do cálculo de atraso com tráfego auto-similar.	64
4.5.5.	Validação do algoritmo genético.....	68
4.6	RESULTADOS OBTIDOS.....	72
4.6.1.	Teste com rede de 4 nós.	72
4.6.2.	Teste com rede de 6 nós.	80
4.7	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	85
5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
5.1	CONCLUSÕES	87
5.2	TRABALHOS FUTUROS	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - EXEMPLO DE LISTA DE INCIDÊNCIA PARA O GRAFO DA FIGURA 2.2.....	9
TABELA 2.2 - MATRIZ DE ADJACÊNCIA COM RÓTULOS DE ENLACES.	10
TABELA 2.3 - MATRIZ DE INCIDÊNCIA PARA O GRAFO DA FIGURA 2.2	11
TABELA 2.4 - MATRIZ LAPLACIANA PARA GRAFO DA FIGURA 2.2.....	12
TABELA 2.5 - CÁLCULO DA CONFIABILIDADE PARA A REDE DA FIGURA 2.6.	19
TABELA 2.6 - LISTA DE INCIDÊNCIA PARA A REDE APRESENTADA NA FIGURA 2.7	23
TABELA 2.7 - TABELA DE ROTEAMENTO PARA A REDE APRESENTADA NA FIGURA 2.7.....	24
TABELA 2.8 - RÓTULOS DE CAMINHOS PARA O GRAFO DA FIGURA 2.7.....	24
TABELA 2.9 - RÓTULOS DE ENLACES PARA O GRAFO DA FIGURA 2.7.	25
TABELA 3.1 - MATRIZ DE ADJACÊNCIA PARA GRAFO DA FIGURA 2.2, NA FORMA TRIANGULAR	31
TABELA 4.1 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA ALOCAÇÃO DAS CAPACIDADES E DO ROTEAMENTO, ADAPTADO DE BARRETO (2007).....	39
TABELA 4.2 - EXEMPLO DE LISTA DE CAPACIDADES	46
TABELA 4.3 - EXEMPLO DE CUSTO MENSAL POR DEGRAUS PARA INTERLIGAÇÃO POR STM-1.	47
TABELA 4.4 - LISTA DE INCIDÊNCIA PARA A REDE EXEMPLO DA FIGURA 4.3.	48
TABELA 4.5 - MATRIZ DE TRÁFEGO PARA A FIGURA 4.3.	48
TABELA 4.6 - EXEMPLO DE LISTA DE INCIDÊNCIA COM INFORMAÇÕES DE TRÁFEGO.....	49
TABELA 4.7 - EVOLUÇÃO DO TEMPO DE CÁLCULO PARA BUSCA POR FORÇA BRUTA.	50
TABELA 4.8 - PROBABILIDADE DE CRUZAMENTO PARA 5 INDIVÍDUOS.	54
TABELA 4.9 - LISTA DE CAPACIDADES PARA O PROBLEMA 1 APRESENTADO EM (DENGIZ ET AL, 1997).....	56
TABELA 4.10 - LISTA DE INCIDÊNCIA PARA O PROBLEMA 1 DE (DENGIZ ET AL, 1997)	57
TABELA 4.11 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES APRESENTADOS EM (DENGIZ ET AL, 1997) E CALCULADOS PELA FERRAMENTA.	57
TABELA 4.12 - LISTA DE CAPACIDADE PARA OS 3 CENÁRIOS UTILIZANDO A REDE DA FIGURA 4.6.	59
TABELA 4.13 - LISTA DE INCIDÊNCIA PARA O CENÁRIO 1 DA FIGURA 4.6.....	59
TABELA 4.14 - LISTA DE TRÁFEGO PARA O CENÁRIO 1 DA REDE DA FIGURA 4.6.	60
TABELA 4.15 - LISTA DE TRÁFEGO PARA O CENÁRIO 2 DA REDE DA FIGURA 4.6.	60
TABELA 4.16 - LISTA DE INCIDÊNCIA PARA O CENÁRIO 2 DA FIGURA 4.6.....	60
TABELA 4.17 - LISTA DE TRÁFEGO PARA O CENÁRIO 3 DA REDE DA FIGURA 4.6.	61

TABELA 4.18 - LISTA DE INCIDÊNCIA PARA O CENÁRIO 3 DA FIGURA 4.6.....	61
TABELA 4.19 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ATRASO CALCULADOS E O TRABALHO DE REFERÊNCIA (BARRETO, 2007)	61
TABELA 4.20 - CÁLCULO DO PARÂMETRO DE HURST E VARIÂNCIA PARA 2 FLUXOS AGREGADOS, ADAPTADO DE [BARRETO, 2007].....	62
TABELA 4.21 - CÁLCULO DE PARÂMETROS DE AGREGAÇÃO PARA 4 FLUXOS, ADAPTADOS DE [BARRETO, 2007]	63
TABELA 4.22 – ATRASO SIMULADO COM O OPNET, EM SEGUNDOS.	65
TABELA 4.23 VARIAÇÃO EM RELAÇÃO À MÉDIA, EM %.	66
TABELA 4.24 – ATRASO SIMULADO COMPARADO COM CÁLCULO IMPLEMENTADO NA FERRAMENTA.....	68
TABELA 4.25 – CÁLCULO DE ATRASO COM DIFERENTES VALORES DE VARIÂNCIA.	68
TABELA 4.26 - LISTA DE INCIDÊNCIA PARA RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS 1 E 2 DE (DENGIZ ET AL, 1997), ATRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO.	69
TABELA 4.27 - LISTA DE CAPACIDADES PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA 1 DE (DENGIZ ET AL, 1997) ATRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO	69
TABELA 4.28 - LISTA DE CAPACIDADES PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA 2 DE (DENGIZ ET AL, 1997) ATRAVÉS DE ALGORITMO GENÉTICO	69
TABELA 4.29 - RESULTADOS DE 10 SIMULAÇÕES DO PROBLEMA 1 DE (DENGIZ ET AL, 1997) COM 10 INDIVÍDUOS POR GERAÇÃO.....	70
TABELA 4.30 - RESULTADOS DE 10 SIMULAÇÕES DO PROBLEMA 1 DE (DENGIZ ET AL, 1997) COM 20 INDIVÍDUOS POR GERAÇÃO.....	71
TABELA 4.31 - CONFIABILIDADE E CUSTO PARA AS TOPOLOGIAS CONECTADAS PARA A REDE DA FIGURA 4.13.....	74
TABELA 4.32 - CONFIGURAÇÕES COM MENOR CUSTO PARA REDE DA FIGURA 4.13.	74
TABELA 4.33 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A FERRAMENTA E COM O OPNET	75
TABELA 4.34 - CONFIGURAÇÕES COM MENOR CUSTO PARA REDE DA	76
TABELA 4.35 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A FERRAMENTA E COM O OPNET	77
TABELA 4.36 - CONFIGURAÇÃO DE 3 TIPOS DE TRANSMISSÃO EQUIVALENTES ÀS TAXAS ÚTEIS DO SDH.....	78
TABELA 4.37 - RESULTADOS DE 10 RODADAS REALIZADAS COM A FERRAMENTA.	78

TABELA 4.38 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NA FERRAMENTA E NO OPNET PARA A TOPOLOGIA A DA TABELA 4.37	80
TABELA 4.39 - DISTÂNCIA ENTRE OS NÓS DO GRAFO DA FIGURA 4.18.....	81
TABELA 4.40 - TIPOS DE TRANSMISSÃO PARA INTERLIGAÇÃO DA REDE COM 6 NÓS.....	82
TABELA 4.41 - RESULTADOS DE 10 RODADAS PARA BUSCA DA TOPOLOGIA ÓTIMA PARA A REDE DA FIGURA 4.18.....	83
TABELA 4.42 - CROMOSSOMOS DAS CONFIGURAÇÕES COM MENOR CUSTO APRESENTADAS NA TABELA 4.41	84
TABELA 4.43 – COMPARAÇÃO ENTRE CARGA E ATRASO CALCULADOS PELA FERRAMENTA E SIMULADOS PELO OPNET.	85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 (A) REPRESENTAÇÃO DE UM ESPAÇO, (B) ESPAÇO TOPOLÓGICO E (C) ESPAÇO MÉTRICO.	6
FIGURA 2.2 - REPRESENTAÇÃO DE UM GRAFO.	8
FIGURA 2.3 - (A) UM GRAFO G NÃO-ORIENTADO COM 5 NÓS E 7 ENLACES. (B) REPRESENTAÇÃO DE G POR LISTA DE ADJACÊNCIA. (C) REPRESENTAÇÃO DE G POR MATRIZ DE ADJACÊNCIA. ADAPTADO DE CORMEN (2001).	9
FIGURA 2.4 – TOPOLOGIA DE UMA REDE HIERÁRQUICA.	13
FIGURA 2.5 - DIVISÃO DE UMA REDE EM ÁREAS DE ROTEAMENTO.	15
FIGURA 2.6 – REDE EXEMPLO COM 3 NÓS E 3 ENLACES.	18
FIGURA 2.7 – REDE EXEMPLO PARA CÁLCULO DE ROTEAMENTO.	23
FIGURA 2.8 – TELA DO <i>OPNET</i> , APRESENTANDO O ENCAMINHAMENTO ENTRE OS NÓS 1 E 4.	25
FIGURA 2.9 – TELA DO <i>OPNET</i> , APRESENTANDO O ENCAMINHAMENTO ENTRE OS NÓS 2 E 3.	26
FIGURA 3.2 - EXEMPLO DE UM ALGORITMO GENÉTICO.	30
FIGURA 3.3 - EXEMPLO DE CRUZAMENTO EM UM PONTO COM CORTE NO QUINTO GENE, ADAPTADO DE ASHLOCK (2005).	34
FIGURA 3.4 - EXEMPLO DE CRUZAMENTO EM DOIS PONTOS COM CORTE NO TERCEIRO E OITAVO GENES, ADAPTADO DE ASHLOCK (2005).	34
FIGURA 3.5 - EXEMPLO DE CRUZAMENTO UNIFORME, ADAPTADO DE ASHLOCK (2005)	35
FIGURA 3.6 - EXEMPLO DE CRUZAMENTO ADAPTATIVO, ADAPTADO DE ASHLOCK (2005)	35
FIGURA 4.1 – MODELO DE FLUXO DE INFORMAÇÕES PARA OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA.	38
FIGURA 4.2 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.	40
FIGURA 4.3 – REDE EXEMPLO.	47
FIGURA 4.4 – PROCESSO DE REPRODUÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO.	54
FIGURA 4.5 – REDE CUSTO POR ENLACE PARA OS PROBLEMAS 1 E 2 DE (DENGIZ ET AL, 1997).	56
FIGURA 4.6 – REDE PARA VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE ATRASO COM TRÁFEGO DE POISSON, ADAPTADO DE [BARRETO, 2007].	59
FIGURA 4.7 – REDE PARA VERIFICAÇÃO DE CÁLCULO DE PARÂMETROS DE TRÁFEGO AGREGADO PARA 2 FLUXOS.	63
FIGURA 4.8 – REDE PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS AGREGADOS PARA 4 FLUXOS.	64
FIGURA 4.9 – REDE PARA TESTE DO CÁLCULO DE ATRASO COM TRÁFEGO AUTO-SIMILAR.	65
FIGURA 4.11 – TELA DO <i>OPNET</i> APRESENTANDO O ATRASO DE ENFILEIRAMENTO PARA O CENÁRIO 3.	67

FIGURA 4.12 – EVOLUÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO.....	71
FIGURA 4.13 – REDE COM 4 NÓS.....	73
FIGURA 4.14 – TOPOLOGIA DA REDE UTILIZADA PARA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE A FERRAMENTA E O OPNET.	76
FIGURA 4.15 – REDE COM 4 NÓS E 4 ENLACES, REPRESENTADA A TOPOLOGIA D DA TABELA 4.34.	77
FIGURA 4.16 – TOPOLOGIA DE REDE A DA TABELA 4.37.....	79
FIGURA 4.17 - TOPOLOGIA DE REDE EM DUPLO ANEL.	81
FIGURA 4.18 - REDE INICIAL COM 6 NÓS PARA TESTE DA FERRAMENTA.....	82
FIGURA 4.19 - REDE PARA A TOPOLOGIA A DA TABELA 4.42.....	84
FIGURA 4.20 - REDE PARA A TOPOLOGIA B DA TABELA 4.42.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ABR	Area Border Router
B	Tamanho médio de pacotes em bits
BGP	Border Gateway Protocol
bps	bits por segundo
C\$	Custo
C	Capacidade do enlace
E	Número de enlaces da rede (Edges)
EGP	Exterior Gateway Protocol
fBm	fractional Brownian motion
G	Grafo
H	Parâmetro de Hurst
IETF	Internet Engineering Task Force
IGP	Internal Gateway Protocol
IP	Internet Protocol
ISO	International Standardization Organization
IS-IS	Intermediate system to intermediate system
LAN	Local Area Network
LRD	Long-Range Dependence
L(G)	Matriz Laplaciana para o grafo G
MAN	Metropolitan Area Network
MIB	Management Information Base
MPLS	Multi-protocol Label Switching
NP	Nondeterministic Polynomial time
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First

P_K	Probabilidade de perda para <i>buffer</i> de tamanho K
Q	Matriz de incidência
QoS	Quality of Service
R	Taxa média de chegada em bps
RFC	Request for comments
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SMI	Structure of Management Information
SNMP	Simple Network Management Protocol
STM	Synchronous Transport Module
T	Atraso em um enlace
TCP	Transfer Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
V	Vertices (nós de uma rede)
VTP	Variance Time Plot
WAN	Wide Area Network
XML	Extensible Markup Language
λ	Taxa média de chegada de pacotes
μ	Taxa média de serviço
ρ	Taxa de pressão do sistema

1. INTRODUÇÃO

Com a difusão da utilização de redes locais pelas organizações empresariais e a larga utilização e abrangência da Internet, cada vez mais o provimento de serviços MAN (*Metropolitan Area Network*) e WAN (*Wide Area Network*) pelas operadoras de telecomunicações se torna relevante dentro do conjunto de serviços prestados por estas empresas. A busca por maior eficiência e menores custos tem levado à convergência das várias redes existentes para uma única infra-estrutura capaz de prover múltiplos serviços com qualidade adequada, em que as redes baseadas em protocolo IP se tornaram o padrão de fato do mercado, devido à eficiência, integração de serviços e facilidade de implementação.

Como os diferentes serviços utilizados pelos usuários apresentam diferentes requerimentos em termos de QoS, (*Quality of Service*), tais como a taxa de dados trocada, disponibilidade do serviço, atraso na transmissão e porcentagem de perda de pacotes, a rede convergente deve ser capaz de dar adequada vazão ao tráfego requerido. Os provedores de serviços utilizam três instrumentos técnicos complementares para manter o desempenho das redes (Awduche, 1999) com o crescimento muitas vezes além do previsto:

- Arquitetura de rede: lida com a estrutura abstrata da rede, permitindo a hierarquização dos elementos de rede e sua classificação, bem como a definição de funcionalidades e relacionamentos entre eles.
- Expansão de capacidade: solução paliativa utilizada em momentos de congestionamento de elementos de rede, permitindo a resolução de problemas até que a Engenharia de tráfego possa redefinir a topologia e a capacidade desta.
- Engenharia de tráfego: como a definição da arquitetura e a expansão de capacidade da rede são ferramentas necessárias, mas não suficientes para manter a qualidade de serviço desejada para a rede, é necessário otimizar o desempenho da rede.

A engenharia de tráfego abrange a aplicação de tecnologias e princípios científicos ao monitoramento, modelagem, caracterização e controle do tráfego. Inclui também a aplicação de conhecimentos e técnicas que permitem atingir objetivos específicos de desempenho, incluindo tráfego otimizado em tempos adequados para todos os fluxos, utilização eficiente dos recursos e o planejamento da capacidade. Ao final, a adequada aplicação da engenharia de tráfego agrega valor tanto para o provedor de serviços como para o usuário.

Conforme (Awduche, 1999), a aplicação efetiva da engenharia de tráfego é dificultada pelas limitações funcionais do protocolo IP. Uma deficiência característica se refere à capacidade de monitoração, sendo que a matriz de tráfego de uma rede, informação básica para a engenharia de tráfego, é difícil de ser estimada com base nas estatísticas fornecidas pelos roteadores. Outra limitação se refere aos protocolos de roteamento intradomínio (IGP), como o OSPF, que podem levar a utilização pouco eficiente das capacidades disponíveis.

Operadores de rede necessitam de ferramentas de engenharia de tráfego em tempo real para resolver problemas de admissão de conexões, roteamento baseado em restrições e reroteamento (Girish et al, 2000). Neste caso são necessários métodos eficientes para troca direta de informações com os protocolos de roteamento e com os sistemas de gerenciamento de rede, permitindo a otimização do desempenho dos elementos da rede. Por outro lado, problemas como o planejamento de capacidade necessitam de ferramentas em tempo não-real.

Em Evans (2007) se discute o planejamento de capacidade do núcleo da rede. O método mais simples para este planejamento é monitorar a utilização dos enlaces da rede e fazer a expansão da capacidade sempre que a carga atingir 50% em um enlace. Ainda segundo Evans (2007), este método apresenta duas conseqüências indesejáveis. A primeira é que sem um conhecimento profundo das demandas de tráfego a serem atendidas pela rede, esta estratégia pode não ser suficiente para garantir que, em caso de falha na rede, os níveis de *SLA (Service Level Agreement)* acordados sejam atendidos. A segunda conseqüência desta abordagem é a disponibilização de mais capacidade que o necessário, levando ao aumento do investimento sem retorno para a empresa. Assim, uma ferramenta que possibilite ao planejador um maior conhecimento da rede em estudo pode permitir a melhora do processo de planejamento.

O planejamento de capacidade é realizado durante os processos de planejamento de expansão, que se desenvolvem em ciclos. Isto se deve tanto ao tempo de maturação e implantação dos projetos, bem como aos altos custos envolvidos, demandando o adequado gerenciamento do processo. O planejador deve levar em conta a demanda futura (Girish et al, 2000), se baseando em fatores tais como:

- Expectativa de crescimento.
- Horizonte de tempo definido.

- Intervalo de tempo necessário para novas implantações.
- Variabilidade das estimativas utilizadas.
- Fatores que influenciam o custo.
- Restrições orçamentárias.

O problema do planejamento topológico consiste em dois subproblemas (Boorstyn e Frank, 1977). O projeto do núcleo da rede e o projeto das redes de distribuição e acesso. Os dois subproblemas se comunicam através dos seguintes parâmetros:

- Número e localização dos nós do núcleo;
- Associação dos terminais e servidores aos nós do núcleo;
- Requisitos de atraso para o núcleo e para as redes de distribuição;
- Requisitos de confiabilidade para o núcleo e para as redes de distribuição.

Definidos estes parâmetros é possível solucionar cada problema independentemente. Na próxima subseção será apresentado o problema a ser estudado neste trabalho

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho, será abordado o problema da busca pela topologia ótima para o núcleo de uma rede multimídia. Baseado no número de nós da rede e na distância física entre eles, a ferramenta analisa as topologias possíveis utilizando as opções de transmissão informadas e busca aquela que atenda aos requisitos de desempenho definidos pelo planejador (confiabilidade mínima, carga máxima, atraso máximo e perda máxima) com o menor custo possível. Para reduzir o tempo necessário para encontrar a solução ótima, a busca é realizada utilizando algoritmo genético, que possibilita reduzir o número de indivíduos analisados e ainda assim encontrar a solução ou soluções que apresentam custo mínimo.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

- Definição de uma metodologia que possibilite levantar informações de configuração e carga de enlaces de uma rede em operação e a partir destas informações, determinar a topologia ótima para esta rede dentro dos critérios de planejamento definidos.

- Implementação de uma ferramenta computacional baseada na metodologia proposta e que possibilite ao planejador encontrar a topologia que com o menor custo atenda aos requisitos de desempenho definidos e realizar análises do comportamento da rede.

1.3 ETAPAS DO PROJETO

- Analisar informações coletadas da rede de uma operadora de telecomunicações, verificando a possibilidade de utilização para otimizar a topologia em uso.
- Formular uma metodologia de planejamento de capacidade que permita realizar a busca pela topologia da rede que atenda aos objetivos propostos com menor custo.
- Definir e analisar estruturas de dados que permitam representar a rede adequadamente e que sejam de fácil entendimento e utilização pelo planejador.
- Implementar uma ferramenta baseada na metodologia definida.
- Validar os resultados apresentados pela ferramenta por meio de comparação com outros trabalhos publicados.
- Definir redes para realização de testes e através de simulação computacional, verificar a adequação dos resultados obtidos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DESTE DOCUMENTO

Neste trabalho, é proposto um ambiente para planejamento de capacidade de enlaces para redes multimídia de provedores de serviços de telecomunicações, através da busca de uma topologia que atenda aos critérios de desempenho definidos com o menor custo possível.

O presente trabalho é formado pelos seguintes elementos:

- Um modelo para representação de informações da rede em estudo, tais como, a caracterização do tráfego, a topologia atual e as opções de conectividade.
- Uma metodologia que permite sistematizar o processo de busca da topologia de menor custo que atenda aos critérios de desempenho.
- Uma ferramenta baseada na metodologia sugerida.

No capítulo 2, são apresentados os elementos teóricos que sustentam o ambiente proposto e a formulação do problema. Inicialmente é apresentado o conceito de topologia e a

formulação do problema do planejamento topológico. São apresentados 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. É discutida a formação das listas e estruturas utilizadas no decorrer do trabalho e apresentado o conceito de conectividade algébrica que permite determinar se um grafo é conectado através da sua matriz laplaciana. É apresentada também a estruturação hierárquica de rede utilizada por prestadoras de serviços de telecomunicações, mostrando a distribuição dos elementos de rede por diferentes camadas. Os algoritmos de roteamento baseados em menor caminho são discutidos, apresentando brevemente o *OSPF (Open Shortest Path First)* e o *IS-IS (Intermediate System to Intermediate System)*. É apresentada uma relação de técnicas de estimação da matriz de tráfego de uma rede a partir das informações de carga da rede, apesar desta determinação não ser objeto deste trabalho. São discutidos, ainda, os modelos utilizados para cálculo de confiabilidade total da rede, carga nos enlaces, perda de pacotes e atraso médio. Para atraso e perda são discutidos modelos que consideram tanto o tráfego com características de Poisson, bem como aqueles com característica de auto-similaridade.

O capítulo 3 apresenta a teoria que permite ao algoritmo evolucionário utilizado otimizar a busca pela topologia ótima. É apresentada a estrutura básica de um algoritmo genético e são discutidas algumas variantes utilizadas nas etapas de inicialização, avaliação de aptidão, seleção, cruzamento e mutação.

O capítulo 4 detalha o ambiente proposto para otimização da topologia da rede, descrevendo as estruturas utilizadas para informar à ferramenta as características da rede, a matriz de tráfego e as opções de conectividade. São apresentadas as características definidas para as etapas do algoritmo genético utilizado, bem como a condição de terminação deste. É apresentada também a validação dos cálculos de confiabilidade da rede, atraso para tráfego com característica de Poisson e agregação de tráfego auto-similar. A convergência do algoritmo genético é verificada através de comparação dos resultados obtidos com os publicados em Dengiz (1997). Este capítulo também apresenta os resultados obtidos em testes com duas redes hipotéticas, sendo uma baseada no núcleo da rede de uma grande operadora de telecomunicações. Os resultados obtidos foram comparados com simulações na ferramenta *Opnet*.

O capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir dos trabalhos realizados e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

2. ELEMENTOS TEÓRICOS E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo serão descritos os elementos teóricos utilizados para abordar o problema em estudo, discutindo como estes se integram dentro da proposta de trabalho desta dissertação. As subseções apresentam os conceitos de topologia, teoria de grafos, estrutura hierárquica de redes, algoritmos de roteamento por menor caminho, estimação de matriz de tráfego com base na carga dos enlaces e apresentam os algoritmos utilizados para cálculo dos requisitos de desempenho utilizados para verificação das topologias em estudo.

2.1 INTRODUÇÃO

Topologia é o conhecimento da conectividade dos pontos de um determinado espaço (Zomorodian, 2005). Na Figura 2.1, é apresentada a representação de espaço (conjunto de pontos), espaço topológico (em que as vizinhanças são conhecidas) e espaço métrico, onde os pontos possuem métricas associadas tal que é possível medir as distâncias entre eles.

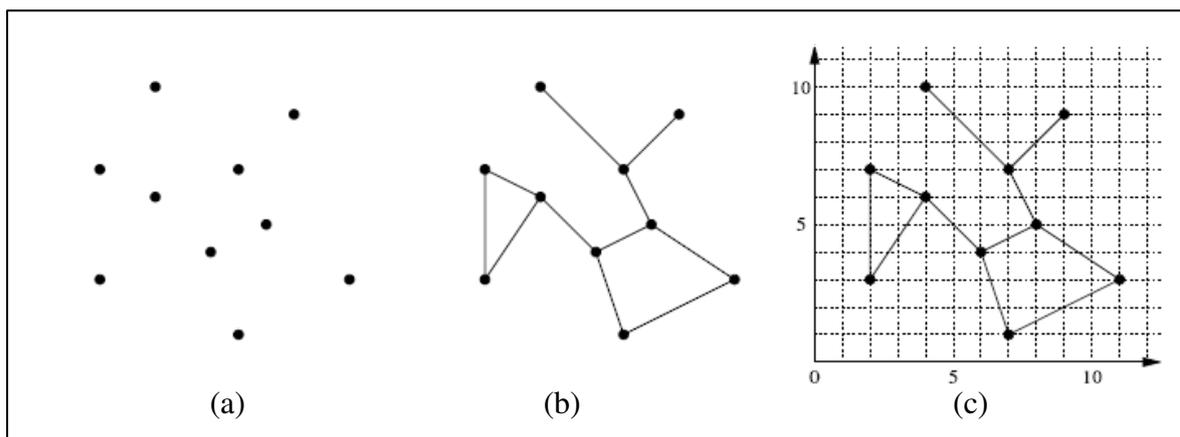


Figura 2.1 (a) Representação de um espaço, (b) espaço topológico e (c) espaço métrico.

Uma rede de telecomunicações pode ser definida como um espaço métrico e ser representada por um conjunto de pontos (nós) e pela topologia (conjunto de enlaces) que interliga estes nós. Em Bertsekas (1992) o problema do planejamento topológico é descrito como a definição de uma rede que transportará um conjunto de demandas de tráfego entre os nós com um custo mínimo e atendendo aos requisitos de desempenho definidos.

A teoria de grafos, apresentada na seção 2.2, define estruturas e algoritmos que permitem a representação de redes de telecomunicações como um espaço métrico, possibilitando a

análise do desempenho em diferentes condições. Comparando as diferentes topologias possíveis é possível determinar aquela que atenda os critérios de desempenho com o menor custo.

2.2 TEORIA DE GRAFOS

Matematicamente, grafos são estruturas utilizadas para estudar as relações dos pares de elementos em determinado conjunto. Um grafo é formado por um conjunto de nós ou vértices conectados por arestas ou arcos e são assim definidos:

- Vértices são representados por pontos ou por nós.
- A ordem de um grafo é o número de seus vértices.
- Um arco é desenhado como uma linha conectando dois vértices, chamados extremidades.
- O tamanho de um grafo é o número de seus arcos.
- Um laço é um arco cujas extremidades estão conectadas a um único vértice.
- Um enlace apresenta extremidades conectadas a vértices distintos.
- 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 o outro.

Neste trabalho são utilizados grafos simples e não-orientados, pois os enlaces utilizados na camada do núcleo de redes multimídia são, em sua grande maioria, simétricos. Na Figura 2.2, é apresentada a representação de um grafo. É importante lembrar que o grafo não deve ser confundido com a estrutura que representa, pois é apenas uma abstração, levando em consideração apenas as características desejadas para o estudo de um sistema.

Em um grafo simples e não-orientado $G=(V,E)$ com V vértices, que neste caso representam os nós da rede, o número máximo possível de arestas E (*edges*) ou enlaces da rede, é definido pela equação (2.1).

$$E_{máx} = \frac{V(V-1)}{2} \quad (2.1)$$

Conforme descrito em Cormen (2001) existem duas formas normalmente utilizadas para representação de um grafo:

- Como uma coleção de listas de adjacência;
- Como uma matriz de adjacência.

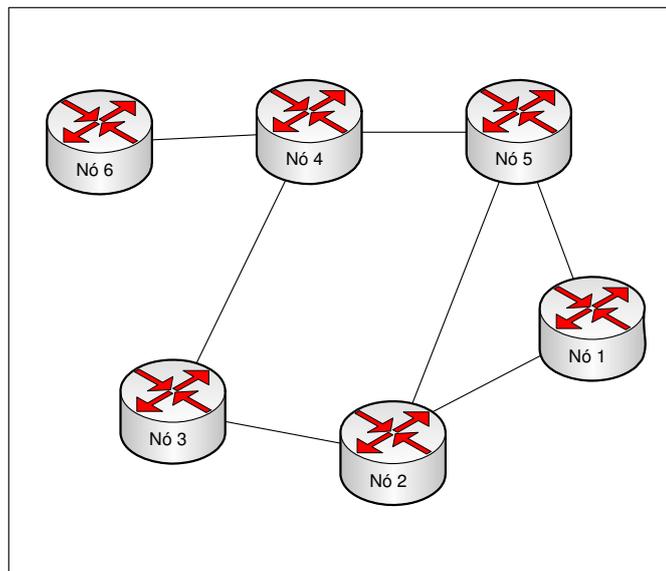


Figura 2.2 - Representação de um grafo.

Na Figura 2.3 é apresentada a representação de um grafo por lista de adjacência e por matriz de adjacência. Na lista de adjacência cada linha está associada a um nó da rede e informa os nós aos quais está diretamente conectado. Na Figura 2.3 (b), a linha 1 apresenta a informação de que o nó 1 está diretamente conectado aos nós 2 e 5. O caractere “/” é utilizado para demarcar o último elemento da linha. A matriz de adjacência mostrada em Figura 2.3 (c) apresenta a mesma informação, representando os nós diretamente conectados por 1 e os demais por 0.

Estruturas de listas são geralmente preferidas ao lidar com grafos representados por matrizes esparsas, por requererem menos memória. Uma matriz é chamada de esparsa quando apresenta uma quantidade relativamente pequena de elementos não-nulos. Por outro lado, normalmente, as estruturas em matriz apresentam tempos de acesso menores e são mais utilizadas com grafos densos.

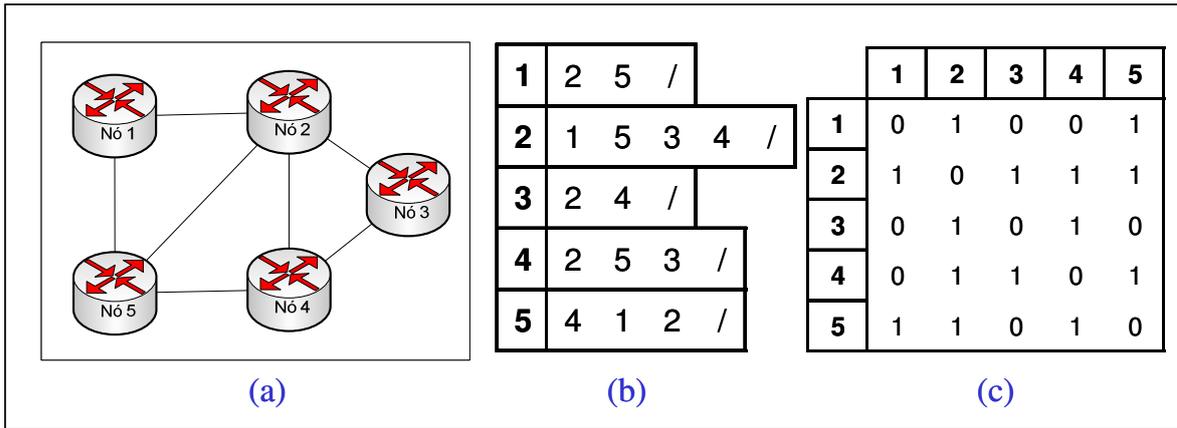


Figura 2.3 - (a) Um grafo G não-orientado com 5 nós e 7 enlaces. (b) Representação de G por lista de adjacência. (c) Representação de G por matriz de adjacência. Adaptado de Cormen (2001).

Uma variação das listas de adjacência são as listas de incidência, que se diferenciam das primeiras por utilizarem número fixo de colunas com possibilidade de transportar diferentes tipos de informações, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Exemplo de lista de incidência para o grafo da Figura 2.2

Arco	Vértice A	Vértice B	Distância	Velocidade Tx
1	1	2	10	155
2	1	5	15	155
3	2	3	20	622
4	2	5	15	622
5	3	4	10	155
6	4	5	25	622
7	4	6	20	155

A primeira coluna (Arco) da Tabela 2.1 apresenta o número do enlace representado. A segunda e terceira colunas (Vértice) informam os nós interligados por cada enlace. A quarta coluna (Distância) representa a distância entre os nós interligados por cada enlace e a última coluna (Velocidade Tx) apresenta a taxa de transmissão de cada enlace.

Neste trabalho, será utilizada a representação da rede por meio de listas de incidência para a transferência de informações entre os módulos da ferramenta e para entrada e saída de dados. Esta representação permite a inclusão de várias informações em uma única

estrutura, simplificando o modelo de informações adotado. Para a realização de cálculos, serão utilizadas estruturas matriciais, por serem mais rápidas, realizando as conversões quando necessário.

Na próxima subseção são descritas as estruturas matriciais utilizadas neste trabalho.

2.2.1. Estruturas matriciais

Neste trabalho, serão utilizadas estruturas matriciais para realização dos cálculos. Sendo E , o conjunto dos enlaces do grafo $G=(V,E)$ e V , o conjunto dos nós (Vértices) deste grafo, a matriz de adjacência é representada pela equação (2.2) e mostrada na Figura 2.3 (c).

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } (i, j) \in E \\ 0 & \text{se } (i, j) \notin E \end{cases} \quad (2.2)$$

Uma variante desta matriz inclui o rótulo dos enlaces e é definida pela equação (2.3), em que Rótulo é um número inteiro positivo que identifica cada enlace.

$$a_{ij} = \begin{cases} \text{Rótulo} & \text{se } (i, j) \in E \\ 0 & \text{se } (i, j) \notin E \end{cases} \quad (2.3)$$

A Tabela 2.2 apresenta a matriz de adjacência com rótulos de enlace para o grafo da Figura 2.3 (a). Neste caso, sendo o grafo não-orientado, o rótulo do enlace que conecta o nó 1 ao nó 2 é o mesmo do enlace que conecta o nó 2 ao nó 1. Se o grafo fosse orientado esses rótulos poderiam ser diferentes.

Tabela 2.2 - Matriz de adjacência com rótulos de enlaces.

Nós	1	2	3	4	5
1	0	1	0	0	2
2	1	0	3	4	5
3	0	3	0	6	0
4	0	4	6	0	7
5	2	5	0	7	0

Para grafos não-orientados, a matriz de incidência é a matriz $Q=b_{ij}$ com dimensões $|V| \times |E|$, definida pela equação (2.4).

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o nó } i \text{ se conecta ao enlace } j \\ 0 & \text{se o nó } i \text{ não se conecta ao enlace } j \end{cases} \quad (2.4)$$

A Tabela 2.3 apresenta a matriz de incidência para o grafo apresentado na Figura 2.2. Nesta tabela, cada coluna representa um enlace do grafo e cada linha representa um nó. Na primeira coluna, pode-se verificar que o enlace 1 conecta os nós 1 e 2, o enlace 2 conecta os nós 1 e 5 e assim por diante.

Tabela 2.3 - Matriz de incidência para o grafo da Figura 2.2

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	1	1	0	0	0
3	0	0	1	0	1	0	0
4	0	0	0	0	1	1	1
5	0	1	0	1	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	1

Conforme mostrado em Jamakovic e Uhlig (2007), o cálculo da conectividade de um grafo, pode ser realizado utilizando-se a matriz de admitância (ou Matriz laplaciana ou Matriz de Kirchhoff) $L(G)$, que pode ser obtida através da equação (2.5), onde Q^T é a transposta da matriz de incidência Q , definida pela equação (2.4).

$$L(G) = QQ^T \quad (2.5)$$

Outra forma de descrever a matriz laplaciana $L(G)$ é através da equação (2.6), em que d_u é o grau de conectividade do nó u .

$$(Q)_{ue} (Q^T)_{ev} = \begin{cases} 1 & \text{se } u \neq v; u, v \text{ são vértices de } e \\ d_u & \text{se } u = v; \\ 0 & \text{nos demais casos} \end{cases} \quad (2.6)$$

Conforme Jamakovic e Uhlig (2007), pode-se utilizar a matriz laplaciana $L(G)$ para determinar se o grafo é conectado, por meio do cálculo dos autovalores desta matriz. O conjunto de autovalores da matriz laplaciana é chamado de espectro laplaciano e está contido no intervalo $[0, \min\{N, 2D_{max}\}]$, em que N é o número de nós da rede e D_{max} é o grau de conectividade máximo do grafo. O segundo menor valor do espectro laplaciano é chamado de conectividade algébrica. Este valor é muito importante para a teoria clássica de conectividade (Jamakovic e Uhlig, 2007), por ser uma medida da robustez de um grafo, pois:

- A conectividade algébrica somente será igual a zero se o grafo G for desconectado.
- A multiplicidade de zeros no espectro Laplaciano é igual ao número de nós desconectados no grafo G .

Na Tabela 2.4, é apresentada a matriz laplaciana para o grafo da Figura 2.2. Ao calcular os autovalores desta matriz, tem-se $[0, 0,7216, 1,6826, 3, 3,7046, 4,8912]$ e, como o segundo menor valor é diferente de 0, conclui-se que o grafo é conectado.

Tabela 2.4 - Matriz laplaciana para grafo da Figura 2.2

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

Após determinar se uma topologia é conectada ou não, será analisada a capacidade de escoar o tráfego desejado dentro dos requisitos definidos. Para isto é necessário conhecer a matriz de tráfego da rede em estudo. Na próxima seção, será discutida a organização hierárquica da rede, para depois abordar os algoritmos de roteamento por menor caminho e finalmente, apresentar a forma de estimar a matriz de tráfego tendo como base a carga dos enlaces da rede.

2.3 ESTRUTURA HIERÁRQUICA DA REDE

Para facilitar o processo de planejamento, operação e manutenção, as redes das prestadoras de serviços de telecomunicações são organizadas de forma hierárquica, conforme mostrado na Figura 2.4.

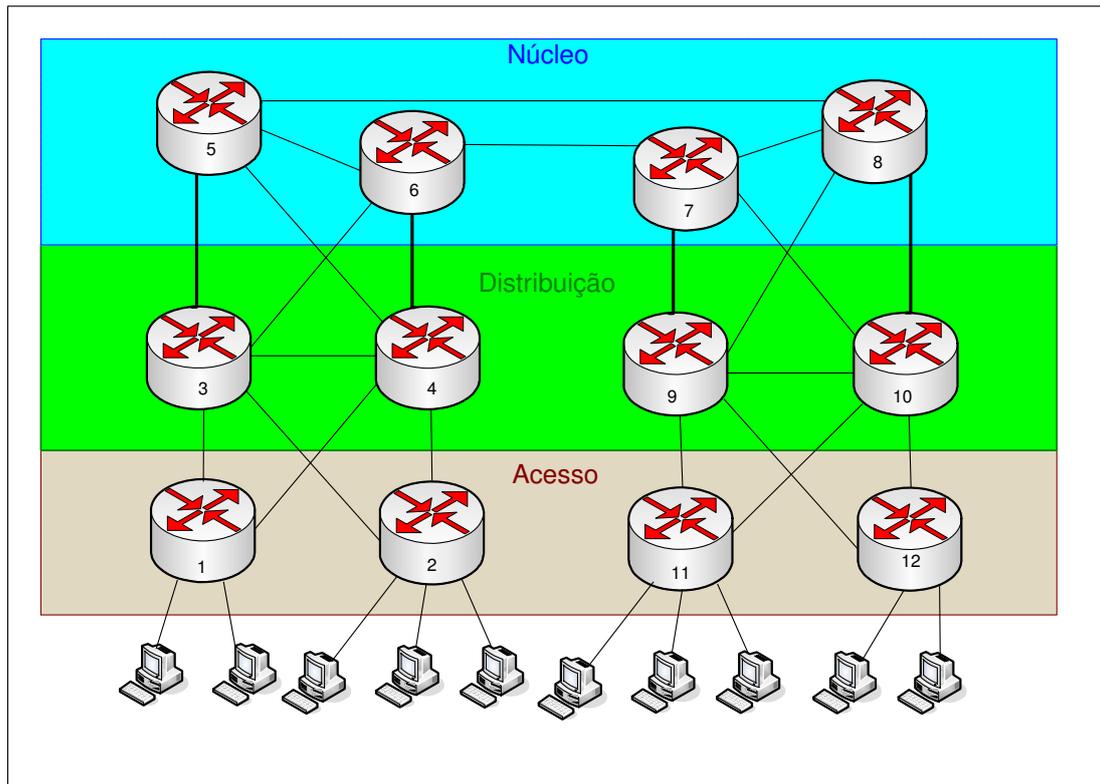


Figura 2.4 – Topologia de uma rede hierárquica.

A rede apresentada está dividida em três camadas:

- **Acesso:** camada formada por roteadores onde os clientes se conectam à rede do provedor de serviços. Estes roteadores representam a fronteira entre as redes do provedor e dos clientes, segmentando-as claramente e facilitando a manutenção e a resolução de problemas.
- **Distribuição:** O objetivo desta camada é encaminhar adequadamente o tráfego entre os roteadores de acesso ou entre estes e o núcleo da rede. Normalmente, cada roteador de distribuição possui enlaces com dois roteadores do núcleo, de acordo com o princípio da redundância de rotas. Além disso, os roteadores de distribuição podem ter rotas entre si, aumentando a disponibilidade e capacidade de escoamento de tráfego.
- **Núcleo (Core):** O objetivo dos equipamentos desta camada é interconectar os equipamentos da camada de distribuição e estes com outras redes. Normalmente, atuam sempre aos pares com redundância de enlaces e equipamentos, aumentando a segurança da rede.

Na próxima seção, serão apresentados os algoritmos de roteamento por menor caminho.

2.4 ALGORITMOS DE ROTEAMENTO POR MENOR CAMINHO

O protocolo de roteamento é o algoritmo que possibilita o encaminhamento dos pacotes através da rede até o destino correto, permitindo a comunicação entre os nós da rede. Conforme Bertsekas (1992), o roteamento em redes multimídia pode ser de dois tipos:

- Datagrama: a decisão de roteamento é tomada para cada pacote, podendo diferentes pacotes de um mesmo fluxo serem encaminhados através de rotas diferentes.
- Circuito virtual: o caminho para cada fluxo é estabelecido antes do início do envio e todos os pacotes seguem a mesma rota.

Os protocolos de roteamento são executados em cada nó da rede de forma semi-independente, sendo que a independência não é total, pois cada nó necessita de informações dos demais para tomar as decisões de roteamento (Bertsekas, 1992). Os algoritmos de roteamento são complexos devido às seguintes razões:

- Requer coordenação entre todos os nós de uma sub-rede.
- Precisa lidar com falhas de nós e enlaces.
- Deve alterar as rotas quando houver congestionamento em alguma região da rede.

Vários algoritmos de roteamento são baseados no conceito de menor caminho entre dois nós, sendo os mais difundidos o *OSPF (Open Shortest Path First)* e o *IS-IS (Intermediate System to Intermediate System)*. Nos protocolos de roteamento por menor caminho, é associado um número positivo a cada enlace, chamado peso de roteamento. Cada caminho entre dois nós tem um peso associado, que é calculado pela soma dos pesos dos enlaces do caminho, conforme Cormen (2001). O algoritmo de roteamento pelo menor caminho tenta, sempre que possível, enviar os pacotes pelo caminho de menor peso. Neste trabalho, foi implementado o algoritmo *OSPF* com os pesos definidos pelo inverso da capacidade do enlace.

Com o crescimento do número de elementos nas redes das prestadoras de serviços de telecomunicações, a convergência do protocolo de roteamento pode ficar lenta e provocar falta de memória e sobrecarga nos processadores dos elementos de rede. Para evitar este problema, em uma rede que utiliza o protocolo de roteamento *OSPF*, as interfaces dos equipamentos da rede são divididas em áreas, sendo que o núcleo da rede é normalmente

definido como sendo a área 0. A Figura 2.5 apresenta um exemplo de divisão de uma rede em áreas de roteamento. Os roteadores 5, 6, 7 e 8 estão na fronteira entre duas áreas de roteamento e são chamados de OSPF ABR (*Area Border Router*). Os roteadores 5 e 6 não divulgam todas as informações de roteamento dos elementos na área 0 para os elementos da área 1, mas apenas resumizam as sub-redes conectadas através desta, diminuindo a quantidade de informações a ser processada e armazenada pelos roteadores e otimizando o processo de divulgação.

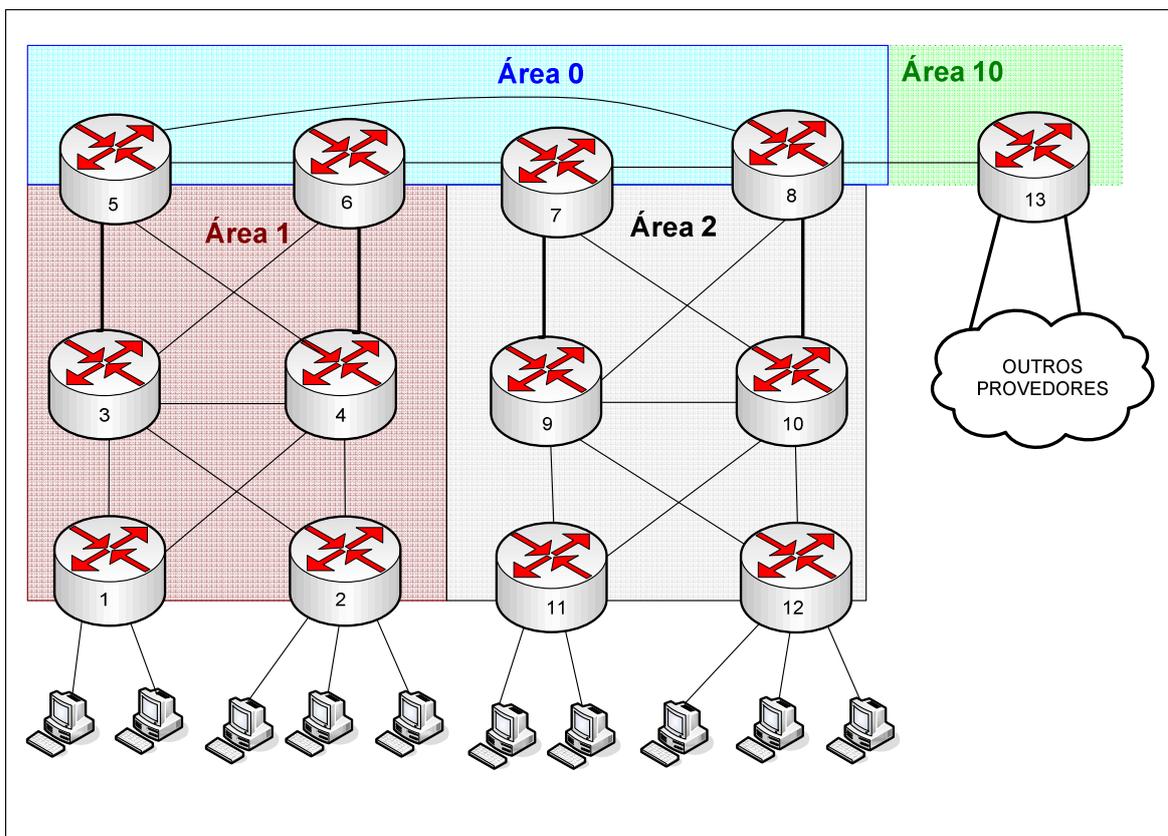


Figura 2.5 - Divisão de uma rede em áreas de roteamento.

A próxima seção descreve os métodos de estimação de tráfego, a partir da carga dos enlaces da rede.

2.5 ESTIMAÇÃO DA MATRIZ DE TRÁFEGO

Neste trabalho, será buscada a topologia com menor custo que atenda aos requisitos de capacidade de tráfego, atraso, perda de pacotes e confiabilidade dentro de uma área de

roteamento. Para isto, é necessário conhecer a matriz de tráfego a ser transportada pela rede. Conforme Medina et al (2002), conhecer a matriz de tráfego através de medidas diretas exige uma capacidade de processamento proibitivamente grande, pois seria necessário monitorar a origem e destino de todos os pacotes que trafegam pela rede.

Neste trabalho, a matriz de tráfego será determinada manualmente e fornecida ao sistema, mas existem técnicas que permitem sua determinação a partir das cargas dos enlaces da rede, conforme Medina et al (2002). Considerando-se Y o vetor que informe as cargas dos enlaces da rede, A a matriz de roteamento e X a matriz de demandas de tráfego, a relação entre o vetor das cargas dos enlaces Y e a matriz de demandas de tráfego X pode ser descrita pela equação (2.7).

$$Y = AX \quad (2.7)$$

A matriz de tráfego pode ser inferida através das cargas dos enlaces por várias abordagens diferentes (Medina et al, 2002), sendo as principais:

- Programação linear: sabendo-se que a carga em determinado enlace da rede é a soma de todas as demandas que utilizam este enlace, é possível determinar um conjunto de equações que permita solucionar o problema. A grande dificuldade neste caso é a definição da função objetivo, que normalmente é do tipo apresentado na equação (2.8), onde j representa cada um dos fluxos que passam por um enlace, X_j é o tráfego médio do fluxo j e w_j é um peso associado a cada fluxo. Para maiores detalhes, ver Goldschmidt (2000).

$$f = \max \left[\sum_{j=1}^c w_j X_j \right] \quad (2.8)$$

- Inferência Bayesiana: Nesta abordagem, o objetivo é computar a distribuição de probabilidade condicional $p(X|Y)$ para todas as demandas (X), dada a carga nos enlaces (Y). Para isto, é necessária uma distribuição prévia para X , chamada de $p(X)$. Sendo $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_c\}$ o vetor das taxas médias de cada fluxo entre pares Origem-Destino (OD), desconhecido e que precisamos estimar, também necessitamos definir uma distribuição prévia para $P(X, \lambda)$. O objetivo é determinar a distribuição conjunta $P(X, \lambda|Y)$. A partir das distribuições prévias são testadas várias distribuições posteriores, avaliando a adequação dos valores encontrados ao vetor λ . Para maiores detalhes, ver Tebaldi (1998).

- Maximização de expectativa: Os pares *OD* são modelados de acordo com uma distribuição gaussiana, $X \sim Normal(\lambda, \Sigma)$. Por causa da relação $AX=Y$, a hipótese gaussiana para valores de X significa que $Y \sim Normal(A \lambda, A \Sigma A')$, onde $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_c\}$ é o vetor das taxas médias de cada fluxo entre pares Origem-Destino (*OD*) e $\Sigma = \varphi \text{diag}(X_1^b, \dots, X_c^b)$ a matriz de covariâncias, sendo φ a variância medida em conjunto com a média X_c^b . Usando *MLE* (*maximum likelihood estimate*) são feitas várias estimativas, procurando pela solução mais adequada. Para maiores detalhes, ver Cao (2000).

Neste trabalho, a matriz de tráfego será uma variável de entrada do sistema proposto, não tendo sido implementada ferramenta para sua estimação.

2.6 REQUISITOS DE DESEMPENHO

O planejamento de capacidade de uma rede multimídia deve ser feita com base em requisitos de desempenho que, uma vez atendidos, permitam a adequada prestação de serviços dentro dos parâmetros requeridos pelos clientes. Estes requisitos são:

- A confiabilidade mínima da rede.
- A perda máxima de pacotes.
- O atraso médio sofrido pelos pacotes.
- A carga máxima nos enlaces da rede.

A seguir serão descritos os algoritmos utilizados para o cálculo destes parâmetros.

2.6.1. Confiabilidade da rede

A confiabilidade total da rede é calculada a partir da confiabilidade individual de cada enlace e representa a porcentagem teórica do tempo em que a rede permite a conectividade total entre os nós da rede.

Em Dengiz et al (1997) é apresentado um método para otimização de topologia utilizando algoritmo genético, onde o cálculo da confiabilidade total representa a função objetivo e procura-se a topologia com o menor custo que atenda ao requisito de confiabilidade mínimo. O cálculo da confiabilidade de cada topologia é realizado através de simulação de Monte Carlo. São simuladas todas as possibilidades de falha de enlaces e calculada a confiabilidade total da rede para cada topologia avaliada, através da equação (2.9), em que

L é o conjunto dos enlaces da rede, L' é o conjunto dos enlaces operacionais, Ω é a quantidade de diferentes situações possíveis de falhas de enlaces para cada topologia analisada e p_i é a probabilidade de falha de cada enlace.

$$\sum_{\Omega} \left[\prod_{l \in L'} p_l \right] \cdot \left[\prod_{l \in L/L'} (1 - p_l) \right] \quad (2.9)$$

Ao aumentar o número de nós que se pretende utilizar na rede, o crescimento exponencial de Ω torna inexecutável a computação por simulação de Monte Carlo de todas as topologias possíveis (Dengiz et al, 1997). Assim, é utilizado um algoritmo de otimização de busca, que permite encontrar a solução ótima, que atende aos requisitos do sistema, sem que seja necessário analisar todas as alternativas possíveis. Este algoritmo é descrito no capítulo 3.

A Figura 2.6 apresenta um exemplo de rede com 3 nós e 3 enlaces para a qual será demonstrado o cálculo de confiabilidade.

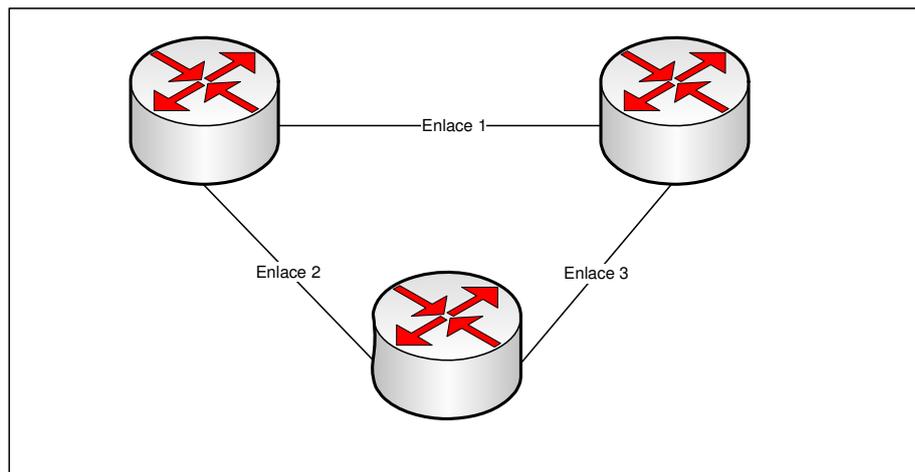


Figura 2.6 – Rede exemplo com 3 nós e 3 enlaces.

Na Tabela 2.5 é apresentado o cálculo da confiabilidade para a rede da Figura 2.6, considerando a confiabilidade individual de cada enlace 0,9, ou seja, é provável que os enlaces estejam em falha durante 10% do tempo. Cada enlace pode estar em duas situações, ativo ou falha. Para 3 enlaces, teremos $2^3 = 8$ diferentes situações para esta rede. Para calcular a probabilidade de ocorrência de cada situação é utilizada a equação (2.9). A verificação da conectividade de cada uma das situações possíveis é realizada através da matriz laplaciana, conforme descrito em 2.2.1. Somando-se os valores das situações que apresentam conectividade total, tem-se uma confiabilidade para esta rede de 0,972 ou 97,2% do tempo a rede estará conectada.

Tabela 2.5 - Cálculo da confiabilidade para a rede da Figura 2.6.

Enlace	1	2	3	Probabilidade da situação	Situação Conectada?
Confiabilidade	0,9	0,9	0,9		
Situação 1	Falha	Falha	Falha	0,001	Não
Situação 2	Falha	Falha	Ativo	0,009	Não
Situação 3	Falha	Ativo	Falha	0,009	Não
Situação 4	Falha	Ativo	Ativo	0,081	Sim
Situação 5	Ativo	Falha	Falha	0,009	Não
Situação 6	Ativo	Falha	Ativo	0,081	Sim
Situação 7	Ativo	Ativo	Falha	0,081	Sim
Situação 8	Ativo	Ativo	Ativo	0,729	Sim

Na próxima subseção será descrito o cálculo do atraso e perdas para tráfegos com características de Poisson.

2.6.2. Atraso e perda de pacotes para tráfego com características de Poisson.

O atraso médio de pacotes T nos enlaces de uma rede multimídia para tráfego com características de Poisson pode ser calculado pela equação (2.10), conforme descrito em (Bertsekas, 1992). Nesta equação λ é a taxa média de chegada de pacotes no enlace em bits por segundo, calculada através da equação (2.11) e μ é a taxa média de serviço em bits por segundo, calculada através da equação (2.12).

$$T = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} + \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (2.10)$$

$$\lambda = \frac{R}{B} \quad (2.11)$$

$$\mu = \frac{C}{B} \quad (2.12)$$

Nestas equações, R é a taxa média de chegada no enlace em bits por segundo, B é o tamanho médio de pacotes em bits e C é a capacidade do enlace. Para o caso de vários fluxos passando por um enlace, B pode ser calculado pela equação (2.13), em que B_i é o tamanho médio dos pacotes do fluxo i e R_i é a taxa média de chegada para o fluxo i em bits por segundo.

$$B = \frac{\sum_i B_i R_i}{\sum_i R_i} \quad (2.13)$$

A equação (2.10) é formada por duas componentes, o atraso médio de serviço $1/\mu$ e o atraso médio de enfileiramento, calculado pela equação (2.14), onde ρ é a taxa de pressão ou taxa de utilização do sistema, definida pela equação (2.15) e que indica a porcentagem do tempo que o servidor fica ocupado.

$$W = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} = \frac{\rho}{(\mu - \lambda)} \quad (2.14)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (2.15)$$

Para calcular o atraso médio para um fluxo entre dois nós, que são interligados por um caminho formado por mais de um enlace, utiliza-se a equação (2.16).

$$T_{fluxo} = \sum_i T_i \quad (2.16)$$

O atraso calculado pela equação (2.16) considera memória temporária infinita. Para considerar esta memória finita, deve-se considerar uma probabilidade de perda de pacotes P_K definida pela equação (2.17), em que K é o tamanho da memória temporária em *bits*. Esta equação é apresentada em Nain (1998).

$$P_K = \frac{(1 - \rho)\rho^K}{1 - \rho^{K+1}} \quad (2.17)$$

Assim, a taxa de chegadas com perdas será calculada utilizando a equação (2.18).

$$\bar{\lambda} = \lambda(1 - P_K) \quad (2.18)$$

Considerando a taxa de chegadas com perdas, o tempo médio de atraso será dado pela equação (2.19).

$$T = \frac{\bar{\lambda}}{\mu(\mu - \lambda)} + \frac{1}{\mu} \quad (2.19)$$

Conforme mostrado nesta subseção, para calcular a perda e o atraso para tráfegos com características de Poisson, é preciso conhecer a taxa de chegada de bits R , a capacidade do enlace C e o tamanho médio de pacotes B . Com estas informações é possível estimar o atraso de enfileiramento e perda de pacotes para redes de comunicação, sendo que esta teoria modela bem o comportamento de redes comutadas de comunicação por voz. Conforme Barreto (2007), a experiência mostrou que para redes multimídia por pacotes o modelo de Poisson não é suficiente e foram desenvolvidas novas teorias para explicar o comportamento destas redes. A aplicação da teoria de auto-similaridade vem mostrando bons resultados no estudo destas redes e neste trabalho será utilizada para cálculo de atraso e perda, comparando os resultados com os valores encontrados para Poisson.

A próxima subsecção apresenta as fórmulas para cálculo de atraso e perda para tráfegos com características de auto-similaridade.

2.6.3. Atraso e perda de pacotes para tráfego auto-similar.

Duas características do tráfego auto-similar são de extrema importância em seu estudo (Barreto, 2007):

- Incrementos estacionários: o processo apresenta esta característica se a equação (2.20) se mostrar válida. Nesta equação, o processo $X(t)$ pode representar, por exemplo, o tempo entre chegada de pacotes ou o tamanho dos pacotes. A equação (2.20) nos mostra que ao observar o processo $X(t)$ em uma janela de tempo entre 0 e t e comparar com outra janela com a mesma duração t e deslocada de Δt , as duas serão estatisticamente equivalentes.

$$\{X(t + \Delta t) - X(\Delta t), t \in \mathfrak{R}\} \stackrel{d}{=} \{X(t) - X(0), t \in \mathfrak{R}\} \quad (2.20)$$

- Dependência de longa duração (*LRD*): as propriedades estatísticas do processo auto-similar são semelhantes, independentemente da escala em que são observadas. Esta propriedade é descrita pela equação (2.21), em que o parâmetro de Hurst H é uma métrica que caracteriza o grau de auto-similaridade do processo. Este parâmetro varia entre 0 e 1 e quanto maior o seu valor, maior é o impacto da auto-similaridade no comportamento do processo.

$$\{X(at), t \in \mathfrak{R}\} \stackrel{d}{=} \{a^H X(t), t \in \mathfrak{R}\} \quad (2.21)$$

O Movimento Browniano Fracionário (*fBm*), proposto por Mandelbrot e Van Ness em 1968, é um meio de modelar processos estocásticos que exibem propriedade de auto-similaridade. As características do tráfego que podem ser modeladas através de *fBm* são o intervalo entre chegadas, o tamanho dos pacotes e a taxa média. A seguir é descrita a modelagem da taxa média do tráfego através de *fBm*.

O atraso d sofrido em um enlace por um tráfego com característica auto-similar pode ser calculado pela equação (2.22), onde q_{max} é o tamanho máximo da fila, calculado pelo processo de envoltória e cuja fórmula é mostrada na equação (2.23). Nesta equação, c é a taxa de serviço do enlace, a é a média do processo *fBm* $A(t)$, σ é o desvio padrão do processo *fBm* $A(t)$ e H é o parâmetro de Hurst. O processo cumulativo de chegada $A(t)$ é definido em Norros (1994).

$$d = \frac{q_{\max}}{c} \quad (2.22)$$

$$q_{\max} = (c - a)^{\frac{H}{H-1}} (k\sigma)^{\frac{1}{1-H}} H^{\frac{H}{1-H}} (1 - H) \quad (2.23)$$

O cálculo do fator k é realizado através da probabilidade ε do valor do processo $A(t)$ ultrapassar o valor do processo envoltória $\hat{A}(t)$ e é definido pela equação (2.24). Em (Barreto, 2007) foram definidos valores empíricos para ε conforme apresentado na equação (2.25).

$$k = \sqrt{-2 \ln \varepsilon} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 \times 10^{-12}, & \text{para } \rho \leq 0,4 \\ 1 \times 10^{-6}, & \text{para } 0,4 < \rho < 0,6 \\ 1 \times 10^{-3}, & \text{para } \rho \geq 0,6 \end{cases} \quad (2.25)$$

A perda de pacotes pode ser calculada pela equação (2.26), onde B_f é o tamanho máximo da fila, t_{\max} , calculado através da equação (2.27), é a máxima escala de tempo no qual, probabilisticamente, a fila alcança a mais alta ocupação e $\hat{A}_H(t_{\max})$, que pode ser calculado pela equação (2.28), é o valor do processo envoltória para $A(t)$ no instante t_{\max} .

$$P_{\max} = \frac{\hat{A}_H(t_{\max}) - ct_{\max} - B_f}{\hat{A}_H(t_{\max})} \quad (2.26)$$

$$t_{\max} = \left(\frac{k\sigma H}{c - a} \right)^{\frac{1}{1-H}} \quad (2.27)$$

$$\hat{A}_H(t_{\max}) = at_{\max} + k\sigma t_{\max}^H \quad (2.28)$$

Assim, para o cálculo de perda e atraso para tráfegos com características de auto-similaridade, precisamos conhecer o parâmetro de Hurst H , a média a , o desvio padrão σ , o tamanho do buffer k e a taxa de serviço c do enlace.

Para enlaces pelos quais trafegue mais de um fluxo, o cálculo do parâmetro de Hurst agregado H_g é calculado através da equação (2.29) e a variância agregada σ_g^2 é determinada pela equação (2.30), conforme (Orestein, 2001):

$$H_g = \frac{\sum_s H_s \sigma_s^2}{\sum_s \sigma_s^2} \quad (2.29)$$

$$\sigma_g^2 = \frac{\sum_s \sigma_s^2}{s} \quad (2.30)$$

2.6.4. Carga nos enlaces

Para o cálculo da carga máxima nos enlaces da rede, é preciso conhecer o encaminhamento dos fluxos através dos enlaces. Como o protocolo de roteamento interno normalmente utilizado no núcleo das redes multimídia é o OSPF, é preciso determinar o menor caminho entre todos os pares origem-destino da rede. Sendo os pesos de roteamento não-negativos, este problema pode ser resolvido através do algoritmo de Dijkstra (Cormem, 2001).

No OSPF, se houver mais de um caminho com o mesmo peso de roteamento, o resultado esperado é que o algoritmo de roteamento distribua o tráfego entre estes caminhos. Para implementar esta característica foi feita uma adaptação no algoritmo, substituindo a matriz de peso de roteamento e a matriz de predecessores por listas que permitem indicar mais de um caminho entre dois nós. Para apresentar o cálculo implementado será utilizada a rede apresentada na Figura 2.7. Esta rede é representada através da lista de incidência apresentada na Tabela 2.6, onde para cada arco (enlace) são apresentados os vértices (nós) conectados por este e a velocidade da interface de transmissão associada.

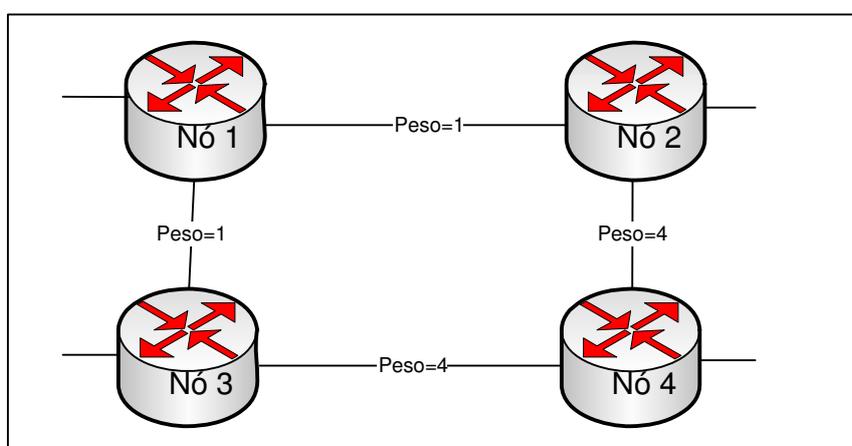


Figura 2.7 – Rede exemplo para cálculo de roteamento.

Tabela 2.6 - Lista de incidência para a rede apresentada na Figura 2.7 .

Arco	Vértice	Vértice	Velocidade Tx
1	1	2	155
2	1	3	155
3	2	4	622
4	3	4	622

Ao inserir estes dados na ferramenta de cálculo de roteamento, a mesma retornou os dados apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Tabela de roteamento para a rede apresentada na Figura 2.7.

		Caminhos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Enlaces	1	1	0	0,5	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	2	0	1	0,5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0,5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0,5	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0,5	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,5	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	1

Na Tabela 2.7, as colunas representam os caminhos entre todos os nós da rede e as linhas representam os enlaces. A interseção entre cada linha e coluna apresenta a porcentagem do tráfego entre dois nós (representado pelo rótulo da coluna) que passa pelo enlace (representado pelo rótulo da linha).

A Tabela 2.8 apresenta a vinculação entre os rótulos de caminhos e os nós de origem e destino deste.

Tabela 2.8 - Rótulos de caminhos para o grafo da Figura 2.7.

Nós	1	2	3	4
1	0	1	2	3
2	7	0	4	5
3	8	9	0	6
4	10	11	12	0

A Tabela 2.9 apresenta a relação entre os rótulos dos enlaces e os nós conectados por cada um.

Tabela 2.9 - Rótulos de enlaces para o grafo da Figura 2.7.

Nós	1	2	3	4
1	0	1	2	0
2	5	0	0	3
3	6	0	0	4
4	0	7	8	0

Assim pode ser verificado que a coluna com rótulo de caminho 3 informa que o tráfego entre os nós 1 e 4, que não são diretamente conectados, é distribuído por dois caminhos, levando a 50% deste tráfego ser transportado pelos enlaces com rótulo 1 (entre os nós 1 e 2), 2 (entre os nós 1 e 3), 3 (entre os nós 2 e 4) e 4 (entre os nós 3 e 4). Na Figura 2.8 é apresentada tela do Opnet, mostrando este encaminhamento de pacotes.

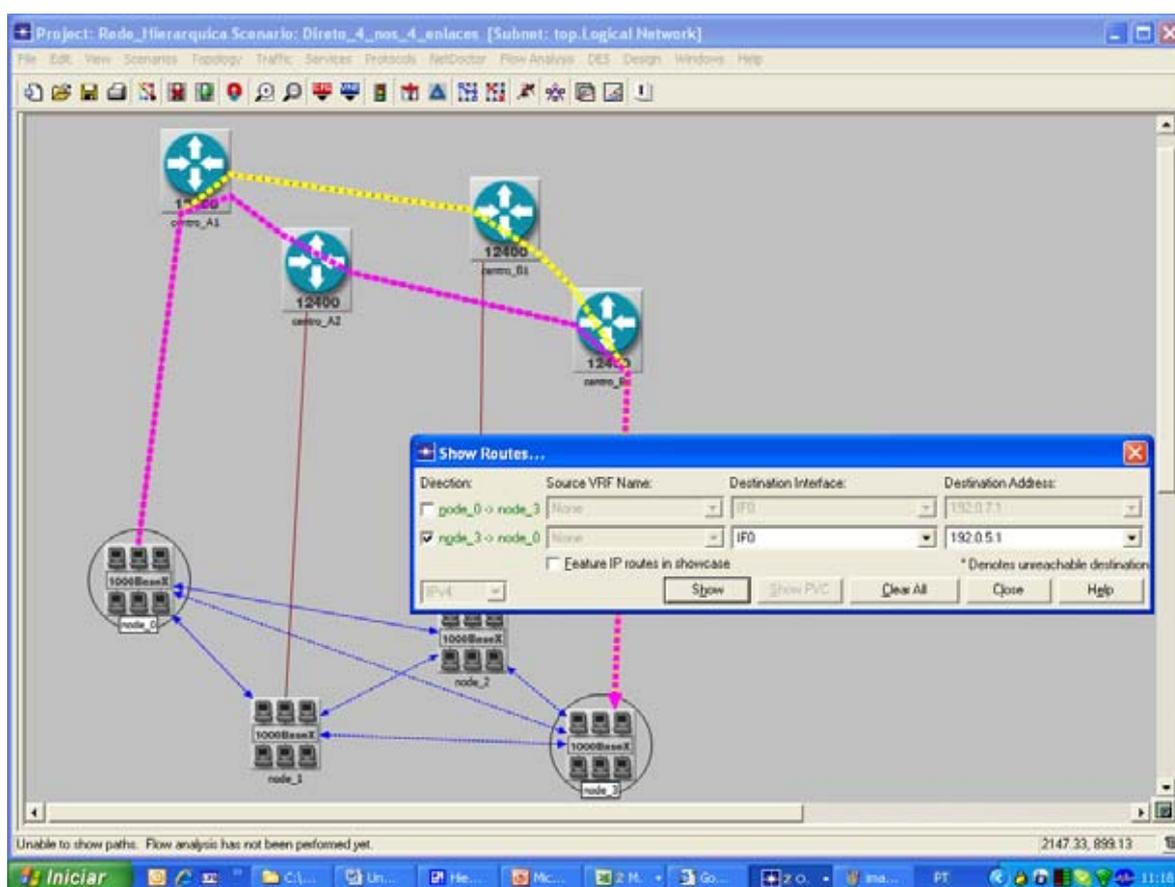


Figura 2.8 – Tela do Opnet, apresentando o encaminhamento entre os nós 1 e 4.

A primeira coluna da Tabela 2.7 informa que todo o tráfego do caminho 1 (entre os nós 1 e 2) trafega pelo enlace 1. A terceira coluna da Tabela 2.7 mostra que 50% do tráfego do

caminho 3 (entre os nós 1 e 4) passa pelos enlaces 1, 2, 3 e 4, ou seja o tráfego entre estes nós é dividido igualmente entre os caminhos 1-2-4 e 1-3-4.

A coluna com rótulo de caminho 4 informa que o tráfego entre os nós 2 e 3, que também não são diretamente conectados, é encaminhado por um único caminho utilizando os enlaces 2 (entre os nós 1 e 3) e 5 (entre os nós 2 e 1). A Figura 2.9 apresenta a tela do Opnet mostrando o encaminhamento entre estes nós.

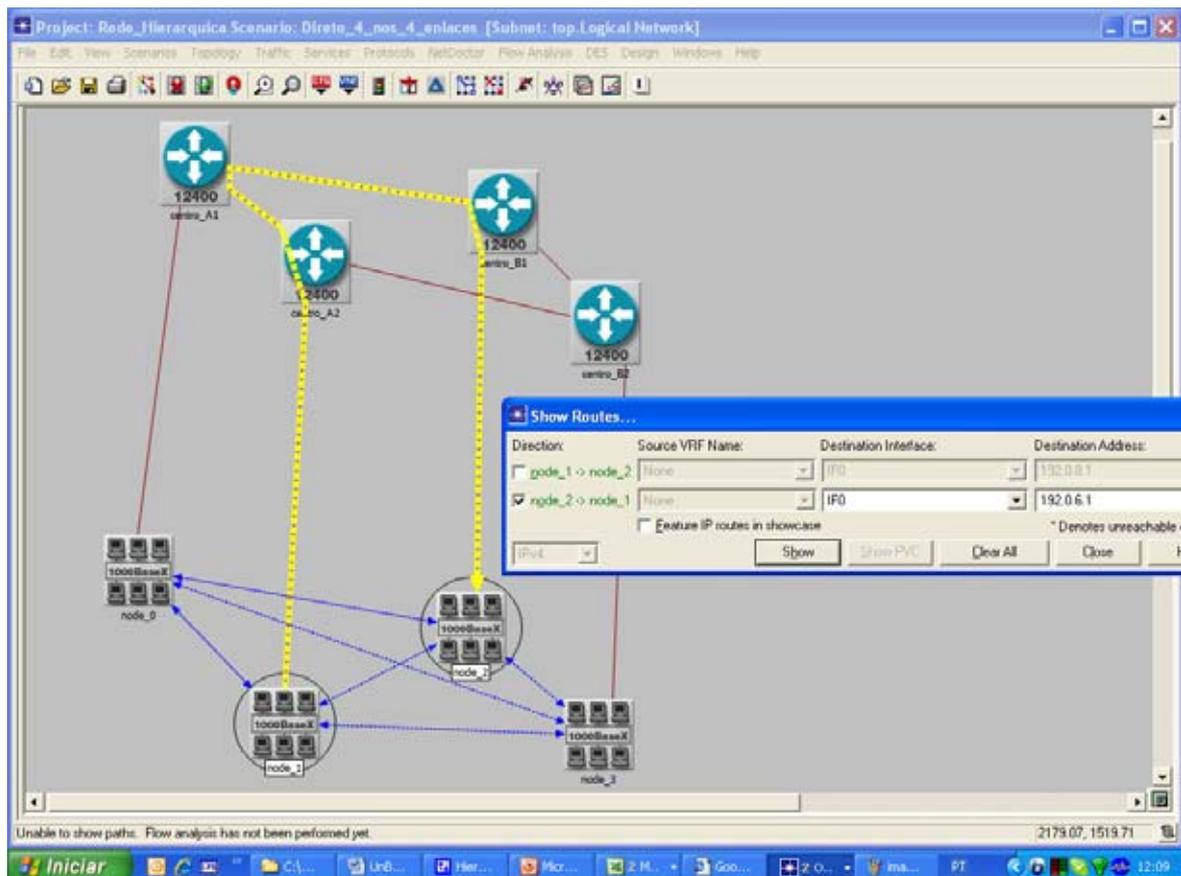


Figura 2.9 – Tela do Opnet, apresentando o encaminhamento entre os nós 2 e 3.

2.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou as bases teóricas utilizadas para fundamentar este trabalho, discutindo o problema da definição da topologia ótima. Foi apresentada a teoria de grafos, detalhando as estruturas matriciais e de listas utilizadas para representação da rede. Foi descrita a estrutura hierárquica adotada nas redes multimídia, pelos prestadores de serviços de telecomunicações. Foram abordados também os algoritmos de roteamento por menor caminho, especificamente o OSPF, que é utilizado em grande parte das redes multimídia.

Foram descritos os principais métodos para determinação da matriz de tráfego através da carga nos enlaces da rede, apesar desta funcionalidade não ter sido incluída na ferramenta implementada. Por último foram descritos os algoritmos para cálculo dos requisitos de desempenho.

No próximo capítulo serão descritos os princípios do algoritmo genético, utilizado para reduzir o tempo de busca para encontrar a solução que atenda aos requisitos definidos com o menor custo possível.

3. ALGORITMO GENÉTICO

Neste capítulo é apresentado o algoritmo utilizado para otimização do processo de busca pela topologia ótima. Este algoritmo é baseado em computação evolucionária e procura, através da avaliação, seleção e combinação de indivíduos, a solução que atenda aos requisitos propostos com o menor custo possível.

3.1 INTRODUÇÃO

A teoria da complexidade computacional investiga problemas relacionados à quantidade de recursos necessários para execução de um algoritmo e à dificuldade inerente em prover algoritmos eficientes para resolver um problema computacional específico. Tipicamente, se verifica como aumenta o tempo de processamento e a necessidade de memória, à medida que se aumenta o tamanho das entradas do algoritmo. Hedman (2004) define que problemas de decisão são aqueles para os quais, dada uma entrada, a resposta deve ser “sim” ou “não”. Estes problemas podem ser classificados como determináveis (*decidable*) ou não. Um problema de decisão é determinável quando pode ser resolvido por algum algoritmo e é praticável quando o tempo e recursos necessários para solução pelo algoritmo são razoáveis, sendo que a percepção de razoabilidade é intuitiva. Algoritmos que não são realizáveis com a tecnologia disponível atualmente, podem o ser com o avanço da tecnologia.

Por ser vago, o conceito de algoritmo praticável é abandonado por Hedman (2004), que utiliza o conceito de classes de complexidade, considerando duas classes em particular:

- Problemas de tempo polinomial (*P*): podem ser resolvidos por um algoritmo para o qual existe um $k \in \mathbb{N}$ tal que dada uma entrada de tamanho $n > 2$, o algoritmo termina em um tempo menor que n^k etapas. Segundo Hedman (2004), se um problema não é da classe *P*, certamente não é realizável.
- Problemas de tempo polinomial não determinístico (*NP*): são resolvidos por algoritmos que em alguma de suas etapas apresentam mais de uma possibilidade para a próxima etapa. Assim, o tempo de resolução destes algoritmos pode variar para diferentes entradas que apresentem o mesmo tamanho.
- Problemas de tempo polinomial não determinístico complementares (*coNP*): são resolvidos por algoritmos que conseguem determinar com eficiência as instâncias “não”, chamadas de contra-exemplos.

A Figura 3.1 apresenta a relação entre estas três classes de complexidade.

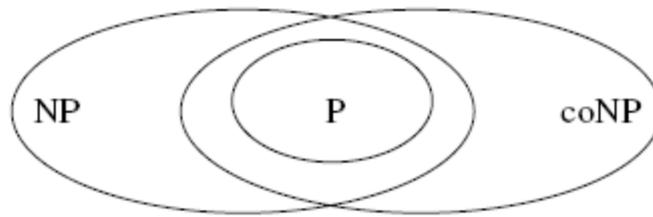


Figura 3.1 – Relação entre as classes de complexidade computacional (Hedman, 2004)

Além destas, Hedman (2004) apresenta a classe *NP-Complete* (*Nondeterministic Polynomial time-Complete*), que inclui os problemas mais difíceis de serem solucionados e que para isto, precisam ser reduzidos a problemas da classe NP.

Conforme Ashlock (2005), o problema da busca pela topologia ótima pode ser definido como sendo do tipo *NP-Complete*, ou seja, uma dada solução pode ser verificada em tempo polinomial, mas o algoritmo para encontrar as soluções tende a levar muito tempo ou necessitar de muitos recursos computacionais. Para resolver problemas deste tipo, as seguintes abordagens podem ser utilizadas:

- Aproximação: a busca é realizada por uma solução próxima da ótima, sendo definido um critério de aproximação.
- Aleatoriedade: permite um tempo de busca médio menor, ao inserir um fator de incerteza no algoritmo de busca.
- Restrição: o conhecimento das entradas do algoritmo possibilita reduzir o número de opções analisadas.
- Parametrização: a fixação de um ou mais parâmetros de entrada possibilita a redução do tempo de busca.
- Heurística: utiliza estratégias avançadas de busca.

Algoritmos de busca utilizam um problema como entrada e retornam uma solução, avaliando um número de possíveis soluções. O conjunto de todas as possíveis soluções para o problema é chamado de espaço de busca. Algoritmos de busca informados utilizam

heurísticas para aplicar o conhecimento sobre o espaço de busca pra reduzir o tempo gasto na busca.

Algoritmo Genético é um tipo de algoritmo de busca que utiliza conceitos da computação evolucionária, tais como características herdadas, mutação, seleção e cruzamento de indivíduos (Ashlock, 2005). A Figura 3.2 apresenta um exemplo de algoritmo evolucionário simples.

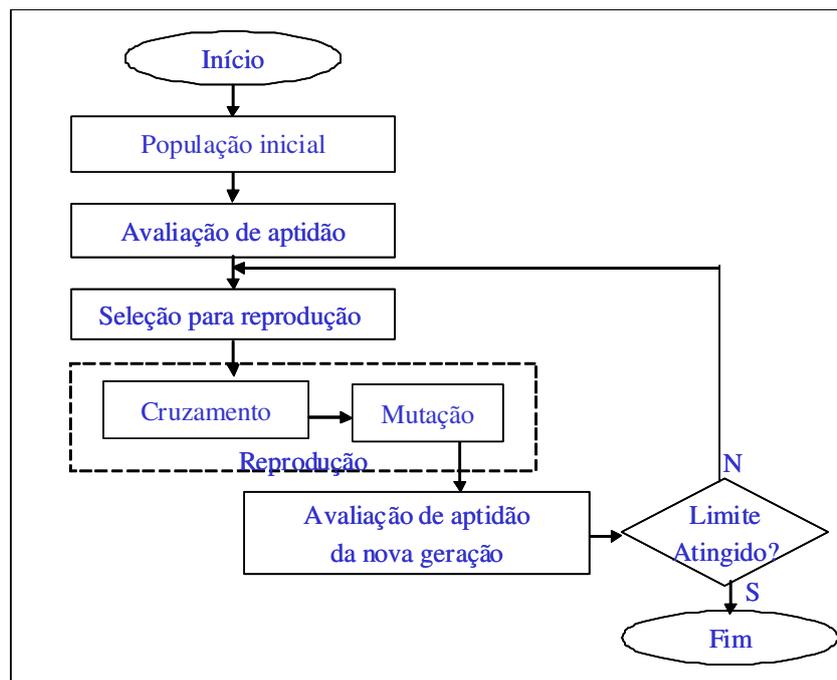


Figura 3.2 - Exemplo de um Algoritmo Genético.

Uma população de representações abstratas (chamadas de cromossomos ou genótipos ou genomas) das soluções candidatas (chamadas de indivíduos, criaturas ou fenótipos) para o problema. A evolução parte de um conjunto de indivíduos gerados aleatoriamente, a partir do qual são gerados novos conjuntos de indivíduos. A cada nova geração, os indivíduos são avaliados através de uma função de adequação e os melhores são selecionados para cruzamento e formação de uma nova geração. Após a geração da nova população os indivíduos sofrerão mutação aleatoriamente. O algoritmo é terminado após um determinado número de gerações ou quando um determinado nível de adequação é atingido.

Para a utilização de uma ferramenta baseada em algoritmo genético é necessário definir a forma de representação genética das soluções possíveis e a função que avaliará a aptidão dos indivíduos (soluções).

A representação padrão para os cromossomos é através de conjuntos de bits. Cada bit deste conjunto representa um gene ou característica do indivíduo. Neste trabalho o cromossomo representará os grafos das topologias que podem ser implementados para a rede em estudo. Cada gene representará se o enlace existe (bit 1) ou não (bit 0) neste grafo. A Tabela 3.1 apresenta a representação na forma triangular da matriz de adjacência para o grafo da Figura 2.2. Esta representação é passível de utilização, pois o grafo é não-orientado, ou seja, os enlaces de transmissão utilizados nesta rede são simétricos. O cromossomo associado à matriz de adjacência para uma rede com 6 nós será:

$$[X_{1,2} X_{1,3} X_{1,4} X_{1,5} X_{1,6} X_{2,3} X_{2,4} X_{2,5} X_{2,6} X_{3,4} X_{3,5} X_{3,6} X_{4,5} X_{4,6} X_{5,6}]$$

Para a matriz de adjacência da Tabela 3.1 o cromossomo será [1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 1 0], onde os cinco primeiros bits representam a situação dos enlaces representados na primeira linha da Tabela 3.1, os quatro bits seguintes (bits 6 a 9) representam a situação dos enlaces representados na segunda linha e assim por diante.

Tabela 3.1 - Matriz de adjacência para grafo da Figura 2.2, na forma triangular

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

A implementação do algoritmo genético está dividida nas seguintes etapas:

- Inicialização;
- Avaliação de aptidão;
- Seleção;

- Reprodução (Cruzamento e mutação).

Nas próximas seções serão descritas as etapas de inicialização, avaliação de aptidão, seleção e reprodução do algoritmo genético.

3.2 INICIALIZAÇÃO

Inicialmente, alguns indivíduos são gerados aleatoriamente para formar a primeira geração do algoritmo. O tamanho desta população irá variar de acordo com o tipo de problema em estudo, podendo variar de algumas dezenas a vários milhares (Ashlock, 2005). Estes indivíduos podem ser distribuídos por todo o espaço de busca ou ser formados a partir de sementes (indivíduos que possuem tendência de maior adequação à função objetivo) e são representados por seus respectivos cromossomos.

No algoritmo utilizado os indivíduos gerados são validados quanto à conectividade da rede e caso não exista conectividade total entre os nós da rede, este indivíduo é descartado e é gerado um novo indivíduo, que é novamente testado.

Após a definição é feita a avaliação de aptidão dos indivíduos, conforme descrito na próxima seção.

3.3 AVALIAÇÃO DE APTIDÃO

A avaliação de aptidão é feita através de uma função objetivo que, neste trabalho, procura o menor custo entre as topologias que atendem aos requisitos definidos para a rede. Após a determinação do atendimento aos requisitos, os indivíduos são marcados como aderentes ou não, é calculado o custo de cada solução e são ordenados, primeiramente pelo critério de atendimento dos requisitos e depois pelo custo.

Após a avaliação de aptidão, é realizado o processo de seleção dos indivíduos que darão origem a uma nova geração.

3.4 SELEÇÃO

Após a avaliação de aptidão e ordenamento dos indivíduos, alguns são selecionados para dar origem a uma nova geração. Neste processo, os indivíduos com maior aptidão terão uma probabilidade maior de participar do processo de reprodução. Alguns métodos de seleção escolhem apenas os melhores indivíduos para reprodução. Em outros métodos, os melhores indivíduos possuem chance maior de se reproduzirem, mas os piores não são

totalmente descartados, pois assim estaremos garantindo a diversidade em uma população grande e evitando a tendência de convergência prematura para soluções não ótimas. Os tipos mais comuns de seleção são por roleta e por torneio (Ashlock, 2005) e serão descritos nas próximas subseções.

3.4.1. Seleção por roleta

Também chamada de seleção proporcional à adequação (Ashlock, 2005). Neste método, o nível de adequação é utilizado para associar uma probabilidade de seleção a cada indivíduo. Assim indivíduos com alta adequação terão uma alta probabilidade de ser escolhidos, mas também tem uma pequena chance de serem eliminados. Este tipo de seleção permite que mesmo os indivíduos com menor adequação tenham uma pequena chance de participar do processo de reprodução, garantindo a diversidade das gerações futuras.

A analogia com a roleta pode ser representada com os indivíduos de maior adequação tendo um espaço maior na roleta, tendo assim maior chance de serem sorteados. Para selecionar N candidatos a reprodução, estaríamos girando a roleta N vezes, podendo até selecionar o mesmo candidato mais de uma vez.

3.4.2. Seleção por torneio

Na seleção por torneio, dois indivíduos são escolhidos aleatoriamente e o com maior adequação é escolhido para reprodução (Ashlock, 2005). Outros dois indivíduos são aleatoriamente escolhidos e o de maior adequação formará o par com o primeiro. O processo é repetido tantas vezes quantas forem necessárias até que se forme o número de pares de indivíduos desejados. Neste caso pode-se ou não permitir que um mesmo indivíduo seja sorteado mais de uma vez.

3.5 REPRODUÇÃO

Após a seleção dos indivíduos será gerado um novo conjunto de indivíduos através de cruzamento (também chamado de recombinação) e mutação. Cada par de indivíduos “pai” dará origem a um novo indivíduo que compartilha as características dos pais. Este processo dará origem a uma nova geração, que teoricamente terá uma média de adequação maior que a da geração anterior.

3.5.1. Cruzamento

Existem várias técnicas possíveis para realizar o cruzamento de indivíduos e dar origem a uma nova geração (Ashlock, 2005), como por exemplo:

- Cruzamento em um ponto: é determinado um ponto onde será feito o corte dos cromossomos para criação dos novos indivíduos. O ponto de corte pode ser fixo ou variável. A Figura 3.3 apresenta o cruzamento de dois indivíduos com cromossomo de 10 genes, com corte no quarto gene.

Pai 1	[a a a a a a a a]
Pai 2	[b b b b b b b b]
Filho 1	[a a a b b b b b]
Filho 2	[b b b a a a a a]

Figura 3.3 - Exemplo de cruzamento em um ponto com corte no quinto gene, adaptado de ASHLOCK (2005)

- Cruzamento multiponto: são definidos dois ou mais pontos, onde são feitos os cortes para criação dos novos indivíduos. A Figura 3.4 apresenta o cruzamento de dois indivíduos com cromossomo de 10 genes, com corte no quarto e nono genes. Neste tipo de cruzamento também podem ser definidos pontos fixos ou variáveis de corte.

Pai 1	[a a a a a a a a]
Pai 2	[b b b b b b b b]
Filho 1	[a a a b b b b a]
Filho 2	[b b b a a a a b]

Figura 3.4 - Exemplo de cruzamento em dois pontos com corte no terceiro e oitavo genes, adaptado de ASHLOCK (2005)

- Cruzamento uniforme: Neste tipo de cruzamento é feito um sorteio a cada gene, determinado se o gene será do pai 1 ou pai 2. Este tipo de cruzamento requer mais poder computacional, devido à quantidade de números aleatórios a ser gerados, mas normalmente converge para a solução mais rapidamente. A Figura 3.5 apresenta um exemplo de cruzamento uniforme. A implementação feita para este trabalho utiliza este tipo de cruzamento.

Pai 1	[a a a a a a a a]
Pai 2	[b b b b b b b b]
Sorteio	[1 0 0 1 0 1 0 1]
Filho 1	[a b b a b a b a]
Filho 2	[b a a b a b a b]

Figura 3.5 - Exemplo de cruzamento uniforme, adaptado de ASHLOCK (2005)

- Cruzamento adaptativo: Neste tipo de cruzamento cada indivíduo tem um gabarito associado que é utilizado para definir o cruzamento. Depois de definidos os dois indivíduos pai, o gabarito do pai 1 é utilizado para determinar o cruzamento. Onde houver um neste gabarito, o gene do pai 1 irá para o filho 1 e do pai 2 para o filho 2. Onde houver zero, o gene do pai 1 irá para o filho 2 e o gene do pai 2 para o filho 1. Além da mutação dos cromossomos ocorre também a mutação do Gabarito, conforme regras próprias e distintas. Este tipo de cruzamento exige um conhecimento profundo do sistema em estudo para definição dos gabaritos e das regras de evolução destes. A Figura 3.6 apresenta um exemplo de cruzamento adaptativo.

	Cromossomo	Gabarito
Pai 1	[a a a a a a a a]	[1 0 0 1 0 1 0 1]
Pai 2	[b b b b b b b b]	[0 0 1 1 0 1 1 0]
Filho 1	[a b b a b a b a]	[1 0 0 1 0 1 1 0]
Filho 2	[b a a b a b a b]	[0 0 1 1 0 1 0 1]

Figura 3.6 - Exemplo de cruzamento adaptativo, adaptado de ASHLOCK (2005)

Na próxima subsecção será explicado o processo de mutação dos genes, que procura impedir a busca de se fixar em um máximo ou mínimo local, impedindo que se encontre o máximo ou mínimo global.

3.5.2. Mutação

A mutação é a alteração aleatória de bits após a criação de uma nova geração. A intenção deste procedimento é permitir que o algoritmo não fique preso a mínimos (ou máximos) locais (Ashlock, 2005). Vários tipos de mutação são utilizados:

- Mutação em um ponto: define aleatoriamente um gene e aplica a mutação nele.

- Mutação em múltiplos pontos: define aleatoriamente um número fixo de posições no cromossomo e aplica mutação em cada um destes genes.
- Mutação probabilística com probabilidade p_m : também chamada de mutação uniforme. Aplica a mutação em cada gene com probabilidade p_m .
- Mutação Lamarckiana com profundidade k : Avalia todas as possibilidades de mutação de k ou menos genes e utiliza aquele que apresenta a maior aptidão.
- Mutação nula: quando não é aplicada mutação alguma.

Neste trabalho foi utilizada a mutação uniforme, sendo testadas várias probabilidades diferentes.

3.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram descritas as fases do algoritmo genético, detalhando as técnicas utilizadas para definição da primeira geração, avaliação de aptidão dos indivíduos, seleção dos pais para a próxima geração e reprodução.

No próximo capítulo será descrito o ambiente proposto para otimização da topologia de redes multimídia.

4. AMBIENTE PARA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Neste capítulo é apresentado o ambiente computacional proposto para planejamento de capacidade em redes multimídia, incluindo a definição da topologia e das capacidades dos enlaces. A partir das informações de distância entre os nós, matriz de interesse de tráfego e tipos de transmissão disponíveis, é feita a busca pela topologia que atenda aos requisitos de desempenho definidos com o menor custo possível.

4.1 INTRODUÇÃO

A Figura 4.1 apresenta o modelo de fluxo de informações que será utilizado, dividindo o problema nas seguintes etapas:

- Levantamento de dados da rede em estudo: nesta etapa são definidos os nós da rede em estudo, as distâncias entre estes e a topologia atualmente em uso, gerando a lista de incidência desta rede.
- Definição das demandas de tráfego a partir das cargas dos enlaces: nesta etapa são feitos estudos sobre o tráfego na rede, com medições em diferentes dias e horários e estabelecimento dos critérios para definição do interesse de tráfego a ser utilizado pela ferramenta no processo de busca pela topologia. Conforme descrito em 2.5, a medição direta dos fluxos entre os nós da rede exige uma capacidade de processamento grande, podendo levar à degradação no desempenho da rede. Para evitar este problema, pode ser adotada a estimação dos interesses de tráfego a partir das informações de carga nos enlaces, gerando a lista de interesse de tráfego, que também apresenta informações de tamanho médio de pacotes, parâmetro de Hurst e desvio padrão do interesse de tráfego.
- Definição dos tipos de transmissão a serem utilizados: Nesta etapa é feita a definição dos tipos de transmissão que o sistema poderá utilizar para interligar os nós da rede e suas características, gerando a lista de transmissão que informa a taxa de transmissão, tamanho da memória temporária e custo fixo e variável associado a este tipo.
- Definição dos critérios de desempenho da rede: Nesta etapa, o planejador deve definir os valores dos critérios de desempenho que o sistema utilizará na avaliação de aptidão dos indivíduos analisados. Estes critérios são baseados nos níveis de serviços acordados com os clientes e neste trabalho foi utilizada a confiabilidade

mínima, o atraso de enfileiramento máximo por enlace, a perda máxima de pacotes por enlace e a carga máxima por enlace.

- Busca pela topologia que atenda os critérios de desempenho com o menor custo: nesta etapa a ferramenta realiza as rodadas de busca pela topologia, utilizando para isto as listas e critérios de desempenho gerados nas etapas anteriores.

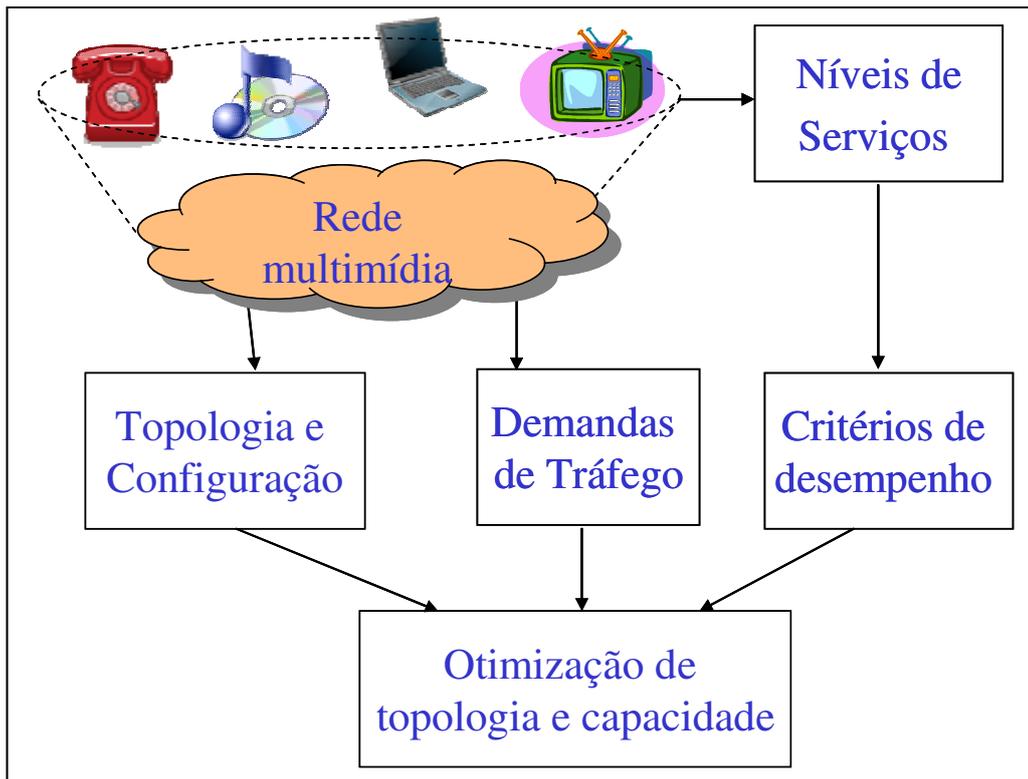


Figura 4.1 – Modelo de fluxo de informações para otimização de topologia.

Na próxima seção é apresentada a metodologia de busca de topologia definida neste trabalho e que procura através de algoritmo genético, reduzir o tempo e esforço computacional necessário para encontrar a topologia que atenda aos requisitos de desempenho com o menor custo.

4.2 METODOLOGIA DE BUSCA DE TOPOLOGIA

O problema da alocação de capacidades em uma rede multimídia pode ser descrito conforme a Tabela 4.1 (Barreto, 2007). No trabalho citado, partindo de uma topologia

dada, procura-se encontrar a configuração de capacidades dos enlaces e tamanho de *buffers* que apresente o menor custo e atenda aos requisitos definidos para a rede.

Tabela 4.1 - Formulação do problema da alocação das capacidades e do roteamento, adaptado de Barreto (2007)

Dado	<p>Uma topologia</p> <p>Uma matriz de tráfego R</p> <p>As funções de custo da capacidade $d_i(C_i)$</p> <p>As capacidades que podem ser utilizadas</p>
Minimizar	Uma função de custo
Considerando	<p>As políticas de roteamento (ou seja, os caminhos dos fluxos f_1, f_2, \dots, f_m na rede</p> <p>Capacidade dos Enlaces $C=(C_1, C_2, \dots, C_b)$ em que b é o número de enlaces.</p>
Sujeito a	<p>O conjunto de fluxos f que satisfaz a matriz de tráfego R</p> <p>$(f \leq C)$</p> <p>Um ou mais requerimentos de desempenho (atraso, perda de pacotes, confiabilidade)</p>

Neste trabalho, partindo da localização dos nós da rede será feita a busca pela topologia que atenda aos requisitos de confiabilidade, atraso e perda de pacotes requeridos com o menor custo possível. A busca pela topologia será realizada através de algoritmo genético, que permite reduzir o número de soluções analisadas. A Figura 4.2 apresenta o fluxograma da metodologia proposta. As próximas subseções detalham as etapas da metodologia.

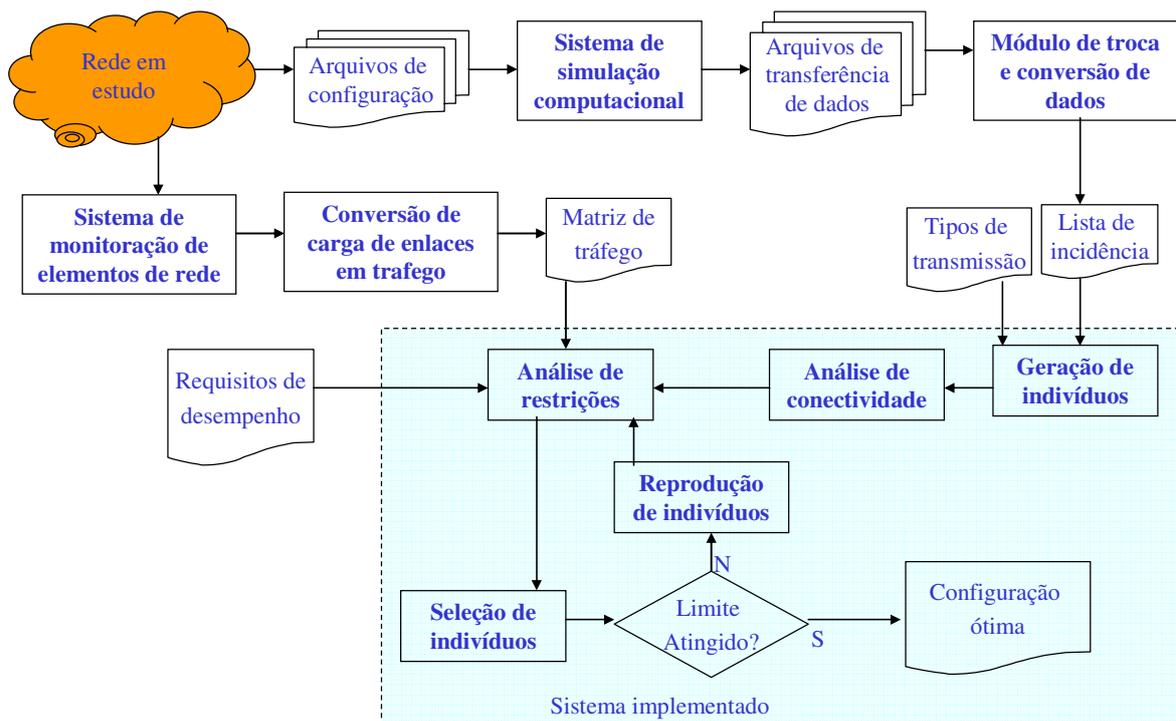


Figura 4.2 – Fluxograma da metodologia proposta.

4.2.1. Levantamento da configuração atual

Para possibilitar o gerenciamento e monitoração de elementos de rede, foi definida pelo *IETF (Internet Engineering Task Force)* a *MIB (Management Information Base) Internet*, atualmente em sua segunda versão e chamada de *MIB II*, que foi proposta em março de 1991, através da *RFC 1213*. Este padrão explicou e definiu a base de informação necessária para monitorar e controlar redes baseadas na pilha de protocolos *TCP/IP* e permite ao planejador acessar através de *SNMP* as informações de configuração dos elementos de rede.

Todos os recursos da rede que precisam ser gerenciados são modelados e as estruturas resultantes são chamadas de objetos gerenciados. Uma *MIB* é um conjunto de objetos gerenciados, que são a visão abstrata de objetos reais do sistema. As regras de construção de uma *MIB* são descritas pela *SMI (Structure of Management Information)*.

O simulador de redes *Opnet* é capaz de ler as informações da *MIB* e a partir delas construir o modelo da rede para simulação. Além disso, é possível exportar estes dados em outros formatos, como por exemplo, *XML (Extensible Markup Language)*, uma linguagem que permite a criação de dados organizados de forma hierárquica. Neste formato é possível, a

partir de um único arquivo transferir os dados sobre os elementos da rede. Este arquivo contém mais informação que o necessário para utilização pelo sistema de busca por topologia e assim é necessário um módulo de troca e conversão de dados que tem as seguintes funções:

- A partir de um arquivo *XML*, gerar a lista de incidência compatível com o sistema de busca por topologia.
- A partir da lista de incidência da topologia ótima, alterar o *XML* original, permitindo retornar estas informações para o simulador Opnet.
- Este módulo não foi implementado neste trabalho, podendo no futuro ser objeto de estudos que podem incluir não somente o *XML*, mas também outros formatos para trocas de dados. Nos experimentos realizados, a lista de incidências foi gerada manualmente.
- Na próxima subseção será detalhada a etapa de definição das demandas de tráfego.

4.2.2. Definição das demandas de tráfego

Conforme [Medina et al, 2002], acumular dados suficientes para conseguir determinar a matriz de tráfego para uma rede multimídia é proibitivamente caro. Assim, técnicas de estimação baseadas em informações parciais são utilizadas para determinar o volume de tráfego que flui entre todos os pares de nós da rede. Conforme descrito em 2.5, existem 3 técnicas básicas para esta determinação:

- Programação linear
- Inferência Bayesiana
- Maximização de expectativa

Estes três sistemas se baseiam nas informações de carga dos enlaces da rede para estimar a matriz de tráfego e conforme [Medina et al, 2002] apresentam variados graus de erro na estimação. A coleta dos dados de carga também é realizada na *MIB* através de *SNMP*, assim como os dados de configuração.

Neste trabalho foram utilizadas matrizes de tráfego com valores hipotéticos ou de arquivos de tráfego coletados da rede de uma grande operadora, sem definição de uma estratégia para determinação da matriz de tráfego. Esta estratégia deve definir a quantidade, tamanho e período das coletas a serem consideradas e como a partir delas definir a matriz de

tráfego, que pode ser através de uma das técnicas acima ou variantes destas. Além de considerar o tráfego atual transportado pela rede, o planejador deve levar em conta o horizonte de planejamento. Por causa do tempo de implantação de novos projetos e da disponibilidade de orçamento, as intervenções necessárias durante o período de um ano devem ser previstas, necessitando para isto, incluir nas estimativas de tráfego a previsão deste crescimento.

Neste trabalho não foi implementado o módulo de estimação, podendo ser objeto de futuros trabalhos.

4.2.3. Definição dos tipos de transmissão

Nesta etapa da metodologia, é feito o levantamento dos tipos de transmissão utilizados na rede em estudo e previstas as necessidades de inclusão de novas velocidades de transmissão. O sistema recebe as seguintes informações sobre os tipos de transmissão:

- Taxa de transmissão: taxa útil dos tipos de transmissão disponíveis para utilização pela rede. Pode ser formado por uma única interface ou por combinações de interfaces e prevê a modularidade do sistema, o que facilita o planejamento, projeto e implantação dos equipamentos.
- Memória temporária (*Buffer*): tamanho da memória utilizada para armazenamento dos pacotes enquanto aguardam o envio para o próximo nó. O sistema permite a previsão de opções com a mesma velocidade de transmissão e diferentes tamanhos de memória temporária.
- Custo fixo: Este custo pode representar o valor de implantação do enlace ou a parcela fixa do custo mensal ou ainda uma combinação destes valores, conforme a necessidade do planejador. Este valor é utilizado no cálculo do custo total da topologia e caso o planejador não deseje considerar custo fixo no projeto, o mesmo deve ser informado como zero.
- Custo variável: representa o custo dependente da distância do enlace. Este valor é utilizado no cálculo do custo total da topologia, multiplicado pela distância e caso o planejador não deseje considerar custo variável no projeto, o mesmo deve ser informado como zero.

4.2.4. Definição dos critérios de desempenho

Os requisitos de desempenho são importantes no planejamento da rede, pois permitem ao planejador antever as necessidades de atendimento de cláusulas definidas com clientes em acordos de *SLA (Service Level Agreement)*. Neste trabalho foram utilizados os seguintes critérios de desempenho:

- Confiabilidade total da rede: calculada a partir da confiabilidade individual dos enlaces, conforme detalhado em 2.6.1. Representa teoricamente a porcentagem total do tempo em que a rede permitirá conectividade entre todos os nós da rede. Este cálculo não considera a capacidade de transportar a matriz de tráfego informada e sim que todos os enlaces conseguirão em alguma medida se comunicar. O valor informado ao sistema no início da busca é o valor mínimo desejado e caso se deseje desconsiderar este cálculo, deve ser zerado.
- Carga nos enlaces: calculada a partir do roteamento calculado para a topologia em estudo, conforme detalhado em 0. Representa a porcentagem da capacidade dos enlaces que será utilizada para transporte do tráfego informado pela lista de interesse de tráfego. O cálculo é realizado para cada enlace e é considerado o maior valor encontrado para cada topologia. O valor informado ao sistema no início da busca é o máximo desejado e caso se deseje desconsiderar este cálculo, deve ser informado como 1 (100%).
- Atraso de enfileiramento por enlace: calculado a partir da ocupação média da memória temporária, conforme detalhado em 2.6.2, para o caso de tráfegos com características de *Poisson* e 2.6.3, para o caso de tráfegos com características de auto-similaridade. O cálculo é realizado para cada enlace e é considerado o maior valor encontrado para cada topologia. O valor informado ao sistema no início da busca é o valor máximo desejado e caso se deseje desconsiderar este cálculo deve ser informado um valor alto, por exemplo, 10 (segundos).
- Perda de pacotes por enlace: quando a ocupação teórica da memória temporária é maior que 100%, ocorre a perda de pacotes, calculada conforme detalhado em 2.6.2, para o caso de tráfegos com características de *Poisson* e 2.6.3, para o caso de tráfegos com características de auto-similaridade. O cálculo é realizado para cada enlace e é considerado o maior valor encontrado para cada topologia. O valor

informado ao sistema no início da busca é o valor máximo desejado e caso se deseje desconsiderar este cálculo, deve ser informado 1 (100%).

4.2.5. Busca pela topologia ótima

A busca pela topologia ótima é realizada através de algoritmo genético, conforme detalhado no capítulo 3. Este algoritmo é formado pelas seguintes etapas:

- **Geração inicial de indivíduos:** etapa do algoritmo genético em que é gerada aleatoriamente a população inicial, conforme detalhado na seção 3.1. Após a geração dos indivíduos é realizada a análise de conectividade da topologia e em caso de não conectividade, o indivíduo é descartado e gerado outro em substituição. Todos os indivíduos analisados são inseridos em uma lista para evitar que sejam novamente analisados e para determinar se a população já foi totalmente analisada.
- **Avaliação de aptidão:** etapa em que é realizado o cálculo do custo de cada topologia e ordenados os indivíduos de acordo com a aptidão. Foram definidos dois critérios para determinação da aptidão dos indivíduos. O primeiro critério é o atendimento aos requisitos de desempenho, sendo aqueles que atendem aos requisitos mais aptos que aqueles que não atendem. O segundo critério de aptidão é o custo calculado da topologia, sendo que quanto menor, mais apto é o indivíduo.
- **Seleção de indivíduos:** baseada na avaliação de aptidão é realizada a seleção dos indivíduos que darão origem aos indivíduos da próxima geração, através de reprodução. Cada indivíduo recebe uma probabilidade de cruzamento, conforme sua aptidão, garantindo a diversidade do processo, pois até os indivíduos menos aptos têm probabilidade de participar da reprodução. A seleção pode ser realizada por vários métodos, conforme descrito em 3.4.1 e procura evitar que a população fique concentrada em mínimos locais.
- **Reprodução de indivíduos:** os indivíduos selecionados para cruzamento dão origem aos indivíduos de uma nova geração, através de cruzamento, que pode ser realizado de várias formas, conforme descrito em 3.5.1. Após o cruzamento é realizada a mutação dos novos indivíduos, conforme descrito em 3.5.2.
- **Verificação da condição de terminação:** função do algoritmo genético que determina o fim do ciclo de reprodução/seleção. Pode ser determinado pelo número

de gerações, número máximo de gerações formadas pelos mesmos indivíduos, pelo tempo de execução ou por algum critério definido pelo planejador.

Durante cada rodada do algoritmo genético são realizadas as seguintes análises dos indivíduos de cada geração:

- **Análise de conectividade:** avalia a conectividade total de uma topologia, ou seja, se todos os nós conseguem se comunicar através desta. No caso de não existir a conectividade total, o indivíduo é descartado e é gerado um novo indivíduo.
- **Análise de restrições:** avalia se as restrições definidas pelo operador são atingidas pela topologia em estudo. Em caso de não atendimento das restrições, a topologia é marcada e no momento da seleção de indivíduos pelo algoritmo genético o primeiro critério de seleção será esta marcação.

Neste trabalho foi implementado um sistema formado pelos módulos de geração de indivíduos, análise de conectividade, análise de restrições, cálculo de aptidão, seleção de indivíduos, verificação de condição de terminação e reprodução de indivíduos.

A seguir serão detalhadas as estruturas utilizadas para repassar informações ao sistema.

4.3 INFORMAÇÕES DA REDE EM ESTUDO

A metodologia proposta neste trabalho foi definida para otimização de uma rede já existente, sendo necessário fornecer as seguintes informações:

- **Lista de incidência:** representa a topologia atual da rede e os enlaces que podem ser acrescentados a esta.
- **Lista de Capacidades:** informa as diferentes capacidades disponíveis para utilização na rede, incluindo taxa de transmissão, tamanho de buffer e custo fixo e variável da interligação.
- **Lista de tráfego:** caracteriza o interesse de tráfego entre os diversos nós da rede, apresentando dados de quantidade de tráfego, tamanho médio de pacotes, parâmetro de Hurst e desvio padrão.

Nas próximas subseções serão descritas as estruturas utilizadas para entrada de informações no modelo proposto.

4.3.1. Lista de capacidades

A lista de capacidades informa ao sistema as opções para interligação dos nós da rede, incluindo a capacidade de transmissão, o tamanho do buffer e os custos associados, tanto fixos como variáveis com a distância. A Tabela 4.2 apresenta um exemplo de lista de capacidade que pode ser utilizada pela ferramenta implementada neste trabalho. Os valores apresentados são apenas ilustrativos, não representando valores utilizados em casos reais.

Tabela 4.2 - Exemplo de lista de capacidades

Capacidade (Mbps)	Buffer (Kb)	Confiabilidade	Custo fixo (mil)	Custo Variável (mil/Km)
149,76	256	0,9	60	23
599,04	512	0,9	145	57
599,04	1024	0,9	155	57
2396,16	1024	0,9	330	100
2396,16	1024	0,95	350	100

As capacidades informadas se referem à máxima taxa útil de tributários STM-1, STM-4 e STM-16 do SDH, que é o sistema de transmissão atualmente utilizado pela maioria dos provedores de serviços de telecomunicações. A informação de tamanho de buffer é dada em *kilobits* e será utilizada para estimar a perda e atraso médios da rede. O custo para uma determinada solução pode ser calculado através de duas componentes:

- O custo fixo representa o custo médio de uma placa com a capacidade e o buffer informado mais o custo do sistema de transmissão que não está associado à distância. Como no núcleo da rede de uma prestadora de serviços de telecomunicações são, normalmente, utilizados equipamentos padronizados não será levado em consideração o custo de gabinete e placas auxiliares, pois serão iguais para todas as alternativas.
- O custo variável está associado à parcela do valor cobrado pelo sistema de transmissão que depende da distância entre os nós.

Normalmente o custo de interligação através de um sistema SDH é definido em degraus, conforme exemplificado na Tabela 4.3. Fazendo regressão linear nos valores apresentados é possível definir um custo fixo de R\$46.998,48 e um variável de R\$23.065,06 por Km.

Tabela 4.3 - Exemplo de custo mensal por degraus para interligação por STM-1.

Km	1	2	4	6	10	14	20	21
Custo Mensal	70.063	93.128	139.258	185.388	277.649	369.909	508.299	531.364

Definidas as opções de interligação dos nós, precisamos informar ao sistema o número de nós da rede, a distância entre estes e a topologia atualmente em uso. Para isto será utilizada uma estrutura de lista de incidência, conforme descrito a seguir.

4.3.2. Informações de topologia

Para representação da topologia atual da rede e dos enlaces que podem ser adicionados à rede, foi utilizada uma estrutura de lista de incidência. A Tabela 4.3 apresenta uma rede exemplo formada por 5 nós e 6 enlaces interligando os nós.

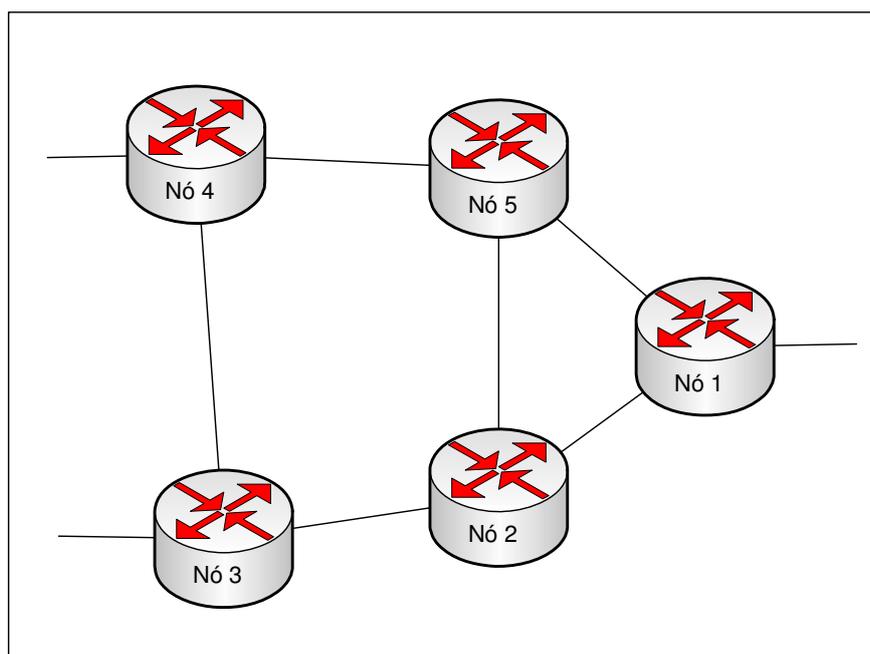


Figura 4.3 – Rede exemplo.

Para esta rede será mostrada a lista de incidência, conforme padronizada para o sistema proposto. Na Tabela 4.4 cada linha representa um enlace, sendo que as duas primeiras colunas representam os nós interligados por cada enlace. A terceira coluna apresenta a distância entre os nós e a quarta coluna, o tipo de interligação utilizado, conforme a Tabela 4.2. Quando o enlace não está ativo, é representado por 0. A ferramenta considera todos os

enlaces como bidirecionais e simétricos, ou seja, o grafo é não-orientado. Caso o planejador deseje que a busca seja leve em conta algum dos enlaces possíveis, basta retirar o mesmo desta tabela.

Tabela 4.4 - Lista de incidência para a rede exemplo da Figura 4.3.

Ponta A	Ponta B	Distância (Km)	Capacidade (Tipo)
1	2	20	1
1	3	50	0
1	4	80	0
1	5	20	1
2	3	39	2
2	4	30	0
2	5	25	2
3	4	45	2
3	5	50	0
4	5	40	2

A seguir, será analisada a estrutura utilizada para informar ao sistema a matriz de interesse de tráfego a ser cursada pela rede.

4.3.3. Informações de tráfego

Na Figura 4.3, apenas os nós 1, 3 e 4 possuem enlaces com equipamentos que não pertencem à rede em estudo. Estes nós são chamados de Origem-Destino (O-D) e a caracterização da quantidade de tráfego que será transportada entre estes nós será fundamental para a determinação da topologia com o menor custo e que atende aos requisitos definido pelo administrador da rede. A Tabela 4.5 apresenta uma possível matriz de tráfego para a rede exemplo da Figura 4.3.

Tabela 4.5 - Matriz de tráfego para a Figura 4.3.

NÓ	1	2	3	4	5
1	10	0	100	100	0
2	0	0	0	0	0
3	50	0	15	150	0
4	75	0	150	20	0
5	0	0	0	0	0

Somente os nós de Origem-Destino apresentam interesse de tráfego e pode existir tráfego que entre e sai da rede pelo mesmo nó, não trafegando pelos demais nós. A linha 1 apresenta o interesse de tráfego do nó 1 para os demais da rede e informa que do total de tráfego que entra no nó 1, 10 unidades de tráfego saem pelo próprio nó 1, 100 pelo nó 3 e mais 100 pelo nó 4.

Conforme visto em 2.6.2 e 2.6.3, para os cálculos de perda e atraso são necessárias mais informações que as fornecidas pela matriz de tráfego. Assim, foi escolhida a estrutura em forma de lista para esta representação, conforme exemplificado na Tabela 4.6. Nesta lista são apresentados dados dos interesses de tráfego entre nós diferentes, ou seja, o tráfego que entra e sai pelo mesmo nó não são representados nesta lista. A linha 1 apresenta o tráfego médio, tamanho médio de pacotes, parâmetro de Hurst e desvio padrão para o tráfego entre os nós 1 e 3.

Tabela 4.6 - Exemplo de lista de Incidência com informações de tráfego.

Ponta A	Ponta B	Tráfego (Mbps)	Tamanho médio de pacotes (bits)	Parâmetro de Hurst (H)	Desvio Padrão (Mbps)
1	3	100	1500	0,6	0,6
1	4	100	5000	0,5	0,5
3	1	50	3000	0,7	0,7
3	4	150	2000	0,9	0,9
4	1	75	1500	0,4	0,4
4	3	150	2500	0,3	0,3

A seguir serão descritos os requisitos de desempenho definidos para a implementação apresentada neste trabalho.

4.3.4. Requisitos de desempenho

A busca por uma topologia ótima envolve a definição de parâmetros de desempenho a serem atingidos. No caso do sistema implementado, foram definidos os seguintes parâmetros:

- **Confiabilidade:** a porcentagem de tempo em que o sistema apresenta conectividade total, ou seja, cada nó consegue se comunicar com todos os demais.

- Atraso de enfileiramento: intervalo de tempo médio que um pacote aguarda para ser transmitido por um enlace. É definido como o tempo entre o pacote ser armazenado na memória temporária e sua transmissão.
- Perda de pacotes: perda máxima de pacotes admitida em qualquer enlace da rede.
- Carga máxima: a porcentagem máxima de ocupação de cada enlace da rede.

Nas próximas seções será detalhado o processo de busca por algoritmo genético.

4.4 ALGORITMO GENÉTICO

Na Tabela 4.7, é mostrado o tempo necessário para analisar todas as topologias possíveis para uma determinada rede, supondo que a análise de cada opção leve 0,1 segundo. Não foi considerando que ao aumentar o número de enlaces, o tempo de análise de cada opção aumenta.

Tabela 4.7 - Evolução do tempo de cálculo para busca por força bruta.

Número de nós	Opções de capacidade	Número máximo de enlaces	Opções a serem analisadas (unidades)	Tempo de cálculo (horas)
5	1	10	1.024	0,03
5	3	10	1.048.576	29,13
6	1	15	32.768	0,91
6	3	15	1.073.741.824	29.826,16
7	1	21	2.097.152	58,25
7	3	21	4.398.046.511.104	122.167.958,64

Neste trabalho, para reduzir o tempo de cálculo, foi escolhida a opção de utilizar um algoritmo para otimização de busca baseado em algoritmo genético, que procura reduzir o número de opções analisadas, mas ainda assim encontrando o valor ótimo buscado. O fluxograma do algoritmo genético é apresentado na Figura 3.2.

A seguir, serão detalhadas as etapas do algoritmo genético implementado.

4.4.1. Primeira geração de indivíduos

Inicialmente será definido o que são os indivíduos nesse trabalho. Estes indivíduos representam as topologias, informando quais os enlaces ativos e qual a configuração de cada um. Na seção 4.2 discutimos as estruturas utilizadas para entrada de dados no sistema implementado. A lista de incidência, discutida em 4.2.2 traz as informações que precisamos, mas precisamos de uma estrutura que possa ser derivada dela e que possa ser

manipulada mais facilmente, assim definimos o cromossomo do algoritmo genético, apresentado abaixo:

$$[1001202202]$$

Cada elemento deste cromossomo é chamado de gene e apresenta o código da capacidade utilizada em um determinado enlace. O primeiro gene do cromossomo informa a configuração utilizada no enlace representado na primeira linha da lista de incidência. Os enlaces que não são utilizados neste indivíduo são representados por 0. Para facilitar a transferência de informações sobre indivíduos entre os módulos do sistema, foi definida uma codificação do cromossomo. Assim, a partir de uma tabela de capacidades, conforme descrita na seção 4.2.1, um cromossomo pode ser codificado utilizando a equação abaixo:

$$Código = \sum_{i=1}^{\text{número de genes}} Gene_i * (Opções + 1)^{(i-1)} \quad (4.1)$$

Onde “Opções” se refere ao número de linhas da tabela de capacidades e $Gene_1$ é o gene mais à direita no cromossomo. Assim, o cromossomo [1 0 0 1 2 0 2 2 0 2] é codificado como 1975302. O número máximo de enlaces possíveis para uma rede formada por um determinado número de nós é definido pela equação abaixo;

$$Enlaces = (Número_{nós} - 1)Número_{nós} / 2 \quad (4.2)$$

A equação a seguir define o número mínimo de enlaces que permitem a conectividade total entre os nós de uma dada rede:

$$Número_{enlaces} \geq Número_{nós} - 1 \quad (4.3)$$

Esta equação informa que somente com topologias em que o número de enlaces é maior ou igual ao número de nós menos um é possível atingir a conectividade total. Para topologias que atendam este requisito é necessário verificar a existência de conectividade total, conforme descrito na subseção 2.2.1. É possível também definir o número de enlaces que uma topologia deve ter para podermos afirmar que a mesma é conectada sem necessidade de outros cálculos, através da equação:

$$Número_{enlaces} \geq (Número_{nós} - 1)(Número_{nós} - 2) / 2 + 1 \quad (4.4)$$

De acordo com as equações (4.2), (4.3) e (4.4), para uma rede com 5 nós existem 10 enlaces possíveis e topologias com menos de 4 enlaces não apresentam conectividade entre todos os nós. Todas as topologias formadas por 7 ou mais enlaces são com certeza conectadas.

Assim, se tivermos uma rede com 5 nós e 4 tipos de capacidade possíveis o menor valor de código de cromossomo que apresentará conectividade total será aquele equivalente ao cromossomo [0 0 0 0 0 0 1 1 1 1], ou seja, 156. O maior código de cromossomo possível será o equivalente ao cromossomo [4 4 4 4 4 4 4 4 4 4] ou 9765624. Assim, está definido o universo de busca para este exemplo, ou seja, para realizar a busca em uma rede de 5 nós e 4 tipos de capacidade deveremos fazer a busca entre os códigos 156 e 9765624, sendo que para todos os códigos acima de 9765500, equivalente ao cromossomo [4 4 4 4 4 4 0 0 0] pode-se afirmar que a topologia é conectada.

Definidos os limites para busca, resta definir o número de indivíduos em cada geração e a distribuição a ser utilizada para esta geração. A distribuição utilizada foi a uniforme, pois para utilizações diferentes destas é necessário um estudo mais aprofundado do comportamento da distribuição dos indivíduos e sua função de aptidão, o que foge ao escopo deste trabalho.

A definição do número de indivíduos em cada geração depende do número total de indivíduos na população (Ashlock, 2005) e deve atentar para os seguintes fatos:

- Um número pequeno de indivíduos por geração irá levar a uma falta de diversidade genética e o algoritmo pode tender a convergir para ótimos locais, não encontrando o ótimo global do problema.
- Um número grande de indivíduos por geração irá levar a um tempo alto de avaliação de aptidão para cada geração, aumentando o tempo de convergência da solução.

Conforme Dengiz et al (1997), a definição dos parâmetros do algoritmo genético (por exemplo, número de indivíduos por geração e probabilidade de mutação) pode afetar o desempenho da busca. Apesar de vários estudos tentarem encontrar valores ótimos para estes parâmetros, o mais usual é a realização de algumas rodadas de simulação para estabelecer os valores que serão utilizados. Neste trabalho, o número de indivíduos em cada geração é definido pelo planejador, no momento de entrada de dados e podem ser feitos testes, variando estes valores para definir o melhor valor para cada tipo de rede.

Após a definição da população inicial, será feita a avaliação de aptidão dos indivíduos, conforme descrito a seguir.

4.4.2. Avaliação de aptidão

Neste trabalho foram utilizados dois testes de aptidão, assim definidos:

- **Análise de restrições:** verifica se a topologia em estudo atende aos requisitos definidos pelo planejador. Neste trabalho foram definidas restrições de confiabilidade mínima, percentual máximo de ocupação de enlaces, perda máxima de pacotes e atraso médio. Os indivíduos que atendem as restrições definidas são considerados aptos. Para seleção e ordenação dos indivíduos de uma geração foi definido o índice de aptidão, conforme a equação (4.5).

$$Ind\acute{e}xe_{aptid\tilde{a}o} = \begin{cases} 0, & \text{se o indiv\acute{u}duo \acute{e} apto} \\ 1, & \text{se o indiv\acute{u}duo n\~{a}o \acute{e} apto} \end{cases} \quad (4.5)$$

- **Análise da função objetivo:** realiza o cálculo da função custo, definida pela equação (4.6).

$$Custo_{topologia} = \sum_{i=1}^{N\acute{u}mero\ de\ enlaces} (Custo\ fixo)_i + (Dist\~{a}ncia\ enlace)_i * (Custo\ vari\acute{a}vel)_i \quad (4.6)$$

O código de todos os cromossomos já avaliados é armazenado em um vetor para evitar que o mesmo indivíduo seja reavaliado. Após a avaliação de aptidão é realizada a seleção de indivíduos para reprodução e criação da nova geração de indivíduos.

4.4.3. Seleção de indivíduos

Após avaliar a aptidão dos indivíduos, é feita a ordenação destes através da função objetivo, sendo o critério de aptidão definido pelo menor custo. A probabilidade de cruzamento de cada indivíduo é definida através da equação (4.7).

$$Pr(cruzamento) = \frac{Num_{indiv\acute{u}duos} - Pos_{indiv\acute{u}duo} + 1}{Num_{indiv\acute{u}duos} * \frac{(Num_{indiv\acute{u}duos} + 1)}{2}} \quad (4.7)$$

Esta fórmula gera uma série de números entre 0 e 1, cuja soma é 1 e que representarão a probabilidade de cruzamento de cada indivíduo. A Tabela 4.8 apresenta a probabilidade de cruzamento para 5 indivíduos.

Tabela 4.8 - Probabilidade de cruzamento para 5 indivíduos.

Posição	Probabilidade de cruzamento
1	0,33
2	0,27
3	0,20
4	0,13
5	0,07

Baseado na probabilidade de cruzamento é feita a seleção por roleta dos pares de indivíduos que darão origem à próxima geração através de cruzamento, conforme detalhado na seção 3.4. A seguir é detalhado o processo de reprodução.

4.4.4. Reprodução

Definidos os pares de indivíduos que darão origem à nova geração é realizada a reprodução, utilizando processo de cruzamento uniforme. Para cada gene do indivíduo filho é realizado um sorteio com probabilidade de 50% para cada indivíduo pai, conforme detalhado na seção 3.4.1. A Figura 4.4 apresenta o fluxograma do processo de reprodução.

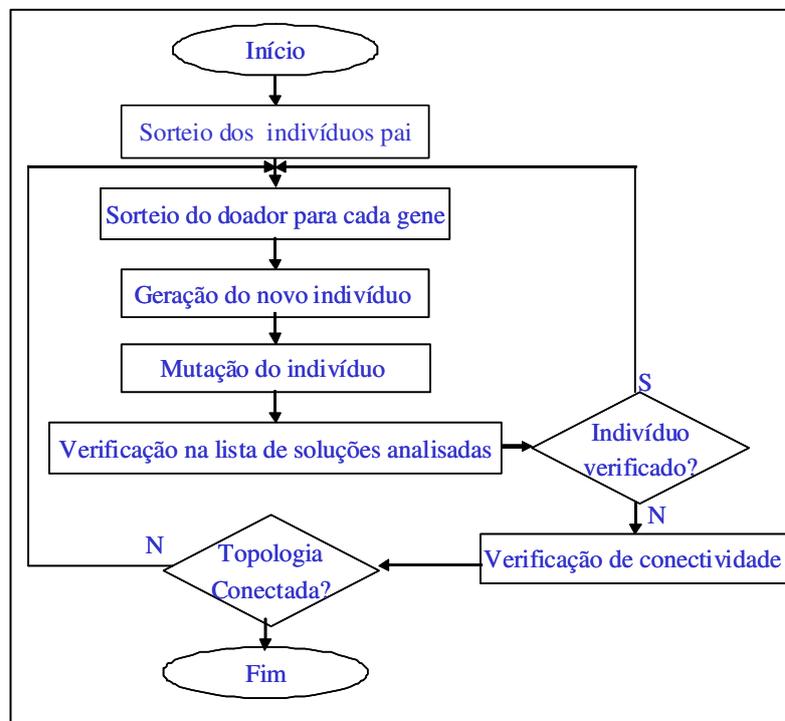


Figura 4.4 – Processo de reprodução do algoritmo Genético.

Após o cruzamento é realizado o processo de mutação uniforme, conforme descrito em 3.5.2. Ao iniciar o processo de otimização é definida uma probabilidade de mutação P_{mut} . Primeiramente é realizado um sorteio, utilizando a P_{mut} para definir se haverá ou não mutação para este indivíduo. Se for definido que haverá, são realizados novos sorteios para cada gene, utilizando a mesma probabilidade, definindo se cada gene sofrerá ou não mutação. Caso seja definida a mutação do gene, é utilizada a equação (4.8).

$$Gene = \begin{cases} 0, & \text{se } gene \neq 0 \\ \text{sorteio}(1 \text{ até } Opções_{transmissão}), & \text{se } gene = 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Após a geração do novo indivíduo é feita a verificação se este já foi avaliado anteriormente e se o mesmo representa uma topologia conectada. Caso o novo indivíduo já tenha sido avaliado ou não represente uma topologia conectada, é realizado novo sorteio dos genes doadores e gerado um novo indivíduo filho. O processo é repetido até que se encontre um indivíduo ainda não analisado e que representa uma topologia conectada. Para evitar que o processo entre em loop, foi definido um número máximo de vezes que o processo pode ser repetido. Atingido este limite, o sistema gera um novo indivíduo aleatoriamente, fazendo as verificações de conectividade e se já foi avaliado.

4.4.5. Condição de terminação do Algoritmo Genético

A condição de término do algoritmo genético foi definida como o número de gerações em que não há alteração de indivíduos e este valor é determinado pelo planejador no momento de início do processo de otimização. Esta condição foi escolhida devido à quantidade de variáveis da rede a serem analisadas para definição de uma condição de terminação através de cálculo, que deveria levar em consideração o número de nós, a distribuição de tráfego, as opções de conectividade, etc.

4.5 VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS IMPLEMENTADOS

Inicialmente, foram validados os cálculos executados pela implementação realizada. Para isto, foram realizadas comparações com resultados obtidos em trabalhos já publicados, conforme descrito nas próximas seções.

4.5.1. Validação do cálculo de confiabilidade

Para validação do cálculo de confiabilidade utilizado na ferramenta, foram realizados os cálculos descritos em (Dengiz et al, 1997). No artigo é apresentado o cálculo de confiabilidade para 20 configurações de rede, variando o número de nós, número de

enlaces e confiabilidade por enlace. Para cada rede, foram calculados o custo e a confiabilidade total da rede. A Figura 4.5 apresenta a estrutura de custo para os problemas 1 e 2. Cada valor nesta matriz representa o custo para interligar os nós correspondentes à linha e à coluna associadas.

$$\begin{array}{c}
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{array}
 \begin{array}{ccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\
 \begin{array}{c}
 1 \\
 2 \\
 3 \\
 4 \\
 5
 \end{array}
 & \left[\begin{array}{ccccc}
 - & 32 & 54 & 62 & 25 \\
 & - & 34 & 58 & 45 \\
 & & - & 36 & 52 \\
 & & & - & 29 \\
 & & & & -
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figura 4.5 – Rede Custo por enlace para os problemas 1 e 2 de (Dengiz et al, 1997).

Para o problema 1 a rede calculada é formada pelos enlaces {1,2}{1,3}{1,5}{2,3}{2,5}{3,4}{4,5} e para o problema 2, {1,2}{1,5}{2,3}{2,5}{3,4}{4,5}. Para representar a rede do problema 1 foi utilizada a lista de capacidades mostrada na Tabela 4.9 e a lista de incidência mostrada na Tabela 4.10.

Na lista de capacidades, a taxa de transmissão e o tamanho das memórias temporárias não são utilizados, pois é feita apenas o cálculo da confiabilidade, baseado na topologia. O campo de custo variável está zerado, pois no artigo é apresentado apenas um custo fixo para cada enlace.

Tabela 4.9 - Lista de capacidades para o problema 1 apresentado em (Dengiz et al, 1997)

Capacidade do Enlace	Memória temporária	Confiabilidade do Enlace	Custo Fixo	Custo Variável
1000	100	0.8	32	0
1000	100	0.8	54	0
1000	100	0.8	62	0
1000	100	0.8	25	0
1000	100	0.8	34	0
1000	100	0.8	58	0
1000	100	0.8	45	0
1000	100	0.8	36	0
1000	100	0.8	52	0
1000	100	0.8	29	0

Tabela 4.10 - Lista de incidência para o problema 1 de (Dengiz et al, 1997)

Ponta A	Ponta B	Distância	Tipo de Transmissão
1	2	0	1
1	3	0	2
1	5	0	4
2	3	0	5
2	5	0	7
3	4	0	8
4	5	0	10

Na lista de incidência, os valores do campo distância foram zerados, pois como foi definido um custo fixo para cada enlace, não há necessidade desta informação.

Na Tabela 4.11 é apresentada a comparação entre os resultados de (Dengiz et al, 1997) e os valores calculados pela implementação deste trabalho.

Tabela 4.11 - Comparação entre os valores apresentados em (Dengiz et al, 1997) e calculados pela ferramenta.

Problema	Artigo		Ferramenta	
	Custo Calculado	Confiabilidade Calculada	Custo Calculado	Confiabilidade Calculada
1	255	0,9170	255	0.9175
2	201	0,9579	201	0.9579
3	720	0,9034	745	0.9194
4	845	0,9513	845	0.9513
5	630	0,9556	630	0.9556
6	208	0,9317	208	0.9317
7	247	0,9614	247	0.9614
8	179	0,9637	179	0.9637
9	239	0,9066	239	0.9066
10	286	0,9567	286	0.9567
11	209	0,9669	209	0.9669
12	154	0,9050	154	0.9050
13	197	0,9516	197	0.9516
14	136	0,9611	136	0.9611
15	317	0,9509	Valores não calculados	
16	926	0,9925		
17	1606	0,9618		
18	1063	0,9035		
19	1022	0,9550	1063	0.9035
			1105	0.6061
			1022	0.8191
20	596	0,9032	596	0.9032

Os valores marcados com **negrito** apresentaram diferenças, descritas a seguir:

- No problema 1 houve uma pequena diferença na confiabilidade, provavelmente por causa de arredondamento de valores no trabalho publicado.
- Para o problema 3, provavelmente houve algum erro na publicação, pois com os valores apresentados não foi possível chegar aos resultados apresentados.
- Para os problemas 15, 16 e 17 não foi possível fazer o cálculo, por não serem apresentados os dados dos enlaces utilizados.
- No problema 19 é informado que foi utilizado o enlace {1,13}, mas não é apresentado o custo deste enlace. Foram feitos dois cálculos, o primeiro utilizando o {1,3} com custo 99 e o segundo utilizando o enlace {1,13} com custo 16. Em nenhum dos casos chegou-se aos resultados apresentados.

Não foi possível comparar o tempo de convergência do algoritmo ou a precisão dos cálculos, pois em (Dengiz et al, 1997) não são apresentadas informações suficientes para comparação.

O método utilizado para o cálculo da confiabilidade, tanto neste trabalho, como em (Dengiz et al, 1997) foi a busca exaustiva, que calcula a confiabilidade exata. Existem métodos de estimativa deste valor, que reduzem o tempo de cálculo, mas apresentam um erro de estimativa. A implementação e comparação destes métodos não faz parte deste trabalho, podendo ser objeto de trabalhos futuros.

4.5.2. Validação do cálculo de atraso com tráfego de Poisson.

Para a validação do cálculo de atraso com tráfego de Poisson foi implementada rede apresentada em (Barreto, 2007), conforme Figura 4.6 e feito o cálculo para 3 cenários diferentes.

Foram utilizados três tipos diferentes de transmissão para interligação dos nós, conforme a lista de tipos de transmissão apresentada na Tabela 4.12.

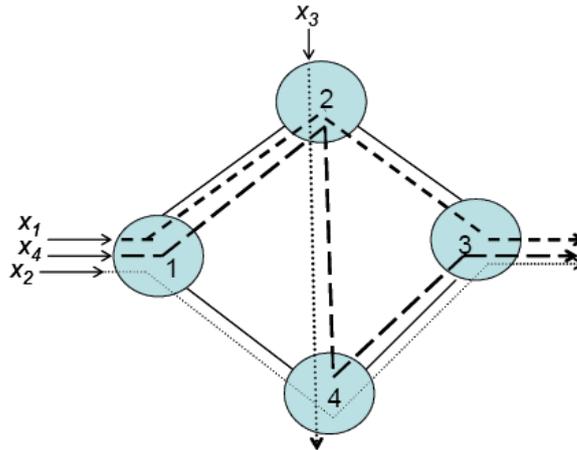


Figura 4.6 – Rede para verificação do cálculo de atraso com tráfego de Poisson, adaptado de [Barreto, 2007].

Tabela 4.12 - Lista de capacidade para os 3 cenários utilizando a rede da Figura 4.6.

Capacidade (bps)	Memória Temporária (bits)	Confiabilidade	Custo Fixo (\$)	Custo Variável (\$)
16.000	1.024.000	0.9	62	23
25.000	1.024.000	0.9	147	57
30.000	1.024.000	0.9	328	100

Em [Barreto 2007] foi simulado um ambiente MPLS com roteamento através de VPN. Na implementação realizada neste trabalho foi simulado um ambiente IP com roteamento através do protocolo OSPF com pesos definidos pelo inverso da capacidade. Assim, para simular os fluxos, conforme apresentado na Figura 4.6, foi preciso adaptar a matriz de tráfego para utilização pela ferramenta. Abaixo são apresentados as características dos 3 cenários:

- Cenário 1: A Tabela 4.13 apresenta a lista de incidência para este cenário, onde todos os enlaces são de 16 Kbps (linha 1 da Tabela 4.12). A Tabela 4.14 mostra a lista de tráfego para este cenário.

Tabela 4.13 - Lista de incidência para o cenário 1 da Figura 4.6.

Ponta A	Ponta B	Distância	Tipo de Transmissão
1	2	10	1
1	4	10	1
2	3	10	1
2	4	10	1
3	4	10	1

Tabela 4.14 - Lista de tráfego para o cenário 1 da rede da Figura 4.6.

Ponta A	Ponta B	Tráfego médio	Tamanho médio de pacotes	H	Variância
1	2	9000	412,4444	0,3	0
1	3	0	0	0,3	0
1	4	8000	400	0,3	0
2	1	0	0	0,3	0
2	3	8000	400	0,3	0
2	4	9000	412,4444	0,3	0
3	1	0	0	0,3	0
3	2	0	0	0,3	0
3	4	0	0	0,3	0
4	1	0	0	0,3	0
4	2	0	0	0,3	0
4	3	9000	412,4444	0,3	0

- Cenário 2: A Tabela 4.16 apresenta a lista de incidência para este cenário, onde um dos enlaces foi alterado para 30 Kbps (linha 3 da Tabela 4.12). A Tabela 4.15 mostra a lista de tráfego para este cenário com alteração no tráfego entre os nós 2 e 4, em relação ao cenário 1.

Tabela 4.15 - Lista de tráfego para o cenário 2 da rede da Figura 4.6.

Ponta A	Ponta B	Tráfego médio	Tamanho médio de pacotes	H	Variância
1	2	9000	412,4444	0,3	0
1	3	0	0	0,3	0
1	4	8000	400	0,3	0
2	1	0	0	0,3	0
2	3	8000	400	0,3	0
2	4	17000	406,5882	0,3	0
3	1	0	0	0,3	0
3	2	0	0	0,3	0
3	4	0	0	0,3	0
4	1	0	0	0,3	0
4	2	0	0	0,3	0
4	3	9000	412,4444	0,3	0

Tabela 4.16 - Lista de incidência para o cenário 2 da Figura 4.6.

Ponta A	Ponta B	Distância	Tipo de Transmissão
1	2	10	1
1	4	10	1
2	3	10	1
2	4	10	3
3	4	10	1

- Cenário 3: A Tabela 4.18 apresenta a lista de incidência para este cenário, onde todos os enlaces foram alterados para 25 Kbps (linha 2 da Tabela 4.12). A Tabela 4.17 mostra a tabela de tráfego para este cenário.

Tabela 4.17 - Lista de tráfego para o cenário 3 da rede da Figura 4.6.

Ponta A	Ponta B	Tráfego médio	Tamanho médio de pacotes	H	Variância
1	2	17000	406,5882	0,3	0
1	3	0	0	0,3	0
1	4	16000	400	0,3	0
2	1	0	0	0,3	0
2	3	16000	400	0,3	0
2	4	17000	406,5882	0,3	0
3	1	0	0	0,3	0
3	2	0	0	0,3	0
3	4	0	0	0,3	0
4	1	0	0	0,3	0
4	2	0	0	0,3	0
4	3	17000	412,4444	0,3	0

Tabela 4.18 - Lista de incidência para o cenário 3 da Figura 4.6.

Ponta A	Ponta B	Distância	Tipo de Tx
1	2	10	2
1	4	10	2
2	3	10	2
2	4	10	2
3	4	10	2

A Tabela 4.19 apresenta a comparação entre os valores de atraso calculados e simulados no NS relatados em [Barreto, 2007] com os calculados neste trabalho e com os valores de atraso na fila coletado em simulação realizada no Opnet.

Tabela 4.19 - Comparação entre os valores de atraso calculados e o trabalho de referência (Barreto, 2007)

Cenário	Barreto, 2007		Ferramenta		Opnet
	Simulação NS	Calculado	Atraso total	Atraso na fila	
1	0,160	0,177	0,177	0,099	0,118
2	0,141	0,149	0,149	0,0840	0,096
3	0,144	0,152	0,152	0,104	0,101

Na próxima subseção será apresentada a validação do cálculo de agregação de tráfegos auto-similares.

4.5.3. Validação do cálculo de agregação de tráfego auto-similar.

Em [Barreto, 2007] são avaliados dois métodos de estimativa de cálculo de agregação de tráfego e comparados com os valores obtidos através de simulação. O segundo método, que segundo a análise apresenta maior aproximação com o caso real foi o escolhido para utilização nesta ferramenta e utiliza as equações (2.29) e (2.30), apresentadas na seção 2.6.3, para cálculo do parâmetro de Hurst H_g e da variância σ_g^2 .

Os resultados dos cálculos e simulações realizados em [Barreto, 2007] para dois fluxos são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Cálculo do parâmetro de Hurst e variância para 2 fluxos agregados, adaptado de [Barreto, 2007]

Nº.	Fluxo 1		Fluxo 2		Método 1		Método 2		Simulação	
	H_1	v_1	H_2	V_2	H_g	v_g	H_g	v_g	H_g	v_g
1	0,55	0,50	0,55	1,50	0,55	1,00	0,55	1,00	0,55±0,00	1,00±0,01
2	0,65	0,50	0,65	1,50	0,65	1,00	0,65	1,00	0,65±0,01	1,04±0,19
3	0,75	0,50	0,75	1,50	0,75	1,00	0,75	1,00	0,75±0,01	1,09±0,27
4	0,85	0,50	0,85	1,50	0,85	1,00	0,85	1,00	0,85±0,01	1,04±0,20
5	0,55	1,00	0,65	1,00	0,65	0,50	0,60	1,00	0,60±0,01	0,94±0,11
6	0,55	0,50	0,75	0,50	0,75	0,25	0,65	0,50	0,66±0,01	0,50±0,00
7	0,55	1,50	0,85	1,50	0,85	0,75	0,70	1,50	0,72±0,00	1,50±0,02
8	0,65	1,50	0,75	1,50	0,75	0,75	0,70	1,50	0,70±0,01	1,50±0,02
9	0,65	0,50	0,85	0,50	0,85	0,25	0,75	0,50	0,76±0,01	0,50±0,01
10	0,75	1,00	0,85	1,00	0,85	0,50	0,80	1,00	0,80±0,01	1,00±0,03
11	0,55	0,50	0,65	1,50	0,65	0,75	0,63	1,00	0,63±0,00	1,01±0,01
12	0,55	1,50	0,65	0,50	0,65	0,25	0,58	1,00	0,63±0,01	1,00±0,01
13	0,55	0,50	0,75	1,50	0,75	0,75	0,70	1,00	0,71±0,00	1,01±0,01
14	0,55	1,50	0,75	0,50	0,75	0,25	0,60	1,00	0,60±0,01	1,00±0,01
15	0,55	0,50	0,85	1,50	0,85	0,75	0,78	1,00	0,79±0,00	1,01±0,01
16	0,55	1,50	0,85	0,50	0,85	0,25	0,63	1,00	0,64±0,01	1,01±0,01
17	0,65	0,50	0,75	1,50	0,75	0,75	0,73	1,00	0,73±0,01	1,01±0,01
18	0,65	1,50	0,75	0,50	0,75	0,25	0,68	1,00	0,68±0,00	1,01±0,01
19	0,65	0,50	0,85	1,50	0,85	0,75	0,80	1,00	0,80±0,01	1,04±0,17
20	0,65	1,50	0,85	0,50	0,85	0,25	0,70	1,00	0,71±0,01	1,00±0,01
21	0,75	0,50	0,85	1,50	0,85	0,75	0,83	1,00	0,83±0,01	1,01±0,02
22	0,75	1,50	0,85	0,50	0,85	0,25	0,78	1,00	0,78±0,01	1,01±0,03

Para validar a implementação pelo método 2, foi realizado o cálculo utilizando a rede apresentada na Figura 4.7. Os valores obtidos foram exatamente iguais aos apresentados nas duas colunas do método 2 da Tabela 4.20.

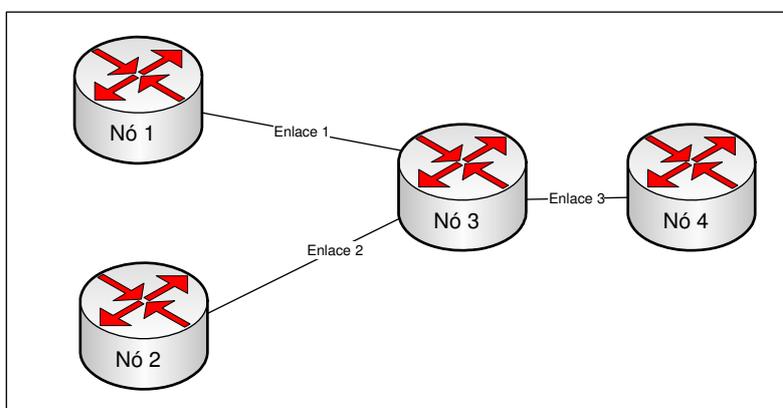


Figura 4.7 – Rede para verificação de cálculo de parâmetros de tráfego agregado para 2 fluxos.

A Tabela 4.21 apresenta o cálculo pelo método 2 para 4 fluxos agregados e os valores obtidos em simulação, conforme apresentado em [Barreto, 2007].

Tabela 4.21 - Cálculo de parâmetros de agregação para 4 fluxos, adaptados de [Barreto, 2007]

Nº.	Fluxo 1		Fluxo 2		Fluxo 3		Fluxo 4		Método 2		Simulação	
	H_1	v_1	H_2	v_2	H_3	v_3	H_4	v_4	H_5	v_g	H_g	v_g
1	0,55	0,50	0,65	0,50	0,75	1,00	0,85	1,50	0,75	0,88	$0,76 \pm 0,01$	$0,90 \pm 0,09$
2	0,55	1,50	0,65	1,50	0,75	1,50	0,85	0,50	0,67	1,25	$0,68 \pm 0,01$	$1,26 \pm 0,02$
3	0,55	1,00	0,65	1,00	0,75	0,50	0,85	1,00	0,69	0,88	$0,71 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,06$
4	0,55	0,50	0,55	1,00	0,55	1,50	0,85	1,50	0,65	1,13	$0,67 \pm 0,01$	$1,14 \pm 0,02$

Para avaliar o cálculo implementado com 4 fluxos foi utilizada a rede apresentada na Figura 4.8. Todos os resultados coincidiram com os apresentados na Tabela 4.21.

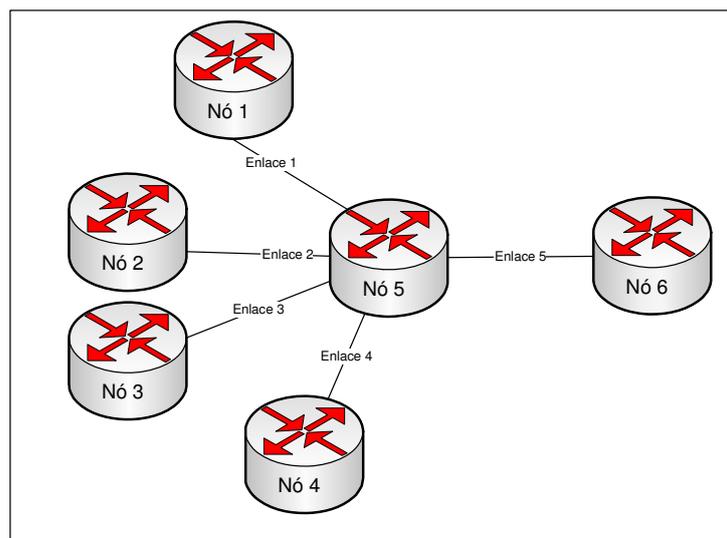


Figura 4.8 – Rede para cálculo de parâmetros agregados para 4 fluxos.

Na próxima subseção será apresentada a validação do cálculo de atraso com tráfego auto-similar, através da comparação com valores apresentados pelo simulador Opnet.

4.5.4. Validação do cálculo de atraso com tráfego auto-similar.

Para verificar o cálculo com tráfego auto-similar implementado na ferramenta, foi utilizada uma rede formada por 3 nós e 3 enlaces. Cada nó tem interesse de tráfego médio de 9.800 bps para cada um dos outros dois nós com parâmetro de Hurst 0,8. A rede implementada no Opnet é mostrada na Figura 4.9.

Inicialmente foram verificadas as diferenças nos tempos de atraso de enfileiramento, ao alterar o tempo simulado no Opnet. A Tabela 4.22 apresenta os atrasos de enfileiramento encontrados para simulações com tempos simulados de 1 hora, 2 horas, 5 horas, 10 horas e 20 horas. A média apresentada foi calculada, excluindo o maior e o menor tempo encontrado.

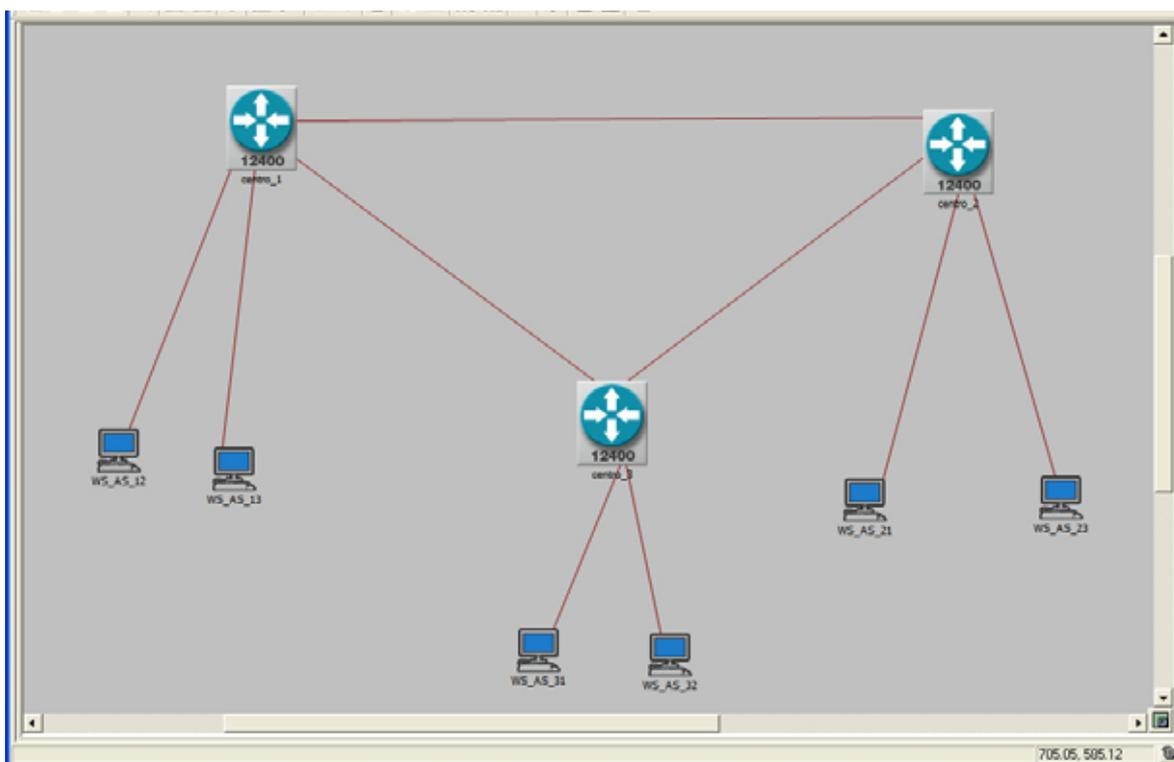


Figura 4.9 – Rede para teste do cálculo de atraso com tráfego auto-similar.

Tabela 4.22 – Atraso simulado com o Opnet, em segundos.

Nós		Tempo simulado (Horas)					Média
Origem	Destino	1	2	5	10	20	
1	2	0,034339	0,034855	0,034974	0,035422	0,035203	0,035203
1	3	0,034571	0,034610	0,034563	0,034829	0,034879	0,034879
2	1	0,033810	0,034287	0,036770	0,035520	0,035090	0,035090
2	3	0,035860	0,035266	0,035178	0,034761	0,034720	0,034720
3	1	0,034202	0,035192	0,035032	0,034992	0,034756	0,034756
3	2	0,034325	0,034505	0,034715	0,034582	0,034667	0,034667

A Tabela 4.23 apresenta a variação dos valores simulados, em relação à média destes valores. Verifica-se que a menor variação ocorreu nas simulações com tempo simulado de 2 horas e 20 horas.

Tabela 4.23 Variação em relação à média, em %.

Nós		Variação em relação à média				
Origem	Destino	1	2	5	10	20
1	2	-1,9%	-0,4%	-0,1%	1,2%	0,5%
1	3	-0,3%	-0,2%	-0,3%	0,5%	0,6%
2	1	-3,3%	-1,9%	5,2%	1,6%	0,4%
2	3	2,3%	0,6%	0,3%	-0,9%	-1,0%
3	1	-2,1%	0,8%	0,3%	0,2%	-0,5%
3	2	-0,8%	-0,2%	0,4%	0,0%	0,2%
Soma		-6,1%	-1,5%	5,7%	2,5%	0,3%

A Figura 4.10 apresenta a tela de progresso da simulação, mostrando que o tempo total para simular 2 horas de funcionamento da rede foi de 1 minuto e 51 segundos. Para simular 20 horas, o tempo gasto foi de 19 minutos. Pelos desvios nos resultados e pelos tempos gastos, foi definido a realização dos demais testes com 2 horas de tempo de simulação.

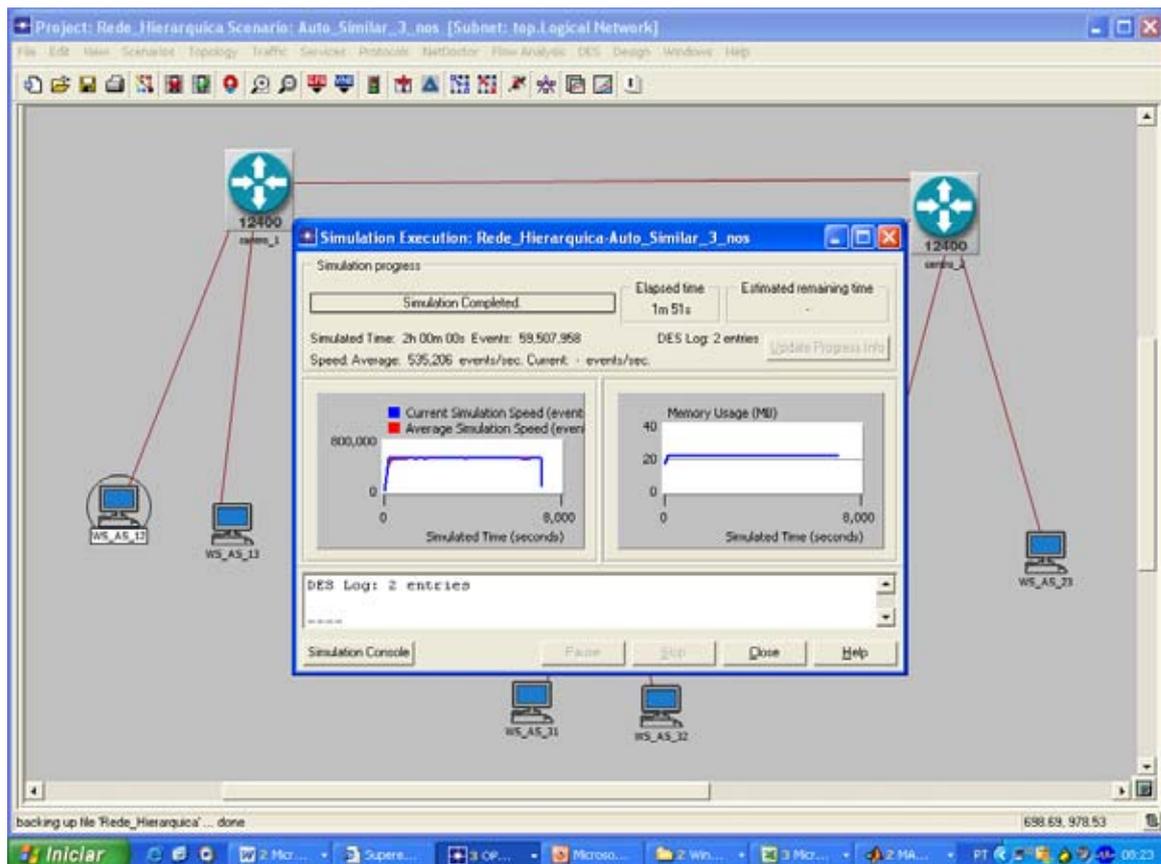


Figura 4.10 Tela de progresso de simulação do Opnet.

A Figura 4.11 mostra a tela do Opnet que apresenta os resultados de atraso de enfileiramento para o cenário 3, apresentado na Tabela 4.22, com 5 horas de tempo simulado. O quadro da esquerda mostra os valores mínimos, médios e máximos de atraso de enfileiramento nos diversos enlaces da rede. No quadro da direita são apresentadas as envoltórias destes tráfegos.

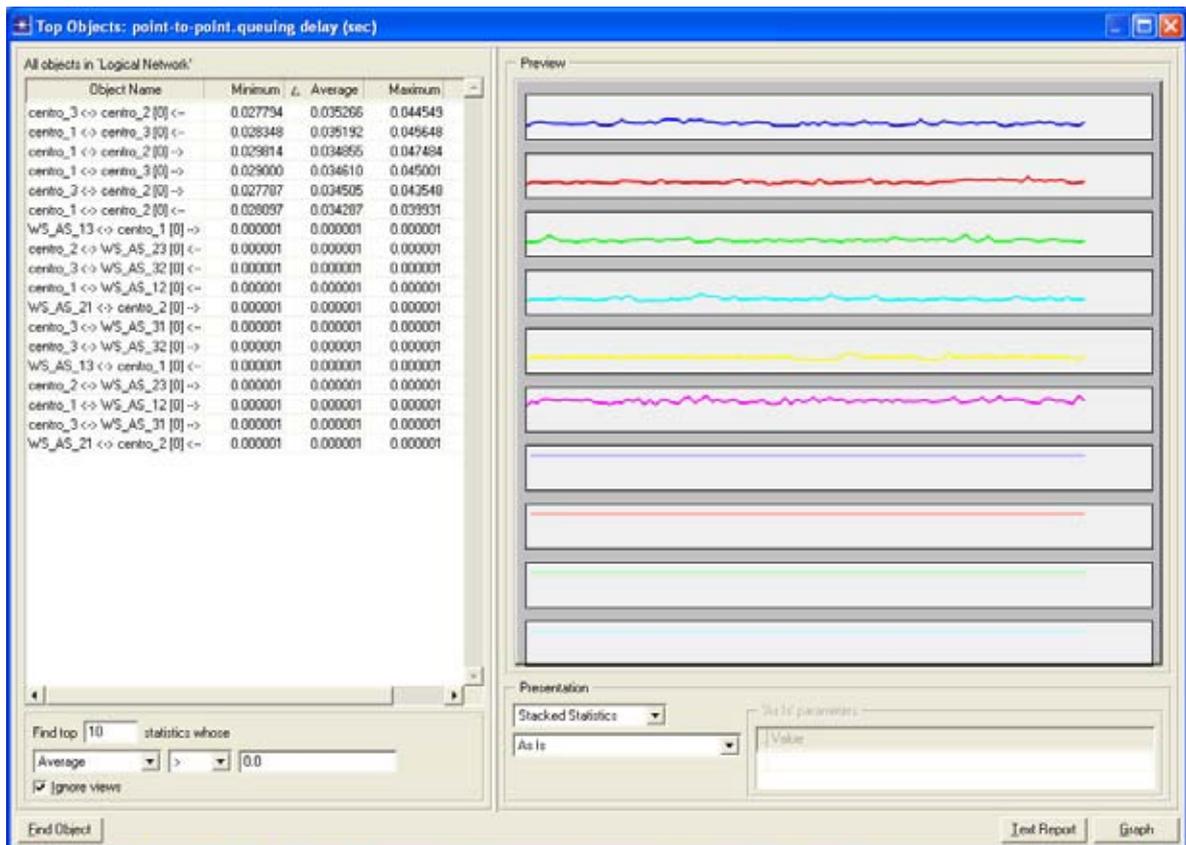


Figura 4.11 – Tela do Opnet apresentado o atraso de enfileiramento para o cenário 3.

O Opnet, ao simular, gera taxas próximas às informadas e não o valor exato. Estes valores foram utilizados para realizar os cálculos na ferramenta, sendo que a Tabela 4.24 apresenta a comparação entre os valores de atraso de enfileiramento e carga de enlaces, simulados no Opnet e os calculados pela ferramenta para $H=0,8$. No cálculo realizado pela ferramenta foi utilizada a variância informada pelo Opnet.

Tabela 4.24 – Atraso simulado comparado com cálculo implementado na ferramenta.

Fluxos		Atraso (segundos)		Carga	
Origem	Destino	Opnet	Ferramenta	Opnet	Ferramenta
1	2	0,034855	0,001323	50,42	32,73
1	3	0,034610	0,002012	50,92	33,06
2	1	0,034287	0,003231	50,55	33,44
2	3	0,035266	0,001119	51,51	32,82
3	1	0,035192	0,002404	51,79	33,62
3	2	0,034505	0,001661	50,50	32,79

A diferença entre os valores calculados pela ferramenta e os apresentados pelo Opnet para carga dos enlaces, se deve à forma como o cálculo é realizado, desconsiderando os tempos em que não existe tráfego. Investigando a diferença entre os valores de atraso de enfileiramento apresentados, foram exportadas as séries de tráfego geradas pelo Opnet e calculada a variância pelo método *VTP (Variance Time Plot)*, obtendo os valores apresentados na Tabela 4.25. Os valores apresentados pelo Opnet diferem dos apresentados na Tabela 4.24 por terem sido utilizados valores diferentes de interesse de tráfego.

Tabela 4.25 – Cálculo de atraso com diferentes valores de variância.

Fluxos		Opnet	Cálculo da ferramenta com variância		
Origem	Destino		do Opnet	do cálculo por VTP	2x do Opnet
1	2	0,05061	0,002513	0,036543	0,08041
1	3	0,05005	0,001470	0,002004	0,04703
2	1	0,06430	0,003276	0,011806	0,10482
2	3	0,05618	0,006782	0,009394	0,21702
3	1	0,05084	0,001740	0,003236	0,05569
3	2	0,04905	0,001854	0,001153	0,05932

Nos estudos realizados não foi possível determinar a razão das diferenças entre os valores encontrados pelo Opnet e os cálculos realizados pela ferramenta, sendo que continuamos investigando este problema.

Na próxima subseção será apresentada a validação do algoritmo genético utilizado na ferramenta.

4.5.5. Validação do algoritmo genético.

Para validação do algoritmo genético implementado, foram utilizados os problemas apresentados em (Dengiz et al, 1997), realizando a busca para encontrar a topologia com o menor custo e que atendesse o requisito de confiabilidade mínima. A Tabela 4.26 apresenta

a lista de incidência utilizada para a resolução dos problemas 1 e 2. A lista de capacidades para o problema 1 é apresentada na Tabela 4.27 e para o problema 2, na Tabela 4.28.

Tabela 4.26 - Lista de incidência para resolução dos Problemas 1 e 2 de (Dengiz et al, 1997), através de algoritmo genético.

Ponta A	Ponta B	Distância	Tipo de Transmissão
1	2	125	1
1	3	150	1
1	4	125	1
1	5	150	1
1	6	150	1
1	7	130	1
2	3	75	1
2	4	100	1
2	5	150	1
2	6	200	1
2	7	250	1
3	4	75	1
3	5	90	1
3	6	250	1
3	7	200	1
4	5	75	1
4	6	100	1
4	7	150	1
5	6	75	1
5	7	100	1
6	7	75	1

Tabela 4.27 - Lista de Capacidades para resolução do problema 1 de (Dengiz et al, 1997) através de algoritmo genético

Capacidade	Buffer	Confiabilidade	Custo Fixo	Custo Variável
1000	100	0.8	0	1

Tabela 4.28 - Lista de Capacidades para resolução do problema 2 de (Dengiz et al, 1997) através de algoritmo genético

Capacidade	Buffer	Confiabilidade	Custo Fixo	Custo Variável
1000	100	0.9	0	1

Além das listas citadas, são os informados os seguintes parâmetros para a busca:

- Confiabilidade mínima: a menor confiabilidade que se deseja para a rede em estudo.

- Número de indivíduos por geração: o número de indivíduos da população que serão avaliados em cada geração.
- Critério de terminação: Critério que informa ao algoritmo que deve encerrar a busca. Nesta implementação foi definido como o número de gerações em que não há alteração de indivíduos.
- Probabilidade de mutação: Probabilidade que os indivíduos filhos sofram mutação após o cruzamento dos indivíduos pais. Esta probabilidade é utilizada também para definir a probabilidade de mutação de cada gene.

A Tabela 4.29 apresenta o resultado de 10 rodadas realizadas para o problema 1, com 10 indivíduos por geração, critério de terminação igual a 5 e probabilidade de mutação 5%. Podemos observar que em 80% dos casos foi encontrada a solução ótima, representada pelo código de cromossomo 877.

Tabela 4.29 - Resultados de 10 simulações do problema 1 de (Dengiz et al, 1997) com 10 indivíduos por geração.

Código do Cromossomo	Confiabilidade Total	Custo total	Geração do ótimo	Indivíduos avaliados	Gerações avaliadas
877	0,917504	255	14	312	26
877	0,917504	255	16	298	24
877	0,917504	255	3	337	27
877	0,917504	255	3	319	26
877	0,917504	255	3	471	37
877	0,917504	255	12	401	31
877	0,917504	255	14	478	38
877	0,917504	255	4	224	19
631	0,917504	266	14	349	29
743	0,917504	270	3	163	14

O número total de indivíduos passíveis de avaliação era de 1009 e na média das 10 simulações foram avaliados 335 indivíduos, representando 33% do total. Para exemplificar a importância da definição dos parâmetros do algoritmo genético, foi feita uma nova rodada de simulações com 20 indivíduos por geração, critério de terminação igual a 20 e 5% de mutação. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.30. Pode-se observar que em todas as simulações foram avaliados todos os indivíduos, o que invalida a principal característica do Algoritmo Genético, que é reduzir o número de indivíduos avaliados.

Tabela 4.30 - Resultados de 10 simulações do problema 1 de (Dengiz et al, 1997) com 20 indivíduos por geração.

Código do Cromossomo	Confiabilidade Total	Custo total	Geração do ótimo	Indivíduos avaliados	Gerações avaliadas
877	0,917504	255	5	1009	37
877	0,917504	255	11	1009	38
877	0,917504	255	12	1009	37
877	0,917504	255	8	1009	37
877	0,917504	255	6	1009	37
877	0,917504	255	8	1009	37
877	0,917504	255	17	1009	37
877	0,917504	255	8	1009	38
877	0,917504	255	3	1009	38
877	0,917504	255	22	1009	37

A Figura 4.12 apresenta o gráfico da evolução do algoritmo genético. A curva verde apresenta o valor da confiabilidade para o melhor indivíduo de cada geração e a curva azul apresenta o custo desta solução. Na quarta geração o custo subiu, pois até a terceira geração não havia sido encontrada uma solução que atendia ao requisito de confiabilidade (acima de 0,9).

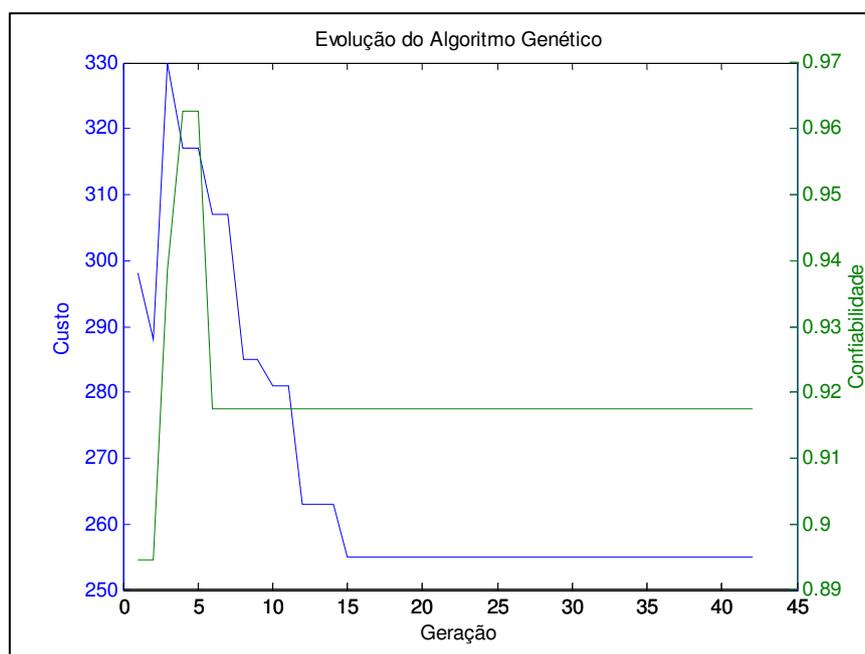


Figura 4.12 – Evolução do algoritmo genético.

A próxima seção apresentará os resultados obtidos em testes com a ferramenta.

4.6 RESULTADOS OBTIDOS

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que permita aperfeiçoar o processo de busca pela topologia ótima de uma rede multimídia. A topologia ótima é aquela que atende os requisitos definidos com o menor custo possível. Esta metodologia prevê a utilização de ferramentas para estimação da confiabilidade da rede, atraso médio e perda máxima de pacotes. Para reduzir o tempo de busca pela topologia que atenda aos requisitos com o menor custo foi criada uma ferramenta baseada em algoritmo genético.

Nos capítulos anteriores deste trabalho, foi introduzido o problema em estudo e foram apresentados os elementos teóricos utilizados. Nas primeiras seções deste capítulo, foi apresentada a validação dos cálculos realizados pela ferramenta através de comparação com artigos publicados.

Nesta seção, serão apresentados os resultados alcançados com esta ferramenta, através dos seguintes testes:

- O primeiro teste é realizado com uma rede composta de 4 nós e, devido a menor quantidade de topologias possíveis, é utilizada para demonstrar a dinâmica da ferramenta.
- O segundo teste é aplicado em uma rede formada por 6 nós, baseada na arquitetura de redes utilizada no núcleo de redes multimídias de empresas de telecomunicações.

A verificação dos resultados encontrados é feita com simulações realizadas com o simulador *Opnet*. A próxima subseção apresenta os resultados obtidos nos testes realizados com a rede de 4 nós.

4.6.1. Teste com rede de 4 nós.

Para demonstrar o funcionamento da ferramenta criada neste trabalho, será avaliada inicialmente uma rede formada por 4 nós, sendo que os nós 1 e 2 estão na mesma localidade e os nós 3 e 4, em outra. A distância entre os nós da mesma localidade é de 10 km e entre os nós de localidades diferentes, 300 km. Conforme a equação (4.2), existem 6 possibilidades de enlaces para interligar os nós desta rede, conforme apresentado na Figura 4.13.

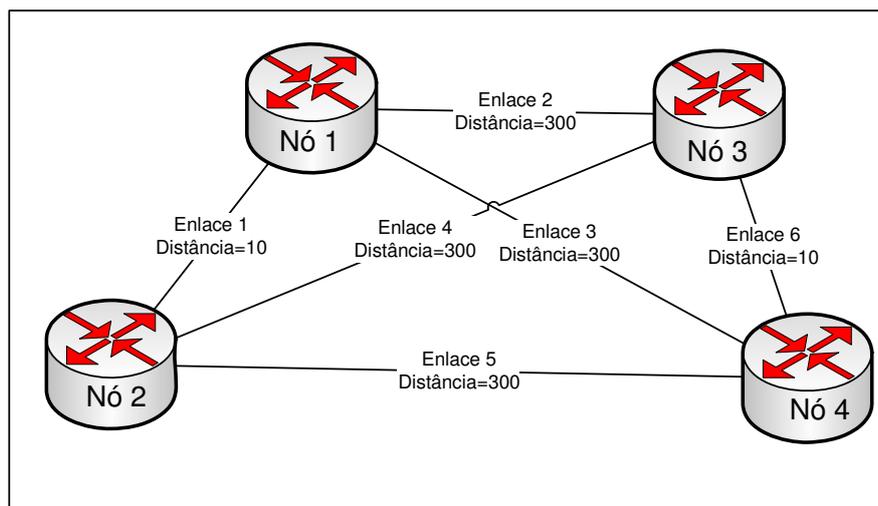


Figura 4.13 – Rede com 4 nós.

Supondo que o planejador defina que utilizará apenas um tipo de transmissão para interligação dos nós desta rede, teremos $2^6 - 1 = 63$ topologias possíveis. No caso deste teste foi utilizada a taxa de transmissão de 149,76 Mbps, equivalente à taxa útil máxima de um tributário STM-1 do SDH. Cada topologia é formada pela existência ou não de cada um dos enlaces possíveis. Devido ao pequeno número de opções, é possível analisar todas as alternativas e verificar o correto funcionamento da ferramenta.

Conforme as equações (4.3) e (4.4), são necessários no mínimo 3 enlaces para ter conectividade nesta rede e com 4 enlaces pode-se afirmar, com certeza, que a rede é totalmente conectada. Assim, tem-se 21 combinações com menos de 3 enlaces e outras 4 que utilizam 3 enlaces, mas não permitem a conectividade, restando 38 combinações a serem analisadas. A Tabela 4.31 apresenta o custo e confiabilidade para as topologias conectadas desta rede. A confiabilidade total foi calculada considerando-se a confiabilidade de cada enlace, 90%. Nesta tabela a coluna código apresenta o número decimal equivalente ao número binário cujos 6 algarismos são formados pela existência (1) ou não (0) de cada enlace.

Tabela 4.31 - Confiabilidade e custo para as topologias conectadas para a rede da Figura 4.13.

Cod.	1	2	3	4	5	6	Conf.	Custo
11	0	0	1	0	1	1	0,729	610
13	0	0	1	1	0	1	0,729	610
14	0	0	1	1	1	0	0,729	900
15	0	0	1	1	1	1	0,8748	910
19	0	1	0	0	1	1	0,729	610
21	0	1	0	1	0	1	0,729	610
22	0	1	0	1	1	0	0,729	900
23	0	1	0	1	1	1	0,8748	910
26	0	1	1	0	1	0	0,729	900
27	0	1	1	0	1	1	0,8748	910
28	0	1	1	1	0	0	0,729	900
29	0	1	1	1	0	1	0,8748	910
30	0	1	1	1	1	0	0,9477	1200
31	0	1	1	1	1	1	0,9769	1210
35	1	0	0	0	1	1	0,729	320
37	1	0	0	1	0	1	0,729	320
38	1	0	0	1	1	0	0,729	610
39	1	0	0	1	1	1	0,8748	620
41	1	0	1	0	0	1	0,729	320

Cod.	1	2	3	4	5	6	Conf.	Custo
43	1	0	1	0	1	1	0,8748	620
44	1	0	1	1	0	0	0,729	610
45	1	0	1	1	0	1	0,9477	620
46	1	0	1	1	1	0	0,8748	910
47	1	0	1	1	1	1	0,9769	920
49	1	1	0	0	0	1	0,729	320
50	1	1	0	0	1	0	0,729	610
51	1	1	0	0	1	1	0,9477	620
53	1	1	0	1	0	1	0,8748	620
54	1	1	0	1	1	0	0,8748	910
55	1	1	0	1	1	1	0,9769	920
56	1	1	1	0	0	0	0,729	610
57	1	1	1	0	0	1	0,8748	620
58	1	1	1	0	1	0	0,8748	910
59	1	1	1	0	1	1	0,9769	920
60	1	1	1	1	0	0	0,8748	910
61	1	1	1	1	0	1	0,9769	920
62	1	1	1	1	1	0	0,9769	1210
63	1	1	1	1	1	1	0,9958	1220

Definindo-se apenas um tipo de transmissão (149,76 Mbps) com confiabilidade 0,9, o objetivo de confiabilidade em 50%, pacotes com tamanho uniforme de 512 bytes e o interesse de tráfego entre cada par de nós em 25 Mbps, valor que permite o tráfego entre as duas localidades ser transportada por um único enlace, tem-se 4 configurações com o menor custo possível (320). Estas configurações são apresentadas na Tabela 4.32, onde cada linha apresenta a situação dos enlaces desta topologia

Tabela 4.32 - Configurações com menor custo para rede da Figura 4.13.

Topologia	Enlaces					
	6	5	4	3	2	1
A	1	0	0	0	1	1
B	1	0	0	1	0	1
C	1	0	1	0	0	1
D	1	1	0	0	0	1
Restrições aplicadas: confiabilidade mínima 50%, carga máxima 100%, atraso máximo 1 segundo, perda máxima 0%.						
Configuração do AG: 10 indivíduos por geração, terminação em 3 gerações sem alteração de indivíduos, probabilidade de mutação 5%.						

Nas configurações apresentadas na Tabela 4.32 estão sempre presentes os enlaces 1 e 6, que interligam os nós que estão na mesma localidade e apenas um enlace interligando as duas localidades, que pode ser o enlace 2 ou 3 ou 4 ou 5. A confiabilidade destas configurações é igual a 0,729 (0,9 x 0,9 x 0,9), pois uma falha em qualquer dos enlaces provoca a não conectividade da rede. A carga máxima nos enlaces calculada pela ferramenta é de 66,4% e o atraso máximo 81,4 μ s. Foram realizadas várias rodadas de busca com os seguintes requisitos:

- Confiabilidade mínima 50%
- Carga máxima por enlaces 100%
- Atraso máximo 1 segundo
- Perda máxima 0%
- 10 indivíduos por geração
- Probabilidade de mutação 5%
- Condição de terminação definida como 3 gerações sem alteração de indivíduos.

Em todas as rodadas de busca realizadas, a topologia ótima definida pela ferramenta foi uma das soluções apresentadas na Tabela 4.32.

A Tabela 4.33 apresenta os resultados obtidos na ferramenta e a simulação das mesmas condições no simulador de redes Opnet, para vários valores de interesse de tráfego entre os nós da rede.

Tabela 4.33 - Comparação entre os resultados obtidos com a ferramenta e com o Opnet

Interesse (Mbps)	Carga máxima (%)		Atraso máximo (μ s)	
	Ferramenta	Opnet	Ferramenta	Opnet
37,5	99,4	99,1	4234	1,1x10 ⁶
35	92,9	93,3	356	224
30	79,6	80,5	106	66,8
25	66,4	66,5	54,0	39,8
12,5	33,1	33,1	13,5	13,3
7,5	19,9	20	6,8	6,4
5	13,2	13,3	4,18	1,6

Os resultados obtidos mostram uma similaridade grande entre os valores de carga de enlace obtidos na ferramenta e no Opnet com diferença máxima de um ponto percentual

entre os dois cálculos. O cálculo de atraso realizado pela ferramenta apresenta valores próximos aos apresentados pelo Opnet e dentro da ordem de grandeza esperada, exceto para o caso onde a carga se aproxima de 100%, onde entramos em uma zona de não linearidade da simulação.

A Figura 4.17 apresenta a topologia utilizada nos testes comparativos entre a ferramenta e o Opnet. Aumentando o objetivo de confiabilidade mínima para 80% e mantendo o interesse de carga entre os nós da rede em 25 Mbps são obtidas as configurações apresentadas na Tabela 4.34. O custo destas soluções é de 620, sendo que duas delas (identificadas pelos códigos 45 e 51) apresentam confiabilidade maior e menor atraso. Em todas as rodadas realizadas foram encontradas as soluções ótimas.

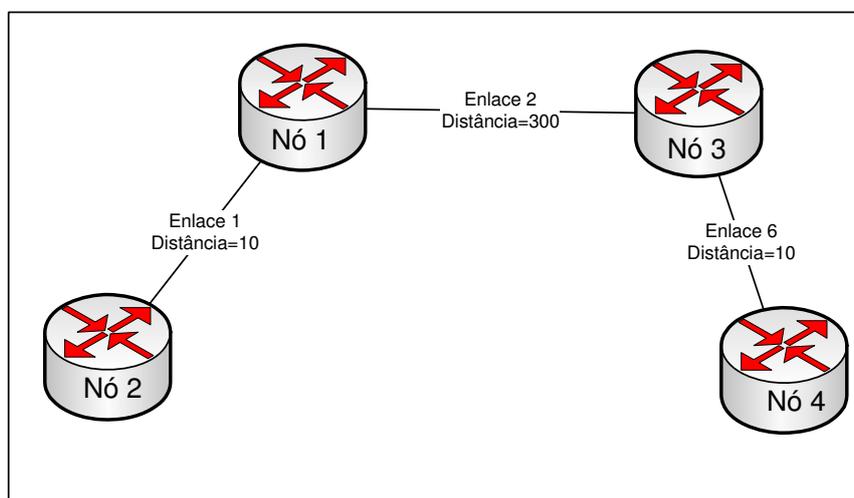


Figura 4.14 – Topologia da rede utilizada para comparação de resultados entre a ferramenta e o Opnet.

Tabela 4.34 - Configurações com menor custo para rede da .

Topologia	Enlaces						Confiabilidade
	6	5	4	3	2	1	
A	1	0	0	1	1	1	0,8748
B	1	0	1	0	1	1	0,8748
C	1	0	1	1	0	1	0,9477
D	1	1	0	0	1	1	0,9477
E	1	1	0	1	0	1	0,8748
F	1	1	1	0	0	1	0,8748
Restrições aplicadas: confiabilidade mínima 80%, carga máxima 100%, atraso máximo 1 segundo, perda máxima 0%.							
Configuração do AG: 10 indivíduos por geração, terminação com 3 gerações sem alteração de indivíduos, probabilidade de mutação 5%.							

As topologias C e D da Tabela 4.34, apresentam confiabilidade de 94,77%, carga máxima de enlaces, 33,4% e atraso máximo de 36,3 μ s. As demais têm confiabilidade de 87,48%, ocupação máxima 50,1% e atraso máximo 54 μ s. A Tabela 4.35 apresenta a comparação entre os resultados obtidos na ferramenta e em simulações realizadas no Opnet, utilizando a topologia D da Tabela 4.34 e apresentada na Figura 4.17, onde todos os enlaces têm taxa de transmissão equivalente a um *STM-1* do *SDH*.

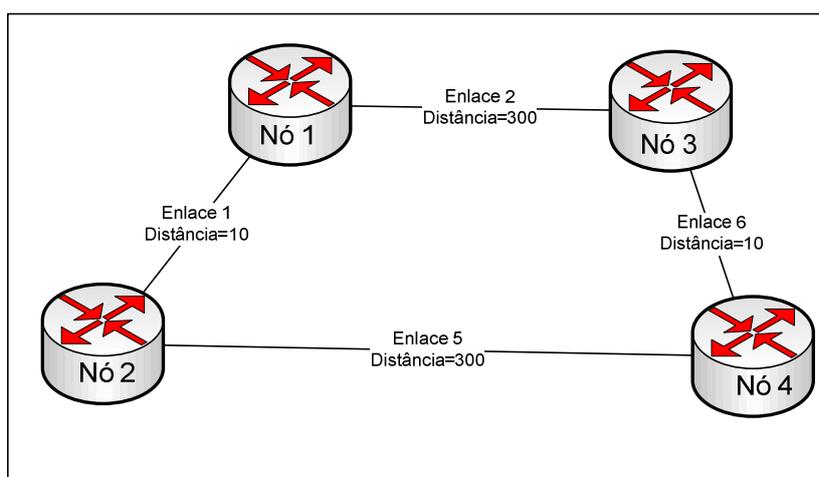


Figura 4.15 – Rede com 4 nós e 4 enlaces, representada a topologia D da Tabela 4.34.

Tabela 4.35 - Comparação entre os resultados obtidos com a ferramenta e com o Opnet

Interesse (Mbps)	Carga (%)		Atraso (μ s)	
	Ferramenta	Opnet	Ferramenta	Opnet
75	99,2	98,9	3216	840×10^3
70	92,6	93,3	368	210
50	66,3	66,8	81,1	45,2
25	33,1	33,4	40,8	12,8
12,5	16,6	16,7	32,8	8,1
5	6,6	6,7	29,3	4,9

Os valores obtidos com a ferramenta são compatíveis com o esperado, sendo que os valores de carga calculados apresentam variação menor que um ponto percentual e o atraso calculado esta dentro da ordem de grandeza dos valores simulados pelo Opnet, exceto para o caso em que a carga de enlace se aproxima ou ultrapassa 99%.

Definindo 3 tipos de transmissão com taxas equivalentes ao STM-1, STM-4 e STM-16 do SDH, conforme apresentado na Tabela 4.36, teremos $4^6 - 1 = 4095$ diferentes opções de topologia. Nesta tabela é apresentada para cada tipo de transmissão, a taxa útil máxima, a

capacidade de memória temporária, a confiabilidade individual do enlace e os custos fixos e variáveis.

Tabela 4.36 - Configuração de 3 tipos de transmissão equivalentes às taxas úteis do SDH

Tipo	Taxa útil (Mbps)	Memória (Mb)	Confiabilidade	Custo Fixo	Custo variável
1	149.760.000	512.000	0,9	0	1
2	599.040.000	1.024.000	0,9	0	2
3	2.396.160.000	1.024.000	0,9	0	4

Foi definido o interesse de tráfego entre os nós em 75 Mbps, tamanho fixo de pacotes com 512 Bytes (4096 bits) e as seguintes condições para busca:

- Confiabilidade mínima 90%
- Carga máxima por enlaces 60%
- Atraso máximo 1 segundo
- Perda máxima 0%
- 10 indivíduos por geração
- Probabilidade de mutação 5%
- Condição de terminação definida como 5 gerações sem alteração de indivíduos.

Após 10 rodadas, a ferramenta gerou as soluções apresentadas na Tabela 4.37.

Tabela 4.37 - Resultados de 10 rodadas realizadas com a ferramenta.

Rodada	Topologia	Confiabilidade	Custo	Indivíduos	Gerações
1	A	0,9477	940	273	27
2	A	0,9477	940	197	20
3	A	0,9477	940	311	30
4	B	0,9477	940	260	26
5	C	0,9477	940	375	37
6	A	0,9477	940	272	27
7	C	0,9477	940	240	24
8	D	0,9477	960	356	35
9	B	0,9477	940	312	31
10	A	0,9477	940	322	31
Restrições aplicadas: confiabilidade mínima 90%, carga máxima 60%, atraso máximo 1 segundo, perda máxima 0%.					
Configuração do AG: 10 indivíduos por geração, terminação com 5 gerações sem alteração de indivíduos, probabilidade de mutação 5%.					

Esta tabela mostra que foram encontradas 3 topologias diferentes com o mesmo custo (940) e uma com custo 2% maior (960). Em 9 das 10 rodadas foi encontrada uma solução que apresenta o menor custo (940) para as condições estabelecidas, enquanto em um caso foi encontrada uma solução com custo 960. Foram analisados em média 291,8 indivíduos em cada uma das rodadas, que tiveram em média 28,8 gerações. Este número de indivíduos representa 7,1% do total possível, chegando a 9,2% na rodada em que foram analisados mais indivíduos.

A Figura 4.16 apresenta a topologia A da Tabela 4.37. Esta rede é formada por 3 enlaces STM-4 e 1 enlace STM-1.

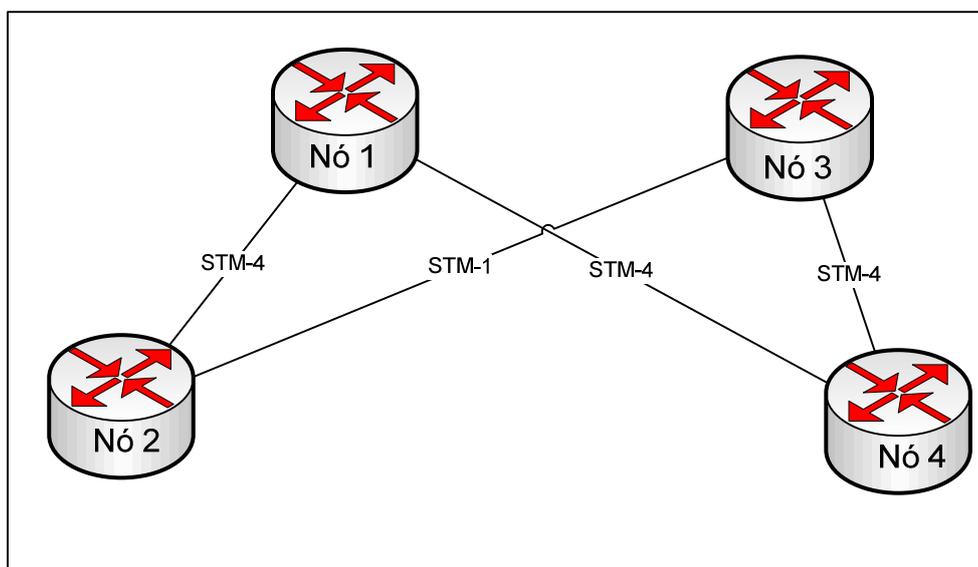


Figura 4.16 – Topologia de Rede A da Tabela 4.37.

A Tabela 4.38 apresenta a comparação entre os valores calculados pela ferramenta e os simulados no Opnet para a rede apresentada na figura 4.13 e pode-se verificar a adequação dos cálculos realizados pela ferramenta.

Tabela 4.38 - Comparação dos resultados na ferramenta e no Opnet para a topologia A da Tabela 4.37

Interesse (Mbps)	Carga (%)		Atraso (μ s)	
	Ferramenta	Opnet	Ferramenta	Opnet
125	82,6	83,4	32,2	18,7
100	66,2	66,9	13,4	9,2
75	49,5	50,2	6,7	5,4

Os testes realizados com esta rede demonstraram a capacidade da ferramenta de encontrar a topologia ótima ou soluções com custo próximo ao desta para as condições definidas. Outra conclusão dos testes realizados é a necessidade de realizar múltiplas rodadas de simulação, variando a quantidade de indivíduos por geração e o número de gerações para terminação do Algoritmo Genético.

Na próxima subseção, serão apresentados os resultados obtidos nos testes realizados em uma rede de 6 nós, baseada no núcleo da rede de uma grande operadora de telecomunicações.

4.6.2. Teste com rede de 6 nós.

As operadoras de telecomunicações constroem suas redes multimídia de forma hierárquica, conforme descrito na seção 2.3, sendo o núcleo da rede a camada que permite a conectividade total entre os elementos da rede, sendo a topologia desta camada um ponto crítico no planejamento da rede. A Figura 4.17 apresenta uma rede formada por 6 nós em 3 localidades distintas interligados através de duplo anel. Esta topologia é muito utilizada pelas operadoras de telecomunicações no núcleo da rede.

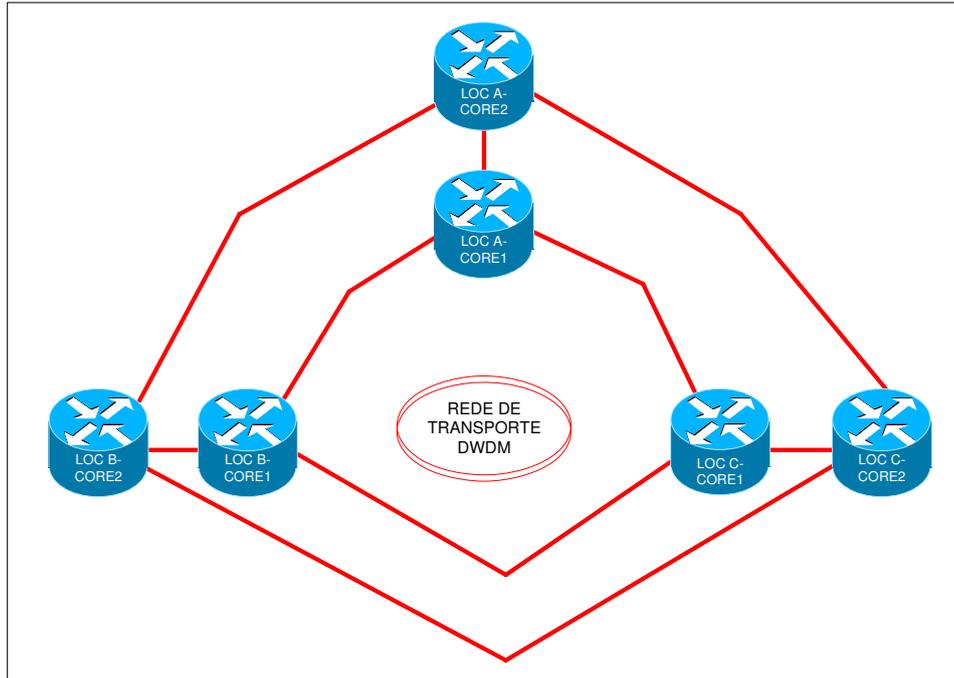


Figura 4.17 - Topologia de rede em duplo anel.

Para verificar a possibilidade de otimização do núcleo da rede, foi utilizada como topologia inicial uma configuração em duplo anel. A rede interliga 3 localidades, cada uma com 2 nós distantes 10 km um do outro e que são interligados por um enlace. A distância entre as localidades é de 300 km entre as localidades A-B e B-C e 600 km entre as localidades A-C. A Tabela 4.39 apresenta as distâncias em km entre os nós destas localidades.

Tabela 4.39 - Distância entre os nós do grafo da Figura 4.18.

Localidade	A	B	C
A	10	300	600
B	300	10	300
C	600	300	10

As opções de transmissão para interconexão dos nós são apresentadas na Tabela 4.40. As taxas utilizadas são equivalentes às dos tributários STM-1, STM-4 e STM-16 do SDH. Os custos fixos e variáveis apresentados são proporcionais a valores mensais de circuitos com estas taxas de transmissão e foram calculados conforme detalhado na subseção 4.3.1. Estes valores não devem ser utilizados como referência para cálculos de casos reais.

Tabela 4.40 - Tipos de transmissão para interligação da rede com 6 nós.

Tipo	Taxa útil (Mbps)	Memória (Mbit)	Confiabilidade	Custo Fixo (\$)	Custo variável (\$)
1	149.760.000	512.000	0,9	62	23
2	599.040.000	1.024.000	0,9	147	57
3	2.396.160.000	1.024.000	0,9	328	100

A Figura 4.18 apresenta a representação da rede utilizada neste teste.

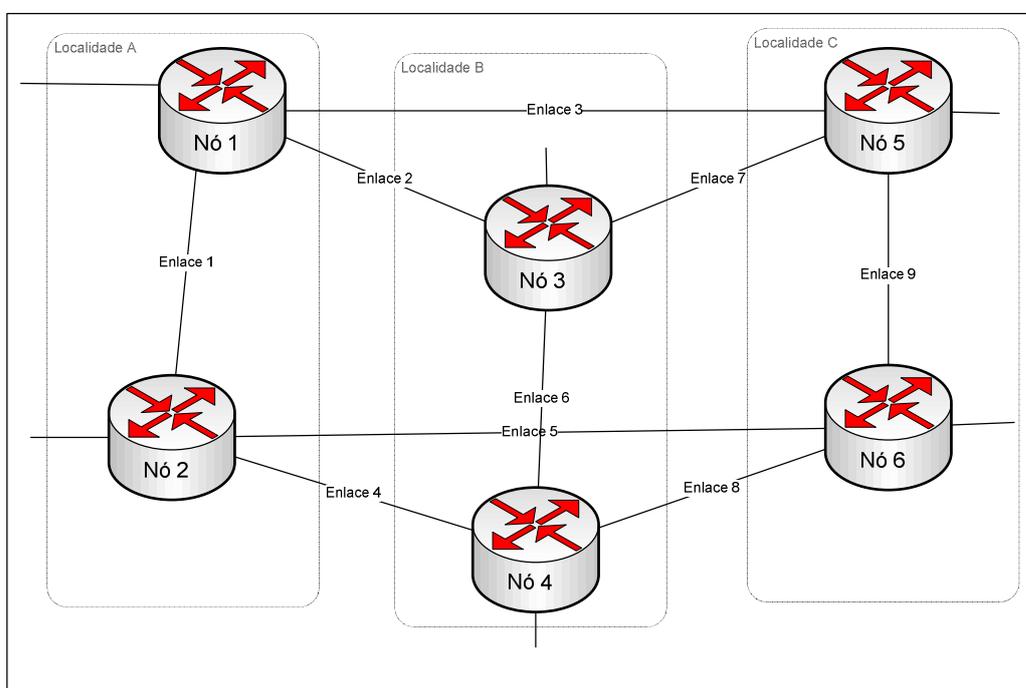


Figura 4.18 - Rede inicial com 6 nós para teste da ferramenta.

Baseado nos valores da Tabela 4.40, considerando apenas um tipo de transmissão possível, equivalente ao STM-1 e com interesse de tráfego entre cada par de nós da rede de 25 Mbps, esta topologia apresenta as seguintes características:

- Custo: \$56.103,00
- Confiabilidade calculada: 99,24%
- Carga máxima por enlace: 66,8%
- Perda de pacotes: 0%

- Atraso máximo por enlace: 11,6 μ s.

Inicialmente, o tráfego médio foi definido em 25 Mbps, entre nós de localidades diferentes, e 50 Mbps entre nós da mesma localidade. Foi mantida a possibilidade de apenas um tipo de transmissão com taxa útil equivalente à do STM-1, custo fixo \$62 e variável \$23 (valor multiplicado pela distância). Como existem 15 enlaces possíveis, teremos $2^{15} - 1 = 32.767$ combinações a serem analisadas. A Tabela 4.41 apresenta o resultado de 10 rodadas de busca.

Tabela 4.41 - Resultados de 10 rodadas para busca da topologia ótima para a rede da Figura 4.18.

Código	Confiabilidade	Custo	Geração configuração ótima	Indivíduos analisados	Gerações
22065	0,944784	35279	15	519	32
24691	0,944784	35279	28	619	38
24859	0,932974	35164	29	931	57
24945	0,944784	35279	31	663	41
21007	0,932974	35164	11	427	27
26915	0,944784	35279	6	845	50
20783	0,949508	35341	8	487	30
24859	0,932974	35164	20	470	29
22065	0,944784	35279	11	378	24
25893	0,944784	35279	23	627	38
Restrições aplicadas: confiabilidade mínima 80%, carga máxima 100%, atraso máximo 1 segundo, perda máxima 0%.					
Configuração do AG: 15 indivíduos por geração, terminação com 3 gerações sem alteração de indivíduos, probabilidade de mutação 5%.					

As buscas foram realizadas com as seguintes condições:

- Confiabilidade mínima 80%
- Carga máxima por enlaces 100%
- Atraso máximo 1 segundo
- Perda máxima 0%
- 15 indivíduos por geração
- Probabilidade de mutação 5%
- Condição de terminação definida como 3 gerações sem alteração de indivíduos.

Em 3 das 10 rodadas foram encontradas soluções com o menor custo possível (\$35.164) para estas condições. Nas demais rodadas, o custo encontrado foi 0,3% maior. A Tabela 4.42 apresenta os cromossomos para as configurações de menor custo apresentadas na Tabela 4.41, chamadas de topologia A e topologia B.

Tabela 4.42 - Cromossomos das configurações com menor custo apresentadas na Tabela 4.41

Ponta a	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	5
Ponta b	2	3	4	5	6	3	4	5	6	4	5	6	5	6	6
A	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
B	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1

A Figura 4.19 apresenta a rede para a topologia A da Tabela 4.42. Esta rede apresenta carga máxima de 83,5%, atraso máximo de 14,9 μ s e nenhuma perda.

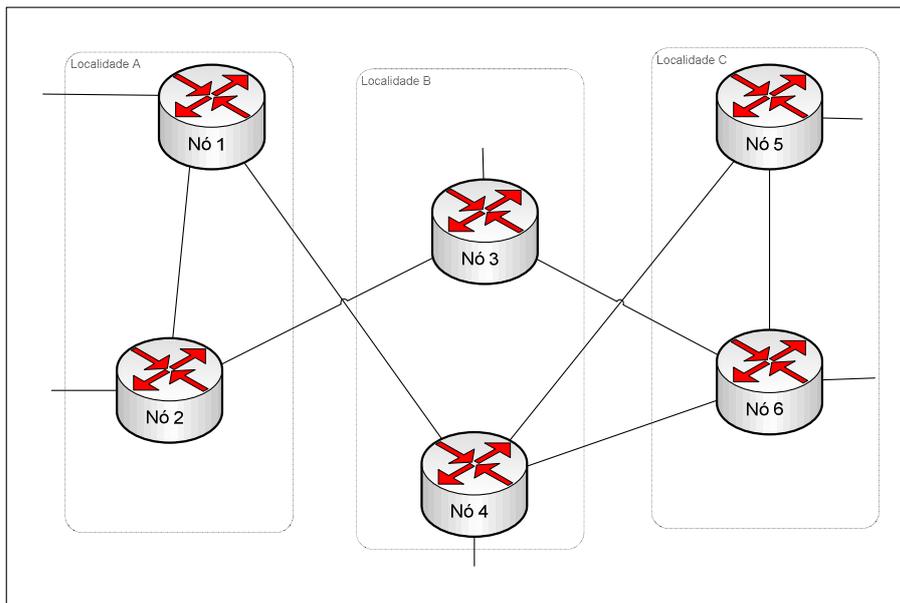


Figura 4.19 - Rede para a topologia A da Tabela 4.42.

A Figura 4.20 apresenta a rede para a topologia B da Tabela 4.42. Esta rede apresenta carga máxima de 83,5%, atraso máximo de 16,6 μ s e nenhuma perda.

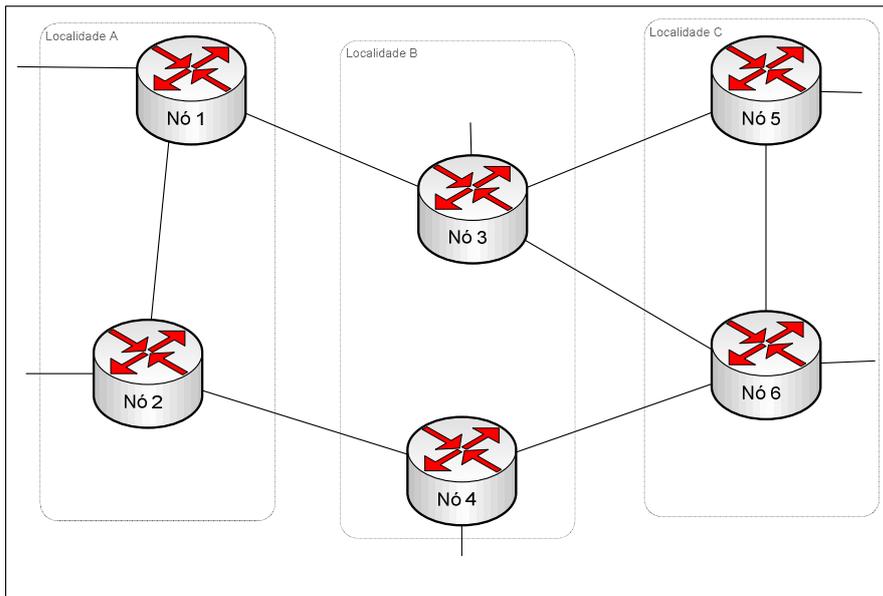


Figura 4.20 - Rede para a topologia B da Tabela 4.42.

A Tabela 4.43 apresenta a comparação entre os resultados de carga máxima de enlaces e atraso máximo, calculados pela ferramenta e simulados pelo Opnet. Os resultados apresentam similaridade e as diferenças nos cálculos estão dentro da ordem de grandeza esperada.

Tabela 4.43 – Comparação entre carga e atraso calculados pela ferramenta e simulados pelo Opnet.

Topologia	Custo	Confiabilidade	Ferramenta			Opnet		
			Carga máxima	Perda máxima	Atraso máximo	Carga máxima	Perda máxima	Atraso máximo
Original	56103	0,99238	49,6	0	27	50,2	0	25,5
B	35164	0,93297	74,5	0	36,0	75,4	0	25,9
A	35164	0,93297	74,4	0	36,8	75,1	0	26,2

4.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram descritas as estruturas utilizadas pela ferramenta para representação da rede em estudo. São utilizadas três estruturas em lista que permitem informar ao sistema os tipos de transmissão disponíveis para utilização, as características dos enlaces entre os nós e os requisitos do interesse de tráfego entre estes nós. A primeira lista informa a taxa de transmissão, tamanho da memória temporária, confiabilidade por enlace e custo, dividido em fixo e variável com a distância para cada tipo de transmissão. A segunda lista

apresenta os enlaces a serem utilizados pela ferramenta na busca pela topologia ótima, informando os nós a que se conecta, a distância entre eles e qual o tipo de transmissão em uso na configuração inicial. Também é feita a descrição das opções utilizadas no algoritmo genético utilizado na ferramenta e são apresentadas as validações dos cálculos realizados. São apresentados também os resultados obtidos, simulando um processo de busca por topologia para uma rede de 4 nós e outra de 6 nós. A rede de 4 nós, devido ao menor número de soluções possíveis, possibilitou a demonstração do funcionamento do algoritmo genético e a comparação com cálculos realizados em planilha. Já a rede de 6 nós simula a configuração utilizada no núcleo da rede de uma grande operadora de telecomunicações e mostrou que a ferramenta é capaz de lidar com este problema em tempos aceitáveis sem necessidade de utilização de equipamentos com grande poder computacional.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, baseado em dados de configuração e monitoração de desempenho disponíveis em uma operadora de telecomunicações, foi formulada uma metodologia para desenvolvimento de um ambiente que permite otimizar a busca pela topologia ótima para a rede. A topologia ótima é aquela que com o menor custo atende aos requisitos de desempenho propostos. Foram analisados os dados de configuração da rede e de monitoramento de tráfego realizados rotineiramente na rede, definindo meios de acessar e utilizar estes dados.

Também foram estudadas as estruturas de dados que podem ser utilizadas para representação da rede e foi definido o uso de estruturas de listas para representar as características dos nós, as demandas de tráfego e os tipos de transmissão a serem considerados na otimização da topologia.

Foi implementada uma ferramenta baseada na metodologia definida e os resultados obtidos mostram que o objetivo de propiciar ao planejador a possibilidade de realizar análises da rede e encontrar a topologia ótima foi atingido.

O algoritmo genético utilizado para otimizar o processo de busca se mostrou eficiente, sendo necessários 3 parâmetros para sua execução, que são o número de indivíduos por geração, a condição de terminação do algoritmo, que foi definida como o número de gerações sem alteração dos indivíduos e a probabilidade de mutação de genes. Os experimentos realizados mostraram que para cada tipo de rede é necessário definir um conjunto adequado de parâmetros para o algoritmo genético, sendo que neste trabalho isto foi feito de forma empírica, através de testes com alguns valores e observação dos resultados obtidos.

A redução do tempo de busca em relação ao processo por busca exaustiva, permitiu a realização de vários experimentos para cada rede em estudo, possibilitando ao planejador um maior conhecimento sobre a mesma e os efeitos das alterações de suas características e dos requisitos de desempenho.

Ao permitir análises rápidas de diferentes condições de tráfego e requisitos de desempenho, a metodologia proposta permite ao planejador adquirir um conhecimento da rede que permite a tomada de decisões com melhores critérios. Assim, além de indicar a

solução ótima para o problema estudado, é possível verificar os resultados que se teria com outras configurações.

Neste trabalho, a ferramenta implementada recebe as informações sobre os nós da rede e de interesse de tráfego, através de listas geradas manualmente, necessitando da intervenção do planejador e não possibilitando a sua utilização de forma automatizada. No ambiente proposto, a automatização desta função fica a cargo dos módulos de levantamento de configuração e de definição de demandas, que não foram implementados.

Conclui-se que a utilização da metodologia proposta pode levar a uma melhor alocação de recursos na rede, por permitir ao planejador visualizar várias condições de funcionamento da rede e os resultados de diferentes configurações que podem ser aplicadas.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, o foco concentrou-se em definir a metodologia para busca da melhor topologia para redes multimídia, bem como na definição dos algoritmos a serem inicialmente utilizados nesta metodologia. Vários elementos propostos na metodologia não foram abordados na sua totalidade, possibilitando novas investigações que possam trazer contribuição para o desenvolvimento desta linha de pesquisa.

Não foram implementadas as etapas de automatização do levantamento de configuração da rede atual e de definição das demandas a partir de informações de carga nos enlaces. Estas etapas podem ser objeto de trabalhos futuros.

O algoritmo que representa o maior custo computacional para o ambiente proposto é o de cálculo da confiabilidade das topologias em estudo. Neste trabalho, optou-se por realizar o cálculo exato, o que leva a um grande tempo para verificação de todos os subgrafos conectados. Existem metodologias que propõem estimar este valor com variados graus de erro e a avaliação destas pode levar a uma redução no tempo necessário para encontrar a solução procurada.

O algoritmo de roteamento utilizado neste trabalho ficou restrito ao protocolo *OSPF*, que pertence à classe dos *IGP (Internal Gateway Protocol)*. Novos trabalhos podem incorporar outros tipos de *IGP* e também roteamento do tipo *EGP*, tal como o *BGP*, o que estenderia a capacidade da ferramenta para otimização de enlaces entre diferentes *AS*. Outra abordagem pode ser a implementação de *MPLS* no sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHLOCK , Daniel. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization. Springer Science+Business Media, Inc. October 2005.
- AWDUCHE, Daniel O. ; MPLS and traffic engineering in IP networks. Communications Magazine, IEEE, Volume 37, Issue 12, p. 42-47. Dec, 1999.
- BALL, Michael O.; COLBOURN, Charles J.; PROVAN, J. Scott. Network Reliability. Technical Research Report. College Park, University of Mariland. June 1992.
- BARRETO, Priscila A. Solís M. Otimização de Roteamento Adaptativo em Redes Convergentes com Tráfego Auto Similar. 2007. Tese de Doutorado. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.
- BERTSEKAS, Dimitri; GALLAGER, Robert G. Data Networks, Second Edition. Prentice-Hall, Inc. 1992.
- BOORSTYN, Robert R.; FRANK, Howard. Large Scale Network Topological Optimization. IEEE Transactions on communications, Vol. COM-25, Nr. 1, January 1977.
- CAO, Jin; WIEL, Scott Vander; YU, Bin; ZHU, Zhengyuan. A scalable method for estimating Network Traffic Matrices from Link Counts. Technical Report, Bell Labs, 2000.
- CORMEN Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; RIVEST, Ronald L.; STEIN, Clifford. Introduction to Algorithms, Second Edition. MIT Press and McGraw-Hill. 2001.
- DENGIZ, Berna; ALTIPARMAK, Fulya; SMITH, Alice E. Efficient Optimization of All-Terminal Reliable Networks, Using an Evolutionary Approach. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 47, No. 1, March 1997.
- EVANS, John William; FILSFILS, Clarence. Deploying IP and MPLS QoS for Multiservice Networks: Theory & Practice. Morgan Kaufmann; 1st edition (March 9, 2007) .
- GIRISH, Muckai; ZHOU, Bei; HU, Jian-Qiang. Formulation of the traffic Engineering Problems in MPLS based IP Networks. In: Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2000).

- GOLDSCHMIDT, O. ISP Backbone Traffic Inference Methods to Support Traffic Engineering . In Internet Statistics and Metrics Analysis (ISMA) Workshop, San Diego, CA, December 2000. Disponível em <http://www.caida.org/workshops/isma/0012/talks/olivier/sld001.htm>.
- GOPINATH, P.; GUPTA, R. Opportunistic evaluation of communication link loads. In: Proceedings of the 10th International Conference on Distributed Computing Systems, 1990.
- HE, Qi; DOVROLIS, Constantinos; AMMAR, Mostafa. A Methodology for the Optimal Configuration of TCP Traffic in Network Simulations under Link Load Constraints. SIMULATION, Vol. 82, No. 5, 279-293 (2006).
- HEDMAN, SHAWN. A First Course in Logic. Oxford University Press. 2004.
- JAMAKOVIC, A.; UHLIG, S. On the relationship between the algebraic connectivity and graph's robustness to node and link failures. 3rd EuroNGI Conference on Next Generation Internet Networks. May 2007.
- JIONG-SHENG, Li; XIAO-DONG, Zhang. A New Upper Bound for Eigenvalues of the Laplacian Matrix of a graph. Linear Algebra and its applications 265:93-100 (1997).
- LIANG, Gang; YU, Bin. Maximum Pseudo Likelihood Estimation in Network Tomography. IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 51, Number 8, August 2003.
- MEDINA, A.; TAFT, N.; SALAMATIAN, K.; BHATTACHARYYA, S.; DIOT, C. Traffic Matrix Estimation: Existing Techniques and New Directions. SIGCOMM'02, August 19-23, 2002, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- MOORE, E. H. On the reciprocal of the general algebraic matrix, Abstract, Bull. Amer. Math. Soc., 26 (1919-20), pp. 394-395.
- NAIN, Philippe. BASIC ELEMENTS OF QUEUEING THEORY, Application to the Modelling of Computer Systems. Lecture Notes. INRIA, 1998.
- NORROS I. "On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks". (1994), Journal on Selected Areas in Communications, Vol.13, pp. 953–962.
- OPNET, [On-line] <http://www.opnet.com>, (2008).

- ORENSTEIN, P.; KIM, H.; LAU, C.L. Bandwidth Allocation for self-similar traffic consisting of multiple traffic classes with distinct characteristics. Globecom 2001, Vol. 4. 2001.
- PENROSE, R., generalized inverse for matrices, Proc. Cambridge Philos. Soc., 51 (1955), pp. 406-413.
- RFC 1213. Management Information Base for Network Management of TCP/IP-based internets: MIB-II. [On-Line] <http://www.ietf.org/rfc/rfc1213.txt>.
- STEWART, G. W. On the Continuity of the Generalized Inverse. SIAM Journal on Applied Mathematics, Vol. 17, Nr. 1, January 1969, pp. 33-45.
- TEBALDI, Claudia. WEST, Mike. Bayesian inference on network traffic using link count data. Journal of the American Statistical Association v93.n442 (June 1998): pp557 (17).
- VARDI, Y. Network Tomography: Estimating Source-Destination Traffic Intensities from Link Data. Journal of the American Statistical Association, Vol. 91, 1996.
- ZHANG, Yin; ROUGHAN, Matthew; LUND, Carsten; DONOHO, David. An Information-Theoretic Approach to Traffic Matrix Estimation. SIGCOMM'03. August 2003.
- ZHANG, Yin; ROUGHAN, Matthew; DUFFIELD, Nick; GREENBERG, Albert. Fast Accurate Computation of Large-Scale IP Traffic Matrices from Link Loads. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, Volume 31, Issue 1, June 2003.
- ZOMORODIAN, Afra J. Topology for Computing. Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics. January, 2005.