

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO – FEEC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS – DENSIS

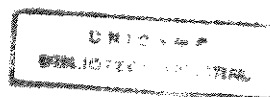
**UMA METODOLOGIA DE PROPOSIÇÃO DE ANÉIS BIDIRECIONAIS
PARA O PLANEJAMENTO DA REDE DE TRANSPORTE EM
TELECOMUNICAÇÕES**

Alda Márcia Penido de Oliveira
orientador: **Raul Vinhas Ribeiro**

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Alda Márcia Penido
de Oliveira e aprovada pela Comissão
Julgada em 14 / 12 / 98
Raul Vinhas Ribeiro
Orientador

Tese submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e
de Computação da Universidade Estadual de Campinas
– UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

– Dezembro de 1998 –



9904561

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	UNICAMP
V.	OL4m
Ex.	
TOMBO BC	36600
PROC.	229/99
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	20/02/99
N.º CPD	

CM-00120833-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

OL4m

Oliveira, Alda Márcia Penido de
Uma metodologia de proposição de anéis
bidirecionais para o planejamento da rede de transporte
em telecomunicações. / Alda Márcia Penido de
Oliveira.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Raul Vinhas Ribeiro
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Telecomunicações. 2. Sistema de telecomunicação
I. Ribeiro, Raul Vinhas. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Raul pela orientação e amizade.

Ao Prof. Hermano, pelo auxílio nos primeiros passos desta jornada.

À minha família, tia Márcia e tio Talhari, pelo apoio e carinho, minha irmã Deise e, principalmente, à minha mãe Magda pelo amor sem medida.

Aos colegas, Bergamaschi, Eduardo, Joana, Nakamura, Raquel, Paulo Billy, Aurenice, Adriano e Adriana, que de alguma forma participaram da realização deste trabalho.

Ao pessoal do DENSIS.

E especialmente a Deus, por ter me sustentado e me fortalecido nesta etapa tão importante da minha vida. Obrigada Senhor, a Ti dedico este trabalho.

“Filho meu, saboreia o mel, porque é saudável, e o favo, porque é doce ao teu paladar. Então
sabe que assim é a sabedoria para a tua alma; se a achares, haverá bom futuro,
e não será frustrada a tua esperança”

Provérbio 24: 13, 14

RESUMO

A necessidade de maior confiabilidade nas redes de telecomunicações e a facilidade com que a tecnologia SDH permite a implementação de topologias sobrevivenciáveis, faz com que a etapa de elaboração de propostas de topologias em anel seja uma questão fundamental no planejamento dessas redes. Também, em redes de transporte de médio e grande porte, verifica-se que a quantidade de anéis que podem ser propostos é muito grande, tornando muitas vezes impraticável a enumeração manual desses anéis.

Neste sentido, propõe-se aqui uma metodologia para o planejamento de anéis bidirecionais que utiliza da técnica de exploração de grafo denominada “Depth First Search” (DFS) para a determinação dos anéis de uma rede. Esta técnica (DFS) descreve a construção de uma árvore de busca na qual a trajetória do nó raiz até um nó folha representa um caminho que contém um ciclo no grafo. Como o número de anéis pode ser imenso, o algoritmo utiliza alguns critérios de avaliação de anéis de forma a eliminar aqueles considerados de má qualidade. O grafo utilizado para a geração de anéis é definido a partir de uma solução de rede constituída por enlaces ponto-a-ponto obtidos de forma otimizada.

Tal metodologia simplifica o processo de planejamento – o planejador é auxiliado por uma ferramenta que propõe de forma automatizada os anéis - além de prover um alto grau de interação com o planejador, sendo este tipo de flexibilidade fundamental em sistemas computacionais de apoio à tomada de decisão.

Apresentamos aplicações da metodologia em duas redes reais: a da área metropolitana de Belo Horizonte (BH), considerada de pequeno porte, e a rede da área metropolitana de São Paulo (AMSP), que é de grande porte.

ABSTRACT

The need of reliability on telecommunication networks and the facility that SDH technology (Synchronous Digital Hierarchy) allows the employment of survivable topologies make the design of ring architectures an important issue during network planning. Also, in the medium and large transport network, the amount of rings that can be proposed is very big, becoming impracticable the manual enumeration of all rings.

In this thesis, a methodology for bidirectional ring planning is proposed. A graph exploitation technique called “Depth First Search” (DFS) is used to obtain the rings of a network. The DFS describes the construction of a search tree in which the path from the root node up to a leaf node represents a path that has a cycle in the graph. As the number of rings may be huge, the algorithm uses some cycle metric evaluations, so that bad quality rings are eliminated. The graph used for generation of rings is based on an optimized point-to-point network solution.

Such methodology simplifies the planning process – the planner is helped by a ring design tool - besides, it can provide a good interaction with the planner. This flexibility is fundamental in computational systems of supporting the decision taking.

We presented applications of the methodology in two real networks: one is the Belo Horizonte metropolitan area, considered small; and other the São Paulo metropolitan area, which is a large network.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Sumário.....	vi
Capítulo 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo.....	1
1.2 Composição da Tese.....	3
Capítulo 2. A TECNOLOGIA SDH.....	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Limitações da Hierarquia Digital Plesiócrons.....	5
2.3 A necessidade da Transmissão Síncrona.....	7
2.4 Benefícios de uma Rede Síncrona e seu impacto no planejamento da rede.....	9
Capítulo 3. EQUIPAMENTOS E ARQUITETURAS SDH.....	13
3.1 Tipos de Equipamentos SDH: OLTM, ADM e SDXC.....	13
3.2 Topologias Elementares de Redes SDH.....	16
3.3 Confiabilidade e Sobrevivência das Redes SDH	21
3.4 Estratégias de Proteção para Redes SDH.....	22
3.5 Arquiteturas de Redes Sobrevivenciáveis.....	24
Capítulo 4. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DA REDE DE TRANSMISSÃO E O MODELO MATEMÁTICO DO ENFEIXAMENTO.....	31
4.1 Planejamento de Rede de Telecomunicações.....	31
4.1.1 Planejamento de Rede Externa.....	31
4.1.2 Planejamento de Comutação.....	31
4.1.3 Planejamento de Transmissão.....	32
4.1.3.1 Agrupamento ou Clusterização.....	33
4.1.3.2 Enfeixamento.....	34
4.1.3.3 Seleção de Galerias/Arranjo e Dimensionamento de Fibras.....	37
4.1.3.4 Evolução.....	38
4.2 O Modelo Matemático do Enfeixamento.....	38

4.2.1 Dados de Entrada.....40

4.2.2 Forma Geral do Modelo.....40

4.2.3 As Equações do Modelo..... 41

4.3 Comentários Adicionais.....43

4.4 Automatização da Montagem do Modelo.....43

Capítulo 5. METODOLOGIA DE PROPOSIÇÃO DE ANÉIS.....45

5.1 A necessidade de um Propositor Automático de Anéis.....45

5.2 A problemática envolvida na determinação de ciclos em um grafo.....46

5.3 A Metodologia Proposta.....50

5.3.1 Geração de uma solução ponto-a-ponto.....51

5.3.2 O Busca_Ciclos.....51

5.3.3 Proposta de candidatos do tipo cadeia.....54

5.3.4 Montagem da proposta de candidatos do tipo anel e cadeia.....54

5.3.5 Obtenção de uma solução com a nova proposta de candidatos.....54

5.4 O algoritmo do Busca_Ciclos.....55

5.4.1 Definições.....55

5.4.2 Estratégia de busca baseada em árvore.....57

5.5 Metodologia proposta para a determinação de cadeias.....61

Capítulo 6. APLICAÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA EM REDES REAIS.....64

6.1 Estudo da Rede de Belo Horizonte.....66

6.1.1 Apresentação da Rede.....66

6.1.2 Testes realizados.....67

6.1.3 Análise comparativa dos resultados obtidos para a rede de Belo Horizonte.....76

6.2 Estudo da Rede da Área Metropolitana de São Paulo.....77

6.2.1 Apresentação da Rede.....77

6.2.2 Testes realizados.....80

6.2.3 Análise comparativa dos resultados obtidos para a AMSP.....96

Capítulo 7. CONCLUSÕES.....97

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....100

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

Atualmente vivemos a era da informação. E levar informações de um lugar a outro, com segurança, qualidade, rapidez, sem limitar a natureza da informação (dados, voz, vídeo, textos), é um negócio muito rentável, mas que não admite atraso tecnológico. O desenvolvimento de tecnologias avançadas tem permitido ao homem desfrutar de sofisticados tipos de serviço. A informação é a grande mercadoria do capitalismo moderno. É por isso que todas as operadoras brasileiras de telecomunicações vêm investindo nos modernos sistemas de transmissão. O setor de telecomunicações tem apresentado, mundialmente, altos índices de crescimento. Esta tendência de crescimento deve se manter no futuro, tornando muito importante o planejamento bem fundamentado da expansão e do dimensionamento dessas redes.

Vários fatores possibilitaram a introdução de novos serviços de telecomunicações: o processo de digitalização das redes telefônicas, o advento das fibras ópticas como meio transmissor e a introdução da tecnologia de transmissão **SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy* - Hierarquia Digital Síncrona). A quantidade cada vez maior de canais transportados por uma única fibra óptica, da ordem de 120 mil canais telefônicos a 10 Gbit/s, bem como a natureza de alguns tipos de serviços (como por exemplo, serviços que envolvem transações bancárias), tornam o problema de confiabilidade da rede uma questão fundamental nos dias de hoje. A tecnologia SDH veio possibilitar várias formas novas e mais confiáveis de configurações de equipamentos, como por exemplo os anéis auto-regenerativos (*SHR - Self-Healing Ring*).

O Planejamento da Rede de Transporte ou de Transmissão é uma das fases importantes deste processo de planejamento. A **Rede de Transporte (RT)** é uma componente da rede mais geral de telecomunicações e é responsável por intercomunicar os **nós de serviços** ou **Centros de Fios (CFs)**, onde um CF é definido como um edifício onde se encontram

localizadas uma ou mais centrais de comutação de assinantes de serviços de voz, centrais de controle de telefonia celular, centrais de comutação de serviços de dados de alta velocidade, entre outros.

O Planejamento da Transmissão, devido a sua complexidade, pode também ser dividido em várias etapas, uma das quais é a etapa do **Enfeixamento**. Nesta etapa, definimos, utilizando critérios de otimização tais como minimização de custo, o conjunto de topologias de equipamentos a ser instalado na rede, suas taxas de transmissão e a distribuição ou roteamento das demandas através da rede obtida.

O problema de Enfeixamento foi modelado matematicamente [Bortolon 96] e obteve-se um Programa Linear Inteiro Misto, onde as variáveis inteiras (binárias) correspondem à decisão ou não de se instalar as topologias de equipamentos (ligações ponto-a-ponto, os anéis e as cadeias) e as variáveis reais correspondem à parcela de uma demanda escoada por um dos caminhos que interligam os nós geradores desta demanda.

Para a montagem deste modelo matemático, foi implementado um pacote computacional denominado “Enfeixamento”, resultado de um trabalho em parceria com a Telesp - Telecomunicações de São Paulo SA e desenvolvido por [Bortolon 96], [Bergamaschi 96] e [Quaglia 97]. Para a resolução deste modelo, ou seja, a obtenção de soluções, optou-se pela utilização do pacote computacional comercial CPLEX [CPLEX 89], que trabalha com a técnica “Branch-and-Bound”, que é uma estratégia de busca em grafos. A obtenção de soluções de boa qualidade é uma tarefa bastante complexa e que depende de diversos fatores. Um deles é o conjunto das topologias de equipamentos candidatas que forma o espaço das soluções, dentre o qual o otimizador encontrará um subconjunto que atenda as restrições exigidas, utilizando o critério de otimização adotado. Portanto, a qualidade da solução encontrada dependerá fortemente da qualidade do conjunto de topologias candidatas propostas inicialmente.

A proposta de candidatos é realizada, nos trabalhos mencionados acima, de maneira semi-automática. Os candidatos do tipo ponto-a-ponto são gerados automaticamente pelo programa, mas para a proposição dos candidatos do tipo anel e cadeia contava-se apenas com a experiência do planejador. Entretanto, à medida que aumenta o tamanho da rede (número de nós e arcos), o número de anéis distintos formados aumenta de forma combinatorial [Grover et alii 95] dificultando o planejador na escolha de anéis para a proposta de candidatos, comprometendo desta forma a qualidade da solução. Analisando algumas soluções obtidas

com proposta de candidatos em anel e cadeia realizada pelo planejador, observamos que a maioria destas soluções teriam seus custos reduzidos se houvesse uma proposta de candidatos mais rica, ou seja, constatamos que a pobreza de candidatos do tipo anel e cadeia estava sendo um entrave para a determinação de melhores soluções.

Este fato motivou-nos a desenvolver uma **Metodologia de Proposição de Candidatos do tipo Anel e Cadeia** para o planejamento da transmissão, que é o escopo desta tese. Desta forma é possível enriquecer a proposta de candidatos, possibilitando a obtenção de soluções mais confiáveis e com custos reduzidos.

1.2 Composição da tese

Esta tese compreende 7 capítulos.

No Capítulo 2 descrevemos as características da tecnologia de transmissão SDH utilizada em telecomunicações, os benefícios desta tecnologia e seu impacto no planejamento da rede.

O Capítulo 3 apresenta os tipos de equipamentos SDH: OLTM, ADM e SDXC, as configurações implementadas com esses equipamentos, tais como enlaces ponto-a-ponto, anéis, cadeias e hub e as topologias de rede, tais como: topologias em anel SHR, topologias em anel biconectado, topologia em malha e topologias híbridas.

No Capítulo 4 descrevemos a metodologia de planejamento da rede de transmissão e suas várias etapas e apresentamos o modelo matemático para a etapa do Enfeixamento.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia proposta para a obtenção de topologias em anel e também apresenta uma metodologia para a obtenção de topologias do tipo cadeia.

No Capítulo 6, tal metodologia é aplicada em duas redes reais: a rede da área metropolitana da cidade de Belo Horizonte (BH), considerada uma rede de pequeno porte, e a rede metropolitana da cidade de São Paulo (AMSP), que é uma rede de grande porte.

Finalmente, o Capítulo 7 é dedicado às conclusões finais sobre a metodologia proposta e à apresentação de outros trabalhos relacionados a este tema.

CAPÍTULO 2. A TECNOLOGIA SDH

2.1 Introdução

A definição dos padrões da Hierarquia Digital Síncrona (*Synchronous Digital Hierarchy* - SDH) foi um passo importante no desenvolvimento das redes de telecomunicações mundiais. A SDH permitiu uma revolução nos serviços de telecomunicações cujos efeitos vem alcançando usuários finais, operadores de rede e fabricantes de equipamentos.

A demanda por serviços sofisticados de telecomunicações tem crescido muito exigindo mais eficiência nas comunicações. Aplicações tais como videoconferência, acesso remoto à base de dados e transferência de arquivo de informação multimídia requerem redes flexíveis com disponibilidade para atender a demandas de grande largura de banda. A complexidade da rede tradicional, baseada em sistemas de transmissão plesiócrons, tornam os operadores de redes incapazes de atender a esta demanda.

A tradicional Hierarquia Digital Plesiócrona (PDH), desenvolvida em resposta ao aumento da demanda por serviços de telefonia, não garante a entrega eficiente e o gerenciamento de conexões de grande largura de banda. No entanto, usando basicamente a mesma fibra, uma rede síncrona é capaz de aumentar significativamente a largura de banda disponível além de reduzir a quantidade de equipamentos da rede. Além disso, a possibilidade de se trabalhar com um método de gerenciamento de rede sofisticado, dentro dos padrões SDH, pode introduzir mais flexibilidade e permitir uma enorme melhoria no controle das redes de transmissão. A capacidade de restauração e reconfiguração da rede resulta em melhor e mais rápida provisão de serviços.

A introdução de sistemas síncronos de transmissão é simples devido à facilidade para integrarem-se ao sistemas plesiócrons já existentes. Os padrões SDH definem uma estrutura que permite que sinais plesiócrons sejam combinados e encapsulados dentro de um sinal SDH. Desta forma, uma empresa não tem seu investimento em equipamentos PDH perdido, e pode empregar equipamentos SDH de acordo com as necessidades particulares de sua rede.

Vários benefícios advindos desta transição poderão ser sentidos. Economias

significativas de custo associadas à redução da quantidade de hardware na rede, e o aumento de eficiência e de confiabilidade da rede conduzirão a economias em operação e manutenção.

A fim de afastar-se das interfaces proprietárias e alcançar interconectividade entre fabricantes diferentes, o subcommittee T1X1 do ANSI (American National Standards Institute) começou trabalhar em 1985 no desenvolvimento de uma Rede Óptica Síncrona (*Synchronous Optical NETWORK* - SONET) baseada numa proposta da Bellcore. Em 1986 o CCITT¹ interessou-se no trabalho que estava sendo realizado pela ANSI e após muito debate em como incorporar as hierarquias de transmissão Européia e Americana em um único esquema, os padrões SDH foram combinados e publicados na forma de recomendações em 1989. Desde então, um esforço de padronização tem continuado a desenvolver e a refinar estas recomendações.

2.2 Limitações da Hierarquia Digital Plesiócrons

Os avanços na transmissão em fibra óptica e as reduções no custo dos circuitos integrados permitiram que sistemas de transmissão plesiócrons constituíssem um meio eficiente para transportar uma grande quantidade de circuitos telefônicos. No entanto, a disponibilidade de largura de banda de transmissão barata tem fomentado a proliferação de novos serviços, como por exemplo os de dados e vídeo. O alto grau de competitividade, configurado no atual cenário da globalização, tem levado usuários de negócios a reivindicarem melhorias na qualidade de transmissão, maior disponibilidade de largura de banda e padrões de conexões mais flexíveis. Entretanto a tecnologia PDH apresenta dificuldades para atender a estas reivindicações já que foi concebida inicialmente para serviços de voz.

O problema de flexibilidade na rede plesiócrons pode ser ilustrado através do seguinte exemplo: uma concessionária precisa fornecer a um grande cliente uma linha alugada de 2 Mbps. Se uma estrutura de alta velocidade passa próximo a este cliente, a operação de retirada de uma linha de 2 Mbps de dentro da estrutura de alta velocidade parece simples e direta. Na prática, contudo, isto não é tão simples. O uso de bits de justificação em cada nível da PDH significa que é impossível identificar a posição exata dos 32 canais que formam o tributário de

¹ CCITT significa International Telegraphy and Telephony Consultative Committee. Agora ele é conhecido como International Telecommunications Unions - Telecommunications Standardization Sector (ITU-

2 Mbps dentro de um agregado de 140 Mbps. Assim, para acessar uma linha de 2 Mbps, a estrutura de 140 Mbps deve ser completamente demultiplexada em seus 63 constituintes de 2 Mbps via 34 e 8 Mbps. Uma vez identificado e extraído o sinal de 2 Mbps requerido, os restantes devem então ser novamente multiplexados até 140 Mbps.

Obviamente este problema com a inserção e retirada de canais dificulta o rápido fornecimento de serviços, reflete um padrão de conexões não muito flexível, além de aumentar o custo da rede devido ao montante de multiplexadores requerido. Esta facilidade de inserção/derivação na tecnologia PDH exige uma cadeia de pares de multiplexadores de terminal de linha óptico (*Optical Line Terminal Multiplexer- OLTM*) dispostos costa-a-costa (*back-to-back*).

Um outro problema associado com a enorme quantidade de equipamentos multiplexadores na rede é o problema de controle. Uma linha de 2 Mbps entre dois pontos, pode percorrer a rede através de um grande número de rotas possíveis. O único modo de assegurar que ela percorrerá o caminho correto é manter com cuidado os registros de interconexão de equipamentos. Entretanto, como a atividade de reconexão na rede é grande, torna-se mais difícil manter os registros atualizados e, conseqüentemente, aumentando a possibilidade de erros. Tais erros provavelmente afetarão não somente a conexão que está sendo estabelecida, mas também interromperá conexões existentes já transportando tráfego.

Uma outra limitação da PDH é sua falta de capacidade de monitoramento de desempenho da rede. Os bits de serviços são muito limitados em sua capacidade, somente permitindo um pequeno transporte de alarmes, ou seja, possui baixa capacidade de bits de supervisão.

Por último, as únicas interfaces padronizadas são as interfaces elétricas (código de linha HDB3 e CMI), as interfaces ópticas ainda não estão padronizadas, não permitindo a utilização de equipamentos de fabricantes diferentes nas duas pontas de um enlace.

Como vimos, são duas as principais limitações da PDH: a inability de identificar canais individuais em um sinal de alta velocidade, e uma estrutura de quadro com insuficiente capacidade para carregar informações de gerenciamento da rede. Estas limitações não eram críticas na rede do passado, caracterizada por serviços de voz. Entretanto, a medida que serviços mais sofisticados tornam-se populares, mais deficiente é a tecnologia PDH para atender a demanda por estes serviços.

T). Qualquer referência ao CCITT neste trabalho se relaciona com a organização antes da mudança de nome.

2.3 A necessidade da Transmissão Síncrona

A tecnologia PDH não é suficientemente flexível ou eficiente para atender à demanda por novos serviços. Como resultado, sistemas de transmissão síncrona foram desenvolvidos para superar os problemas associados com a transmissão plesiócrona, em particular a inabilidade para extrair sinais de baixa capacidade de sinais de alta velocidade sem ter que demultiplexar o sistema inteiro.

A oportunidade de definição deste novo padrão está sendo usada para solucionar um número de outros problemas, como por exemplo, a necessidade de uma maior capacidade de gerenciamento de rede, a necessidade de se definir padrões de interfaces entre equipamentos de fabricantes diferentes, e a necessidade de facilitar a interoperabilidade entre as hierarquias de transmissão Européia e Norte Americana.

Estes trabalhos de padronização culminaram nas Recomendações do CCITT (agora ITU-T) G.707, G.708, e G.709, que tratam da Hierarquia Digital Síncrona, publicadas em 1989. Vários grupos de trabalho foram estabelecidos para elaborar mais recomendações abrangendo outros aspectos da tecnologia SDH, tais como os requerimentos para a padronização de interfaces ópticas e funções de Operação, Administração, Manutenção e Provisionamento (OAM&P). Várias destas recomendações adicionais e as três Recomendações originais G.707, G.708 e G.709 foram combinadas e atualizadas pelo ITU-T originando uma nova recomendação G.707 [ITU-T Rec. G.707, 96].

Na América do Norte, a ANSI adaptou o padrão SONET, desenvolvido por ela, às normas do CCITT, o padrão mundial para a SDH.

As recomendações do ITU-T definem as taxas de transmissão dentro da SDH. A primeira destas é 155.52 Mbps, normalmente referida como STM-1 (*Synchronous Transport Module* - Módulo de Transporte Síncrono). A partir deste sinal básico, estão definidas as taxas de transmissão de valor $N \times 155.52$ ($N=4, 16, 64$), denominadas STM-4, STM-16 e STM-64 (622.08 Mbps, 2488.32 Mbps e 9953.28 Mbps respectivamente).

Estas recomendações também definem uma estrutura de multiplexagem em que um sinal STM-1 pode transportar como carga (*payload*) vários sinais de taxa de transmissão mais baixa, utilizando o conceito de *containers* virtuais (VC—*Virtual Container*). Estes VCs transportam os sinais síncronos de 1.5 e 2 Mbps e permitem também o transporte dos sinais

PDH em suas várias hierarquias (8, 34 e 140 Mbps), deste modo possibilitando que estes sinais sejam transportados em uma rede síncrona (SDH).

A hierarquia Européia (adotada no Brasil) define três tipos de VCs: VC-12 que transporta sinais de 2 Mbps, VC-3 para o transporte de sinais de 34 Mbps e VC-4 para 140 Mbps. O VC-4 pode ainda conter 3 VC-3 ou 63 VC-12.

As características mais importantes da tecnologia SDH são:

- Tratamento a nível de byte, isto é, na multiplexação, o entrelaçamento é feito byte-a-byte e não bit-a-bit como na PDH.
- Duração do quadro uniforme (125µs).
- Utilização de ponteiros para identificar os quadros dos tributários e adaptação de velocidade (justificação).
- Canais de serviço e supervisão de grande capacidade, integrados no cabeçalho. Esta estrutura permite a implementação de serviços sofisticados de gerenciamento de rede (*Telecommunications Managed Network* - TMN).
- Padronização mundial que permite compatibilizar as três hierarquias existentes (Européia, Americana e Japonesa).
- Existe capacidade de transmissão suficiente em cada estágio de multiplexação para as futuras necessidades de operação e manutenção da rede.
- Acesso direto aos tributários de baixas taxas sem passar pelos estágios intermediários superiores.
- Facilidade para aumentar as taxas de transmissão com a evolução tecnológica: técnica de multiplexação mais simples e sem necessidade de bits de preenchimento (*stuffing*).
- Flexibilidade para prover serviços faixa larga.
- Compatibilidade transversal (ambiente multifornecedor).
- Permite a implantação de arquiteturas mais eficientes e flexíveis com o uso de ADMs e SDXCs, reduzindo os custos dos nós da rede através da utilização destes equipamentos.

2.4 Benefícios de uma Rede Síncrona e seu impacto no planejamento da rede

Os principais benefícios oferecidos pela tecnologia SDH e o que significam para os planejadores no desenvolvimento de suas redes são descritos a seguir.

Simplificação da Rede

Um dos principais benefícios é a simplificação da rede devido ao uso de equipamentos de transmissão síncrona. A estrutura de multiplexação leva em conta maior integração de produtos e um maior controle dos equipamentos, acarretando uma conseqüente redução de seu número. Um único multiplexador SDH pode realizar a função de um conjunto de multiplexadores plesiócrons. Por exemplo: dois OLTMs na configuração *back-to-back* podem ser substituídos por um equipamento multiplexador de inserção/derivação (*Add/Drop Multiplexer- ADM*).

A facilidade de inserção e retirada de canais associada à grande capacidade de gerenciamento dessas redes levaram a uma maior facilidade para prover linhas de grande largura de faixa para novos serviços multimídia, como também acessar de qualquer lugar esses serviços.

Deste modo, a simplificação da rede, e a nova flexibilidade que esta traz, abre o potencial para as empresas gerarem novas receitas.

Sobrevivenciabilidade

A tecnologia SDH permite o desenvolvimento de topologias de rede capazes de sobreviver a falhas através de reconfiguração de rotas e manutenção dos serviços por meios alternativos. A proteção da rede pode ser alcançada através do uso de funcionalidades de transconexão para realizar a restauração da rede ou através do uso de arquiteturas em anéis auto-regenerativos.

O emprego da fibra óptica em toda a rede e a adoção de equipamentos SDH possibilitam o monitoramento do sinal, desde sua origem até o destino final, e a manutenção da integridade da rede. A capacidade de gerenciamento das redes SDH torna possível a identificação

imediate de falhas de links ou até mesmo de falhas nos nós da rede.

Assim, falhas nos mecanismos de transporte da rede não interromperão os serviços e são transparentes aos usuários finais, cada vez mais dependentes da transferência eficiente de informação. Alguns tipos de transações (como por exemplo: transferência eletrônica de fundos, compras pela rede, etc.) faz com que a sobrevivenciabilidade dos serviços seja uma questão fundamental no planejamento, pois permite que as empresas operadoras garantam altos níveis de desempenho da rede.

Gerenciamento de Rede

A tecnologia SDH provê canais de gerenciamento dentro da estrutura do seu quadro de transmissão, permitindo que a rede seja totalmente controlável por software. Neste caso, o sistema de gerência possui funções de gerenciamento de eventos tradicionais e permite, além disso, simplificar uma multidão de outras funções tais como: monitoramento de desempenho, gerenciamento de configuração, gerenciamento de recursos, segurança e planejamento.

O equipamento SDH tem uma proporção significativa de seu design embutido no software ao invés do hardware. Portanto, o administrador da rede é capaz de controlar mudanças na configuração de equipamentos através de software. O que as empresas têm exigido é a capacidade para implementar o que é chamado de Provisionamento em Serviço (In-Service Provisioning). Por exemplo: um pedido por um serviço chega ao administrador da rede via um terminal ou outro meio eletrônico e é então analisado, através de uma série de instruções, para cada elemento da rede envolvido nesse serviço. Cada elemento da rede é então configurado e provisionado, através de software, para suportar o serviço pedido sem ter que ser tirado de operação.

O gerenciamento de equipamentos SDH é mais completo e complexo, possibilitando “vigiar” o estado dos nós, dos enlaces ponto-a-ponto, da qualidade da transmissão. No caso de falhas numa rota o software de gerência SDH automaticamente redireciona o tráfego por uma rota alternativa.

Banda sob Demanda (Bandwidth on Demand)

Um grande atrativo das redes de transmissão SDH é que elas permitem a oferta de largura de banda variável a pedido (bandwidth on demand), ou seja, o usuário pode requerer um enlace de faixa larga apenas discando para um número telefônico predeterminado. Um

exemplo seria a videoconferência discada: basta discar o número para interconectar os equipamentos necessários à videoconferência. Em oposição à situação tradicional, onde uma videoconferência precisa ser reservada com antecedência para que a operadora providencie o enlace de alta velocidade.

Com as interfaces adequadas, muitos outros novos serviços se tornaram possíveis na rede síncrona, pois equipamentos SDH não transportam apenas enlaces E1, eles podem transportar pacotes ATM, conexões entre redes locais (*Local Area Networks* - LANs), televisão de alta definição (HDTV), enlaces RDSI, pacotes TCP/IP da Internet e outros [RNT 97]. Estes representarão novas fontes de receita para as empresas e um aumento de vantagens para os usuários.

Interoperabilidade entre fabricantes diferentes (*Multi-Vendor Connectivity*)

A padronização dos sistemas de transmissão síncrona permite que equipamentos de transmissão de diferentes fabricantes sejam utilizados em um mesmo enlace. Isto significa que a empresa operadora não está mais limitada a uma solução proprietária de um determinado fabricante [Nortel 95].

Os padrões SDH também acomodam tanto a hierarquia de transmissão Européia como a Norte Americana. Usando a transmissão plesiócrona isto é difícil devido às diferentes taxas de transmissão usadas em cada lado do Atlântico.

Multiplexação em Único Estágio

A estrutura do multiplexador SDH permite que muitos tributários diferentes sejam multiplexados dentro de um sinal STM-N em um único estágio de multiplexação. Assim, planejadores de rede não estão limitados por uma estrutura de rede hierárquica inflexível (rígida), como acontece com a PDH, mas sim têm à disposição a flexibilidade de manipulação da largura de banda que é essencial para a introdução de novos serviços.

Gerenciamento de Largura de Banda Distribuído (*Distributed Bandwidth Management*)

O *cross-connect* plesiócrono foi originalmente concebido como um equipamento para simplificar o roteamento e arrumação em pontos estratégicos na rede.

Na rede síncrona, a capacidade dos multiplexadores de realizar roteamento e arrumação no nível de virtual container (VC) significa que a funcionalidade de transconexão pode ser

distribuída por toda a rede.

A distribuição da funcionalidade de transconexão, junto com a conectividade fornecida pelas estruturas auto-regenerativas dos anéis, torna possível gerenciar a distribuição de largura de banda no nível de VC. Esta capacidade de gerenciamento de largura de banda distribuído é essencial para técnicas tais com provisionamento em serviço, locação flexível de largura de banda, assim como para sobrevivenciabilidade da rede.

Implementação de Novos Serviços

A tecnologia SDH permite que planejadores “olhem” para suas redes mais em termos de demanda por novos serviços do que apenas de provisionamento de facilidades ponto-a-ponto. Desta forma, uma empresa é capaz de construir uma infra-estrutura de rede robusta o suficiente para suportar a oferta de qualquer serviço, a qualquer um e em qualquer lugar.

CAPÍTULO 3. EQUIPAMENTOS E ARQUITETURAS SDH

Neste capítulo são apresentados os vários tipos de equipamentos de tecnologia SDH e também os diversos tipos de topologias de rede que podem ser implementadas utilizando estes equipamentos.

3.1 Tipos de Equipamentos SDH: OLTM, ADM e SDXC

Os tipos básicos de equipamentos de tecnologia SDH são:

- **OLTM:** Optical Line Terminal Multiplexer – Multiplexador de Terminal de Linha Óptico
- **ADM:** Add/Drop Multiplexer – Multiplexador de Retirada e Inserção
- **SDXC:** Synchronous Digital Cross-Connect – Transconector Cruzado Digital

Um equipamento **OLTM** consiste em um multiplexador que realiza a operação de multiplexação, ou seja, agrupa diversos tributários em um sinal de hierarquia superior (agregado ou feixe principal) e terminais de linha ópticos que realizam a conversão dos sinais elétricos em ópticos. Estes equipamentos diferem quanto ao tipo de interface de tributário que pode ser SDH ou PDH. A interface de agregado é sempre STM-N e estes equipamentos podem ser a quatro fibras, quando se exige alta confiabilidade, ou a duas fibras. A Figura 3.1 mostra três exemplos de configurações possíveis de equipamentos OLTMs que diferem quanto aos tipos de tributários. Na Figura 3.1(a), 63 tributários de 2 Mbps formam um STM-1. Na Figura 3.1(b), dois tributários de 34 Mbps (PDH) e 21 de 2 Mbps (SDH) formam um agregado STM-1. Na Figura 3.1(c), dois tributários de 140 Mbps (PDH) e dois tributários STM-1s (SDH) formam um agregado STM-4.

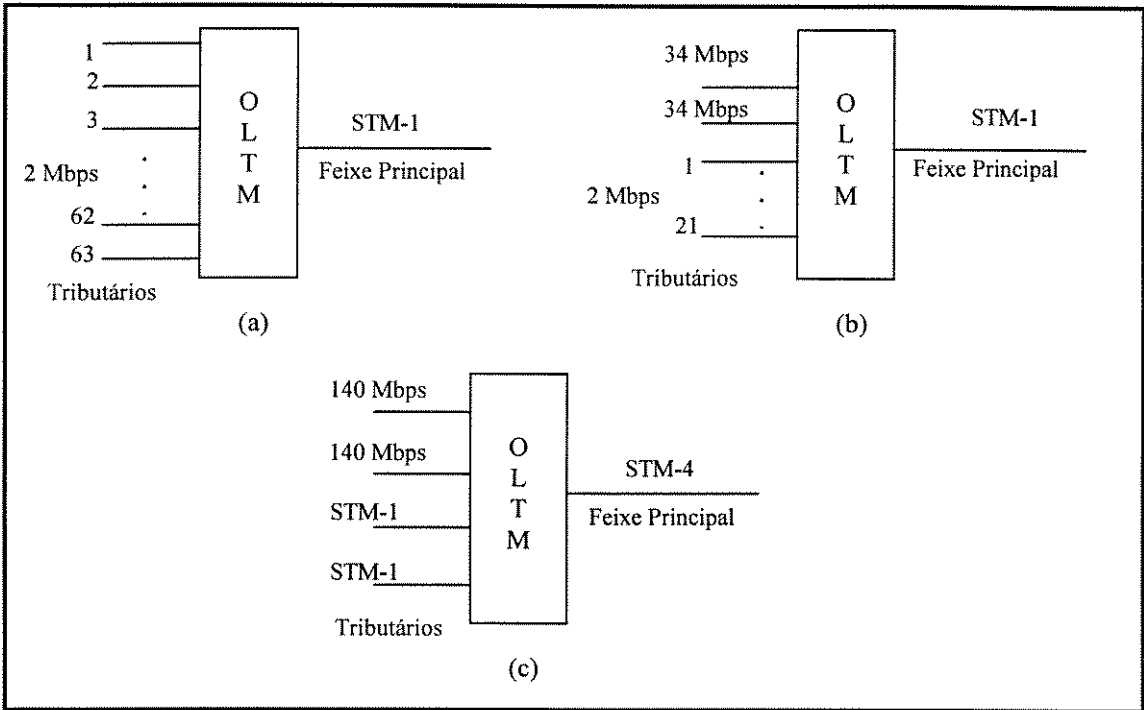


Figura 3.1: Exemplos de equipamentos OLTMs

Um **ADM** é um equipamento que comporta dois terminais de linha ópticos, para o transporte do feixe principal, e um conjunto de portas de acesso de sinais tributários. Este equipamento permite a inserção e/ou retirada de tributários do agregado sem a necessidade de demultiplexação deste sinal. A Figura 3.2 ilustra um exemplo de um equipamento ADM com interface de sinal agregado STM-1 de onde os tributários de 2 Mbps podem ser inseridos e/ou retirados.

Os ADMs podem ser de dois tipos, um que somente permite a retirada e inserção de VC-4 ou 155 Mbps de agregados de velocidade superior - **ADM tipo 1** - e outro que permite a retirada e inserção também de *containers* de ordem inferior VC-12 e VC-3 - **ADM tipo 2**. Os ADMs tipo 1 são utilizados principalmente no núcleo central da rede de transporte e, em geral, são de hierarquia 16 (2.48 Gbps) ou superior, embora possam existir também na hierarquia 4 (622 Mbps). Os de segundo tipo podem ser encontrados nas hierarquias 1 (155 Mbps) e 4. Os ADMs tipo 2 são utilizados basicamente na periferia da rede, onde devem ser realizadas as operações de arrumação de containers VC-12 e VC-3 em containers VC-4. Estes equipamentos podem também ser de **acesso completo** ou de **acesso parcial**. Em um ADM de acesso completo é possível retirar ou inserir qualquer container de qualquer quadro do sinal agregado; se isto não for possível tem-se então um ADM de acesso parcial.

Os ADMs podem ter ou não funcionalidade de transconexão. Os ADMs sem essa funcionalidade usam esquema de multiplexação de sinal do tipo **TSA** (*Time Slot Assignment* –

Designação de Intervalo de Tempo). Nestes equipamentos os tributários a serem inseridos e/ou retirados já possuem posição fixa no sinal agregado. Os ADMs com funcionalidade de transconexão usam esquema de multiplexação de sinal do tipo **TSI** (*Time Slot Interchange* – Intercâmbio de Intervalo de Tempo). Os equipamentos com esta funcionalidade podem alterar a posição relativa de um VC-4 em uma seqüência temporal de quadros STM-N e também permitem a alteração de posição de um VC de baixa ordem (VC-12 e VC-3) dentro de um mesmo quadro ou entre quadros diferentes. Esta facilidade é denominada de arrumação (*grooming*).

No modelo matemático de otimização que iremos apresentar nesta tese (Capítulo 4), consideramos que todo ADM contém a funcionalidade TSI.

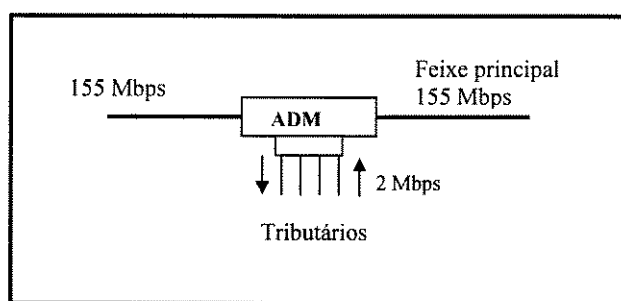


Figura 3.2: Exemplo de equipamento ADM

Um **SDXC** consiste em uma matriz de comutação SDH associada a um conjunto de sinais agregados, de forma que sinais tributários provenientes de um sinal agregado podem ser conduzidos a qualquer outro sinal agregado. Esta funcionalidade de transconexão permite a conexão entre suas várias portas (entradas e saídas) de sinais agregados e tributários de forma a permitir a comutação de VCs entre elas. Este equipamento pode ser implementado por duas matrizes de comutação diferentes, uma de baixa ordem e outra de alta ordem. A matriz de comutação de baixa ordem faz a comutação de VC-12 ou VC-3 e é denominada de **LPC** (*Lower-Order Path Connection*), enquanto que a matriz de alta ordem faz a comutação de VC-4 e é denominada de **HPC** (*Higher-Order Path Connection*).

Um ADM com TSI pode também ser chamado de “mini-SDXC” porque integra funções de inserção/retirada e transconexão, mas possui muito menos portas do que um SDXC [Wu 92].

Um SDXC que só comuta VC-4 entre sinais agregados de ordem superior é notado por SDXC 4/4. O SDXC 4/4 aceita sinais em 140 Mbps e STM-N. Se o SDXC pode comutar

VC-12, VC-3, ou ambos, ele é representado por SDXC 4/1, SDXC 4/3 ou SDXC 4/3/1 respectivamente. As Figuras 3.3(a) e 3.3(b) ilustram um SDXC 4/4 e 4/1 respectivamente. O SDXC 4/1 aceita combinações de sinais em 2, 34, 140 Mbps e STM-N.

Um equipamento SDXC é muito caro, e o mais caro deles é o do tipo 4/3/1, por isto é interessante distribuir a funcionalidade de transconexão, inserida em ADMs, através da rede, utilizando-se de matrizes de comutação menores e de controles mais simples. Esta distribuição permitirá o uso de SDXCs menores onde for exigido e, portanto, mais econômicos.

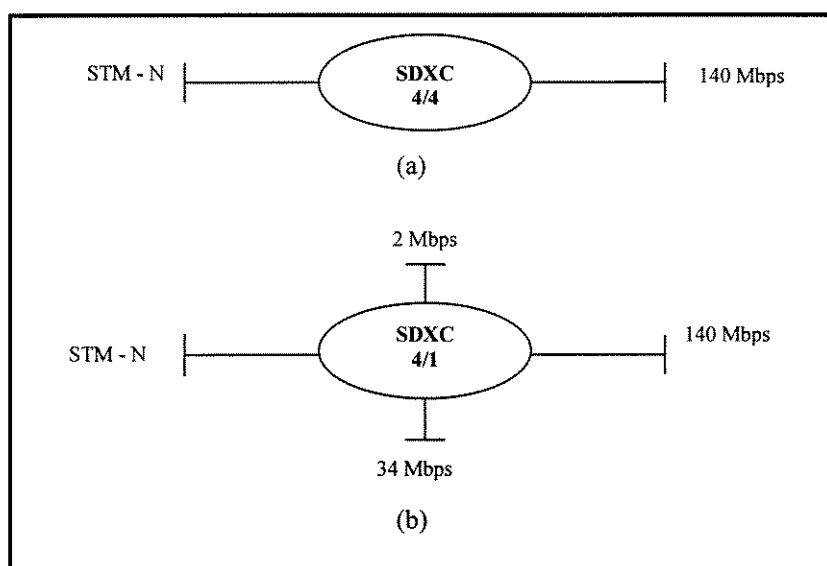


Figura 3.3: Tipos de SDXC

3.2 Topologias Elementares de Redes SDH

Os equipamentos SDH descritos acima podem ser combinados a fim de se construir diversas topologias de rede. Apresentamos a seguir algumas dessas alternativas.

Ponto-a-ponto

Um enlace ponto-a-ponto é construído usando-se um equipamento multiplexador OLTM em cada extremidade do enlace. Um exemplo de interligação entre 3 nós é mostrado na Figura 3.4. Aí são necessários 6 OLTMs para se ter os 3 nós comunicando entre si. A proteção para enlaces ponto-a-ponto é realizada através de redundância de meios de transmissão utilizando proteção 1+1 e roteamento disjuncto das fibras.

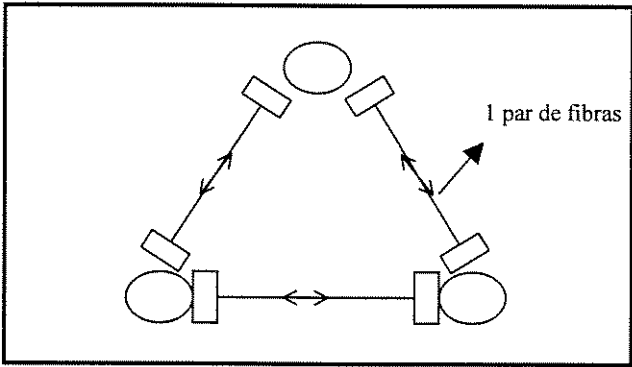


Figura 3.4: Ligações ponto-a-ponto

Anéis de ADMs

Um anel é construído utilizando-se equipamentos ADMs em 3 ou mais nós de modo a formarem um ciclo. De acordo com suas características um anel pode ser dividido em categorias gerais descritas a seguir.

- Anel unidirecional ou bidirecional: dependendo do sentido do fluxo de tráfego através dele sob condições normais.
- Anel a 2 ou 4 fibras: dependendo do número de fibras entre seus ADMs.

Em um anel unidirecional o sinal é transportado no anel em um único sentido. No exemplo mostrado na Figura 3.5 a informação de A para C é transmitida através dos arcos AB e BC e a informação de C para A é enviada, no mesmo sentido, através dos arcos CD e DA.

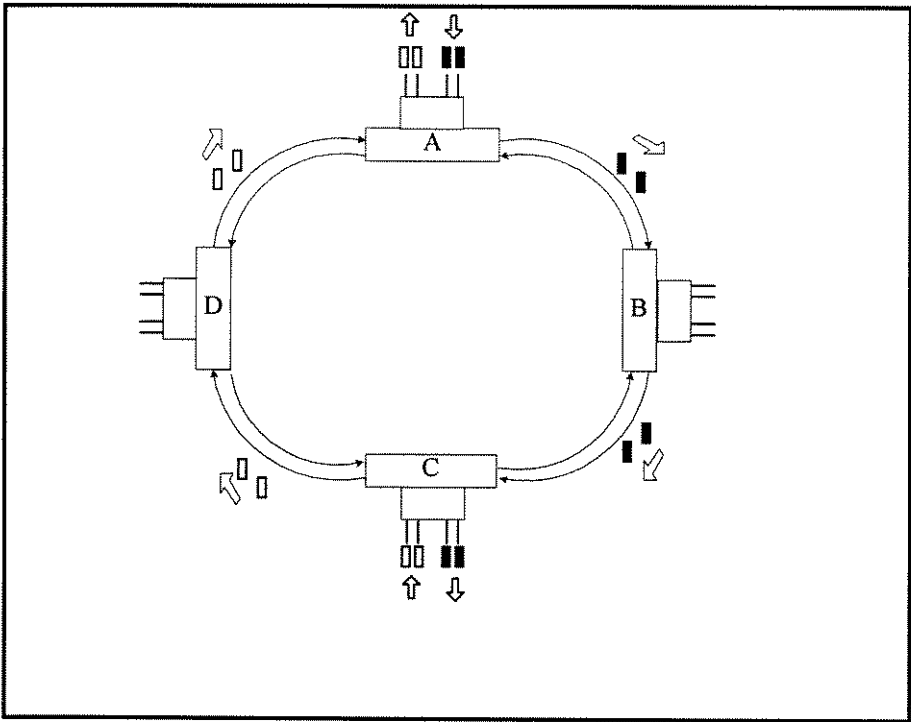


Figura 3.5: Anel unidirecional a 2 fibras

No anel unidirecional o fluxo total circulando no anel é a soma das demandas entre os nós. Por exemplo, o anel de 4 nós da Figura 3.6 tem a seguinte matriz de demanda: nós vizinhos no anel têm demanda igual a 10 canais de 2Mbps, enquanto nós não vizinhos têm demanda nula. O fluxo de canais homogêneo em todos os arcos deste anel é igual a 40 canais, que equivale à soma das demandas entre os nós.

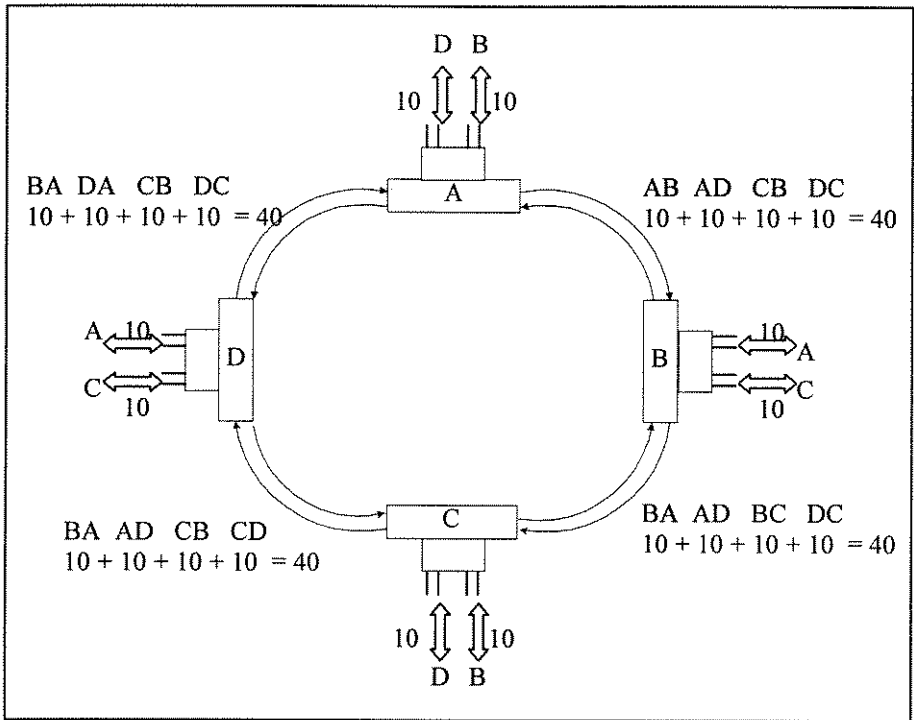


Figura 3.6: Exemplo da distribuição de canais no anel unidirecional

Em um anel bidirecional o tráfego de trabalho é transmitido em ambas as direções, por isso no mínimo duas fibras são necessárias para transportar estes canais de serviço. No anel da Figura 3.7 a informação de A para C (e vice-versa) é transmitida através dos arcos AD e DA nos dois sentidos do anel. Um anel bidirecional pode ser a 2 ou 4 fibras.

No anel bidirecional a 2 fibras a informação entre dois nós circula, em geral, pelo caminho mais curto do anel. A proteção aqui é obtida mantendo-se uma capacidade ociosa ou de reserva de 50% em cada arco, ou seja, o fluxo total em cada arco deve ser metade da capacidade do anel.

O anel bidirecional a 4 fibras (Figura 3.8) apresenta dois conjuntos transmissor/receptor em cada lado do ADM, leste e oeste, ligados a 4 fibras, um par de trabalho e o outro de proteção. Este anel tem funcionamento semelhante ao do anel bidirecional a 2 fibras, mas

agora cada par de trabalho, em cada arco, pode usar todo o fluxo agregado para transporte de informação.

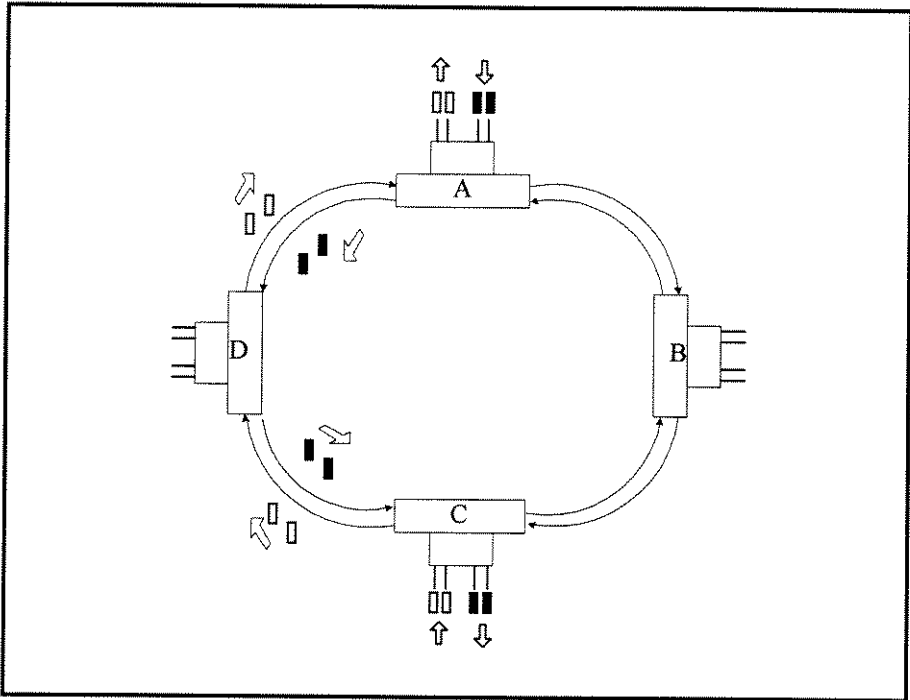


Figura 3.7: Anel bidirecional a 2 fibras

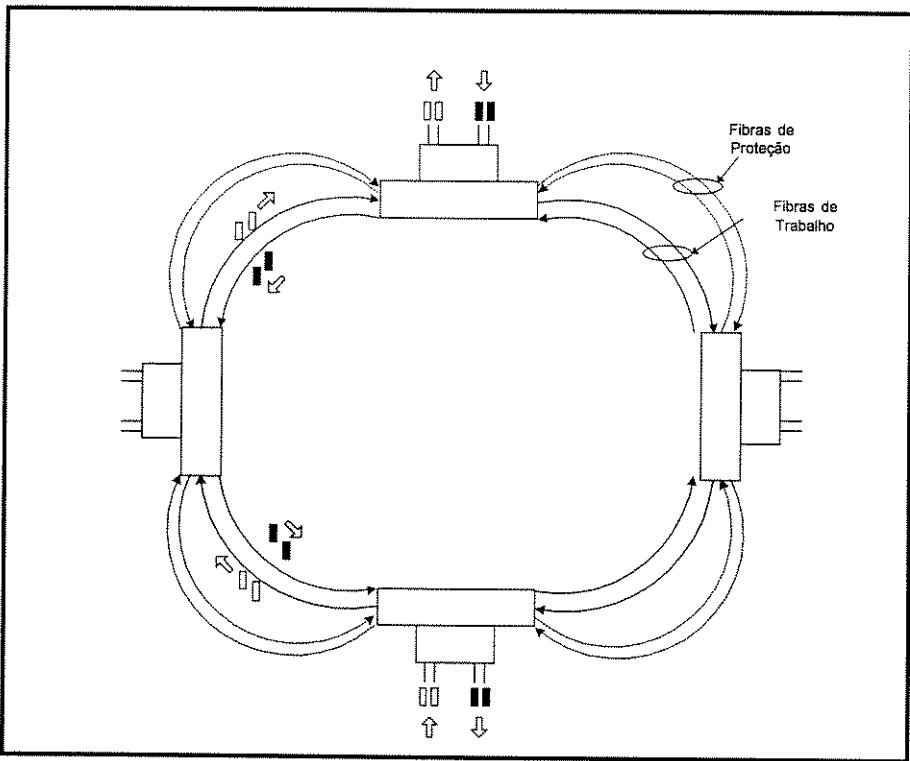


Figura 3.8: Anel bidirecional a 4 fibras

Um anel composto somente de ADMs tipo 1 é chamado de anel gerenciado em nível de módulo de transporte (**STM managed ring**). Se ele for composto de ADMs tipo 2 então ele é um anel gerenciado em nível de container virtual (**VC managed ring**).

Para áreas da rede que requerem alta sobrevivenciabilidade, a estrutura em anel é capaz de se reconfigurar sem a intervenção de um operador externo caso ocorra uma falha de cabo ou de equipamento, deste modo mantendo a continuidade do serviço. Muitas empresas têm dado prioridade a este tipo de configuração por dotar a rede de maior segurança.

Cadeias de ADMs

Constitui-se de uma seqüência de ADMs com OLTMs nas pontas (veja Figura 3.9). Na hierarquia PDH estes ADMs são substituídos por OLTMs dispostos costa-a-costa (back-to-back). Este tipo de estrutura é bastante inflexível para a tecnologia PDH, pois qualquer alteração das conexões dos OLTMs deve ser feita manualmente; enquanto que, em uma cadeia de ADMs, esta alteração pode ser feita à distância através de uma estação de trabalho conectada à rede. A topologia do tipo cadeia geralmente é utilizada em situações onde só se tem, entre os nós da rede, um único caminho de dutos para a disponibilização de fibras. Contudo, mesmo aqui, talvez seja conveniente fechar a cadeia (dessa forma obtém-se um “flat ring”), protegendo a rede contra falhas dos ADMs, embora não contra cortes de fibras.

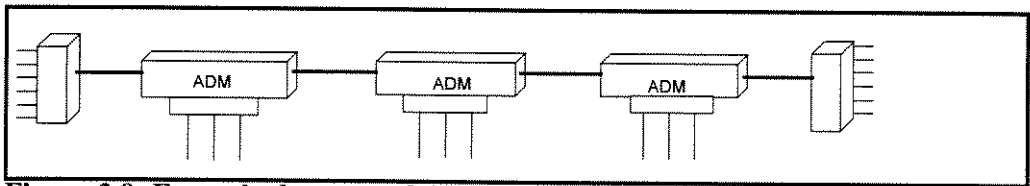


Figura 3.9: Exemplo de uma cadeia de ADMs

Hub

Em algumas redes podem existir nós que têm uma importância maior que seus vizinhos e são chamados de hubs. Neste tipo de topologia nós de importância secundária enviam toda sua demanda, que em geral é pequena, para um nó hub, que em geral sedia um equipamento roteador (ou com funcionalidade de transconexão). Deste modo, essa demanda é agregada em um feixe de maior capacidade ganhando-se com isso economia de escala. Esse tipo de estratégia elimina a necessidade de elementos de redes dispostos back-to-back em um mesmo nó, sobrecarregando-o. Por exemplo, em um nó onde há uma certa concentração de OLTMs e

ADMs pode ser utilizado um SDXC em substituição a estes equipamentos [Bergamaschi et alii 95]. Um exemplo de rede baseada em hubs é mostrado na Figura 3.10.

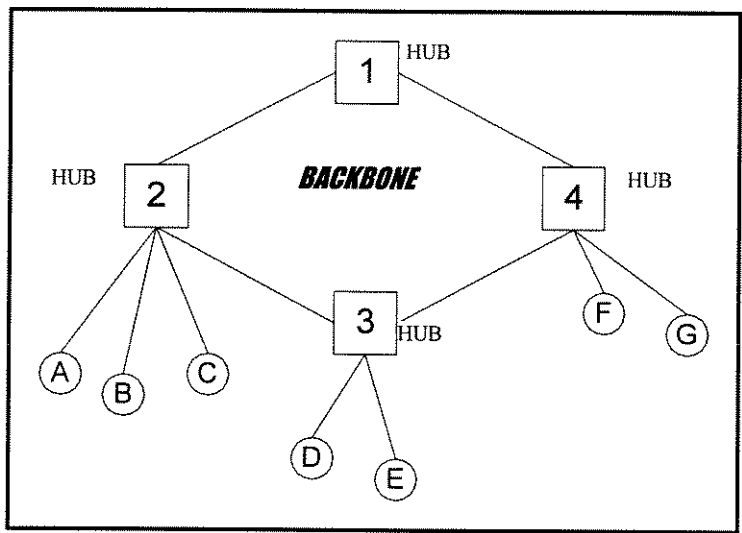


Figura 3.10: Exemplo de rede baseada em hubs.

3.3 Confiabilidade e Sobrevivência das Redes SDH

A confiabilidade de uma rede está relacionada às possibilidades de falhas da rede – ou de seus componentes – que afetam diretamente na capacidade da rede de cumprir sua missão como uma plataforma provedora de serviços.

Sobrevivenciabilidade pode ser definida como a capacidade de uma rede de recuperar-se de falhas. Nestas circunstâncias, deve-se assegurar a continuidade dos serviços providos pela rede. Isto é, no caso de falha, pode haver uma completa continuidade do serviço ou este pode sofrer uma descontinuidade mas ser restaurado rapidamente. Neste último caso, para assegurar a sobrevivenciabilidade, deve-se definir um tempo máximo permitido de descontinuidade do serviço. Este tempo pode variar dependendo do operador e dos tipos de serviços, mas é geralmente uma fração pequena do tempo médio para reparo (Mean Time To Repair – MTTR) de falha.

Um estudo sobre sobrevivenciabilidade no planejamento de redes de telecomunicações pode ser encontrado em [Mello 96].

3.4 Estratégias de Proteção para Redes SDH

Diversos esquemas de proteção e arquiteturas podem ser usados para implementar redes SDH sobrevivenciáveis. A escolha da combinação adequada de proteção e arquitetura dependerá de critérios de planejamento adotados. Nesta seção alguns destes esquemas serão apresentados de forma resumida. Na seção seguinte apresentaremos algumas dessas arquiteturas.

Automatic Protection Switching (APS)

É a mais simples e a mais rápida técnica de restauração e tem a vantagem de ser totalmente automática e de fácil manutenção [Wu 95]. Geralmente está associada a ligações OLTM-OLTM, mas também pode ser encontrada em anéis, cadeias e ligações SDXCs [Bortolon 96]. Dois tipos de configurações são possíveis: 1+1 e 1:N. Na configuração 1:N, N sistemas¹ de trabalho compartilham um único sistema de proteção. Esta configuração 1:N é parcialmente sobrevivenciável, pois apenas um dos sistemas de trabalho será comutado para o sistema de proteção em caso de falhas. Também não é eficiente para corte de cabos, pois o sistema de proteção é colocado na mesma rota dos sistemas de trabalho. Uma alternativa é a configuração 1:N/DP (*Diverse Protection*), onde os sistemas de trabalho e o sistema de proteção são dispostos em rotas distintas tornando possível a restauração dos serviços na presença de corte de cabo de fibras. Durante a operação normal, os sinais são transmitidos nas fibras de trabalho. Caso haja alguma falha, o sistema de trabalho de maior prioridade será comutado para o sistema de proteção. Esta configuração é muito simples e muito usada em redes metropolitanas onde os custos de equipamentos dominam os custos totais.

Na configuração 1+1/DP, um sistema de proteção é destinado para cada sistema de trabalho. Esta configuração consiste em se duplicar eletronicamente o módulo de transporte STM-N e transmiti-lo em ambos os sistemas (trabalho e proteção), ou seja, em operação normal o sinal está sendo transmitido nos dois sistemas (veja Figura 3.11). No ponto de recepção este sinal é analisado e um seletor selecionará o sinal do sistema de proteção caso o sinal de trabalho não esteja satisfazendo exigências de desempenho. Esta configuração provê completa sobrevivenciabilidade para corte de cabo de fibras e falha de equipamento, porém requer mais facilidades e equipamentos do que a 1:N/DP. Na prática, sistemas com

¹ Um sistema consiste em um par de fibras, uma para transmissão em um sentido e a outra para transmissão no outro sentido, e equipamentos nas pontas do par de fibras.

capacidade acima de Gbps requerem este tipo de configuração, pois transportam muitos serviços. Maiores detalhes são apresentados por [Wu 92].

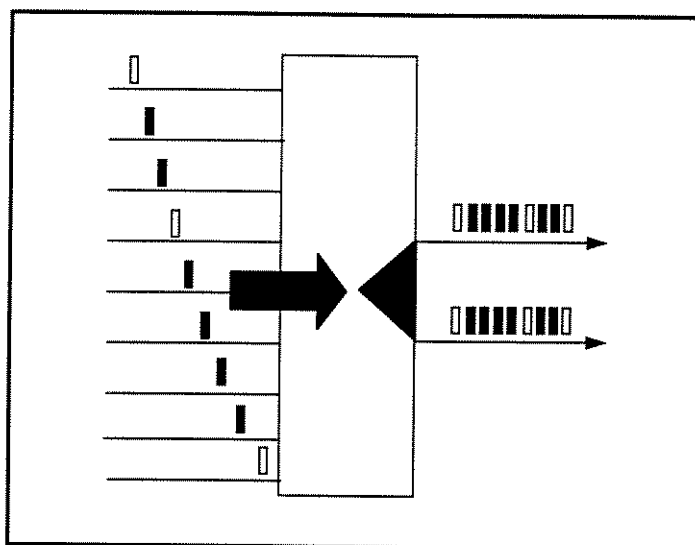


Figura 3.11 :Esquema de proteção 1+1 APS

Dual Homing

Em redes baseadas em *hubs*, a falha em um edifício configurado como *hub* (com um equipamento SDXC localizado nele) pode isolar a área onde aquele *hub* serve como ponto de concentração e distribuição de demandas. Para prover proteção contra essas falhas e assegurar que serviços sejam parcialmente protegidos, esta técnica de restauração usa um conceito de *hub de backup*. Em contraste com a técnica *single-homing*, a qual agrega demandas de um nó para nós de destino através de um *home hub* associado, *dual homing* designa dois *hubs* (um *home hub* e um *foreign hub*) para cada nó especial (nó que necessita de maior proteção para seus serviços) e requer um arco de fibra óptica desse nó especial ao seu *home hub* e outro arco para o seu *foreign hub*. Nesta técnica, demandas originadas de um nó especial são divididas entre os dois *hubs*. Por exemplo, cada nó especial poderá assegurar que 50% de sua demanda total não será afetada se um dos dois *hubs* ligados a ele falhar. No caso de uma falha no *home hub* um nó que usa *dual homing* pode ainda acessar outros nós através do *hub de backup (foreign hub)*. *Dual homing*, por si mesma, não realiza restauração automaticamente, contudo pode ser usada em conjunto com SDXCs nos nós especiais para entregar, em seu destino, parte da demanda total via *foreign hub* se o *home hub* falha. Neste caso, o arco de fibra conectando o nó especial ao seu *foreign hub* deve possuir capacidade de reserva. A Figura 3.12 ilustra uma arquitetura usando esta técnica.

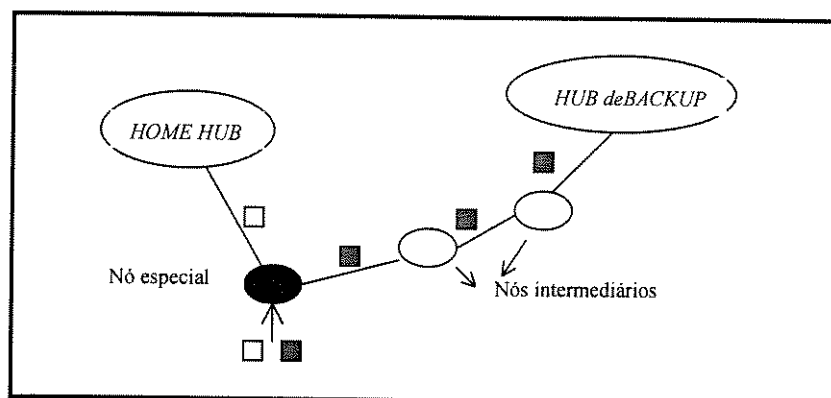


Figura 3.12: Dual Homing

Path Switching

Neste esquema de proteção, um VC (*virtual container*) é duplicado a partir de algum ponto, gerando um canal de trabalho (*working*) e outro de proteção (*protection*). No ponto de destino, o melhor dos dois é recuperado, e o outro descartado. Este é o esquema de proteção mais comum em anéis unidirecionais. Maiores detalhes são apresentados em [Wu 92].

Line Switching

Neste esquema de proteção, quando ocorre uma falha em um enlace óptico, o módulo de transporte STM-N que seria remetido por este enlace é desviado para uma linha de reserva, percorrendo a rede por um outro caminho, até chegar ao seu destino final. Este é o esquema de proteção geralmente está associado a anéis bidirecionais a 2 ou 4 fibras.

3.5 Arquiteturas de Redes Sobrevivenciáveis

As redes reais em geral apresentam uma arquitetura que é um misto daquelas descritas a seguir, de forma pura.

Anéis auto-regenerativos (*Self-Healing Rings – SHRs*)

Um anel é dito auto-regenerativo se, em caso de falhas na rede (corte de cabo de fibras ópticas ou falha em um dos nós), ele é capaz de prover um caminho alternativo, com largura de faixa suficiente, para transmitir a comunicação sem perda do serviço. Por isso, os ADMs que constituem o anel possuem funcionalidades que permitem essa reconfiguração na presença de falhas.

Em [Wu 92] temos a seguinte definição: “Um SHR é um anel que provê largura de faixa e/ou equipamento de rede redundante de modo que serviços interrompidos possam ser automaticamente restaurados.” Portanto, uma importante característica de um SHR é que, se o anel é rompido em algum ponto, a direção de transmissão do sinal pode ser invertida para evitar a perda do serviço. Arquiteturas de SHR podem ser uni ou bidirecionais.

SHR Unidirecional

Anéis unidirecionais auto-regenerativos (*Unidirectional Self-Healing Ring* - USHR) podem ser implementados de acordo com o conceito de proteção 1:1 ou 1+1. O USHR 1:1 utiliza uma fibra de proteção com sentido contrário ao da fibra de trabalho. Esta fibra de proteção não transporta demanda de serviço em situação normal. Em caso de falha na rede, os canais de serviços são desviados para a fibra de proteção. Este anel 1:1/ USHR é também denominado *Unidirectional Line-Switched Self-Healing Rings* (ULSHRs). Anéis 1:1 USHRs podem ser configurados como anéis 1:N USHRs, isto é, uma única fibra de proteção é compartilhada pelas N fibras de trabalho. Contudo este tipo de anel não é totalmente auto-regenerativo, por isso não será discutido aqui.

No anel 1+1 USHR o sinal é duplicado no nó de origem, gerando um sinal de trabalho que é enviado através da fibra de trabalho, e outro de proteção, enviado através da fibra de proteção. O nó de recepção (nó de destino) seleciona o melhor dos dois sinais recebidos e descarta o outro. Este anel 1+1 USHR é denominado *Unidirectional Path-Switched Self-Healing Ring* (UPSHR) e é mais utilizado do que o ULSHR. A Figura 3.13 apresenta um UPSHR. Maiores detalhes ver [Wu 95].

SHR Bidirecionais

O anel bidirecional usando esquema de proteção line-switching é conhecido como um BLSHR (*Bidirectional Line-Switched Self-Healing Ring*). Em um BLSHR a 2 fibras, se um par de fibra óptica se rompe ou um ADM apresenta defeito, os dois ADMs adjacentes ao defeito comutam para o par alternativo e utilizam a capacidade de reserva para, através do caminho mais longo do anel, realizar a sua tarefa (veja Figura 3.14). Neste caso, considerando também apenas a possibilidade de falha simples, temos proteção do tipo 1:N, pois a mesma capacidade de reserva é utilizada para dar proteção a uma demanda qualquer entre nós do anel. Assim, o ADM para BSHR a 2 fibras necessita, obrigatoriamente, ter a funcionalidade TSI para mudar os canais de trabalho de uma fibra rompida para os correspondentes canais de proteção da outra fibra.

No BLSHR a 4 fibras, se um conjunto transmissor / receptor apresenta defeito, o ADM comuta para o conjunto adicional, utilizando o par de fibra de proteção. Se os dois pares de fibras entre cada par de nós forem roteados fisicamente pelo mesmo caminho, a confiabilidade deste anel é similar ao caso do anel a 2 fibras. Mas se os caminhos forem disjuntos (roteamento disjunto), a confiabilidade cresce bastante.

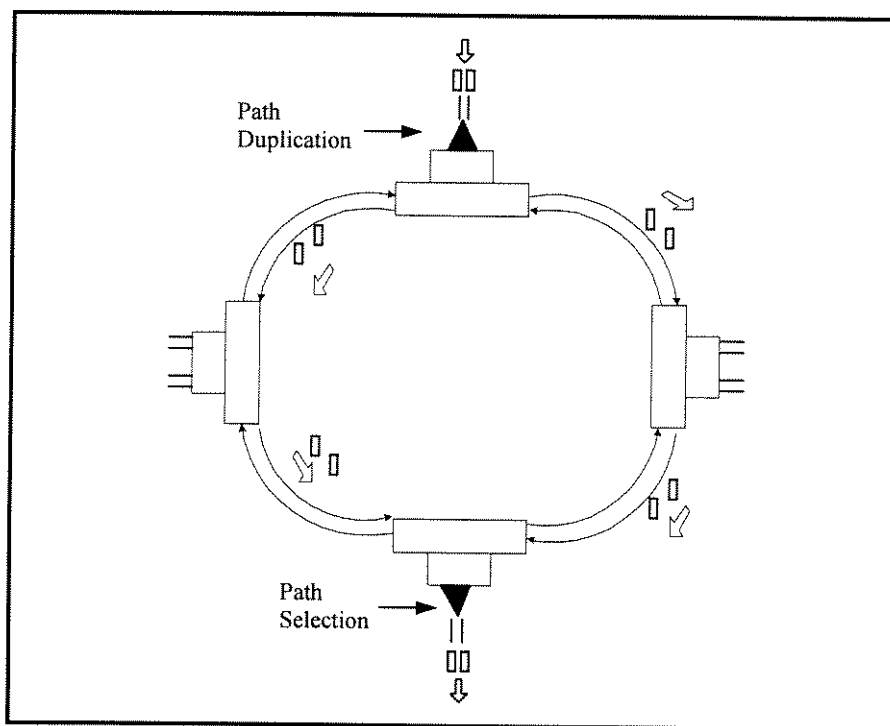


Figura 3.13 : Anel UPSHR

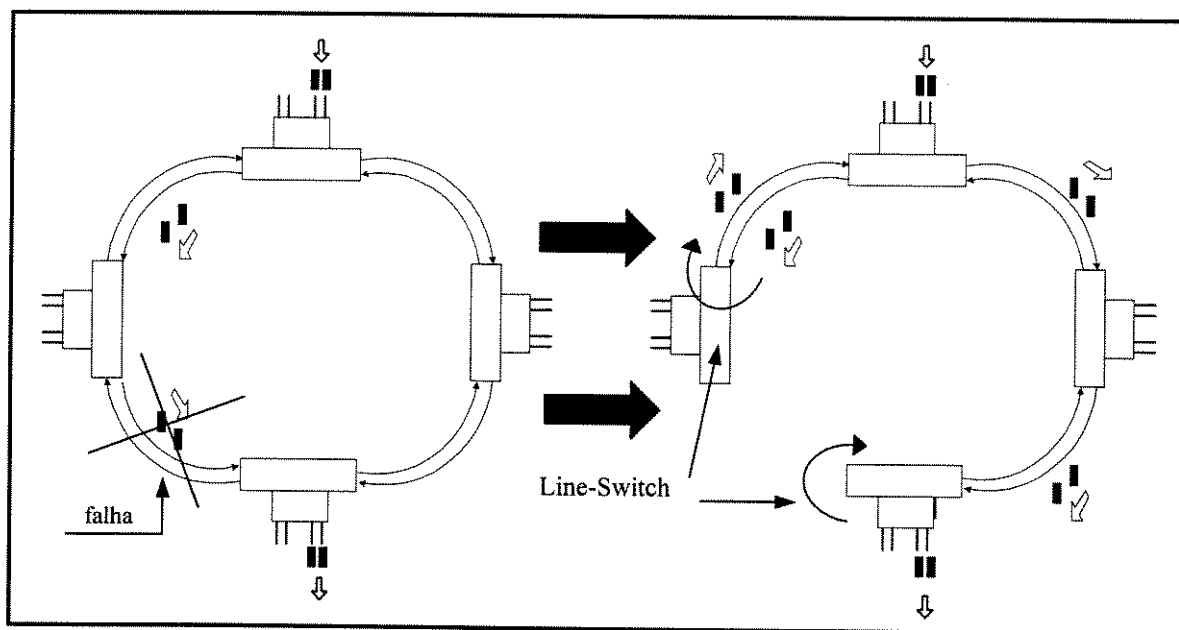


Figura 3.14 : Anel BLSHR

Regras de aplicação de USHRs e BSHRs têm sido bastante estudadas. Acredita-se que USHR pode ser mais economicamente atraente em áreas onde as demandas de vários nós são destinadas a um único nó principal. Já os BSHRs podem ser atraentes em áreas onde as demandas são mais uniformemente distribuídas [Flanagan 90]. Isto sugere que USHRs sejam mais apropriados em redes periféricas e redes de acesso, enquanto que BSHRs sejam mais práticos em redes de transporte. Um modelo especializado que utiliza somente anéis unidirecionais na rede de acesso pode ser visto em [Formigoni 95].

O que se tem feito comumente é construir redes SDH utilizando arquiteturas em anel e, para nós que tenham um número razoável de ADMs, ligar algumas portas destes a um SDXC de pequeno porte. Esta solução pode ser complementada com a distribuição da funcionalidade de transconexão através da rede, acrescentando-a aos ADMs, o que pode contribuir na diminuição do porte dos equipamentos SDXCs puros, em nós nevrálgicos da rede.

Anéis Biconectados

Dois anéis podem ser interconectados via um nó de acesso ou via dois nós de acesso (Figura 3.15). No primeiro caso, o nó de acesso pode ser um *hub* em uma rede baseada em *hubs*. A mais simples configuração nodal para esta interconexão é usar dois ADMs (um para cada anel) no nó de acesso. A conexão é feita no lado de baixa velocidade (tributários) dos ADMs, como mostrado na Figura 3.16 (a). Uma segunda configuração, do nó de acesso, é usar um SDXC para interconectar demandas entre anéis que são retiradas dos ADMs (Figura 3.16 (b)). O benefício desta configuração é a flexibilidade de se adicionar e se retirar demandas dos anéis. Uma outra alternativa de configuração do nó de acesso é usar um SDXC para interconectar os anéis (Figura 3.16 (c)). A vantagem dessa configuração da anterior é a redução dos custos de ADMs, mas impõe atrasos para serviços normais e para restaurações emergenciais. Também, a falha deste SDXC pode afetar todos os anéis que estão conectados a ele, pois nesta última configuração os anéis não são independentes um do outro.

Para interconexão de anéis via dois nós de acesso (anéis biconectados), as configurações nodais para cada nó de acesso são similares àquelas descritas acima.

Do ponto de vista da confiabilidade, a interconexão de anéis através de dois nós de acesso é melhor do que através de apenas um.

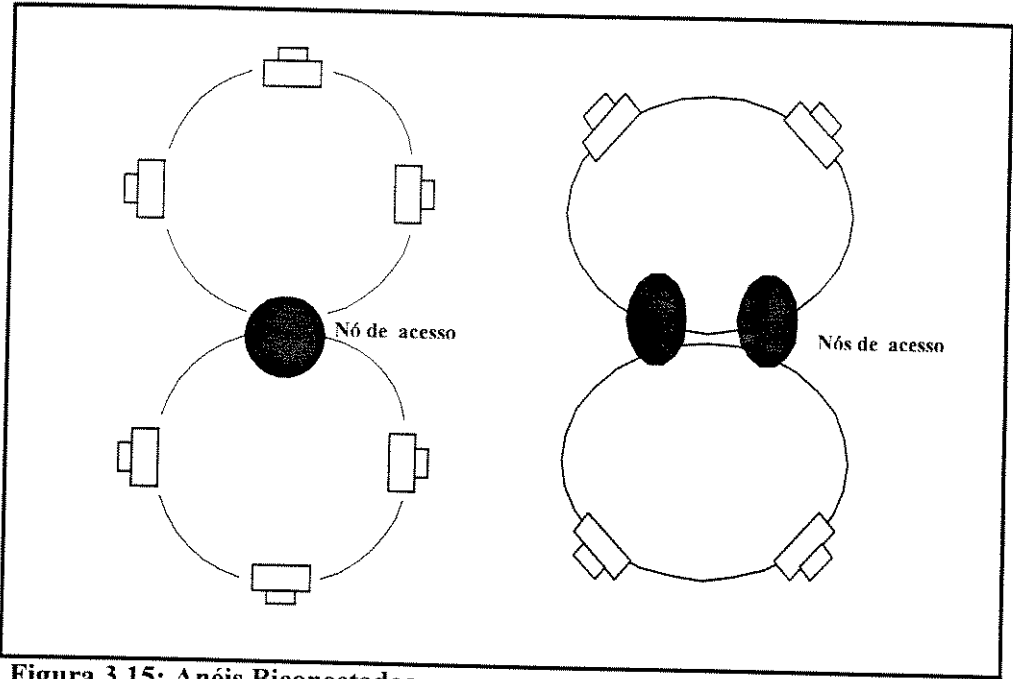


Figura 3.15: Anéis Biconectados

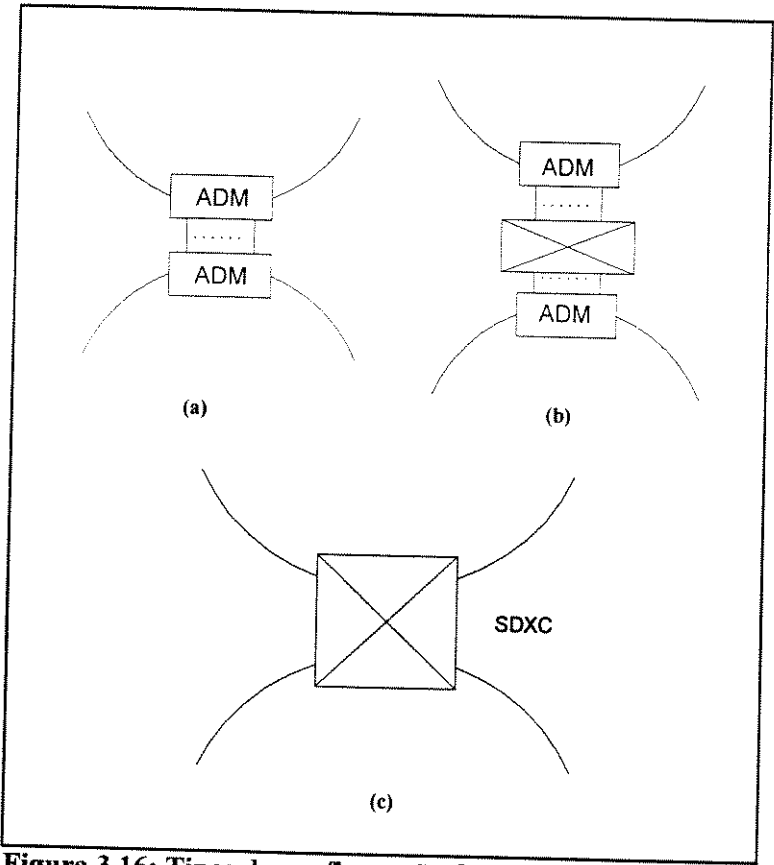


Figura 3.16: Tipos de configuração do nó de acesso

Malha (Mesh)

Uma arquitetura tradicional para a rede de transporte é a rede malhada, que utiliza somente equipamentos SDXC. Os nós são conectados por um conjunto de enlaces e, em geral, em um nó terminam dois ou mais enlaces. A rede pode também ser completamente conexa, ou seja, todo nó é ligado a todos os outros. Se a malha é apenas parcial então alguns pares de nós são interligados através de um terceiro, utilizando a funcionalidade de transconexão. Esta é uma arquitetura utilizada principalmente entre centros de fios com alta demanda entre si como, por exemplo, as regiões centrais das áreas metropolitanas. Esta é uma estrutura interessante e flexível. Como cada SDXC é um comutador, em caso de mudança do padrão de demanda ou em caso de falha é possível reconfigurá-los para atender à nova situação.

Como neste tipo de rede há geralmente pelo menos dois caminhos entre dois nós, elas são inerentemente sobrevivenciáveis, ou seja, caso haja um corte de cabo, a demanda ainda poderá ser escoada via roteamento através das rotas alternativas (obviamente, estas rotas devem possuir capacidade de reserva) da porção não afetada da rede. A Figura 3.17 ilustra um exemplo de uma topologia de rede em malha.

Sistemas de hardware e software para redes auto-regeneráveis baseadas em SDXC são bastante complexos. Também, o problema com o SDXC é que provê-lo com capacidade de supervisão torna o equipamento caro. Além disso, o tempo de reconfiguração do equipamento em caso de falha pode ser muito grande (da ordem de alguns segundos), o que não é aceitável para o usuário, cada vez mais dependente de serviços de rede seguros e confiáveis.

Muitos protocolos para auto-regeneração dessas redes têm sido propostos [Grover 91].

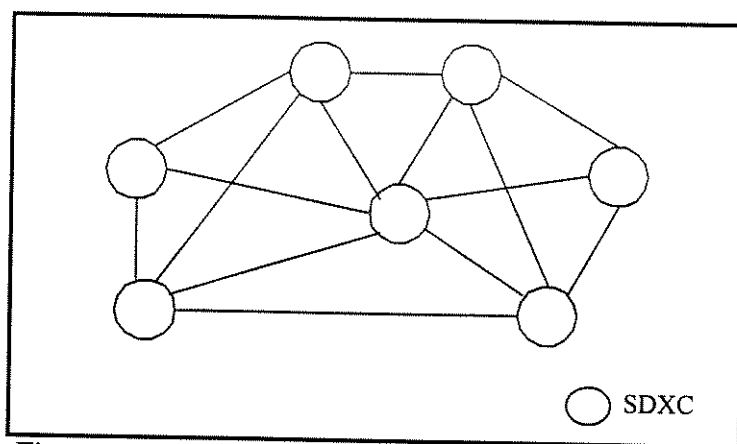


Figura 3.17: Topologia de rede em malha

Topologias Híbridas

Em redes de grande porte, uma alternativa muito discutida é a combinação de anéis de ADMs interligados a uma malha de SDXCs. Geralmente esta malha constitui-se o *backbone* da rede onde os nós *hubs* estão fortemente conectados. Em [Grover 92] podemos encontrar duas estratégias utilizando este conceito: *mesh-ring* e *mesh-arc*. Entretanto, estas redes apresentam os mesmos problemas que a rede em malha.

É importante ressaltar que, neste tipo de rede em que há uma cooperação entre ADMs e SDXCs, para os nós onde estes dois equipamentos estão interconectados, é necessário que haja a conversão da sinalização ADM em sinalização SDXC.

Mesh-ring

Nesta estratégia, considera-se que topologias em anéis de ADMs e a topologia em malha de SDXCs cooperam numa mesma rede de forma a garantir completa sobrevivenciabilidade. A Figura 3.18 ilustra um exemplo de uma rede *mesh-ring*.

Mesh-arc

Nesta rede, muito similar à anterior, segmentos de anéis de ADMs são usados ao invés de anéis fechados. A Figura 3.19 ilustra um exemplo deste tipo de estratégia.

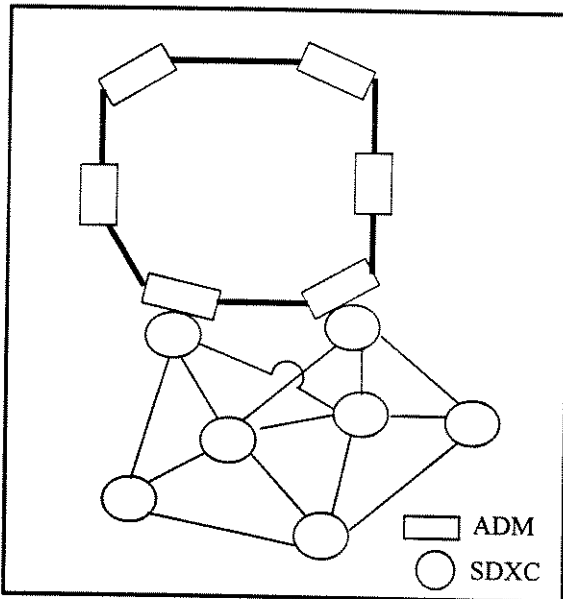


Figura 3.18: Topologia Mesh-ring

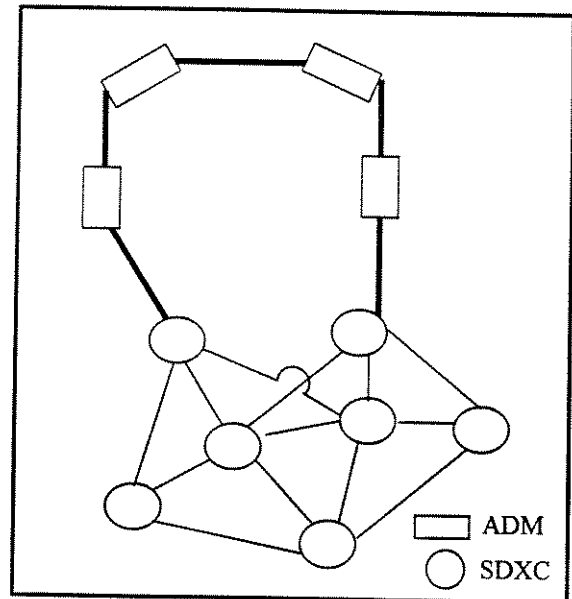


Figura 3.19: Topologia Mesh-Arc

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DA REDE DE TRANSMISSÃO E O MODELO MATEMÁTICO DO ENFEIXAMENTO

O planejamento de um sistema de telecomunicações geralmente é dividido em várias fases, reduzindo assim sua complexidade e permitindo que cada subproblema seja “atacado” de modo particular, possibilitando revisões parciais e interferência do planejador em vários momentos do planejamento. Essas fases são apresentadas a seguir, com maior ênfase no planejamento de transmissão, objeto desta tese. E, para finalizar o capítulo, apresentamos o Modelo Matemático do Enfeixamento, uma das etapas fundamentais deste processo de planejamento.

4.1 Planejamento de Rede de Telecomunicações

4.1.1 Planejamento de Rede Externa

Entende-se por Rede Externa a rede de interligação dos usuários ou assinantes aos prédios de comutação telefônica ou Centros de Fios (CFs). O planejamento desta rede consiste em determinar a melhor localização dos CFs, sua abrangência geográfica (cortes de área) e um cronograma para a implantação e futuras expansões (projetos de alívio) da rede.

4.1.2 Planejamento de Comutação

Dimensionam-se, quanto à capacidade de tráfego telefônico, as centrais de comutação a serem instaladas nos CFs. Define-se ainda, a partir do interesse de tráfego entre as centrais telefônicas, o encaminhamento das chamadas através das centrais e dimensiona-se o número de circuitos necessários à interligação entre elas, obtendo-se ao final uma matriz de circuitos comutados que devem interligar as centrais. Os elementos desta matriz representam módulos

de 30 canais de 64 Kbps, num total de 2 Mbps, no caso de centrais digitais. Como cada CF pode abrigar mais de uma central de comutação, a matriz anterior é transformada em uma menor, a matriz de demanda de sistemas de 2 Mbps entre CFs.

4.1.3 Planejamento de Transmissão

Nesta fase dimensionam-se o número de equipamentos e suas respectivas taxas de transmissão necessários para interligar os CFs, a configuração desses equipamentos, os meios de transporte (rádio ou fibras ópticas) usados e a malha de galerias que irá suportar os cabos ópticos. Na metodologia apresentada aqui, consideramos apenas o planejamento estático, ou seja, apenas uma única matriz de demanda deve ser atendida, não se tem diversas matrizes de demandas resultantes de um estudo de previsão de crescimento de demanda ao longo de um período.

O objetivo do planejamento da rede de transmissão SDH é buscar um compromisso entre custo e confiabilidade [Bortolon et alii 96]. Como podemos notar, este planejamento é muito complexo e por isso pode ser também dividido em quatro etapas descritas a seguir (veja a Figura 4.1).

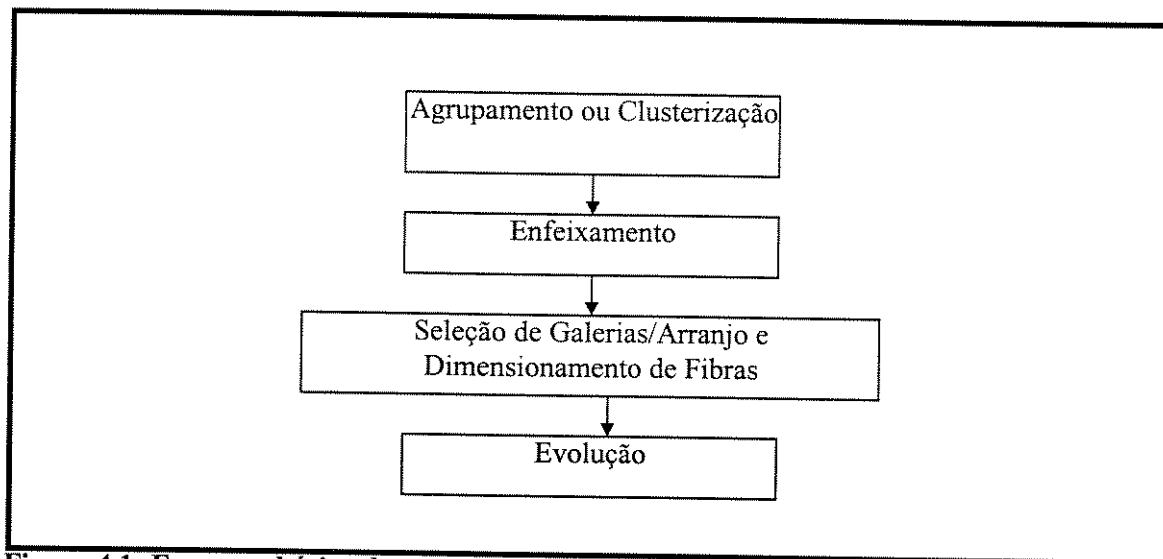


Figura 4.1: Esquema básico das etapas que constituem o Planejamento de Transmissão

4.1.3.1 Agrupamento ou clusterização

Nesta fase procura-se organizar a rede dividindo-a em grupos ou *clusters*. Um dos critérios adotados para a formação desses *clusters* é agrupar CFs que possuem maior interesse de demanda entre si, de modo a maximizar a demanda *intracluster*. Também é muito freqüentemente usado o critério de proximidade geográfica. Cada *cluster* possui um nó principal denominado *Hub* que será um ponto de concentração de demanda e de comunicação dos CFs deste *cluster* com os outros *clusters*. Veja a Figura 4.2.

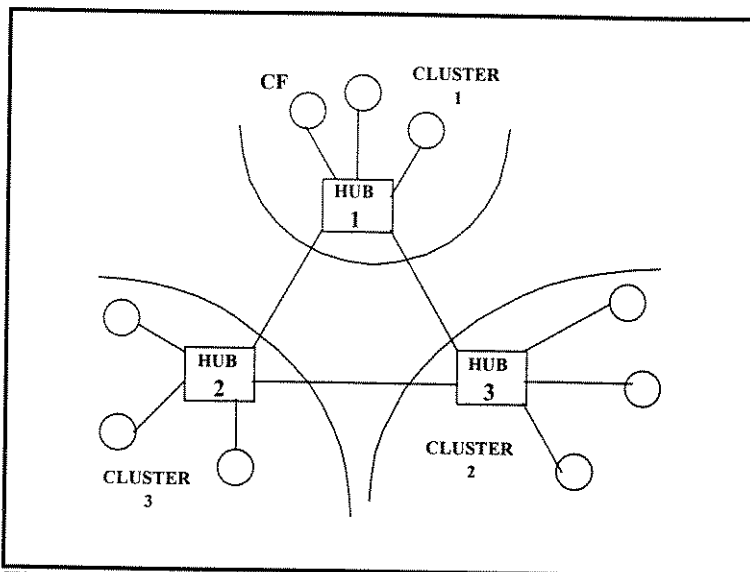


Figura 4.2: Exemplo de clusterização

Nesta fase é feita uma classificação dos CFs de acordo com seu volume de demanda e com a distribuição desta demanda. Temos então:

- CF pendente: geralmente com pequeno volume de demanda que é distribuída a um único centro de fios denominado CF “mãe”.
- CF periférico: também com pequeno volume de demanda, mas possui interesse com vários CFs.
- CF central: possui grande volume total de demanda e sua distribuição é bastante intensa, ou seja, dele sai/chega demandas para/de vários outros CFs.
- CF *Hub*: um centro de fios é classificado como *hub* por apresentar algumas características: elevado volume de demanda originado nele, localização de fácil acesso para os demais CFs, infra-estrutura que permite a instalação de vários equipamentos SDH (como por exemplo, equipamentos roteadores), existência de centrais de comutação tandem. É importante ressaltar que, muitas vezes a escolha de *hubs* é fortemente influenciada pela experiência do planejador. Às vezes um CF pode não apresentar as características descritas acima e, entretanto, ser escolhido como *hub*. Por exemplo, um CF pode ser escolhido para ser *hub* caso ele seja um ponto estratégico da rede onde já se prevê crescimentos futuros. A clusterização é uma etapa de organização da rede, não se considera aspectos de custo e capacidade de equipamentos, apenas prepara a rede para a etapa seguinte: o Enfeixamento.

4.1.3.2 Enfeixamento

Nesta fase, tem-se por objetivo obter um conjunto de equipamentos de custo mínimo que atenda à demanda prevista [Quaglia et alii 95]. Este conjunto é composto pelas diversas topologias de equipamentos candidatas: enlaces ponto-a-ponto, anéis uni e bidirecionais e cadeias de ADMs. Deve-se também prever alguma folga para atender a requisitos de confiabilidade.

Devido à sua complexidade, o Enfeixamento é dividido em sub-fases :

- proposta de candidatos
- montagem de caminhos
- montagem do modelo matemático
- obtenção e análise de solução

Proposta de topologias de transmissão candidatas

A proposta de configurações de equipamentos candidatas pode ser realizada de dois modos: os candidatos podem ser sugeridos pelo planejador e também podem ser propostos automaticamente através de programas computacionais. A proposta de candidatos do tipo ponto-a-ponto é feita separadamente das do tipo anel e cadeia.

• **Proposta de candidatos do tipo ponto-a-ponto**

Em [Bortolon 96] é descrita uma técnica para propor de forma semi-automática as configurações do tipo ponto-a-ponto. Esta técnica será apresentada aqui resumidamente:

- estabelecer um limiar mínimo de fluxo de canais entre dois CFs, para que uma ligação ponto-a-ponto seja criada. Por exemplo, o planejador determina que, para fluxo entre dois CFs acima de 20 canais, pode ser criado um candidato ponto-a-ponto entre eles;
- dada a matriz de demanda e as informações obtidas na etapa de Agrupamento, calcular o fluxo máximo que pode fluir, através de uma ligação ponto-a-ponto, para cada par de CFs;
- calcular o custo da ligação (custo dos equipamentos + custo do par de fibras) e a capacidade de atendimento para cada par de CFs e em cada hierarquia e, a partir daí, avaliar quais as velocidades de transmissão “competitivas” entre o dois CFs;
- submeter as propostas à análise dos planejadores;

- incluir as ligações ponto-a-ponto já instaladas (capacidade instalada da rede). As demandas correntes atendidas por essas ligações devem ser incluídas na matriz de demandas.

- **Proposta de candidatos do tipo anel e cadeia**

A metodologia para a proposição de configurações do tipo anel e cadeia é a principal contribuição deste trabalho. Esta proposta era feita manualmente pelo planejador. Com a nova metodologia, o planejador pode contar com um propositor automático de anéis e encontrar cadeias a partir de uma método eficiente para proposição dessas topologias. Com isso, além de facilitar o trabalho do planejador, possibilita encontrar soluções melhores. A descrição desta metodologia será apresentada no Capítulo 5.

Montagem de caminhos

Uma demanda pode ser escoada através de vários caminhos alternativos entre sua origem e seu destino. Nesta etapa se quer decidir, entre as inúmeras possibilidades de caminhos entre dois CFs, por aquelas que parecem mais razoáveis do ponto de vista da engenharia.

A geração ou obtenção de caminhos (seqüência de arcos que interligam dois nós geradores de demanda) é feita a partir da proposta de topologias de transmissão candidatas e levando-se em consideração a classificação dos CFs feita na etapa de Agrupamento. Para cada demanda, é gerado um conjunto de caminhos, de forma que aquela demanda possa ser “escoada” em quaisquer das inúmeras combinações de equipamentos que possam surgir durante o processo de busca.

Na ferramenta computacional desenvolvida em [Bortolon 96], os algoritmos implementados basearam-se em técnicas de busca exaustiva. Foram considerados os seguintes tipos de caminhos (a Figura 4.3 ilustra alguns destes tipos):

- caminhos diretos (CF-a-CF, CF-a-*Hub*, *Hub*-a-*Hub*), não passa por nenhum CF intermediário;
- caminhos passando por 1 *Hub*;
- caminhos passando por 2 *Hubs*;
- caminhos passando por 3 *Hubs*;
- caminhos passando por 4 *Hubs*;
- caminhos passando por um anel ou cadeia;
- caminhos passando por dois anéis ou cadeias.

A geração de caminhos curtos (que passam por até 3 CFs intermediários) foi privilegiada, tais caminhos são mais econômicos e mais confiáveis, pois utilizam menos equipamentos da rede. Entretanto, para se evitar que seja gerado uma quantidade de caminhos absurda, implementou-se uma estratégia de geração de caminhos “seletiva”, onde o número de caminhos gerados entre dois CFs depende do volume de demanda entre eles.

É interessante observar que, sobre um anel bidirecional é possível a formação de dois tipos de caminho: um que utiliza o sentido horário do anel e outro o sentido anti-horário. Se o caminho passa por 2 anéis bidirecionais, tem-se 4 caminhos diferentes (veja a Figura 4.4).

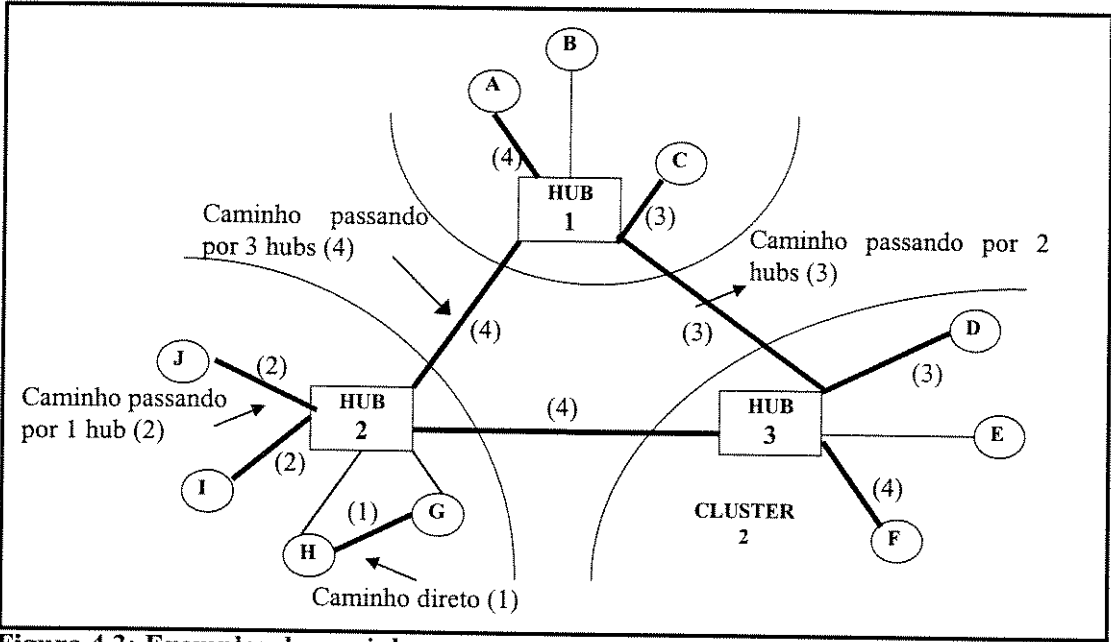


Figura 4.3: Exemplos de caminhos

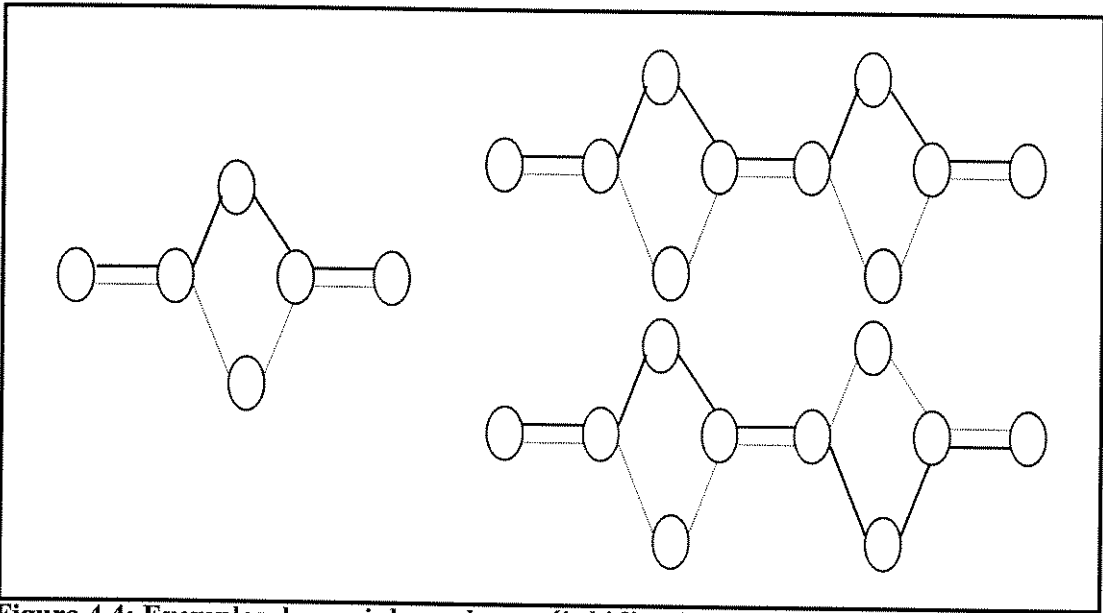


Figura 4.4: Exemplos de caminhos sobre anéis bidirecionais

Montagem do Modelo Matemático

O modelo matemático obtido é um Programa Linear Inteiro Misto, onde as variáveis inteiras correspondem à instalação ou não das configurações de equipamento candidatas (enlace ponto-a-ponto, anel e cadeia) e as variáveis reais correspondem à parcela de uma demanda escoada por cada um dos caminhos que interligam os nós geradores desta demanda. Os dados necessários para a formulação deste modelo são obtidos das duas etapas anteriores: proposta de configurações de equipamentos candidatas e geração de caminhos. Sua descrição mais detalhada será feita na seção 4.2.

Obtenção e análise de soluções

Algoritmos de programação linear inteira mista são implementados computacionalmente. Um dos softwares mais conhecidos, o qual usamos nos testes, é o CPLEX [CPLEX 89] que utiliza o procedimento do tipo árvore de busca denominado Branch & Bound. Como o número de possibilidades de busca é imenso, obtém-se uma ou mais soluções sub-ótimas. Estas soluções estão sujeitas à análise do planejador, podendo ser alteradas manualmente. Também, pode-se realizar uma nova “rodada”, na qual alguns parâmetros são setados e/ou novas restrições técnicas adicionadas, de forma a obter soluções com as características desejadas.

4.1.3.3 Seleção de Galerias/Arranjo e Dimensionamento de Fibras

Considerando a demanda de pares de fibras ópticas entre os equipamentos determinada na fase anterior, seleciona-se um conjunto de galerias na rede que garanta conectividade entre os CFs e define-se os caminhos onde serão colocados os cabos de fibras.

Nesta fase, questões relativas à confiabilidade e sobrevivenciabilidade da rede devem ser consideradas. Como por exemplo, a escolha de galerias menos propensas a inundações e a escolha de mais de um conjunto de galerias que garanta a conectividade entre CFs mais importantes. Isto permitirá a implementação de técnicas de proteção por caminhos disjuntos e também garantirá que, caso haja falha de uma ou até mesmo duas galerias, não haverá perda de conexão entre esses CFs.

4.1.3.4 Evolução

Nesta etapa, elabora-se um cronograma para a instalação imediata de equipamentos e instalações que atenderão a expansões futuras da rede. Com isso, é interessante um estudo não apenas de crescimento da demanda, mas também de se conhecer as áreas da rede onde esse crescimento se dará. Portanto, o planejamento não é feito somente para atender à demanda esperada para um dado período de planejamento, mas sim para vários períodos.

Observação: A principal diferença entre o planejamento de redes urbanas e de redes interurbanas está relacionada em se identificar onde os custos se concentram. Como em redes urbanas a maior parte dos custos está nos equipamentos, primeiro se define a malha de equipamentos. Em redes interurbanas, nas quais as distâncias são maiores e não se aproveitam aquelas galerias construídas para a Rede Externa (não existe uma “Rede Externa” com que compartilhar o uso da infra-estrutura), os custos estão basicamente concentrados nos cabos ópticos e na infra-estrutura que os suporta. Daí, para este caso, primeiro se define a malha de cabos ópticos e após isto, define-se a compra de equipamentos.

4.2 O Modelo Matemático do Enfeixamento

Como vimos neste capítulo, a metodologia de planejamento da rede de transmissão é composta por várias etapas. Apresentamos a seguir um modelo matemático para o problema do Enfeixamento, que é a etapa do planejamento na qual se define o conjunto de topologias de equipamentos de transmissão a ser implantado. A montagem do modelo matemático é a terceira etapa na solução do problema do Enfeixamento (veja diagrama de blocos da Figura 4.5), que será resolvido através de algoritmos de otimização (por exemplo: algoritmos SIMPLEX ou de Pontos Interiores para problemas de Programação Linear; Branch & Bound, Algoritmos Genéticos ou Busca Tabu para problemas de Programação Inteira). Nos testes práticos, trabalhamos com o pacote comercial denominado CPLEX, que utiliza técnicas de Branch & Bound para problemas de Programação Inteira.

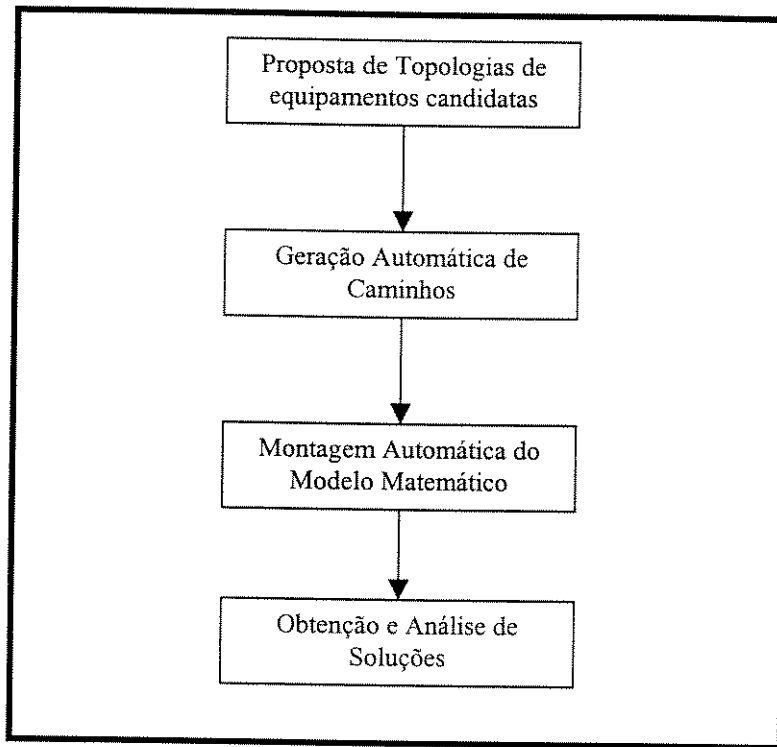


Figura 4.5: Etapas do Enfeixamento

Na etapa de Enfeixamento utiliza-se um modelo de otimização de rede com fluxo multiproduto. Um produto é definido basicamente pelos seus nós origem/destino, isto é, os produtos são demandas de 2 Mbps entre dois Centros de Fios (CFs). Os nós da rede são esses CFs. Os arcos são definidos pelos seus respectivos nós-pontas e representam enlaces de fibra óptica entre pares de equipamentos de transmissão. São associados custos e capacidades aos arcos. Cada produto ao “escoar” através dos arcos da rede utiliza um ou mais caminhos, entre seu nó origem e seu nó destino. Há duas maneiras tradicionalmente utilizadas para modelar um problema de escoamento multiproduto sobre um grafo: fluxo por arco e fluxo por caminho [Ahuja et alii 93]. Aqui abordaremos este problema utilizando a segunda alternativa: fluxo por caminho. O modelo é um Programa Linear Inteiro Misto, onde as variáveis inteiras correspondem à instalação ou não das topologias de equipamento candidatas (enlace ponto-a-ponto, anel e cadeia). Uma variável real corresponde à uma parcela de uma demanda escoada por cada um dos caminhos que interligam os nós geradores desta demanda. Os caminhos usados no modelo podem ligar diretamente dois centros de fios, passar pelo *hub* de um deles, passar pelos *hubs* de ambos, ou ainda passar por anéis e cadeias. Nos caminhos que utilizam um anel bidirecional, devemos especificar se o percurso no anel é pela esquerda ou pela

direita. Já nos caminhos que passam por anéis unidirecionais apenas um percurso é possível. A uma parcela de demanda escoada por um caminho particular denominaremos simplesmente de caminho.

4.2.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada usados na etapa de Enfeixamento são:

- informações sobre os CFs (nós da rede): nome, situação na rede (nó pendente ou estação mãe), posição geográfica;
- agrupamento ou clusterização: lista dos nós que compõem cada cluster (grupo) e seus respectivos hubs (nós mais importantes);
- matriz de demanda entre cada par de Centros de Fios (i, j) em termos de sistemas de 2 Mbps (circuitos de comutação e linhas privadas);
- topologias candidatas (enlace ponto-a-ponto, cadeia, anel bidirecional e anel unidirecional), especificando: número de nós, relação dos nós e seqüência de arcos que compõem cada candidato, nome do candidato;
- informações de custos e capacidades para cada hierarquia dos equipamentos de transmissão (OLTM, ADM, SDXC e equipamentos PDH).

4.2.2 Forma Geral do Modelo

O modelo de otimização que resolve o problema de Enfeixamento tem a seguinte forma:

Minimizar custo total das topologias de equipamentos (enlaces ponto-a-ponto + anéis bidirecionais + anéis unidirecionais + cadeias)

Sujeito a

- restrições de satisfação de demanda
- restrições técnicas de capacidade
- restrições adicionais

A função objetivo e as restrições de atendimento à demanda e de capacidade são montadas a partir das seguintes informações:

- proposta de configurações de equipamentos candidatas: ponto-a-ponto, cadeia, anéis uni e bidirecionais.
- caminhos gerados sobre as configurações acima.

As restrições adicionais, em geral, referem-se a relações entre os candidatos (pré-seleção, ordenação, imposição, etc.) determinadas pelo planejador. Também podem se referir a folgas desejadas na rede, demandas a serem protegidas, limites superiores das variáveis, etc.

Folgas de capacidade nos anéis uni e bidirecionais têm um comportamento diferente. Nos anéis bidirecionais um arco pode estar operando com sua capacidade máxima, mas outro arco pode estar com folga. Já nos anéis unidirecionais, como uma demanda entre dois nós circula por todos os arcos do anel, este possui o mesmo fluxo de demanda passando por todos os arcos. Dessa forma, o anel pode possuir a mesma quantidade de folga, em todos os seus arcos, ou estar saturado por inteiro.

4.2.3 As Equações do Modelo

O conjunto de variáveis e parâmetros usados no modelo são:

- $i \in$ conjunto de nós;
- d_{ij} – demanda entre os nós i e j ;
- c – caminho;
- β_{ij} – conjunto dos caminhos que atendem a demanda d_{ij} entre os nós i e j ;
- λ_{ij} – conjunto dos caminhos que necessitam de enlace entre i e j ;
- $X = \{X_{mnk}\}$, $Z = \{Z_{mnk}\}$, $W = \{W_{mnk}\}$, $U = \{U_{mnk}\}$ – conjunto de enlaces ponto-a-ponto, anéis e cadeias candidatas, respectivamente;

X representa um enlace ponto-a-ponto;

Z representa um anel bidirecional;

U representa um anel unidirecional;

W representa uma cadeia;

m representa o número do candidato

n representa o seu nível hierárquico:

$n = 1 \Rightarrow 34 \text{ Mbps}$

$n = 2 \Rightarrow 155 \text{ Mbps}$

$n = 3 \Rightarrow 622 \text{ Mbps}$

$n = 4 \Rightarrow 2.5 \text{ Gbps}$

k representa a quantidade de candidatos numa mesma hierarquia, ou seja, um único candidato ($k = p$) ou dois candidatos em paralelo ($k = s$).

- $Y_c \geq 0$ – número de troncos utilizados no caminho c ;
- T_{ij} – número total de troncos que necessitam de enlace entre i e j ;
- P_{ij} – conjunto de anéis bidirecionais e cadeias que passam pelo arco (i, j) ;
- ϖ_{mnk}, μ_{mnk} – custo e capacidade dos candidatos na hierarquia n ;
- $\beta_{ij,u}$ – subconjunto de caminhos pertencentes a β_{ij} que passam por um anel unidirecional;
- $T_{ij,u}$ – número total de troncos que passam por um anel unidirecional;
- $CAPT_{ij}, FLGT_{ij}$ – capacidade total e folga total do enlace entre i e j ;
- $CAPT_u, FLGT_u$ – capacidade total e folga total do anel unidirecional;

A expressão de custo total é dada por:

$$Custo\ Total = \sum_n \left(\sum_X \varpi_{mnk} \cdot X_{ijnk} + \sum_Z \varpi_{mnk} \cdot Z_{mnk} + \sum_U \varpi_{mnk} \cdot U_{mnk} + \sum_W \varpi_{mnk} \cdot W_{mnk} \right)$$

As restrições de satisfação de demanda são:

$$\sum_{c \in \beta_{ij}} Y_c = d_{ij}$$

Para as restrições técnicas de capacidade dos arcos, temos:

$$CAPT_{ij} = \sum_n [\mu_{mnk} \cdot X_{ijnk} + \sum_{P_{ij}} (\mu_{mnk} \cdot Z_{mnk} + \mu_{mnk} \cdot W_{mnk})]$$

$$CAPT_{ij} - T_{ij} = FLGT_{ij} \quad \sum_{c \in \beta_{ij}} Y_c = T_{ij}$$

Para as restrições técnicas de capacidade do anel unidirecional temos:

$$CAPT_u = \sum_n \mu_{mnk} \cdot U_{mnk} \quad \sum_{c \in \beta_{ij,u}} Y_c = T_{ij,u}$$

$$CAPT_u - T_{ij,u} = FLG_u$$

Para as restrições adicionais, temos:

$$X_{mnk} = 0/1, Z_{mnk} = 0/1, U_{mnk} = 0/1, W_{mnk} = 0/1, Y_c \geq 0$$

4.3 Comentários Adicionais

A principal dificuldade no tratamento computacional é a manipulação de um número grande de variáveis inteiras, ou seja, aquelas variáveis que caracterizam o uso das topologias de equipamentos candidatas.

O modelo apresentado não considera os custos de fibra óptica e nem custos de instalação de cabos ópticos, aplicando-se somente para redes urbanas. No caso das redes interurbanas, as distâncias entre os CFs, situados em cidades diferentes, podem ser grandes, portanto o custo da fibra óptica, o custo de instalação de cabos e de infra-estrutura são predominantes [Bortolon et alii 96]. Daí, a necessidade de algumas alterações no modelo, para que ele se aplique a essas redes.

4.4 Automatização da Montagem do Modelo

O modelo matemático pode ser gerado automaticamente a partir do pacote computacional denominado Enfeixamento. Este pacote é constituído de um conjunto de programas e possui as seguintes características:

- permite interação com o planejador durante o processo de montagem. O planejador pode fixar configurações de equipamentos, exigindo que estas estejam nas soluções obtidas. Também permite retirar configurações indesejáveis, impedindo que estas entrem nas soluções;
- permite considerar equipamentos existentes na rede;
- gera as configurações de equipamentos ponto-a-ponto candidatas;
- gera automaticamente os caminhos da rede de acordo com as configurações de equipamento propostas e a clusterização adotada;
- elabora o modelo matemático propriamente dito;
- possui saída gráfica, permitindo a visualização das soluções obtidas e facilitando a análise dessas soluções.

Para a geração automática de caminhos, o programa possui 9 algoritmos. Tais caminhos são gerados em função dos candidatos e devem ter a característica de enriquecer a qualidade da solução. Quanto mais caminhos por onde as demandas possam ser escoadas, melhores

condições de se obter boas soluções. Portanto, o número de caminhos gerados, embora limitado, deve ser significativo.

Todo este sistema foi desenvolvido tanto para estações de trabalho SUN (sistema operacional Unix), quanto para micro-computadores (Windows). Usou-se para isto a linguagem de programação C++. Maiores detalhes sobre a montagem automática do modelo podem ser encontrados em [Bortolon 96]. Outro exemplo de aplicação de processos automáticos no Planejamento de Redes de Transmissão pode ser visto em [Cosares et alii 95].

Este pacote computacional juntamente com o nosso programa de proposição de candidatos anéis foi aplicado à rede metropolitana de São Paulo e à rede de Belo Horizonte. Nosso objetivo é avaliar o impacto que a metodologia proposta para a obtenção de candidatos anéis e cadeias causa ao custo da solução final. Lembramos que, até o momento, anéis e cadeias eram propostos pelo planejador, de acordo com seu conhecimento da rede, mas nada podia garantir que estes eram candidatos razoáveis.

CAPÍTULO 5. METODOLOGIA DE PROPOSIÇÃO DE ANÉIS

A lista de anéis bidirecionais, propostos como candidatos a comporem a rede de transporte, é um dado de entrada fundamental para o problema do Enfeixamento. Automatizar a elaboração desta lista é uma tarefa bastante complexa [Slevinsky 93].

Apresentaremos aqui uma metodologia que propõe de forma automatizada configurações de anéis bidirecionais. O resultado obtido pode ainda ser submetido a uma análise pelo planejador que, soberanamente, inclui novos candidatos que não foram encontrados pelo procedimento automatizado ou retira aqueles que, por algum critério, julgar insatisfatórios no contexto da rede. Além de poder alterar a proposta final de candidatos, o planejador poderá também interferir em vários momentos do processo de elaboração dessa proposta.

Estudos de caso para várias situações típicas mostram que anéis bidirecionais são mais convenientes para situações em que a demanda é mais distribuída, característica do padrão de demanda de troncos entre centros de fios, portanto são anéis mais adequados para rede de transporte [Flanagan 90]. Anéis unidirecionais são mais convenientes para situações em que o padrão de demanda por transporte é caracterizado por uma forte concentração de demanda de todos os nós para um único nó, característica de rede de acesso [Trindade 95] [Nakamura & Tavares 98]. Como estamos considerando aqui o planejamento da rede de transporte, os anéis encontrados pela metodologia serão do tipo bidirecionais.

5.1 A necessidade de um Propositor Automático de Anéis

A análise de soluções de rede obtidas após a aplicação da ferramenta de Enfeixamento, utilizando somente propostas de anéis e cadeias sugeridas pelo planejador, mostra em geral a presença na solução final de enlaces ponto-a-ponto que poderiam formar anéis e cadeias. Mas estes não foram propostos como candidatos, e portanto, não aparecem nessas soluções como

tais. Um procedimento de pós-otimização, em que estes enlaces ponto-a-ponto são substituídos por cadeias e anéis, levam a soluções com custo menor, mais confiáveis e mais flexíveis devido a presença de um número maior de anéis. Isto nos leva a concluir que a pobreza de candidatos é um entrave na obtenção de soluções de melhor qualidade. Por outro lado, redes que possuem a característica de serem bastante conectadas, podem sugerir uma quantidade enorme de alternativas de anéis. Neste caso, o número de variáveis inteiras pode estar além da capacidade de resolução do software de otimização utilizado (no nosso caso, o CPLEX) na etapa de Enfeixamento, sendo necessário alguma forma de eliminação de candidatos ou alguma heurística de resolução. Ou seja, à medida que aumenta o número de ciclos possíveis em uma rede, aumenta a incerteza do planejador em relação a quais ciclos inserir na proposta de candidatos. Tais fatos motivou-nos na implementação de um propositor automático de anéis, compatível com a ferramenta de planejamento já existente e flexível ao permitir a interação com o planejador.

5.2 A problemática envolvida na determinação de ciclos em um grafo

Um **ciclo** elementar (anel) é um caminho fechado, dentro de uma rede, que não possui nós repetidos. Em uma rede conectada, o número máximo de ciclos distintos que podem ser formados é dado pela equação abaixo:

$$c = 2^{(S - N + 1)} ; (S \geq N), \quad \text{[Slevinsky 93]}$$

onde S e N são o número de arcos e nós da rede, respectivamente.

Tomemos como exemplo a rede de BH que é de pequeno porte e que possui 9 nós. Suponhamos uma solução para esta rede, somente com enlaces ponto-a-ponto, com 13 arcos. O número máximo de ciclos que poderão ser encontrados nesta rede é $2^5 = 32$ ciclos distintos. Se o número de arcos aumentar para 18, o número máximo de ciclos distintos aumenta para $2^{10} = 1024$. Para a rede da área metropolitana de São Paulo, considerando uma solução ponto-a-ponto obtida com 44 nós e 71 arcos (já desconsiderando os arcos na hierarquia de 34 Mbps - PDH), o número máximo de ciclos distintos que podem ser encontrados é da ordem de $2^{28} = 268.435.456$. Portanto, quanto mais conectada for a rede, a quantidade de ciclos possíveis

assume uma proporção assustadora. Daí a necessidade de buscar anéis considerando a rede dividida por hierarquia, no caso de redes de grande porte.

Nossa proposta utiliza também a rede de transmissão ponto-a-ponto para gerar anéis, ao invés de utilizar a rede de dutos como em [Grover et alii 95]. Desta forma, geramos anéis a partir de uma rede com um número menor de nós e arcos, facilitando assim a obtenção de anéis.

Estabelecemos também alguns critérios ou filtros para eliminação de candidatos. Nesta tese, escolhemos quatro critérios de seleção: número máximo de nós do anel, avaliação da eficiência de balanço do anel, avaliação da eficiência de capacidade do anel e análise de seqüências proibidas. O anel só será adicionado à proposta de candidatos se ele for aprovado por estes quatro filtros descritos a seguir.

1. Número máximo de nós do anel

O número máximo de nós permitido em um anel é uma variável de entrada do programa Busca_Ciclos e pode ser alterada pelo planejador. Este número depende do padrão de demanda da rede em estudo. Entretanto, observamos que para redes muito conectadas somente a seleção pelo número de nós pode não ser suficiente para se obter um subconjunto com um número adequado de anéis. Por isso determinamos outros três critérios de seleção.

2. Avaliação da Eficiência de Capacidade do Anel

Este critério expressa com que eficiência η_{cap} a capacidade do anel está sendo utilizada.

A eficiência de capacidade do anel é dada por [Slevinsky 93]:

$$\eta_{cap} = \frac{\sum_{i=1}^S w_i}{S \cdot \max cap}$$

onde w_i corresponde ao fluxo total de demanda no arco i do anel, S corresponde ao número de arcos do anel e $\max cap$ corresponde à capacidade máxima do anel.

3. Avaliação da Eficiência de Balanço do Anel

Este critério mede o balanceamento dos fluxos de demanda nos arcos do anel e é dado por:

$$\eta_{bal} = \frac{\sum_{i=1}^S w_i}{S \cdot \max(w_i)}$$

onde w_i corresponde ao fluxo total de demanda no arco i do anel, S corresponde ao número de arcos do anel e $\max(w_i)$ corresponde ao maior fluxo total de demanda que circula pelo anel.

Para o cálculo de η_{cap} e η_{bal} , tomamos como exemplo dois anéis bidirecionais (Figura 5.1 (a) e (b)) a 4 fibras compostos de 4 nós, com taxa de transmissão de 622 Mbps (capacidade máxima de transporte de 252 canais E1). O anel (a) tem o seguinte fluxo de demanda: $d_{AB}=230$, $d_{BC}=170$, $d_{CD}=150$, $d_{DA}=250$. O anel (b) tem o seguinte fluxo de demanda: $d_{AB}=d_{BC}=d_{CD}=d_{DA}=200$. As eficiências de capacidade e de balanço do anel (a) são respectivamente $800/1008=0.7936$ e $800/1000=0.8$. O anel (b) possui eficiência de capacidade e eficiência de balanço iguais a $800/1008=0.7936$ e $800/800=1.0$, respectivamente.

Os valores de eficiência de balanço e de capacidade mínimos a serem adotados ficam a critério do planejador e são uma variável do programa.

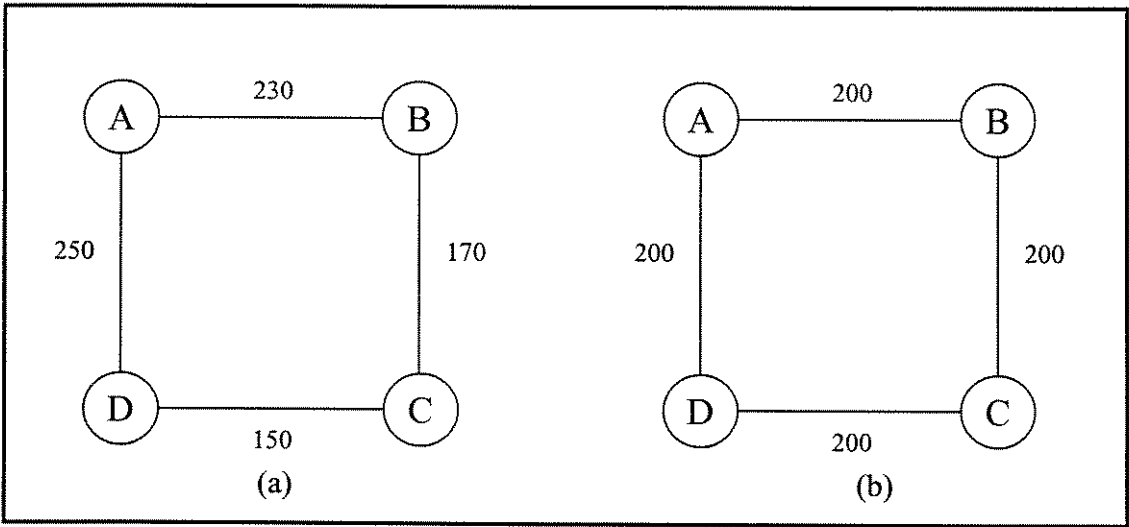


Figura 5.1: Exemplo de eficiência de balanço e de eficiência de capacidade

4. Seqüências de nós proibidas e arcos cruzados

Este último critério de seleção está relacionado com a localização geográfica dos nós da rede e com a rede de fibra óptica. Para redes de grande porte, como por exemplo a área metropolitana de São Paulo, onde as distâncias entre nós extremos da rede é muito grande, é relevante a preocupação, por exemplo, com anéis onde dois de seus nós estão localizados em pontos extremos e opostos da rede. Um anel deste tipo pode ter passado nos três critérios acima, entretanto o planejador pode considerá-lo inviável para ser implementado na prática. Outro tipo de anel que pode ser indesejável na prática, por ser mais vulnerável, é aquele cuja topologia física possui dois arcos que se cruzam. Seja o anel ABCD da Figura 5.2. Neste exemplo, os arcos AB e CD do anel encontram-se no ponto E que é uma caixa de emenda de cabos de fibra óptica. Uma falha neste ponto poderá causar a interrupção do fluxo de demanda dos nós A e D para os nós C e B. Neste caso a confiabilidade do anel é ameaçada, e a continuidade dos serviços não poderá ser garantida. Portanto, este anel não será desejável do ponto de vista operacional.

Este critério pode ser realizado de duas formas:

- automática: dada a topologia da rede de cabo de fibras, o programa determina quais os pares de arcos que não serão aceitos em um anel, porque eles se cruzam em algum ponto geográfico, e quais os nós que também não poderão fazer parte de um anel por estarem em pontos extremos da rede.
- manual: após os anéis terem sido selecionados, o planejador analisa a proposta de anéis obtida pelo programa e elimina aqueles indesejáveis na prática.

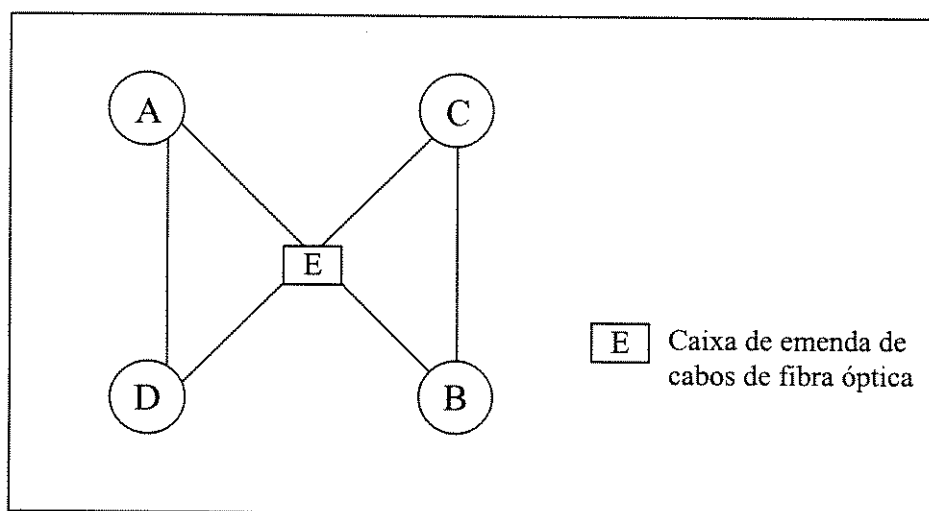


Figura 5.2: Exemplo de anel com arcos cruzados

5.3 A Metodologia Proposta

Partindo do diagrama de blocos da Figura 5.3 vamos descrever cada uma das etapas da metodologia proposta nesta tese para a obtenção de candidatos do tipo anel e cadeia.

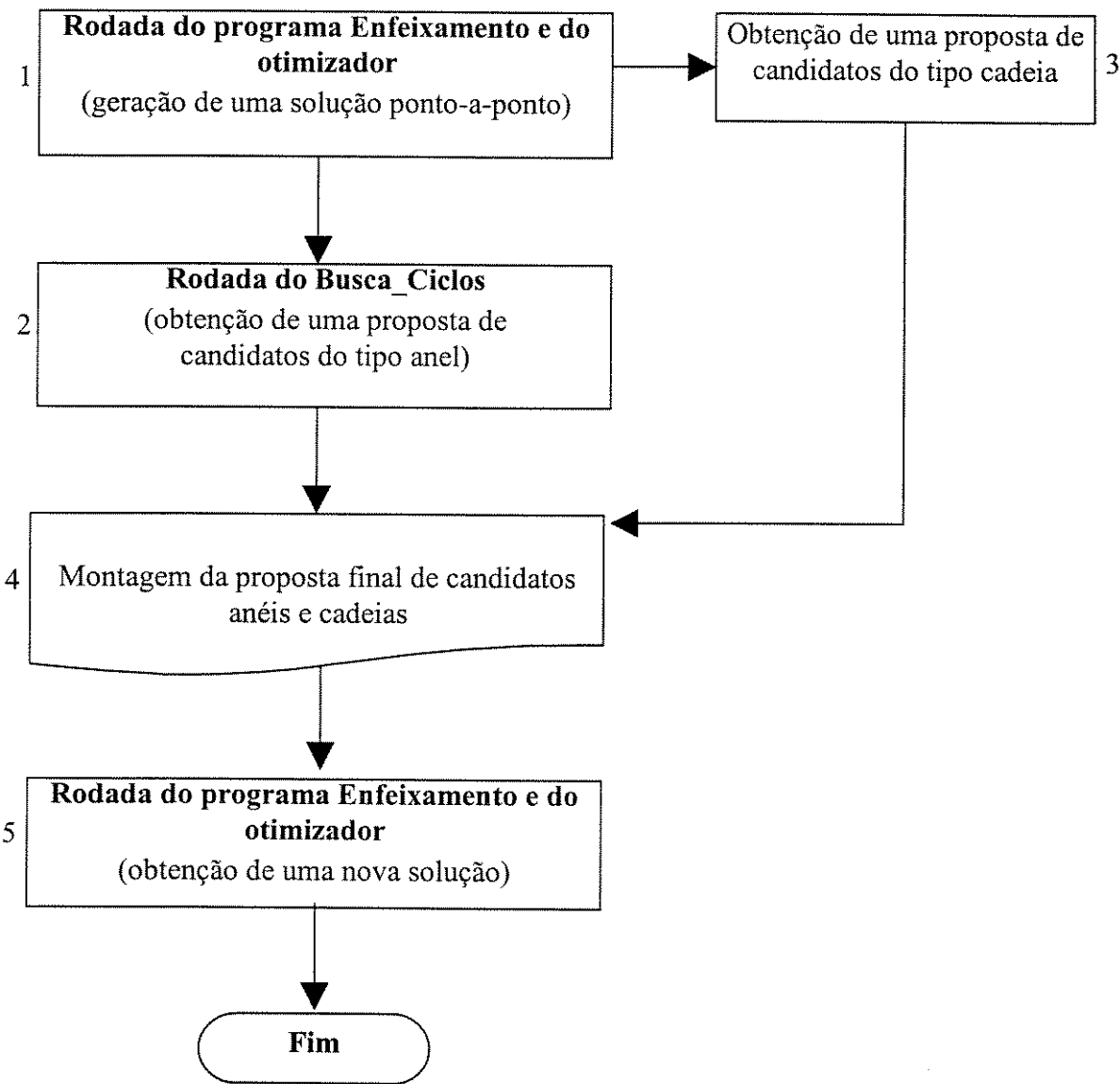


Figura 5.3: Metodologia proposta

5.3.1 Geração de uma solução ponto-a-ponto

Os anéis serão encontrados a partir de uma solução somente com enlaces ponto-a-ponto. Esta solução ponto-a-ponto é gerada pelo otimizador após a montagem do modelo matemático feita pelo programa Enfeixamento. A escolha de anéis a partir de uma **solução ponto-a-ponto** possui as seguintes vantagens:

- os anéis obtidos são constituídos a partir de enlaces ponto-a-ponto já otimizados, ou seja, já são a priori anéis cujos arcos estão bastante carregados, portanto com uma boa eficiência de capacidade.
- determina-se os arcos a partir dos quais os ciclos poderão ser formados, ou seja, reduz-se o espaço de soluções, evitando-se uma busca exaustiva através de todos os arcos que seriam possíveis se utilizássemos a rede física de cabos ópticos.

A possibilidade de se encontrar anéis e cadeias a partir de uma solução ponto-a-ponto também pode ser encontrada em [Bortolon 96]: “Todavia, justifica-se efetuar um estudo de enfeixamento usando somente enlaces ponto-a-ponto como é feito nesta seção, pois soluções deste tipo podem sugerir topologias semelhantes a anéis e cadeias, que podem ser aproveitadas em estudos seguintes”.

5.3.2 O Busca_Ciclos

O Busca_Ciclos é um programa computacional que encontra o conjunto dos anéis distintos de uma rede de nós (CFs) e arcos (enlaces ponto-a-ponto), seleciona um subconjunto dentre esses anéis com base nos critérios de avaliação descritos anteriormente, gerando uma proposta de candidatos.

Os dados de entrada são o número total de nós, o número total de arcos (enlaces ponto-a-ponto), os nós de origem e destino de cada arco, sua hierarquia (taxa de transmissão) e o fluxo total de demanda em cada arco.

Durante sua implementação, tivemos a preocupação de criar um programa que fosse compatível com a ferramenta de planejamento já existente desenvolvida pelo grupo, cujos detalhes podem ser vistos em [Bortolon 96] [Bergamaschi 96] [Quaglia 97].

Há três opções para a montagem da proposta de candidatos do tipo anel.

Opção 1:

Encontra-se todos os anéis distintos da rede formada pelos arcos em todas as hierarquias.

Esta opção só deve ser escolhida quando se tem uma rede pequena ou pouco conectada, com poucos arcos em relação ao número de nós, onde a quantidade de ciclos formados não é impraticável. A utilização dos critérios de eficiência de capacidade e eficiência de balanço é inadequada para este caso, pois os arcos da rede possuem diferentes capacidades de transmissão. Conseqüentemente, anéis obtidos nesta rede podem, eventualmente, ser formados por arcos com baixa utilização. Já os critérios de número máximo de nós e avaliação das rotas físicas podem ser utilizados, ficando a critério do planejador a aplicação ou não destes.

Opção 2:

A rede da solução ponto-a-ponto é dividida por hierarquia e o algoritmo é aplicado para cada uma delas. Por exemplo, se a solução contém enlaces nas hierarquias de 34 Mbps, 155 Mbps, 622Mbps e 2,5 Gbps, esta rede será dividida em subredes contendo apenas enlaces numa mesma hierarquia, ou seja, serão determinadas três subredes compostas por arcos a 155 Mbps, 622 Mbps e 2,5Gbps. Para cada subrede, encontra-se todos os anéis contidos nela. Cada anel encontrado é avaliado pelos critérios de seleção adotados. Somente os anéis aprovados em todos os critérios serão adicionados à lista de candidatos.

Para redes grandes ou bastante conectadas, este tipo de opção é a mais apropriada.

Opção 3:

Adiciona-se a todos os “nós pontas” (nós conectados a somente um outro nó) de uma subrede numa determinada hierarquia, arcos da hierarquia imediatamente inferior que estão ligados a estes nós, de modo que eles deixem de ser “pontas”, onde for possível. Na subrede resultante, encontra-se todos os ciclos. Isto é feito para todas as hierarquias exceto, obviamente, para a hierarquia a 155 Mbps. A proposta final é formada pelos ciclos encontrados em cada subrede resultante e aprovados pelos critérios de seleção. Por exemplo, numa subrede formada apenas pelos arcos da hierarquia de 2.5 Gbps, acrescenta-se a todos os “nós pontas” desta subrede, arcos da hierarquia de 622 Mbps que estão ligados a estes nós. Encontra-se todos os anéis desta subrede resultante e para cada anel encontrado, aplica-se a avaliação. Para a subrede com arcos a 10 Gbps e 622 Mbps o procedimento é o mesmo. O diagrama de blocos da Figura 5.4 mostra as 3 opções dentro da metodologia proposta.

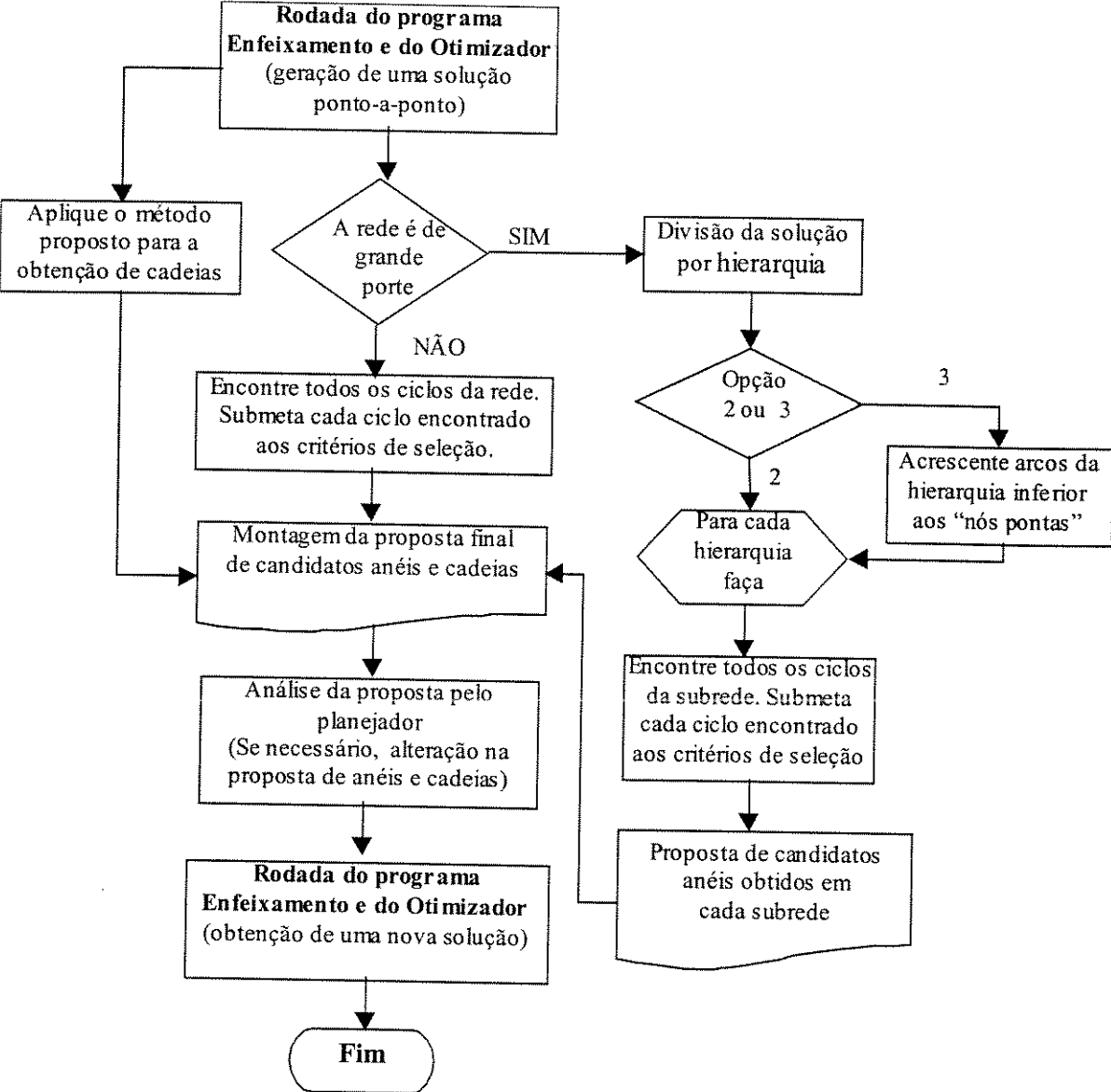


Figura 5.4: Metodologia proposta com as 3 opções do Busca_Ciclos

Observações:

- As avaliações do número de nós, da eficiência de balanço e da eficiência de capacidade do anel são realizadas nas opções 2 e 3, e estão automatizadas. O critério das seqüências de nós proibidas e de arcos cruzados é aplicado manualmente pelo planejador em qualquer uma das opções escolhidas.
- O Busca_Ciclos também pode encontrar anéis a partir de soluções que contenham anéis e cadeias além de enlaces ponto-a-ponto. Contudo, esses anéis e cadeias são desconsiderados pelo programa e os ciclos são procurados na subrede da solução formada somente pelos enlaces ponto-a-ponto.
- As opções 1 e 3 não devem ser escolhidas para redes muito conectadas.
O algoritmo do Busca_Ciclos será descrito no item 5.4.

5.3.3 Proposta de candidatos do tipo cadeia

As **cadeias** são determinadas a partir da solução ponto-a-ponto gerada pelo otimizador e são adicionadas à proposta de anéis. A metodologia utilizada aqui para a determinação das cadeias é descrita no item 5.5.

5.3.4. Montagem da proposta final de candidatos do tipo anel e cadeia

Após a obtenção das cadeias e anéis candidatos, estes são unificados e uma nova proposta é obtida para o problema de Enfeixamento.

Neste momento o planejador pode analisar a lista de candidatos resultante e fazer alterações que julgar serem necessárias, podendo adicionar anéis e cadeias que não foram sugeridos pelo proponente ou retirar aqueles que considerar indesejáveis de acordo com algum critério estabelecido.

5.3.5. Obtenção de uma solução com a nova proposta de candidatos

Com a proposta de candidatos resultante, um novo modelo matemático é gerado e uma nova solução de rede é obtida.

5.4 O algoritmo do Busca_Ciclos

Descrevemos neste item o algoritmo Busca_Ciclos que se baseia na construção de uma árvore de busca na qual a trajetória do nó raiz até uma folha representa um caminho que contém um ciclo no grafo original (rede¹). Utilizamos uma técnica de exploração de grafo chamada Busca Primeiro em Profundidade (DFS- *Depth-First Search*) [McHugh 90], considerada eficiente para este tipo de problema.

Iniciamos definindo os termos utilizados no algoritmo para, em seguida, apresentá-lo.

5.4.1 Definições

Grafo –um grafo $G(V, E)$ consiste de um conjunto V de vértices e um conjunto E de arcos.

Grafo conectado – Um par de vértices u e v em um grafo são conectados se, e somente se, existe um **caminho** partindo de u em direção a v . Um grafo G é dito conexo se, e somente se, cada par de vértices em G são conectados, isto é, se existe pelo menos um caminho entre cada par de vértice do grafo. Um grafo não conexo pode ser decomposto em vários componentes conexos.

Caminho – sequência de vértices² da rede, sem repetição, conectados por arcos.

Caminho fechado –caminho cujo último arco liga o primeiro e o último vértice da sequência.

Ciclo - caminho fechado, contendo no mínimo 3 vértices.

Árvore–Árvore é um grafo conexo que não possui ciclos. Portanto, entre dois nós distintos da árvore, há somente um caminho entre eles.

Raiz- podemos arbitrar um nó qualquer da árvore como nó raiz.

Nó pai e nó filho- O nó raiz é um nó pai, qualquer nó ligado ao nó raiz será um nó filho do nó raiz. Estes nós, por sua vez, serão pais de nós ligados a eles, exceto o nó raiz, e assim por diante. De acordo com esta definição o nó raiz é o único nó a não ter pai. Um nó divide a árvore em nós antecessores e sucessores. Chamamos respectivamente de ancestrais e descendentes.

Folhas – São os nós extremos da árvore, não possuem filhos e são interligados ao grafo por um único arco.

Trajetoária – caminho que parte da raiz e vai até uma folha.

¹ São eliminados desta rede os nós pontas - nós conectados à rede por um único arco.

² Denominamos vértices os nós da rede e reservamos o termo nó para o uso na árvore de busca.

Ramificação - é um segmento de trajetória. Duas ou mais trajetórias podem ter, a partir da raiz, um primeiro segmento em comum. Os caminhos se diferenciam a partir do nó que finaliza esse primeiro segmento. É definida uma ramificação como o segmento de trajetória entre este nó finalizador e a folha da trajetória.

Retorno (*backtracking*) – volta a um nó de árvore já explorado. É a volta realizada em uma trajetória já explorada para a verificação da existência de outras ramificações, em nós anteriores da árvore, e conseqüente exploração destas.

Árvore de busca- Utilizaremos o conceito de árvore de busca para obtenção de ciclos em uma rede. Ao primeiro nó da árvore de busca, que será também sua raiz, será dado um valor que é o nome de um vértice arbitrário da rede. Nós distintos da árvore podem estar representando um mesmo vértice da rede. Por isso usamos este conceito de valor, onde cada nó da árvore recebe como valor o nome do vértice da rede que ele representa. Portanto, nós distintos da árvore possuem o mesmo valor quando representam o mesmo vértice da rede.

- **Variáveis utilizadas**

- **x**: corresponde ao valor de um nó da árvore que é dado pelo nome de um vértice da rede.

- **“Lista de vértices”**: A busca dos ciclos é realizada em cada trajetória da árvore. Para isto, os valores dos nós de um trajetória são armazenados numa “lista de vértices” visitados na rede na ordem em que aparecem nesta trajetória. Quando a folha é visitada, a “lista de vértices” indica a existência de um ciclo. Um ciclo na rede é identificado porque o valor da folha coincide com o valor de outro vértice dessa lista, ou seja, esses dois nós distintos da árvore representam o mesmo vértice na rede.

- **“Lista vértices_ciclo”**: Após a identificação de um ciclo na lista de vértices, os vértices que formam o ciclo são armazenados na “lista vértices_ciclo” aonde serão posteriormente reordenados segundo algum critério estabelecido.

- **“Lista de ciclos”**: Quando um ciclo é encontrado, ele é avaliado pelos critérios de seleção e, se aprovado, é armazenado numa “lista de ciclos”; a menos que já tenha aparecido em outra trajetória. Ao final da busca todos os ciclos distintos da rede estarão contidos nesta lista.

5.4.2 Estratégia de busca baseada em árvore

Os dados de entrada necessários para a execução do algoritmo são o conjunto de vértices (CFs) e o conjunto de arcos (enlaces ponto-a-ponto) da rede, as hierarquias e o fluxo total de demanda em cada arco. O diagrama de blocos da Figura 5.5 apresenta o algoritmo e sua explicação é feita logo a seguir.

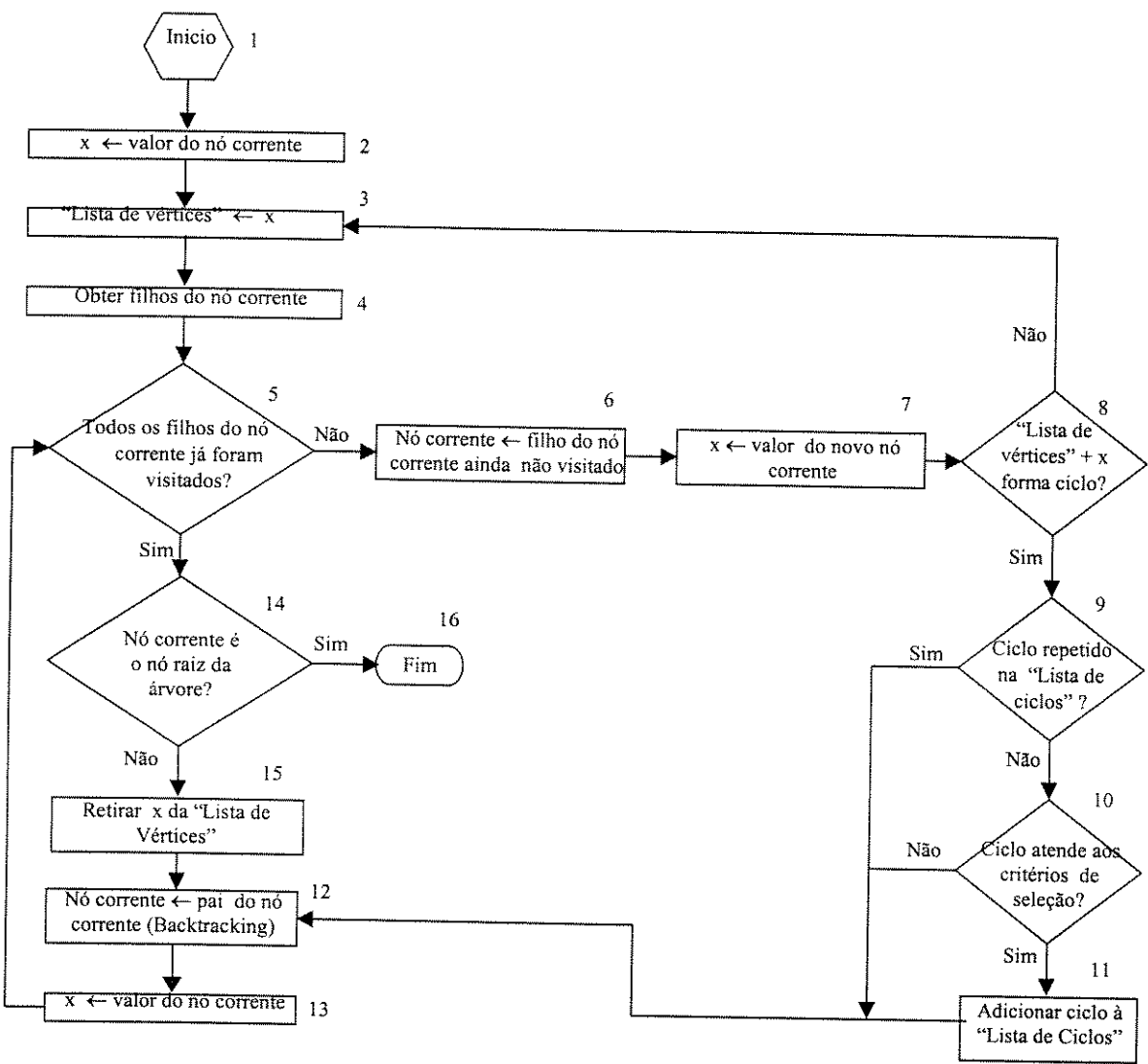


Figura 5.5: O algoritmo Busca_Ciclos

Para cada componente conexo da rede efetue o seguinte procedimento:

1. A partir de um nó raiz será construída uma árvore utilizando um procedimento de busca primeiro em profundidade (DFS – Depth First Search). Inicialmente é atribuído ao nó raiz um valor que corresponde ao nome de um vértice arbitrário da rede. Este nó raiz será o nó corrente.
2. O valor da raiz (nó corrente) é armazenado na variável x .
3. O conteúdo de x é adicionado à “Lista de vértices”, ou seja, inicialmente esta lista recebe o valor da raiz da árvore. Nos passos seguintes será construída uma trajetória por vez, da raiz até uma folha, e o valor de cada nó da trajetória será colocado, um a um, na lista de vértices.
4. O valor do nó corrente corresponde a um vértice V da rede. Verifica-se neste passo quais vértices da rede estão ligados ao valor do nó corrente (vértice V). O número de filhos do nó corrente será igual ao número de vértices ligados ao vértice V , exceto o vértice que corresponde ao valor do pai do nó corrente. Cada um deles corresponderá ao valor de cada filho do nó corrente.
5. Verifica-se se todos os filhos do nó corrente N já foram visitados, de modo que nenhuma ramificação, a partir de N , deixe de ser explorada. Se sim, vá para 14, caso contrário, siga em frente.
6. Escolhe-se um dos filhos de N , ainda não visitado, para visitar. Este filho passa ser o novo nó corrente. Esta ação caracteriza uma visita a este nó da árvore.
7. O valor deste novo nó corrente é armazenado em x .
8. À medida que se aprofunda na árvore, deve-se verificar se houve a formação de um ciclo na rede. Sabe-se que, se na lista de vértice o valor do nó corrente coincidir com o valor de um nó ancestral um ciclo aparece neste ramo. Observe que não necessariamente todos os vértices contidos na lista formam um ciclo com x . Por exemplo: seja a lista de vértices = $\{1, 3, 5, 7\}$ e $x=3$. O ciclo formado neste caso é: 3-5-7-3. O segmento 1-3, apesar de estar contido na lista de vértices, não participa do ciclo. Caso um ciclo ainda não tenha sido encontrado volte ao passo 3.
9. Encontrado um ciclo é analisada a sua unicidade, pois um mesmo ciclo pode ser encontrado em diferentes trajetórias. Uma maneira eficiente para a realização desta análise é utilizar uma regra de ordenação de vértices do ciclo. Ainda nesta seção, são apresentadas maiores considerações sobre esta regra de ordenação. Se o ciclo já estiver contido na

“Lista de ciclos ” ele não é adicionado à lista, portanto vá para o passo 13. Caso contrário, siga em frente.

10. O ciclo é distinto de todos os outros contidos na lista de ciclos, mesmo assim ele deve ser avaliado pelos quatro critérios de seleção apresentados anteriormente. Se o ciclo não atender aos quatro critérios de seleção, vá para o passo 13, caso contrário, siga em frente.
11. O ciclo encontrado não está presente na “Lista de ciclos” e atende a todos os critérios de seleção, portanto deve ser adicionado à esta lista.
12. Volta-se ao nó pai do nó corrente, este passa a ser o novo nó corrente. O backtracking acontece em dois momentos:
 - Quando há a formação de um ciclo. Neste caso o nó corrente é considerado uma folha (nó sem filhos), por isso a investigação neste nó é encerrada e deve-se voltar ao nó anterior.
 - Todos os filhos do nó corrente N já foram visitados. Isto significa que todas as ramificações a partir de N foram exploradas, bem como as possibilidades de formação de novos ciclos através dele.
13. O valor do novo nó corrente é armazenado em x. Vá para 5.
14. Verifica-se a possibilidade de “retorno” no caminho de busca. Todos os filhos do nó corrente já foram visitados, isto significa que todas as trajetórias abaixo deste nó foram exploradas, portanto deve-se realizar um retorno na árvore de busca a fim de procurar ciclos em outras ramificações. Este retorno só não será possível quando o nó corrente é o nó raiz da árvore de busca. Neste caso, a exploração nesta árvore de busca estará finalizada e deve-se ir ao passo 16. Se o retorno for possível, siga em frente.
15. Retire x da “Lista de vértices”. Vá passo 12.
16. Fim do procedimento de busca. Todos os ciclos distintos da rede que satisfazem aos critérios de seleção estarão contidos na “Lista de ciclos”.

Verificação da unicidade de um ciclo

O bloco número 9 da Figura 5.5 pode ser subdividido em três etapas mostradas na Figura 5.6.

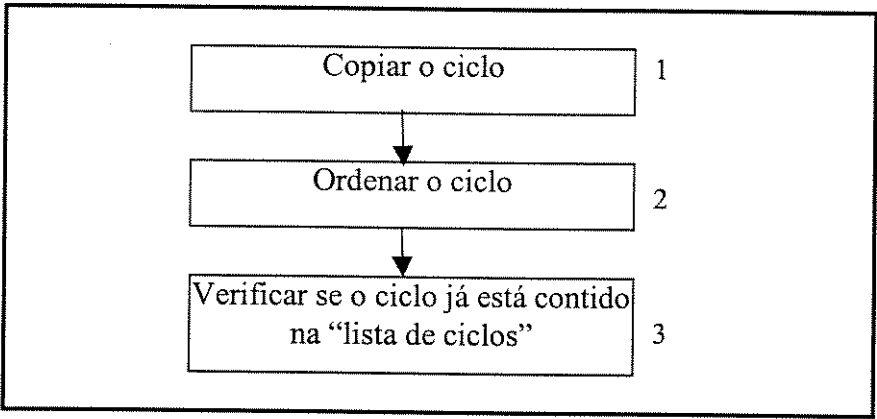


Figura 5.6: Etapas para verificação da unicidade de um ciclo

Etapa 1: Copiar o ciclo

Quando um ciclo é descoberto, este é copiado da “lista de vértices” para uma “lista vértices_ciclo”.

Etapa 2: Ordenar o ciclo

Nesta lista, o ciclo passará por uma reordenação de seus vértices de acordo com uma regra preestabelecida, a fim de facilitar a comparação para a eliminação dos ciclos repetidos. Essa regra diz que um ciclo é identificado unicamente rotacionando os elementos da “lista vértices_ciclo” de modo que o vértice de menor valor seja o primeiro da lista. Na sequência tem-se seu vizinho também de menor valor e o restante dos vértices do ciclo.

Etapa 3: Verificar se o ciclo já está contido na “lista de ciclos”

Se o 1º vértice de um ciclo da “lista de ciclos” não coincide com o 1º vértice do ciclo em teste, estes ciclos são diferentes. Para os ciclos que coincidem o 1º vértice, se falhar o mesmo teste para o 2º vértice significa que estes ciclos também são diferentes e assim por diante. Este procedimento diminui consideravelmente o número de testes na comparação dos ciclos.

5.5 Metodologia proposta para a determinação de cadeias

A metodologia sugerida determina cadeias a partir da solução ponto-a-ponto gerada pelo otimizador. O algoritmo é composto pelos seguintes passos (veja Figura 5.7):

1. Divida a rede ponto-a-ponto inicial em subredes para todas as hierarquias SDH existentes na rede.
2. Para cada subrede faça:
 - 2.1 Verifique se a subrede resultante é um grafo disjunto (não conexo).
 - 2.2 Para cada parte conexa da subrede, faça:
 - 2.2.1 Estabeleça uma lista de “nós pontas” (ou seja, nós conectados a somente um outro nó).
 - 2.2.2 Obtenha todas as combinações 2 a 2 com os nós desta lista.
 - 2.2.3 Para cada combinação obtida faça:
 - 2.2.3.1 Encontre o caminho mínimo entre os dois nós. Se houver mais de um caminho mínimo, escolha aquele formado por nós que tenham maior interesse de demanda com os “nós pontas”.
 - 2.2.3.2 Determine a cadeia. Uma cadeia é formada pelos dois “nós pontas” mais os nós intermediários que pertencem ao caminho mínimo entre os “nós pontas”.
 - 2.2.3.3 Aplique os critérios de avaliação: número máximo de nós, η_{cap} , η_{bal} e topologia física. Por exemplo, elimine as cadeias cuja topologia física inviabilize sua implementação na prática.
 - 2.2.3.4 Se aprovada nos critérios de avaliação, adicione a cadeia a uma “lista de cadeias”.
3. Obtenha a proposta de candidatos com as cadeias contidas na “lista de cadeias”.

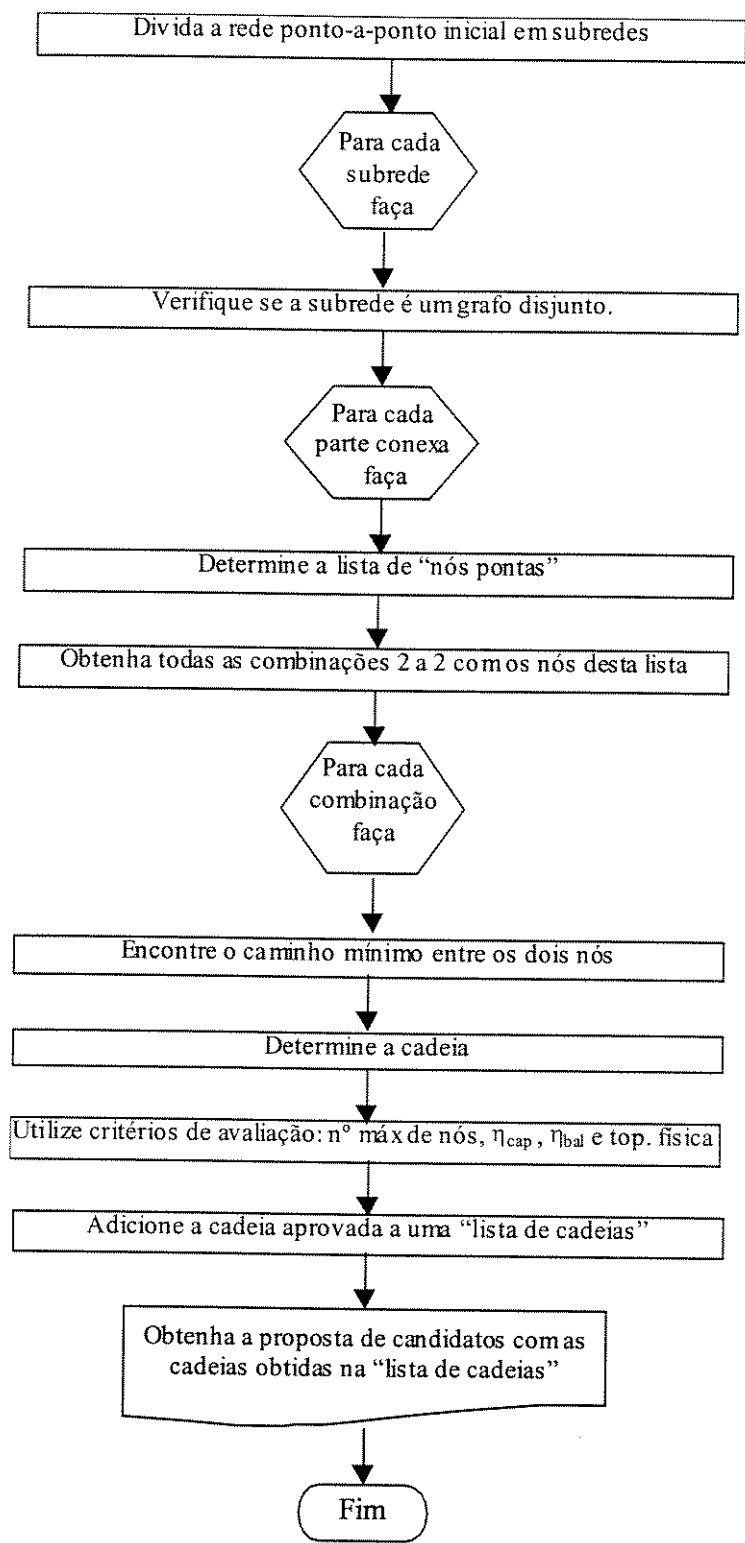


Figura 5.7: Metodologia proposta para a determinação de topologias do tipo cadeias

Observações:

- Nesta metodologia, a determinação das cadeias é feita em cada subrede, independente do porte da rede.
- Fica a critério do planejador a escolha de outras cadeias. Por exemplo, o planejador pode propor cadeias em que nenhum dos seus nós extremos são nós “pontas” da rede ponto-a-ponto.
- Uma outra alternativa é obter cadeias a partir de anéis. Neste caso, elimina-se um (ou mais) arco(s) do anel, por exemplo, o arco com menor fluxo ou o arco cuja rota física seja indesejável na prática (por exemplo, arco que cruza com um outro).
- Caso se queira enriquecer ainda mais a proposta de anéis, pode-se ainda candidatar as cadeias como anéis. Neste caso, fecha-se a cadeia conectando-se seus dois “nós pontas”.
- A utilização dos critérios de avaliação, que acarreta uma diminuição na quantidade total de cadeias a ser inserida à proposta, favorece a performance do Branch & Bound com relação ao tempo de rodada. É sabido que, com o aumento do número de variáveis inteiras, o tempo de execução do algoritmo aumenta de forma exponencial devido ao caráter combinatorial típico desses problemas de Programação Inteira. Em [Bergamaschi 96] foi implementado um método heurístico denominado “RODAUT” que auxilia o Branch & Bound na resolução de problemas com grande número de variáveis inteiras. A idéia central do “RODAUT” é limitar este número a cada execução do otimizador. Por exemplo, se estivermos resolvendo um problema com 300 variáveis inteiras, podemos, numa primeira execução, seleccionar apenas 60, enquanto as outras 240 serão relaxadas, ou seja, poderão assumir valores reais. Numa segunda execução, outras 60 serão seleccionadas como inteiras e o processo é repetido até que todas as variáveis façam parte ou não da solução final, ou seja, até que elas sejam fixadas definitivamente em 1 (entra na solução) ou 0 (não entra na solução). Dessa forma, ao invés de se realizar apenas uma execução do otimizador com todas as variáveis inteiras, efetuam-se várias execuções, seleccionando-se, a cada rodada, apenas algumas daquelas, fazendo com que o otimizador opere com um número limitado de variáveis inteiras a cada execução.

CAPÍTULO 6. APLICAÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA EM REDES REAIS

Com o objetivo de demonstrar a eficiência e a aplicabilidade da metodologia de proposição de anéis e cadeias, bem como os resultados que essa metodologia pode proporcionar ao melhorar a proposta de candidatos, dois estudos de caso foram elaborados. Para o primeiro estudo de caso foi escolhida uma rede de pequeno porte, a rede de Belo Horizonte (BH). O segundo estudo de caso foi feito na rede da Área Metropolitana de São Paulo (AMSP), considerada de grande porte.

Os dados de entrada necessários à etapa do Enfeixamento para a rede de Belo Horizonte e para a rede da AMSP são: relação dos nós da rede, matriz de demanda, custo dos equipamentos SDH, “clusterização” e proposta de candidatos (enlaces ponto-a-ponto, anéis e cadeias) e são apresentados a seguir para cada uma das redes.

Anéis unidirecionais não foram considerados, estudos anteriores demonstraram sua inadequação para redes de transporte [Flanagan 90]. Entretanto, nada impede que sejam adicionados à proposta de candidatos já que para o modelo de otimização, apresentado no capítulo 4, os dois tipos de anéis (uni ou bidirecional) podem ser utilizados pela rede de transporte. Em [Formigoni 95] o autor propõe um modelo matemático para o planejamento de redes de acesso para as quais anéis unidirecionais são mais interessantes.

Equipamentos SDXC ainda não são considerados no modelo de otimização devido a sua variedade de custos e configurações.

Os dados básicos para os equipamentos são mostrados na Tabela 6.1.

A confiabilidade e/ou segurança da rede são obtidos através da duplicação de equipamentos e/ou o lançamento de cabos ópticos em rotas disjuntas. Um estudo sobre sobrevivenciabilidade e confiabilidade de redes SDH pode ser encontrado em [Mello 96].

Aqui, para esta análise de segurança da rede estamos considerando anéis bidirecionais a 4 fibras com rotas disjuntas dos cabos ópticos. No caso de anéis bidirecionais a 2 fibras, para se obter 100% de proteção das demandas que trafegam pelo anel, deve-se permitir que os

arcos do anel sejam carregados até 50% de sua capacidade. Por exemplo, um anel a 622 Mbps deve ter no máximo 126 canais de 2 Mbps em cada um de seus arcos para permitir 100% proteção da demanda que circula pelo anel. Para 100% de proteção contra falhas em um nó do anel, é necessário, além de utilizar rotas disjuntas dos pares de fibra, a duplicação de equipamentos em cada nó do anel.

Uma alternativa para atribuir maior segurança às cadeias seria fechá-las. No caso em que não existe rota disjunta de fibras ópticas para o fechamento, este pode ser feito adicionando um arco passando por uma mesma rota de dutos, daí obtemos um “flat ring”. Esta topologia só oferece proteção contra falha de equipamento, ou seja, ela não protege contra corte de cabos ópticos.

A relação de capacidades e custos relativos dos equipamentos é mostrada na Tabela 6.2

Equipamento	Capacidade (canais de 2 Mbps)	Custo (unidade monetária - \$)
OLTM 34 Mbps	16	11
OLTM 155 Mbps	63	30
OLTM 622 Mbps	252	60
OLTM 2.5Gbps	1008	135
ADM bi 155Mbps	63	50
ADM bi 622Mbps	252	90
ADM bi 2.5Gbps	1008	210

Tabela 6.1 : Capacidades e custos dos equipamentos.

Hierarquia	34 Mbps	155 Mbps	622 Mbps	2.5 Gbps
capacidade	1	4	16	64
custo par OLTMs	1	2.73	5.45	12.27
custo ADM bi	--	2.27	4.09	9.55

Tabela 6.2: Capacidades e custos relativos dos equipamentos.

Para cada rede (AMSP e BH) foram realizados cinco tipos de testes com base nos dados de entrada mencionados acima. No teste 1 utilizou-se uma proposta de candidatos do tipo anel e cadeia elaborada pelo planejador. Os testes 2, 4 e 5 foram realizados com proposta de candidatos obtida pela metodologia. No teste 3 foi utilizada uma proposta que une os candidatos do planejador mais os candidatos obtidos pela metodologia.

6.1 Estudo da Rede de Belo Horizonte

6.1.1 Apresentação da Rede

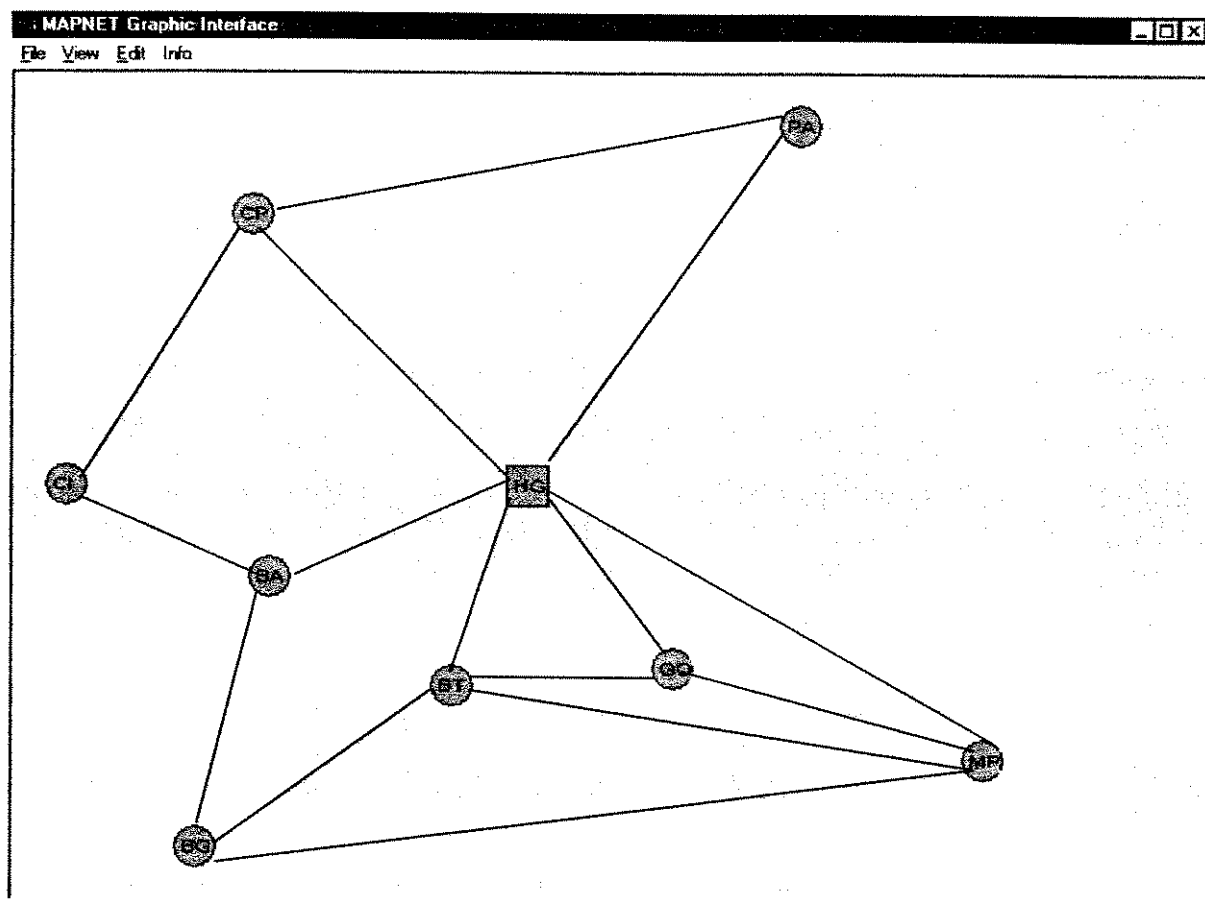
A rede de Belo Horizonte é formada por 9 Centros de Fios (HG, MP, GO, BG, CI, PA, BT, CP e BA) e possui demanda total de 1721 canais de 2 Mbps. Como a maior parte de sua demanda está centralizada em um só ponto da rede, HG, este centro de fios (CF) foi escolhido como hub único da rede. A matriz de demanda entre pares e a soma das demandas (SD*) para cada um dos 9 CFs são mostrados na Tabela 6.3.

	HG	MP	GO	BG	CI	PA	BT	CP	BA
HG	--	190	140	130	90	95	70	100	90
MP	190	--	130	80	70	70	80	15	10
GO	140	130	--	60	30	20	35	10	5
BG	130	80	60	--	32	28	30	10	10
CI	90	70	30	32	--	32	18	8	5
PA	95	70	20	28	32	--	16	12	0
BT	70	80	35	30	18	16	--	0	0
CP	100	15	10	10	8	12	0	--	0
BA	90	10	5	10	5	0	0	0	--
SD*	905	625	430	380	285	273	249	155	120

Tabela 6.3: Matriz de demanda a 2Mbps e soma das demandas de cada CF da rede de BH.

A topologia da rede é apresentada na Figura 6.1 que mostra a localização geográfica dos 9 CFs e a interligação desses com cabos de fibras ópticas.

No Tabela 6.4 estão relacionados os 6 anéis bidirecionais e as 2 cadeias sugeridos pelo planejador. Os enlaces ponto-a-ponto foram candidatados automaticamente pelo programa Enfeixamento: um candidato para cada demanda superior a 3 canais de 2 Mbps, gerando um total de 32 candidatos ponto-a-ponto. Foi adotado um único agrupamento (ou “cluster”), com o nó HG como hub.



**Figura 6.1: Localização geográfica dos CFs da Rede de Belo Horizonte
Rede de Cabos de Fibras**

6.1.2 Testes realizados

Foram realizados cinco testes descritos a seguir. O teste 1 é o de referência com relação aos custos.

Teste 1: Utilizando proposta de candidatos anéis e cadeias sugerida pelo planejador.

Teste 2: Utilizando a proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia.

Teste 3: Utilizando a proposta de candidatos obtidos pela metodologia mais aqueles sugeridos pelo planejador.

Teste 4: Utilizando como candidatos os anéis obtidos pela metodologia e anéis obtidos pelo fechamento das cadeias. Neste teste, somente topologias em anel são candidatas.

Teste 5: Utilizando proposta de candidatos da metodologia (anéis e cadeias) mais anéis obtidos pelo fechamento das cadeias. Todas as topologias (ponto-a-ponto, anéis e cadeias) são candidatas.

Teste 1: Utilizando proposta de candidatos anéis e cadeias sugerida pelo planejador

A proposta de anéis e cadeias foi fruto de um trabalho manual de planejamento baseado apenas na experiência do planejador [Quaglia 97], ou seja, nenhuma ferramenta de software foi utilizada para a sua elaboração. Esta proposta é constituída por 6 anéis e 2 cadeias (veja Tabela 6.4).

A formulação matemática contém 104 variáveis inteiras e 600 variáveis reais positivas (caminhos) para escoamento das demandas.

A Figura 6.2 ilustra a solução de rede de menor custo obtida e os resultados podem ser vistos na Tabela 6.5. Nesta solução entraram 5 enlaces ponto-a-ponto (todos em 622 Mbps), 2 anéis (B4 e B8, ambos na hierarquia de 622 Mbps) e nenhuma cadeia. O custo da solução foi \$1230.

A capacidade total da rede foi obtida somando-se as capacidades individuais de cada topologia da solução. A folga da rede foi 23,41% de sua capacidade total.

Tipo	Nome	CFs
Anel bidirecional	B4	HG CI PA
	B5	CI CP PA HG
	B6	CP PA HG
	B7	CI CP HG
	B8	HG MP GO BG
	B9	HG MP BG
Cadeia	C11	CI HG BG
	C17	PA HG MP

Tabela 6.4: Anéis e cadeias propostos pelo planejador para a Rede de Belo Horizonte.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$1230	2	0	5	3024	708	23,41

Tabela 6.5- Resultados obtidos no teste 1.

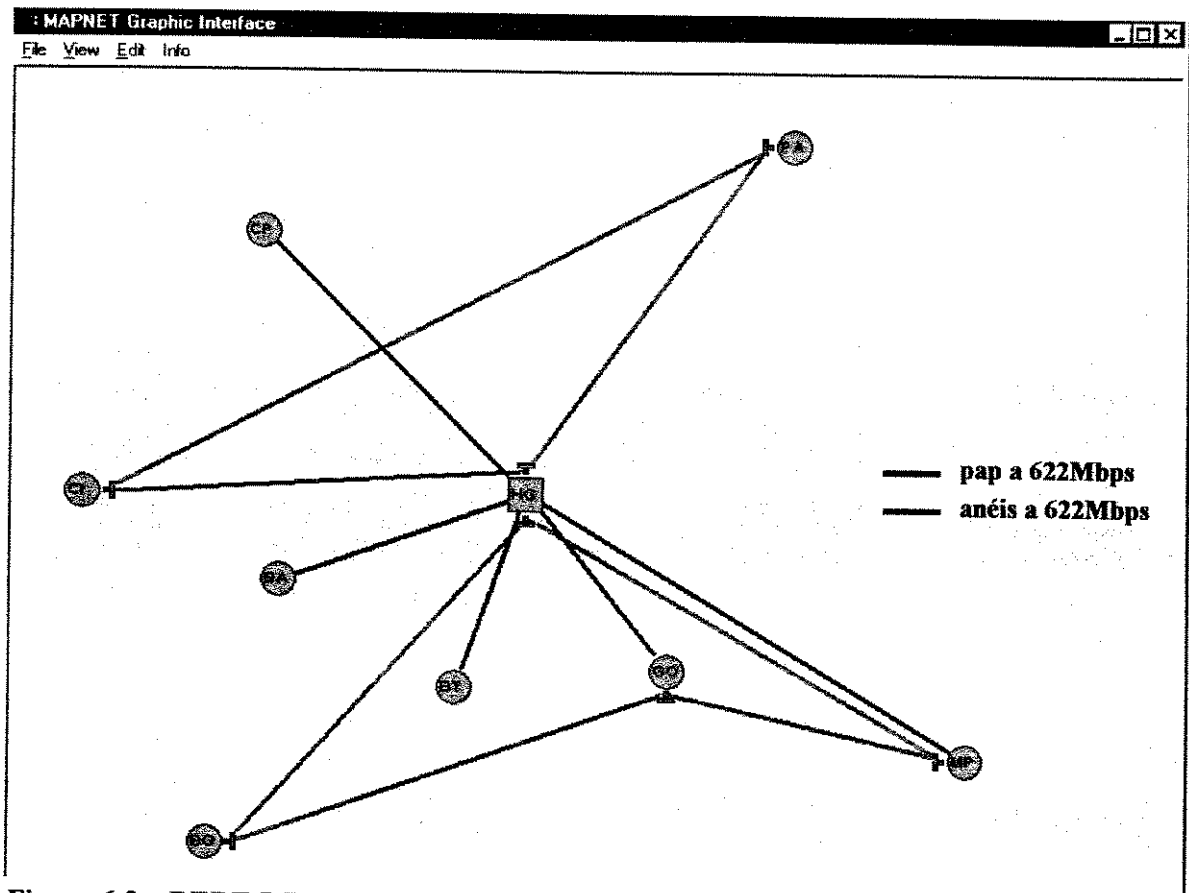


Figura 6.2: REDE DE BELO HORIZONTE
Solução obtida com candidatos anéis e cadeias propostos pelo planejador.

Teste 2: Utilizando a proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia

Para a determinação da proposta de candidatos do tipo anel e cadeia foi utilizada a metodologia descrita no Capítulo 5. Os passos realizados para a obtenção da solução podem ser vistos no diagrama de blocos da Figura 5.3. A proposta de candidatos anéis e cadeias obtida pela metodologia foi baseada na rede ponto-a-ponto da Figura 6.3 e é apresentada na Tabela 6.6. Cada um dos anéis e cadeias é candidatado nas várias hierarquias possíveis, como determinado pelo programa Enfeixamento. Conforme mostra a tabela, foram propostos 4 anéis e 16 cadeias pela metodologia.

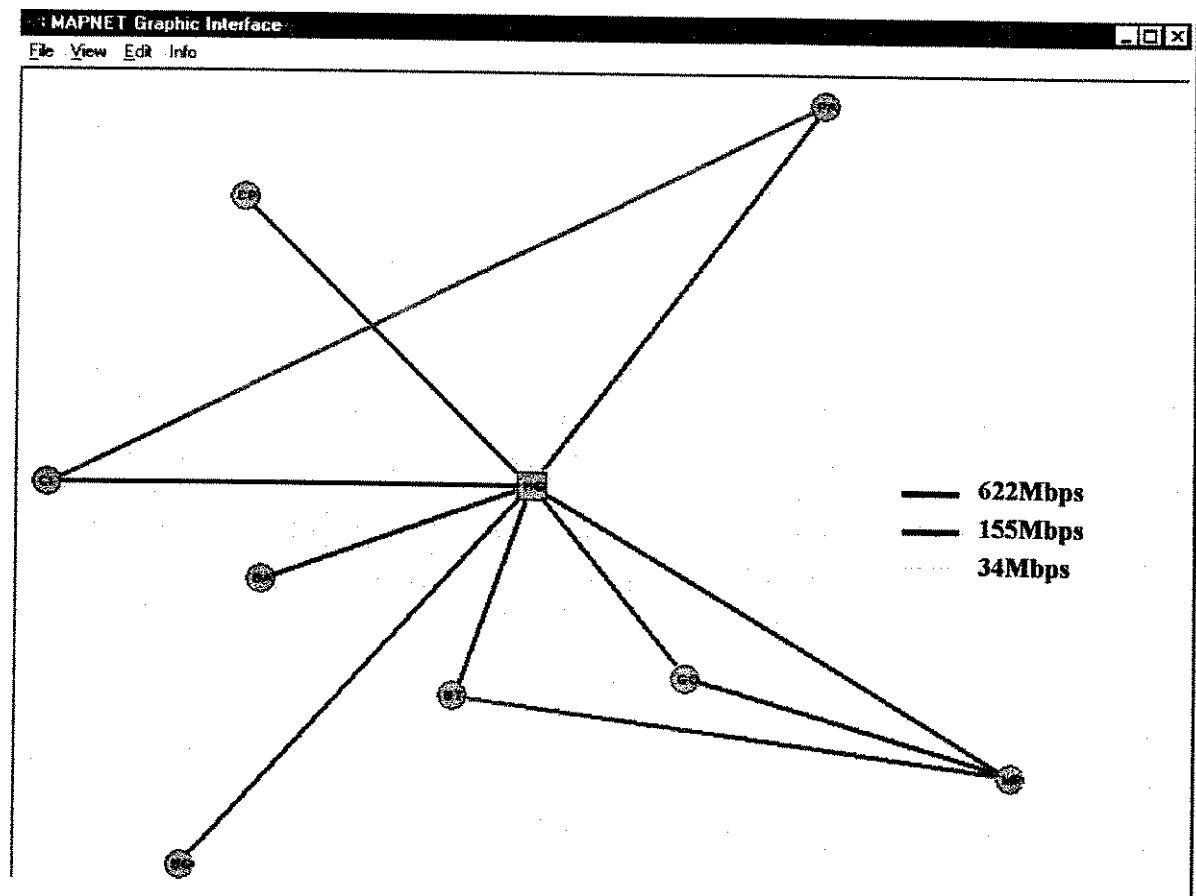


Figura 6.3: REDE DE BELO HORIZONTE
Solução com apenas enlaces ponto-a-ponto.

Tipo	Nome	CFs
Anel bidirecional	B1	HG MP GO
	B2	HG MP BT
	B3	HG GO MP BT
	B4	HG CI PA
Cadeia	C1	PA HG CP
	C2	PA HG CI
	C3	PA HG BA
	C4	PA HG BG
	C5	PA HG BT
	C6	CP HG CI
	C7	CP HG BA
	C8	CP HG BG
	C9	CP HG BT
	C10	CI HG BA
	C11	CI HG BG
	C12	CI HG BT
	C13	BA HG BG
	C14	BA HG BT
	C15	BG HG BT
	C16	BG HG MP

Tabela 6.6: Anéis e cadeias propostos pela metodologia para a rede de Belo Horizonte.

A formulação matemática contém 141 variáveis inteiras e 493 variáveis reais positivas (caminhos) para escoamento das demandas. A solução de rede obtida utilizando esta proposta é ilustrada na Figura 6.4 e os resultados podem ser vistos na Tabela 6.7. Nesta solução entraram 1 enlace ponto-a-ponto (em 622Mbps), 2 anéis (B3 e B4, ambos na hierarquia 622 Mbps) e 2 cadeias (C7 e C16, ambas na hierarquia 622 Mbps) e seu custo foi igual a \$1170. A folga da rede foi 23,31% de sua capacidade total.

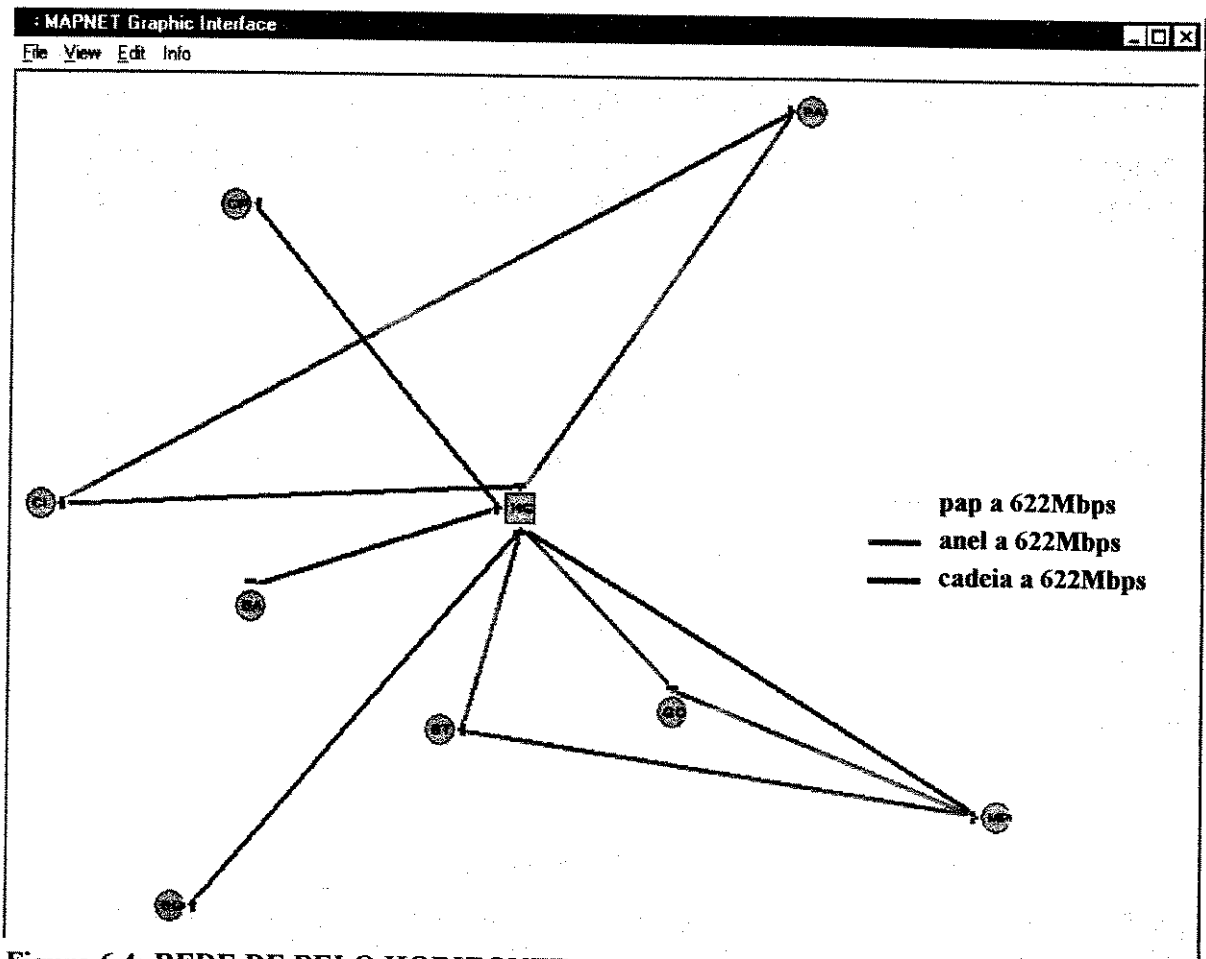


Figura 6.4: REDE DE BELO HORIZONTE
Solução obtida com candidatos anéis e cadeias propostos pela metodologia.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$1170	2	2	1	3024	705	23,31

Tabela 6.7: Resultados obtidos no teste 2.

É importante ressaltar que, como visto no capítulo 5, temos três tipos de opções para a montagem da proposta. A utilização das opções 2 e 3, em que se divide a rede por hierarquia, só é adequada para redes de grande porte. Como a rede de Belo Horizonte é pequena, não se justifica a utilização das opções 2 e 3, portanto foi utilizada somente a opção 1 (sem divisão da rede por hierarquia) para a geração de anéis. Entretanto, o método para obtenção de cadeias foi aplicado em cada subrede, isto é, a rede ponto-a-ponto inicial foi dividida por hierarquias (lembre-se que uma subrede só contém arcos numa mesma hierarquia). Ao contrário dos anéis, o número de cadeias aumenta à medida que se tem mais nós “pontas” numa rede. Quando se divide a rede, aparecem mais nós “pontas” nas subredes do que na rede inicial. Também as cadeias sugeridas contendo arcos com utilização semelhante são mais prováveis de entrar na solução do que aquelas pouco balanceadas. Por isso, é mais conveniente dividir a rede por hierarquias e obter cadeias em cada subrede.

Teste 3: Utilizando a proposta de candidatos obtidos pela metodologia mais aqueles sugeridos pelos planejador

Este teste foi realizado com uma proposta de candidatos (Tabela 6.8) que utiliza os anéis e cadeias encontrados pela metodologia, B1 a B4 e C1 a C16 (Tabela 6.6) e os sugeridos pelo planejador B4 a B9, C11 e C17 (Tabela 6.4). Note que o anel B4 e a cadeia C11 foram sugeridos pela metodologia e também pelo planejador. Os anéis B5 a B9, propostos pelo planejador, não puderam ser determinados pela nossa metodologia porque apresentam arcos que não estão na solução ponto-a-ponto. Foram propostos devido a alguma avaliação ou intuição do planejador.

A formulação matemática contém 136 variáveis inteiras e 450 variáveis reais positivas (caminhos) para escoamento das demandas.

Na solução obtida (veja Tabela 6.9 e Figura 6.5) entraram 3 anéis (B3, B4 e B9 na hierarquia de 622 Mbps), 1 cadeia (C7 na hierarquia de 622 Mbps) e nenhum enlace ponto-a-ponto. O custo desta solução foi \$1110. A folga da rede foi 25,40% de sua capacidade total.

Tipo	Nome	CFs
Anel bidirecional	B1	HG MP GO
	B2	HG MP BT
	B3	HG GO MP BT
	B4	HG CI PA
	B5	CI CP PA HG
	B6	CP PA HG
	B7	CI CP HG
	B8	HG MP GO BG
	B9	HG MP BG
Cadeia	C1	PA HG CP
	C2	PA HG CI
	C3	PA HG BA
	C4	PA HG BG
	C5	PA HG BT
	C6	CP HG CI
	C7	CP HG BA
	C8	CP HG BG
	C9	CP HG BT
	C10	CI HG BA
	C11	CI HG BG
	C12	CI HG BT
	C13	BA HG BG
	C14	BA HG BT
	C15	BG HG BT
	C16	BG HG MP
	C17	PA HG MP

Tabela 6.8: Proposta do planejador e da metodologia.

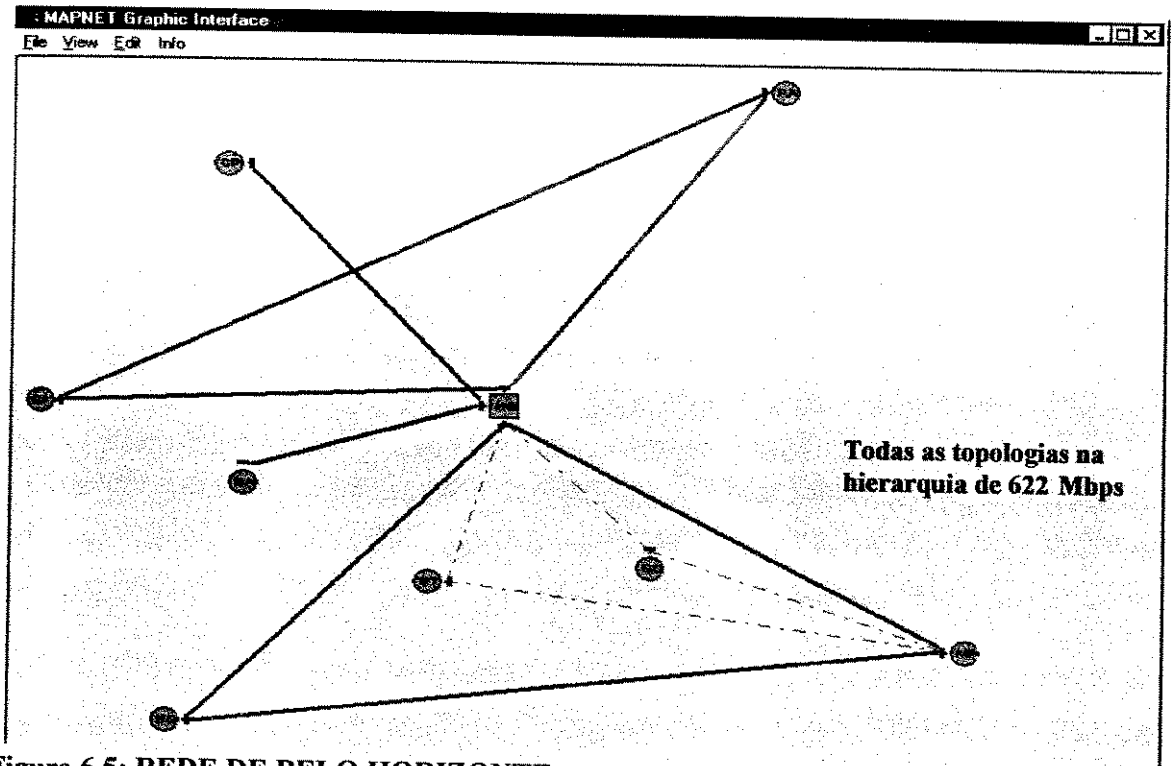


Figura 6.5: REDE DE BELO HORIZONTE
Solução obtida com candidatos anéis e cadeias propostos pela metodologia e pelo planejador.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$1110	3	1	0	3024	768	25,40

Tabela 6.9: Resultados obtidos no teste 3.

Teste 4: Utilizando como candidatos os anéis obtidos pela metodologia e anéis obtidos pelo fechamento das cadeias.

O objetivo deste teste foi obter uma solução com somente topologias em anel. Para isso, as cadeias obtidas pela metodologia foram fechadas e candidatas como anéis (veja Tabela 6.6), enriquecendo a proposta destes candidatos. Dessa forma, somente topologias em anel foram candidatas. A formulação matemática contém 48 variáveis inteiras e 646 variáveis reais positivas (caminhos) para escoamento das demandas.

A Figura 6.6 ilustra a solução de rede obtida e os resultados podem ser vistos na Tabela 6.10. Nesta solução entraram os anéis B3, B4, C7 e C16 (todos na hierarquia de 622 Mbps) e seu custo foi igual a \$1170. A rede apresenta folga igual a 29,21% de sua capacidade total.

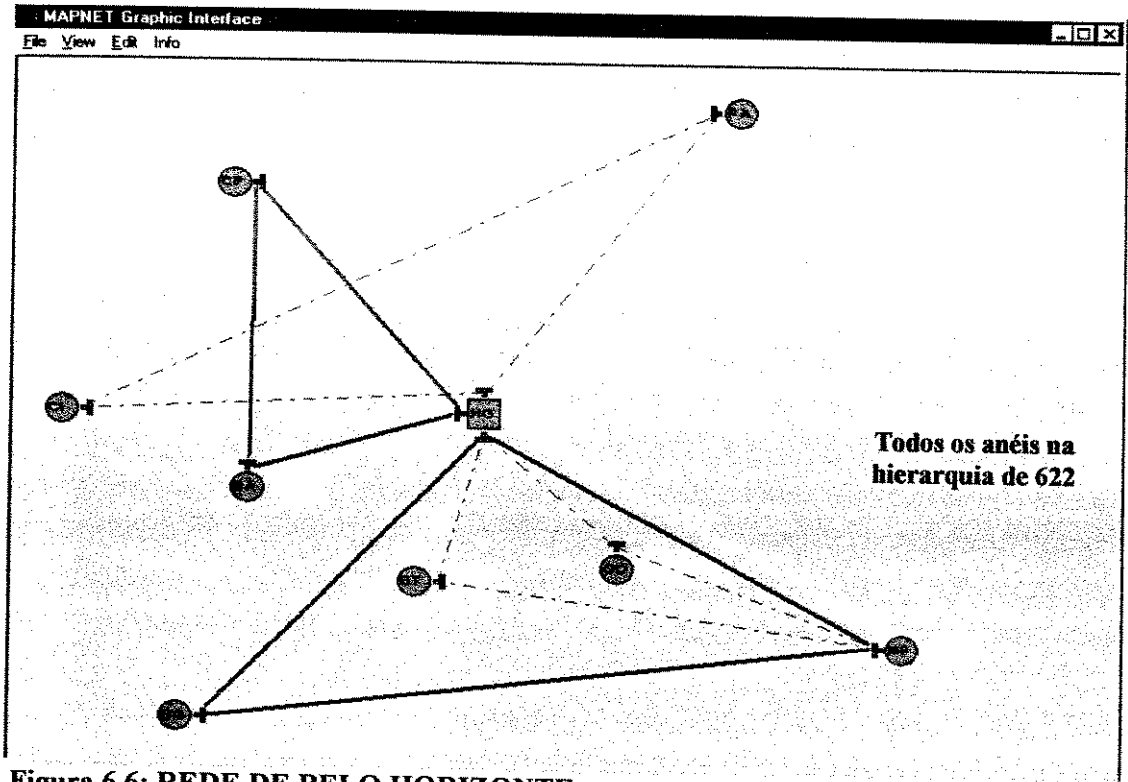


Figura 6.6: REDE DE BELO HORIZONTE
Solução somente com anéis

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$1170	4	0	0	3276	957	29,21

Tabela 6.10: Resultados obtidos no teste 4.

Teste 5: Utilizando proposta de candidatos da metodologia (anéis e cadeias) mais anéis obtidos pelo fechamento das cadeias.

Este teste é muito similar ao anterior. Contudo, aqui todas as topologias (anéis, cadeias e enlaces ponto-a-ponto) competiram entre si. A formulação matemática contém 169 variáveis inteiras e 347 variáveis reais positivas (caminhos) para escoamento das demandas.

A Figura 6.7 ilustra a solução de rede obtida e os resultados podem ser vistos na Tabela 6.11. Na solução obtida entraram 3 anéis (B3, B4 e C16 na hierarquia de 622 Mbps) e 1 cadeia (C7, na hierarquia de 622 Mbps). O custo desta solução foi \$1110. A folga da rede foi 23,31% de sua capacidade total.

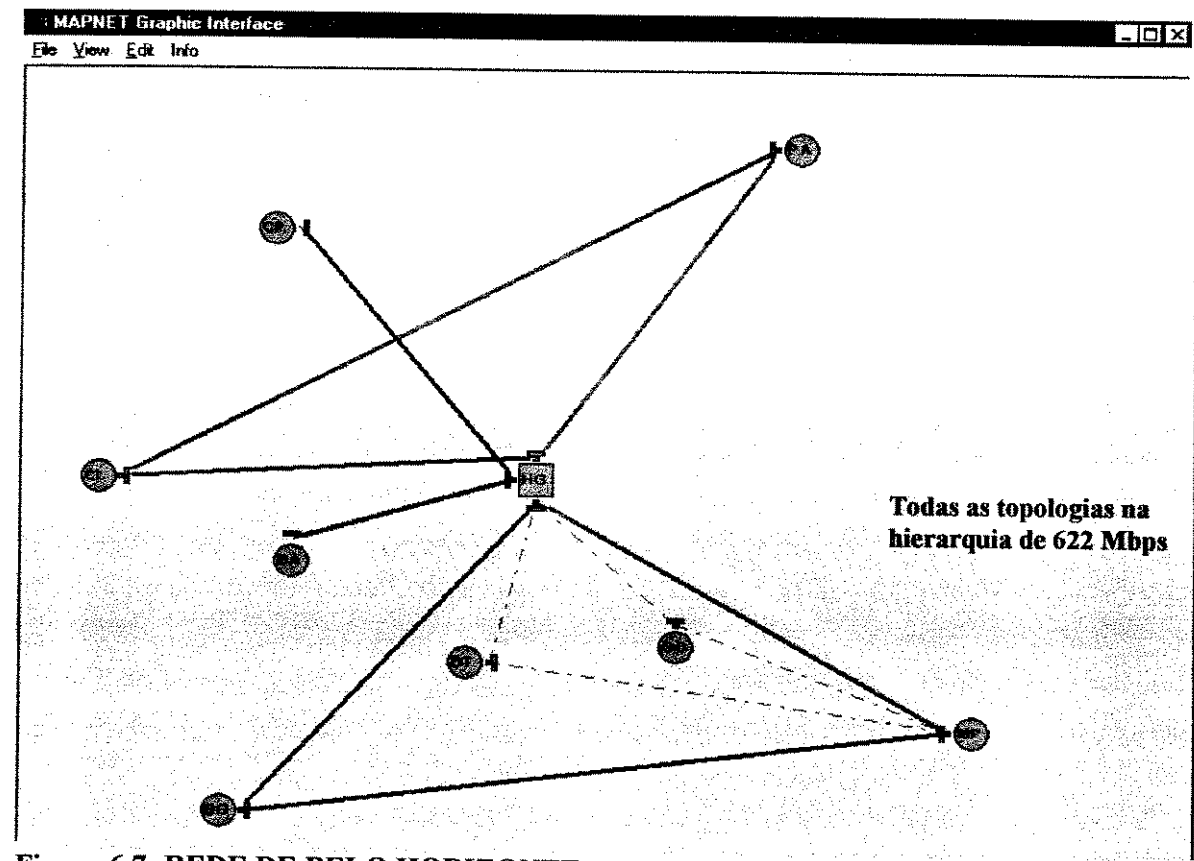


Figura 6.7: REDE DE BELO HORIZONTE
Solução obtida com proposta de anéis enriquecida com o fechamento das cadeias.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$1110	3	1	0	3024	705	23,31

Tabela 6.11: Resultados obtidos no teste 5.

6.1.3 Análise comparativa dos resultados obtidos para a rede de Belo Horizonte

Um resumo dos resultados dos testes 1 a 5 para a Rede de Belo Horizonte é apresentado na Tabela 6.12. A seguir são feitas comparações entre esses resultados.

A solução de rede obtida pelo planejador (teste 1) foi a mais cara e apenas 29,63% do tráfego da rede circula somente por arcos de anéis.

A solução de rede do teste 2 (utilizando proposta de candidatos anéis e cadeias obtida pela metodologia) foi 4,88% mais barata que a solução encontrada pelo planejador, 43,58% do tráfego total da rede possui a vantagem de utilizar somente arcos pertencentes a anéis, ou seja, não passa pelas cadeias e nem pelo enlace ponto-a-ponto. A folga é semelhante a apresentada pela rede do teste1.

O custo das redes encontradas nos testes 3 (solução obtida com proposta do planejador acrescentada à proposta obtida pela metodologia) e 5 (proposta de anéis enriquecida com cadeias encontradas pela metodologia) foi 9,75% mais barato do que o custo da solução de rede obtida com proposta do planejador. Também, nos dois testes supracitados, 84,02% do tráfego total da rede utiliza arcos pertencentes a anéis. No teste 3, um dos anéis propostos somente pelo planejador faz parte da solução final, confirmando a importância deste na tomada de decisão. Repare que, no teste 5, uma das cadeias que foi fechada reproduzia um dos anéis propostos pelo planejador que acaba por entrar na solução. Obviamente, isto é uma coincidência.

A rede obtida no teste 4 (utilizando somente proposta de candidatos do tipo anel encontrada pela metodologia) apresentou o maior número de anéis, a maior folga, além de ter

100% do seu tráfego sendo transportado através de anéis. O custo da solução foi 4,88% menor que o custo daquela encontrada pelo planejador.

É importante ressaltar que, as soluções de rede dos testes 2, 4 e 5 foram obtidas sem a adição de candidatos do planejador à proposta de anéis e cadeias.

TESTES	Custo Absoluto	Ganho em custo (%)	Número de enlaces pap	Número de anéis	Número de cadeias	Capacidade total (canais de 2 Mbps)	Folga total (%)
Teste 1	\$1230	0	5	2	0	3024	23,41
Teste 2	\$1170	4,88	1	2	2	3024	23,31
Teste 3	\$1110	9,75	0	3	1	3024	25,40
Teste 4	\$1170	4,88	0	4	0	3276	29,21
Teste 5	\$1110	9,75	0	3	1	3024	23,31

Tabela 6.12: Quadro Comparativo dos testes 1, 2, 3, 4 e 5.

6.2 Estudo da Rede da Área Metropolitana de São Paulo

6.2.1 Apresentação da Rede

A rede da Área Metropolitana de São Paulo possui 91 Centros de Fios. Esta rede foi reduzida a 44 CFs segundo alguns critérios de redução de nós [Bergamaschi 96] e será a rede que consideraremos para análise. A Figura 6.8 ilustra a localização geográfica dos 44 CFs e a Rede de Cabos de fibras ópticas que interconectam esses centros. A Tabela 6.13 mostra a relação dos 44 CFs e a soma das demandas (em canais de 2Mbps) para cada um desses CFs. Esses dados foram fornecidos pelo grupo de Planejamento de Transmissão da TELESP. Foi adotada uma clusterização com 5 hubs (Tabela 6.14). Na Tabela 6.15 estão relacionados os 22 anéis bidirecionais e as 28 cadeias sugeridos pelos planejadores. Esta proposta envolveu um trabalho conjunto entre Unicamp e Telesp.

Sigla	Nome	Demanda Total (canais de 2Mbps)
GRS CC	Cumbica	555
GRS GR	Centro	477
SPO NA	Anhangabaú	496
SPO BC	Benjamin Constant	1482
SPO BG	Basílio da Gama	402
SPO BR	Brás	746
SPO CB	Campo Belo	885
SPO CO	Consolação	951
SPO DT	Dutra	352
SPO IH	Ingleses (Interurb.)	1438
SPO IP	Ipiranga	477
SPO JD	Jardim	861
SPO LI	Liberdade	3130
SPO PA	Paraíso	1896
SPO PD	Perdizes	2629
SPO PE	Penha	1934
SPO PI	Pinheiros	772
SPO PL	Palmeiras	600
SPO SA	Santo Amaro	682
SPO SI	Santa Ifigênia	1426
SPO ST	Santana	367
SPO VM	Vila Mariana	1000
OCO OS	Osasco	907
SPO AM	Americanópolis	1797
SPO CV	Casa Verde	294
SPO FO	Freguesia do O	255
SPO GU	Guarani	425
SPO IB	Ibirapuera	1185
SPO IM	Itaim Bibi	753
SPO JB	Jabaquara	495
SPO LP	Lapa	810
SPO MB	Morumbi	521
SPO PH	Penha (Interurb.)	589
SPO VU	Vila União	462
SPO BE	Berrini	296
SPO JG	Jaguare	710
SPO LH	Lapa (Interurb.)	1006
SPO MH	Morumbi (Interurb.)	442
SPO AT	Chácara S. Antônio	90
SPO SM	São Miguel	255
GRS MQ	Mesquita	78
SPO IT	Itaquera	255
SPO SS	São Mateus	258
SPO VE	Vila União	261

Tabela 6.13: Sigla, Nome e Demanda Total dos Centros de Fios.

Cluster	Hub	Nós
1	AM	AM CB SA BE MH AT MB
2	PD	PD OS LP CV FO LH PI PL JG
3	PA	PA BG CO IH JD SI VM IB IM
4	LI	LI JB AN BC BR IP
5	VU	VU PE DT ST CC GR GU PH SM MQ IT SS VE

Tabela 6.14: Clusterização adotada.

Tipo	Nome	CFs
Anel bidirecional	BP1	AM SI IH
	BP2	LP LH PD
	BP3	PA PD SI
	BP4	PA PD MB
	BP5	PA IH LI
	BP6	PA BC LI
	BP7	PA LH PL
	BP8	PA JD IB
	BP9	PA IH SI
	BP10	PE BC IH
	BP11	PE LI MB
	BP12	OS PD JG
	BP13	BC IH SI
	BP14	PD OS SI
	BP15	VU PE SI
	BP16	VU PE LI
	BP17	IB JD VM
	BP18	LI PD LP
	BP19	SI PD LP
	BP20	AM SI CB
	BP21	LI AM JB
	BP22	AM PD MB
Cadeia	CP1	AM JB PA
	CP2	AM IH SI PE
	CP3	AM PD PE
	CP4	AM IH PA
	CP5	AM PA LI
	CP6	AM MB PA
	CP7	AM IH BC PE
	CP8	AM OS PA
	CP9	AM IM PA
	CP10	AM SA PA
	CP11	AM CB IH
	CP12	AM PD LI
	CP13	AM BC LI
	CP14	AM SI LI
	CP15	PA SI LI
	CP16	PA SI PE
	CP17	PA PE LI
	CP18	PA PD LI
	CP19	PA VM LI
	CP20	PA PI PD
	CP21	PE SI LI
	CP22	PE JB LI
	CP23	PE BR LI
	CP24	PE DT LI
	CP25	PE ST LI
	CP26	PD PL SI
	CP27	PD LH MB
	CP28	OS PD JG

Tabela 6.15: Anéis e cadeias propostos pelos planejadores para a AMSP.

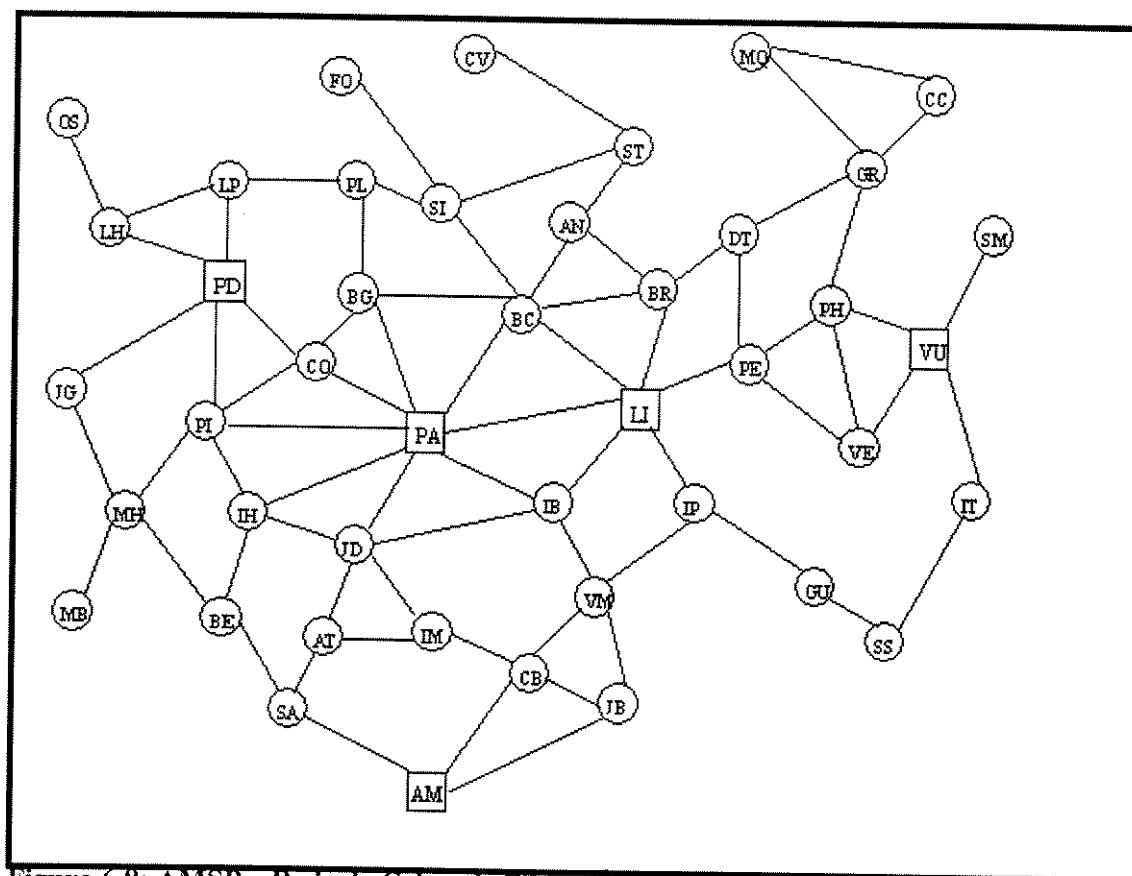


Figura 6.8: AMSP – Rede de Cabos de Fibras Ópticas.
Localização geográfica dos Centros de Fios.

6.2.2 Testes realizados

A metodologia parte de uma proposta de solução ponto-a-ponto para a obtenção de anéis. O carregamento desta rede ponto-a-ponto é obtido minimizando-se o somatório do fluxo total em cada arco, de forma a se obter uma solução com máxima folga e uma rede mais homogênea. É este carregamento que é utilizado para se medir a eficiência de capacidade e de balanço de cada anel.

Como cada teste foi feito com a rede reduzida (rede com 44 CFs) é necessário voltar à rede original (rede com 91 CFs). Para isso, após a obtenção da solução de rede com 44 CFs, acrescentamos os enlaces que atendem à demanda entre os nós pendentes e as respectivas estações-mães (enlaces eliminados inicialmente a fim de se determinar a rede reduzida), obtendo-se dessa forma a solução para a rede com 91 CFs. O custo destes enlaces é somado ao custo da solução reduzida, resultando no custo da solução original.

Como o número de variáveis inteiras pode ser muito grande, o programa Enfeixamento pode ser rodado utilizando-se uma heurística implementada através de um programa chamado

“RODAUT”. Esta heurística consiste em utilizar o programa Enfeixamento várias vezes, cada uma delas com um subconjunto de variáveis inteiras diferentes e de cardinalidade no máximo igual a 60. Como a rede da área metropolitana de São Paulo tem um número muito grande de variáveis, utilizou-se do programa RODAUT nos testes.

Os cinco testes realizados são descritos a seguir. O teste de referência com relação aos custos é o de número 1.

Teste 1: Utilizando proposta de candidatos anéis e cadeias sugerida pelo planejador.

Teste 2: Utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia.

Teste 3: Utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia adicionada à proposta sugerida pelos planejadores.

Teste 4: Utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia— Solução somente com cadeias e anéis.

Teste 5: Utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia adicionada à proposta sugerida pelos planejadores – Solução com vários anéis.

Teste 1: Utilizando proposta de candidatos anéis e cadeias sugerida pelo planejador

A proposta de anéis e cadeias é constituída por 22 anéis bidirecionais e 28 cadeias (Tabela 6.15). Como dito anteriormente, esta proposta foi elaborada por uma equipe de planejadores da Unicamp e Telesp, sem a utilização de alguma ferramenta de software.

A Figura 6.9 apresenta a solução de rede obtida (somente cadeias e anéis são ilustrados) e os resultados podem ser vistos na Tabela 6.16. Nesta solução entraram 74 enlaces ponto-a-ponto, 1 anel (BP16, na hierarquia de 2.5 Gbps) e 6 cadeias (CP5, CP15 e CP18 na hierarquia de 2.5 Gbps, CP1 e CP4 na hierarquia de 622 Mbps e CP26 em 155 Mbps). O custo da solução encontrada foi \$15.318. A capacidade total foi obtida somando-se as capacidades individuais de cada topologia da solução. A folga da rede foi 22.23% de sua capacidade total.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$15.318	1	6	74	43.541	9678	22,23

Tabela 6.16: Resultados obtidos no teste 1.

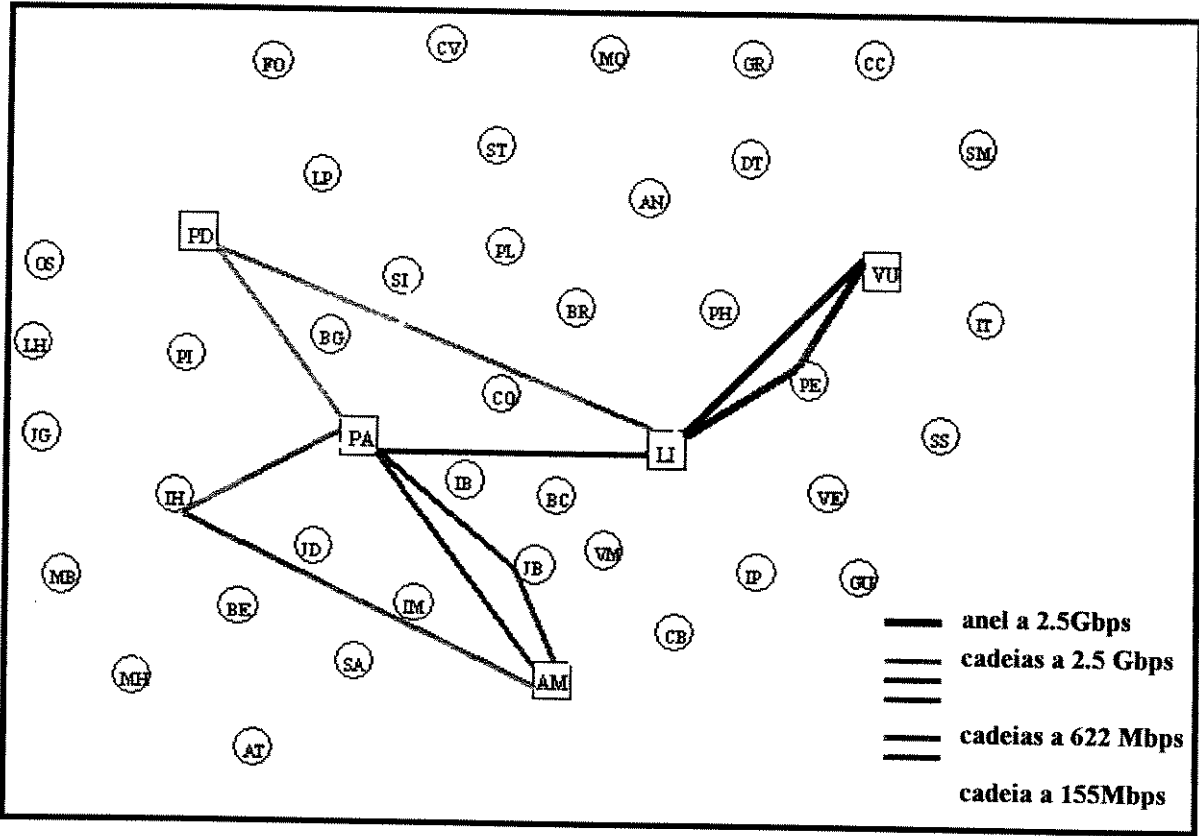


Figura 6.9: AMSP – Rede obtida com proposta de candidatos feita pelo planejador. Mostrando apenas anéis e cadeias.

Teste 2: Utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia

A proposta de candidatos anéis e cadeias obtida pela metodologia (Tabela 6.17) foi baseada na rede ponto-a-ponto, dividida por hierarquias, ilustrada nas Figuras 6.10 a 6.12. Para a montagem (geração) desta proposta foi utilizada a opção 2, onde a determinação dos anéis é feita em cada subrede. Conforme mostra a tabela, foram candidatados 36 anéis e 20 cadeias. Cada um dos anéis e cadeias é candidatado nas várias hierarquias possíveis, como determinado pelo programa Enfeixamento.

Tipo	Nome	CFs
Anel bidirecional	B1	AM VU GR PE
	B2	AM VU GR PE LI AN
	B3	PA AN LI JB
	B4	LI PE GR VU GU
	B5	AM VU ST PA MH
	B6	PA AN LI GU VU ST
	B7	PA JB LI GU VU ST
	B8	AM MH PA AN LI PE
	B9	AM PD PA
	B10	AM PD PA LI
	B11	PD PA LI
	B12	PD PA LI VU
	B13	PA LI VU
	B14	PA LI IH
	B15	PA LI BC
	B16	PD PA VU
	B17	AM PD PA VU LI
	B18	PA VU LI IH
	B19	PA VU LI BC
	B20	AM PD PA IH LI
	B21	PD PA IH LI
	B22	PD PA IH LI VU
	B23	PD PA BC LI
	B24	PD PA BC LI VU
	B25	AM PD LI PA
	B26	PD LI PA VU
	B27	PD LI VU
	B28	AM PD LI VU PA
	B29	AM PD VU PA
	B30	AM PD VU LI PA
	B31	AM PD VU LI BC PA
	B32	AM PA PD LI
	B33	AM PA PD VU LI
	B34	AM PA LI
	B35	AM PA VU LI
	B36	AM PA BC LI
Cadeia	C1	PI PD JG
	C2	SA AM CB
	C3	BE AM AT
	C4	GR VU SM
	C5	IT VU SS
	C6	FO PD CV
	C7	BE PA CV
	C8	PE VU PH
	C9	OS PD LH
	C10	PL PD LP
	C11	SI PA CO
	C12	GR MQ VU
	C13	VE VU DT
	C14	BR LI IP
	C15	JD PA IM
	C16	VM PA IB
	C17	MB LI VU CC
	C18	SA MH PA BG OS
	C19	BG PD IB
	C20	CC PE AM MH PA BG

Tabela 6.17: Anéis e cadeias propostos pela metodologia para a AMSP.

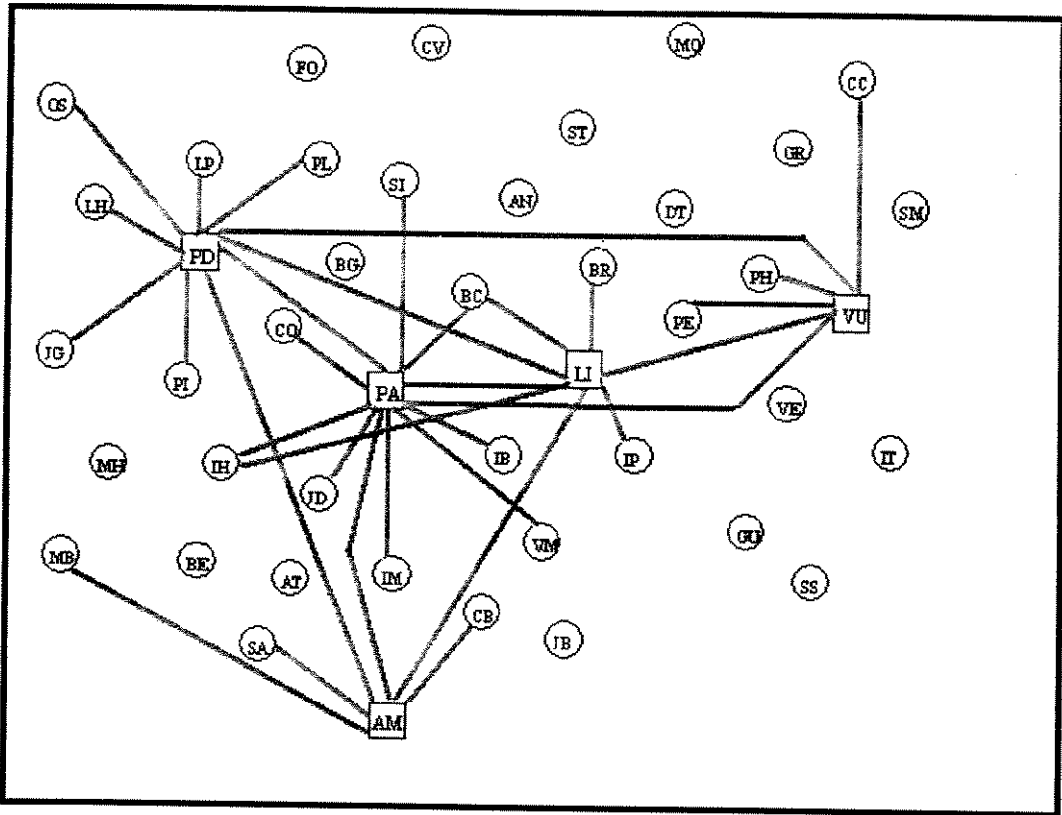


Figura 6.10 AMSP – Subrede formada por enlaces na hierarquia de 2.5 Gbps. Solução Ponto-a-Ponto.

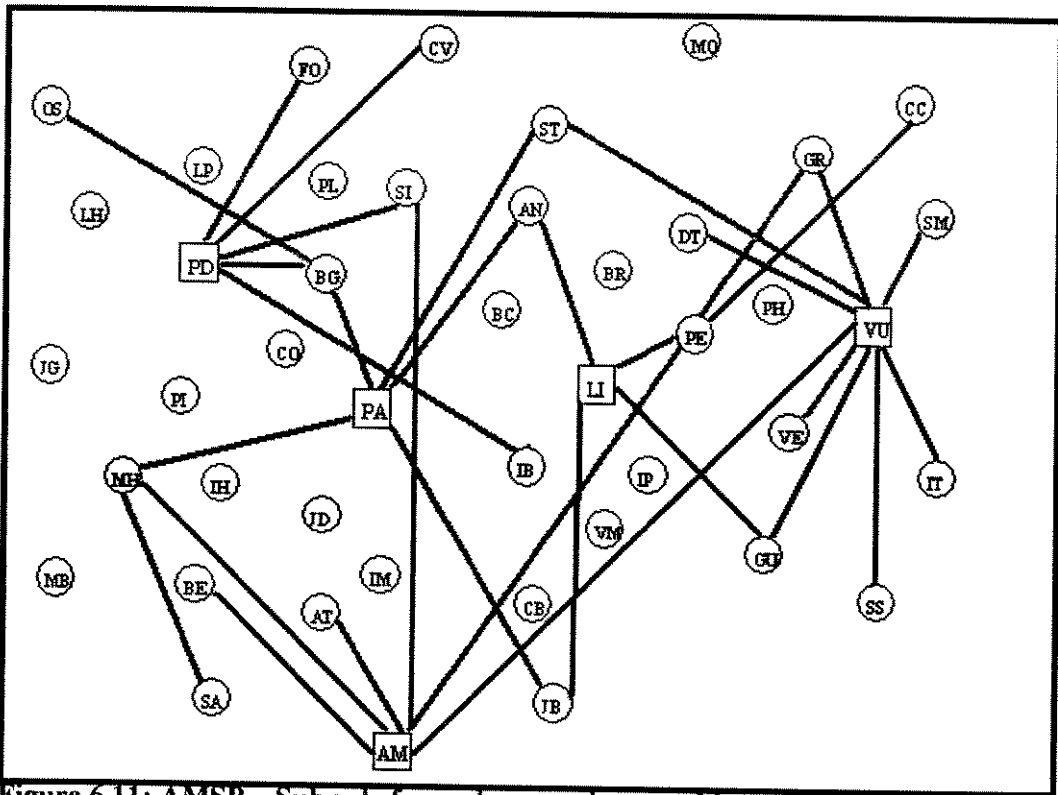


Figura 6.11: AMSP – Subrede formada por enlaces na hierarquia de 622 Mbps. Solução Ponto-a-Ponto

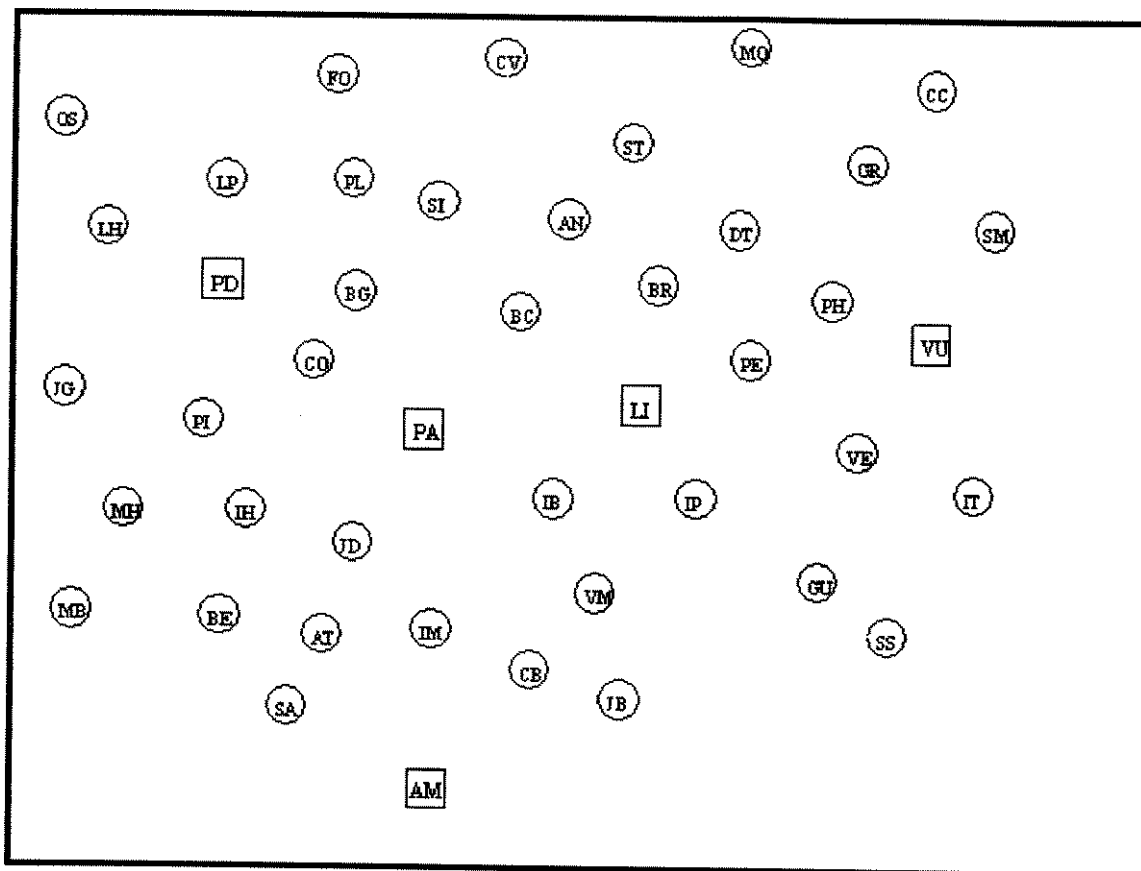


Figura 6.12: AMSP – Subrede formada por enlaces na hierarquia de 155 Mbps. Solução Ponto-a-Ponto.

A rede obtida utilizando esta proposta é ilustrada nas Figura 6.13 a 6.16. Os resultados podem ser vistos na Tabela 6.18. Nesta solução entraram 17 enlaces ponto-a-ponto, 6 anéis: B1, B7, B8 na hierarquia de 622 Mbps e B18, B31 e B32 na hierarquia de 2.5 Gbps; 13 cadeias: C5 na hierarquia de 155 Mbps e 622Mbps; C3, C4, C6, C13 e C19 na hierarquia de 622 Mbps; C1, C8, C9, C10, C11, C14 e C16 na hierarquia de 2.5 Gbps . O custo da solução foi igual a \$13.630. A folga da rede foi 14,81% de sua capacidade total.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$13.630	6	13	17	43.896	6500	14,81

Tabela 6.18: Resultados obtidos no teste 2.

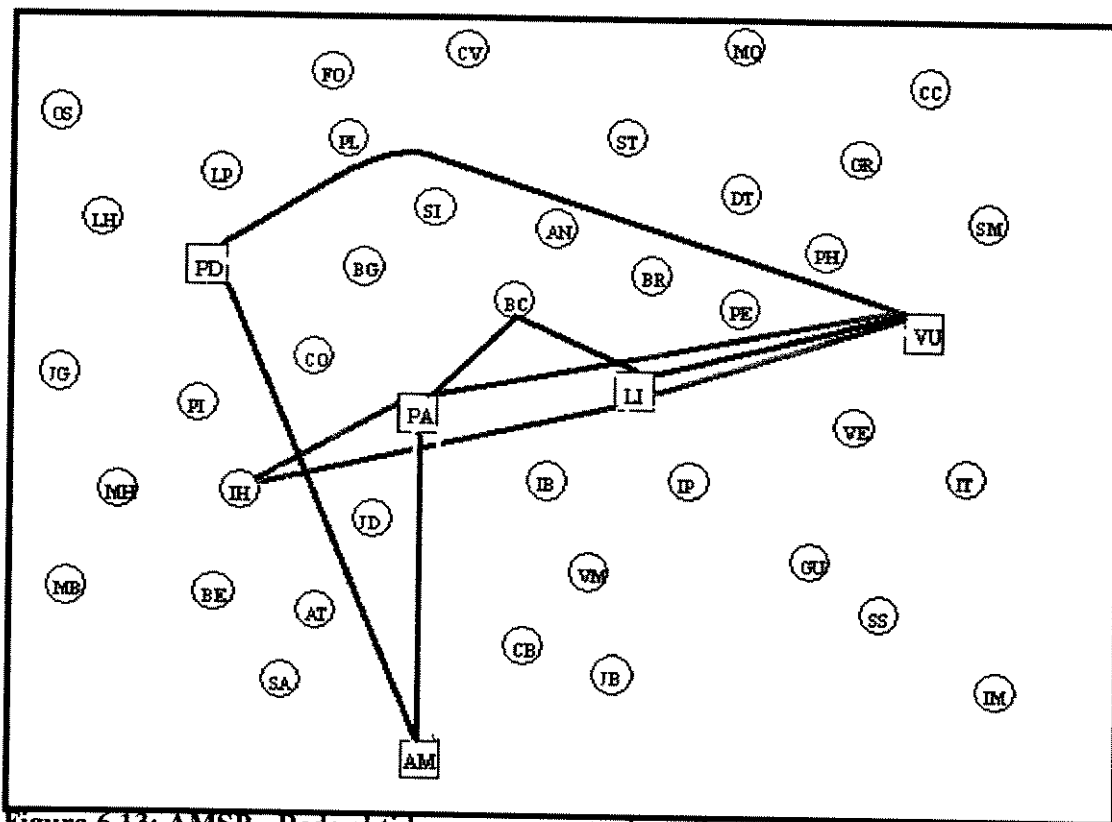


Figura 6.13: AMSP - Rede obtida com proposta de anéis e cadeias feita pela metodologia. Mostrando somente os anéis a 2.5 Gbps.

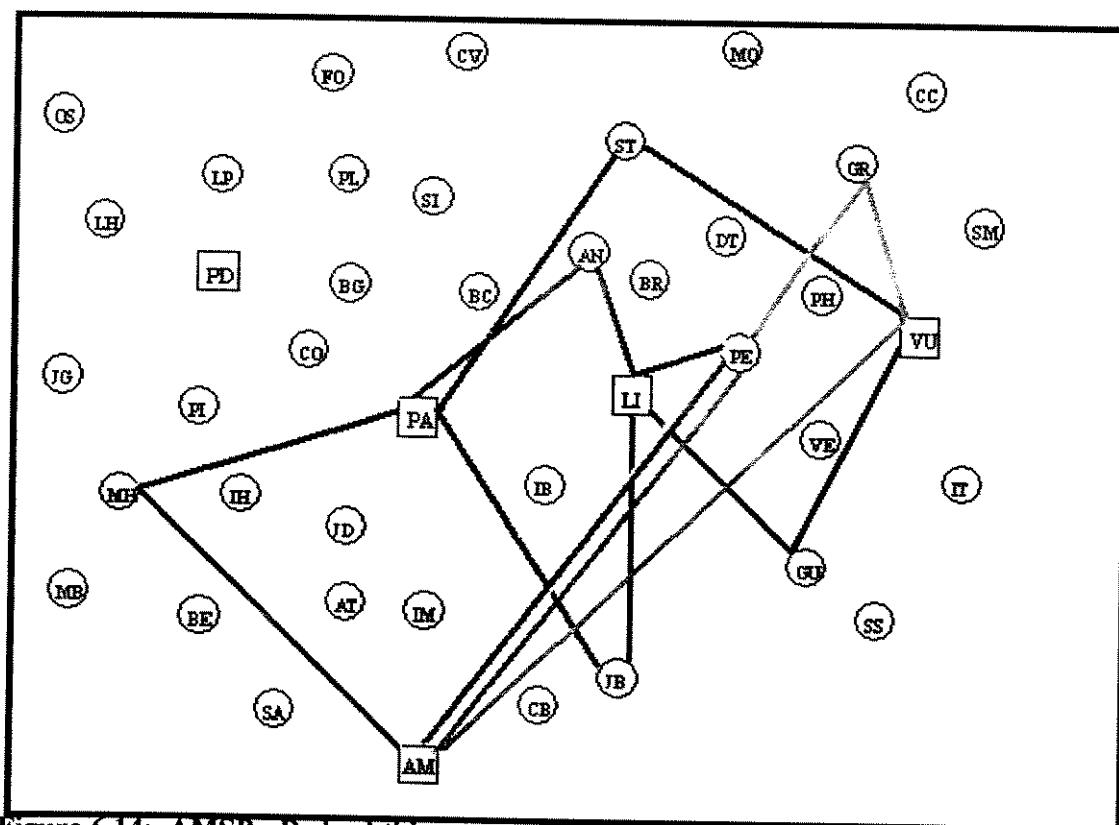


Figura 6.14: AMSP - Rede obtida com proposta de anéis e cadeias feita pela metodologia. Mostrando somente os anéis a 622 Mbps.

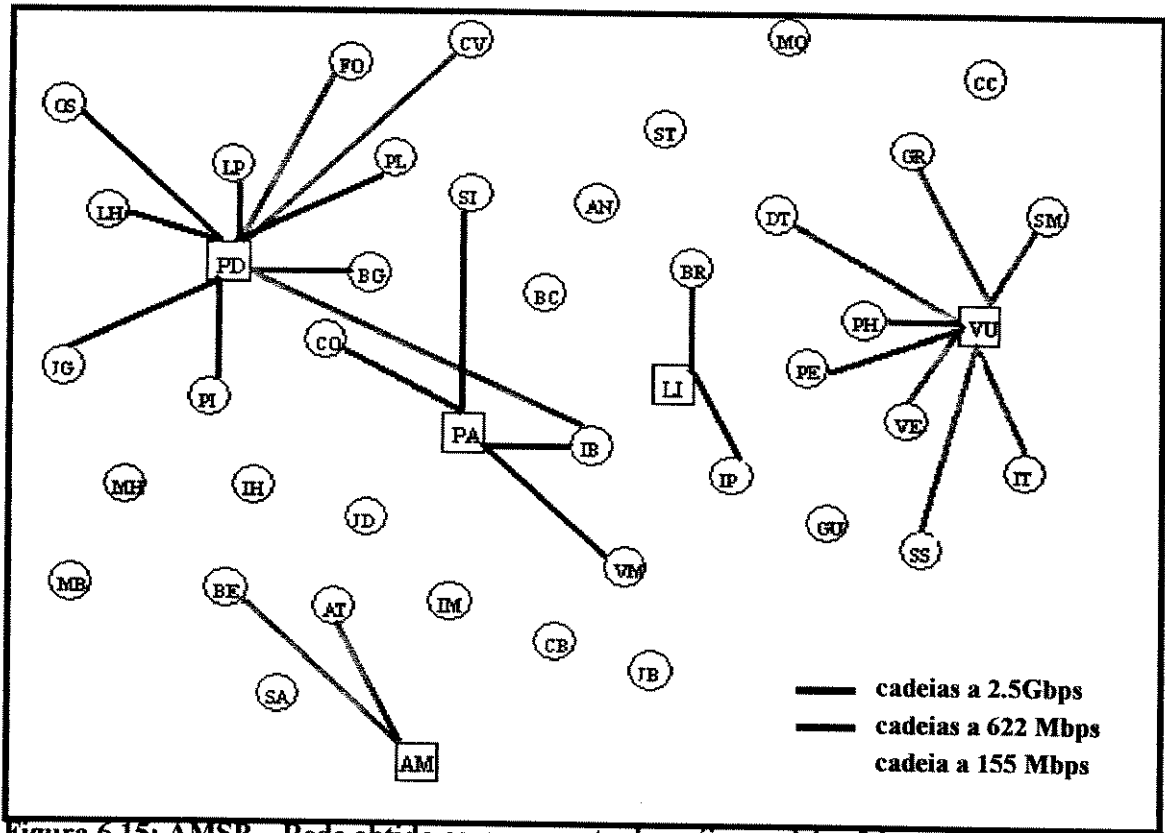


Figura 6.15: AMSP – Rede obtida com proposta de anéis e cadeias feita pela metodologia. Mostrando somente as cadeias.

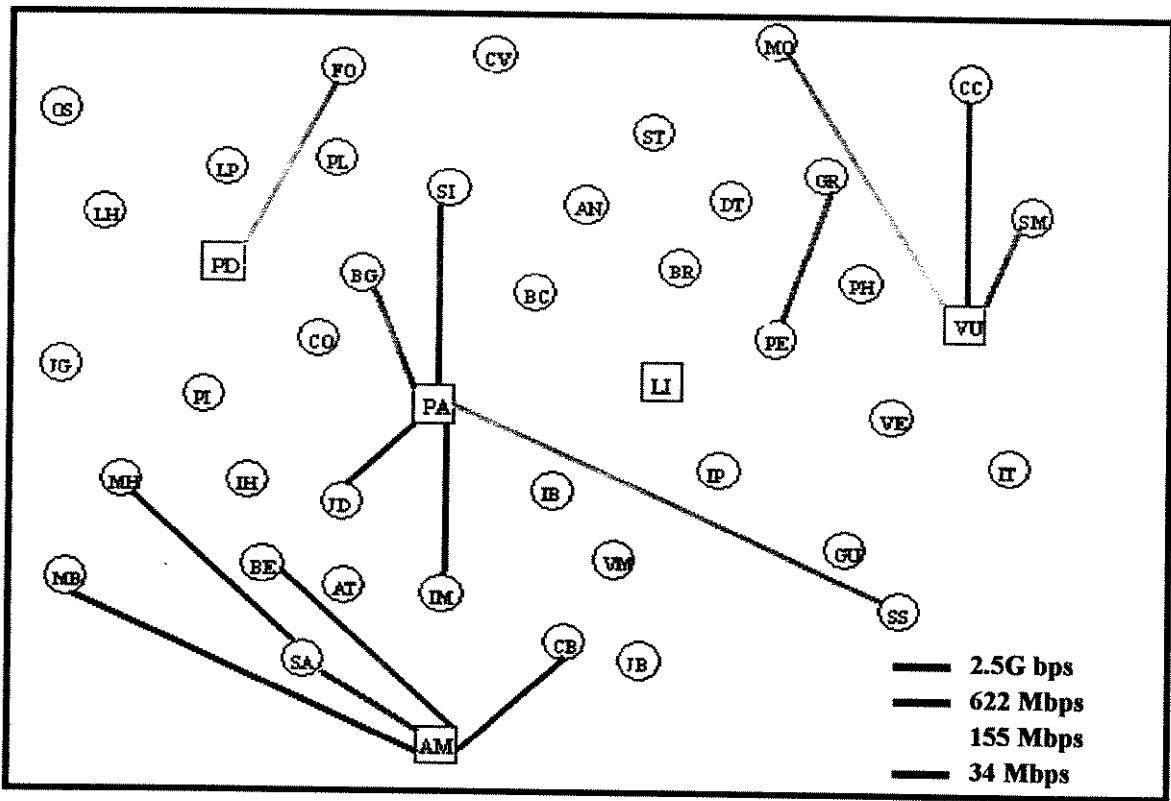


Figura 6.16: AMSP – Rede obtida com proposta de anéis e cadeias feita pela metodologia. Mostrando somente os enlaces ponto-a-ponto.

Teste 3: Utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia adicionada à proposta sugerida pelos planejadores

A proposta de candidatos é formada por 58 anéis (36 anéis obtidos pela metodologia e 22 anéis pelo planejador) e 48 cadeias (20 cadeias obtidas pela metodologia e 28 pelo planejador). A rede obtida é ilustrada nas Figuras 6.17 a 6.20. A Tabela 6.19 apresenta os resultados obtidos. Nesta solução entraram 21 enlaces ponto-a-ponto, 6 anéis: B2, B7 e BP7 na hierarquia de 622 Mbps; B14, B24 e B25 na hierarquia de 2.5 Gbps; 14 cadeias: CP26 em 155Mbps; C5 na hierarquia de 155 Mbps e 622Mbps; C3, C6, C13 e C19 na hierarquia de 622 Mbps; C1, C2, C8, C9, C11, C14, C15 e C16 na hierarquia de 2.5 Gbps. O custo da solução foi igual a \$13.498. A folga da rede foi 18,80% de sua capacidade total.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$13.498	6	14	21	41.881	7874	18,80

Tabela 6.19: Resultados obtidos no teste 3.

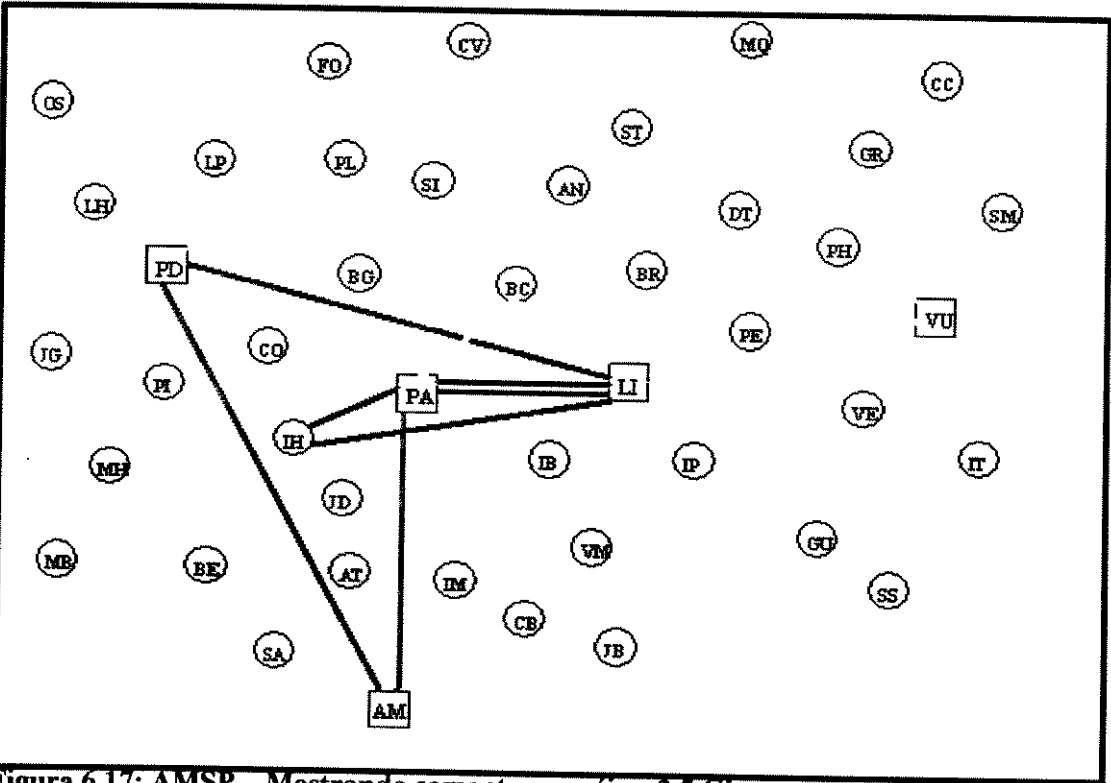


Figura 6.17: AMSP – Mostrando somente os anéis a 2.5 Gbps.
Solução obtida com candidatos anéis e cadeias propostos pela metodologia e pelo planejador.

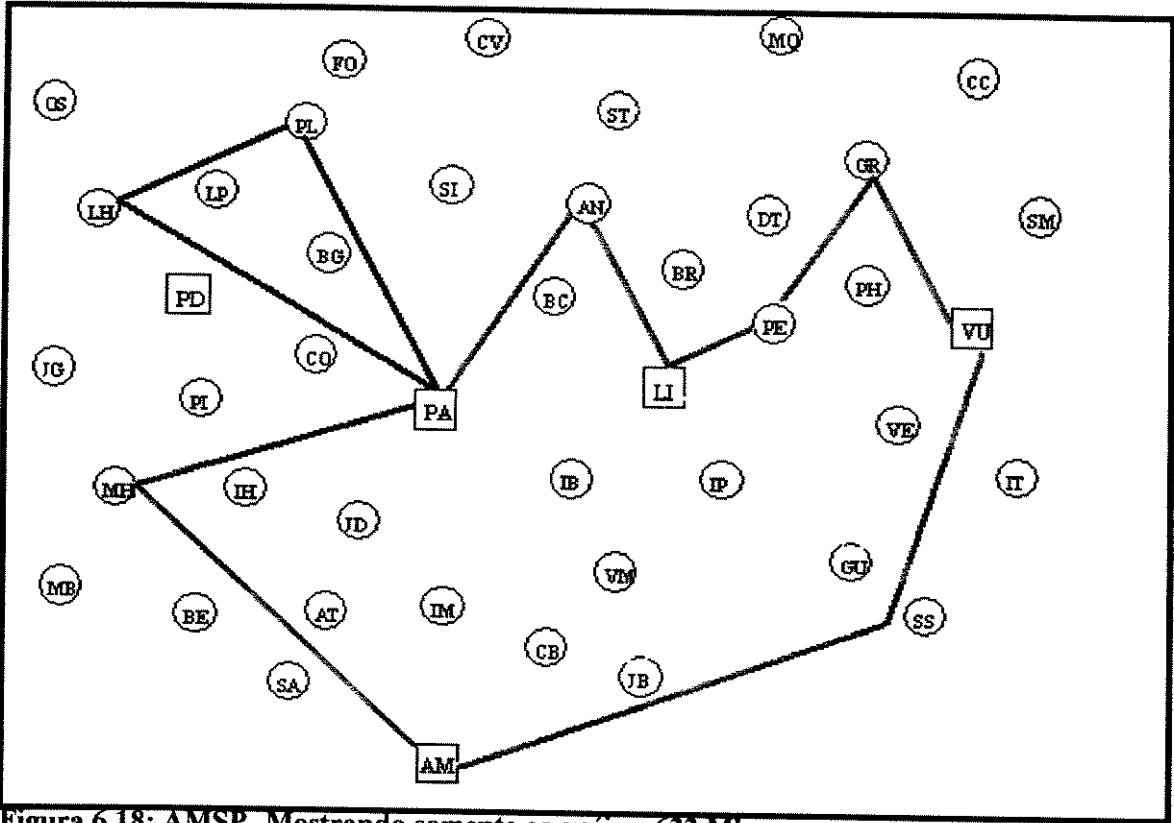


Figura 6.18: AMSP- Mostrando somente os anéis a 622 Mbps.
Solução obtida com candidatos anéis e cadeias propostos pela metodologia e pelo planejador.

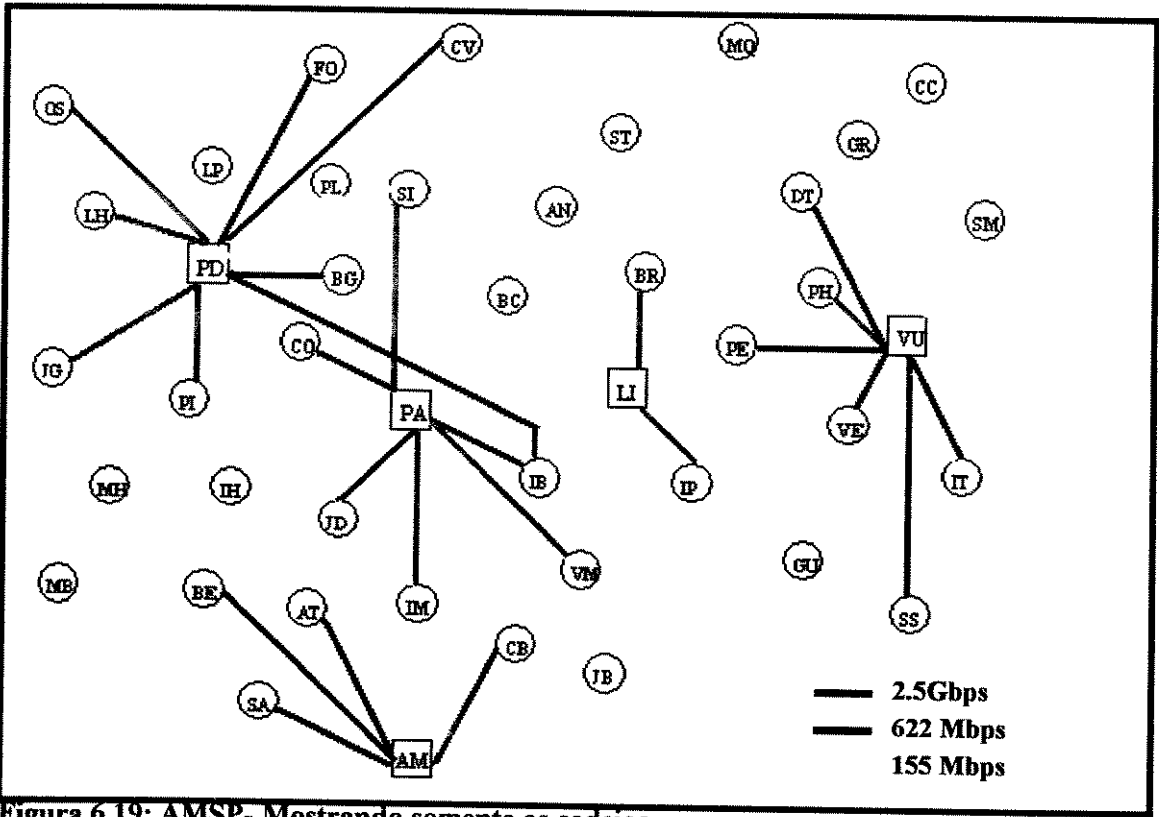


Figura 6.19: AMSP- Mostrando somente as cadeias.
Solução obtida com candidatos anéis e cadeias propostos pela metodologia e pelo planejador.

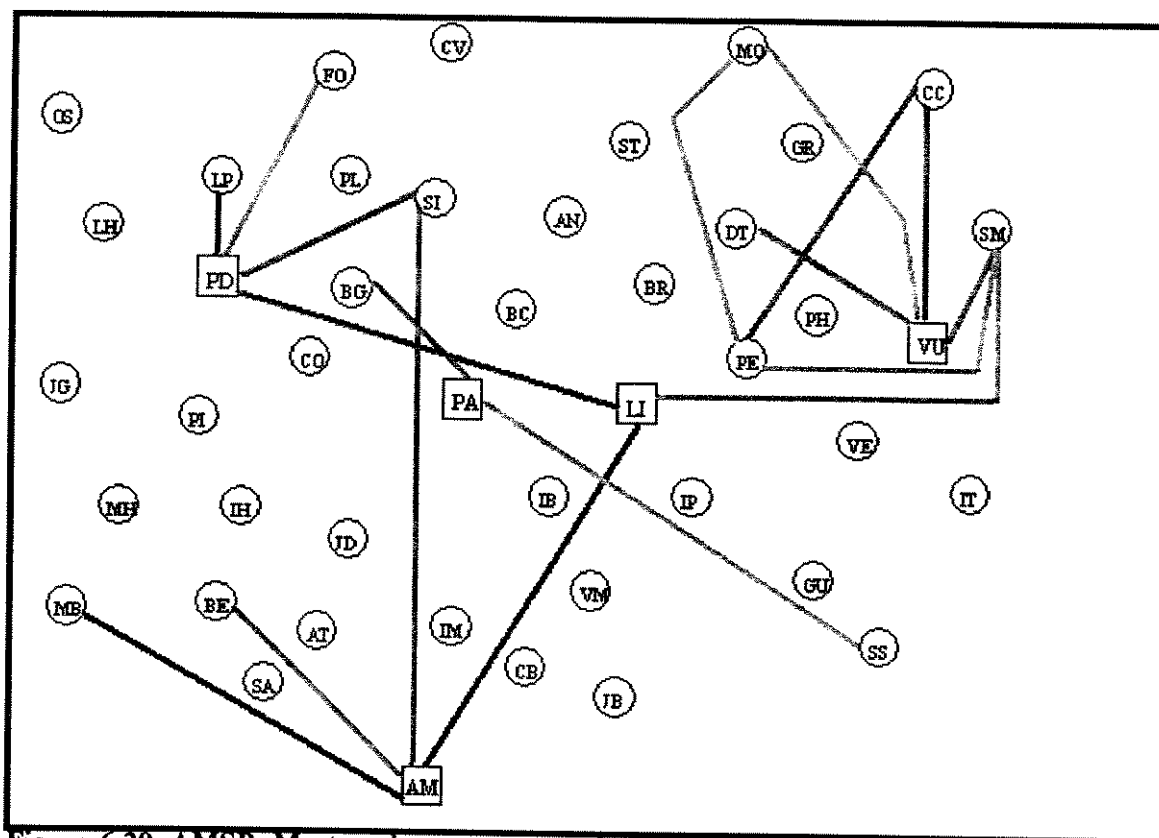


Figura 6.20: AMSP- Mostrando somente os enlaces ponto-a-ponto.

Solução obtida com candidatos anéis e cadeias propostos pela metodologia e pelo planejador

Teste 4: Utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia
– Solução somente com cadeias e anéis

A solução de rede encontrada é ilustrada nas Figuras 6.21 a 6.24. A Tabela 6.20 apresenta os resultados obtidos. Nesta solução entraram 7 anéis: B1, B7 e B8 em 622 Mbps, B11, B18, B30 e B36 em 2.5 Gbps; 19 cadeias: C7 e C12 em 155 Mbps; C4, C5 e C6 em 155 Mbps e 622Mbps; C11 em 622Mbps e 2.5Gbps; C3, C13, C19 e C20 em 622 Mbps; C1, C2, C8, C9, C10, C14, C15, C16 e C17 em 2.5 Gbps. O custo da solução foi igual a \$15.114. A folga da rede foi 16,96% de sua capacidade total.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$15.114	7	19	0	51.030	8.656	16,96

Tabela 6.20: Resultados obtidos no 4.

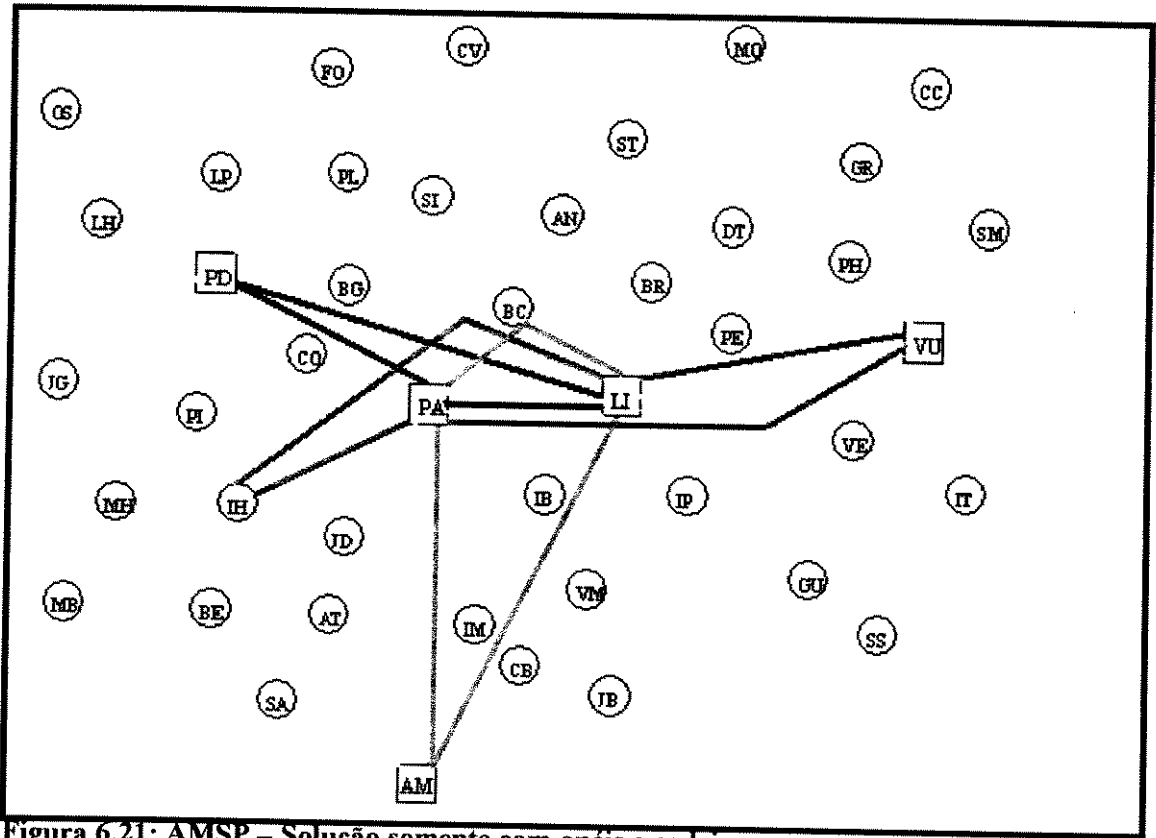


Figura 6.21: AMSP – Solução somente com anéis e cadeias.
Mostrando somente os anéis a 2.5 Mbps.

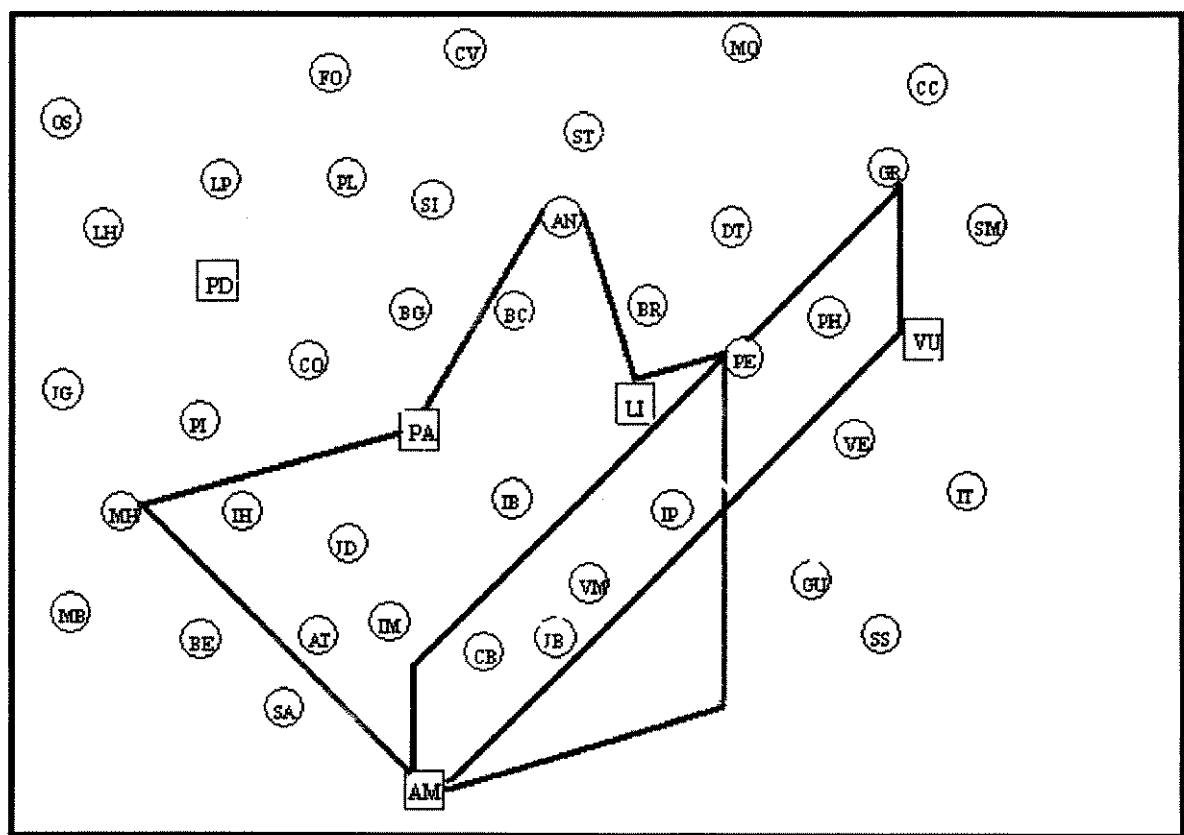


Figura 6.22: AMSP – Solução somente com anéis e cadeias.
Mostrando somente os anéis 622 Mbps.

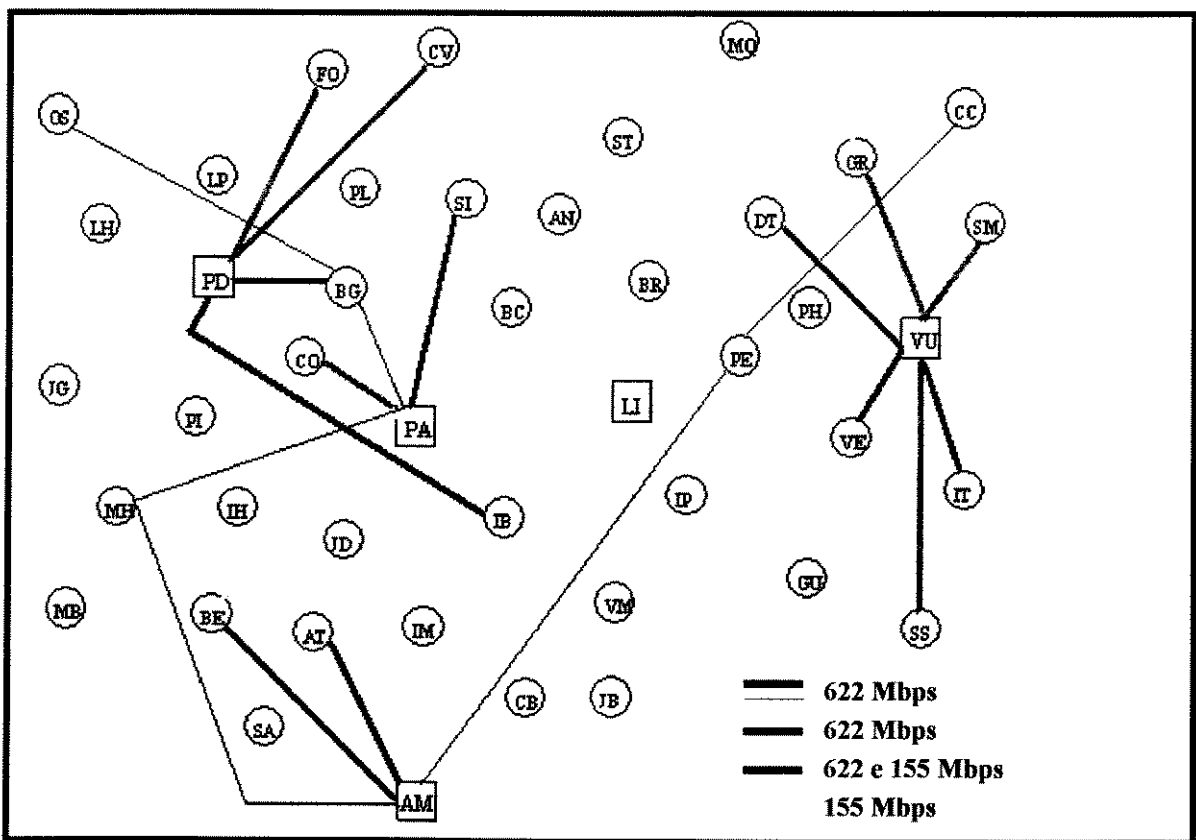


Figura 6.23: AMSP – Solução somente com anéis e cadeias.
Mostrando somente cadeias a 155 Mbps e 622 Mbps.

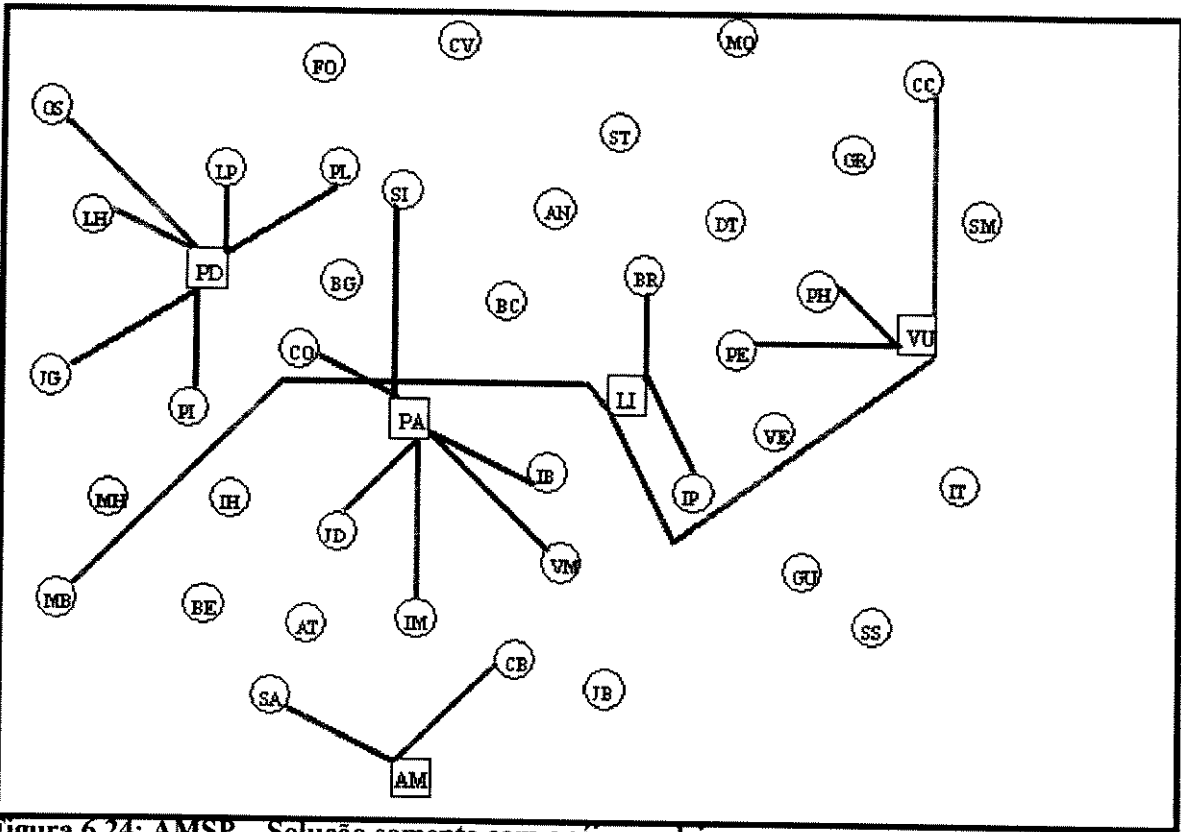


Figura 6.24: AMSP – Solução somente com anéis e cadeias.
Mostrando somente cadeias a 2.5 Gbps.

Teste 5: Utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia adicionada à proposta sugerida pelos planejadores – Solução com vários anéis

A Tabela 6.21 apresenta os resultados obtidos. Nesta solução entraram 20 enlaces ponto-a-ponto, 10 anéis: B1, B2, B3, B4, B6 e BP7 na hierarquia de 155 Mbps, B7 e B8 na hierarquia de 622 Mbps, B26 e B36 na hierarquia de 2.5 Gbps; 15 cadeias: C5 e C6 na hierarquia de 155 Mbps e 622Mbps; C3, C4, C13, C19 e CP18 na hierarquia de 622 Mbps; C1, C2, C8, C9, C10, C14, C16 e CP15 na hierarquia de 2.5 Gbps. O custo da solução foi igual a \$14.750. A folga da rede foi 16,53% de sua capacidade total. Veja Figuras 6.25 a 6.28.

Função Objetivo	Número de anéis	Número de cadeias	Número de enlaces pap	Capacidade Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (canais de 2 Mbps)	Folga Total (%)
\$14.750	10	15	20	43.472	7.185	16,53

Tabela 6.21: Resultados obtidos no teste 5.

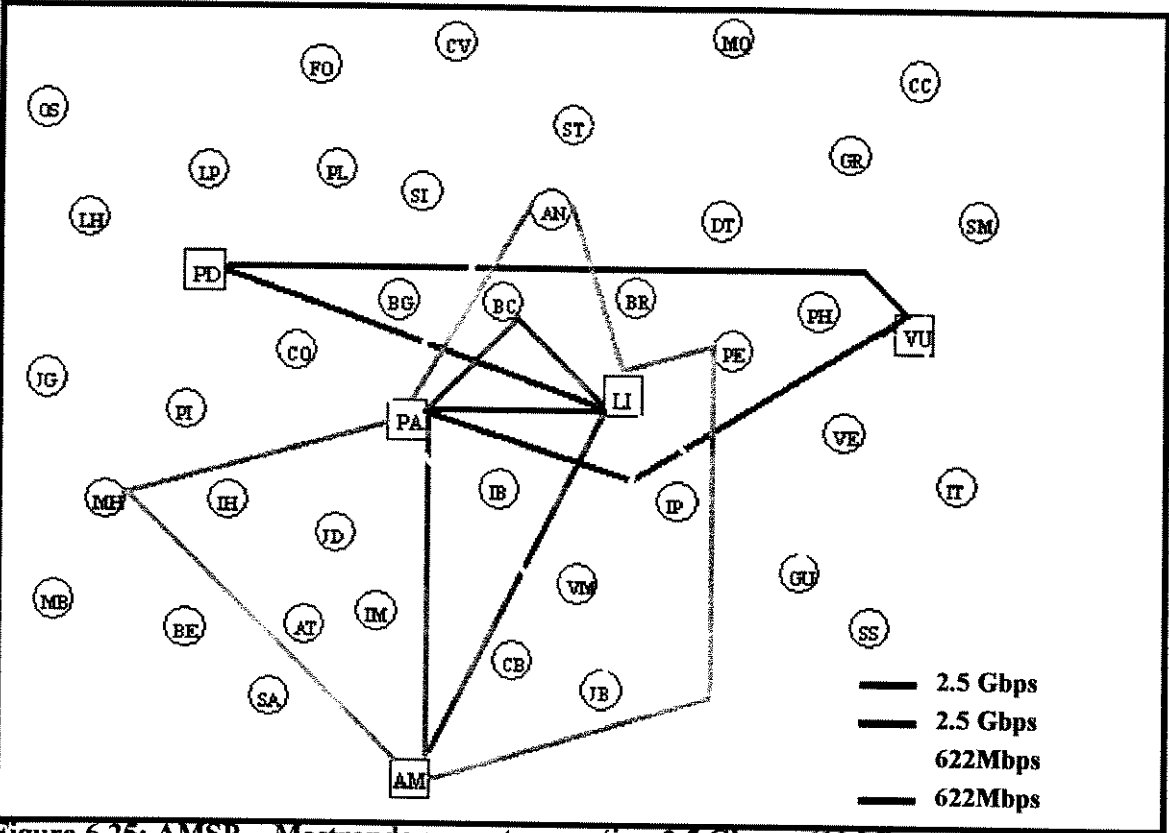


Figura 6.25: AMSP - Mostrando somente os anéis a 2.5 Gbps e 622 Mbps.

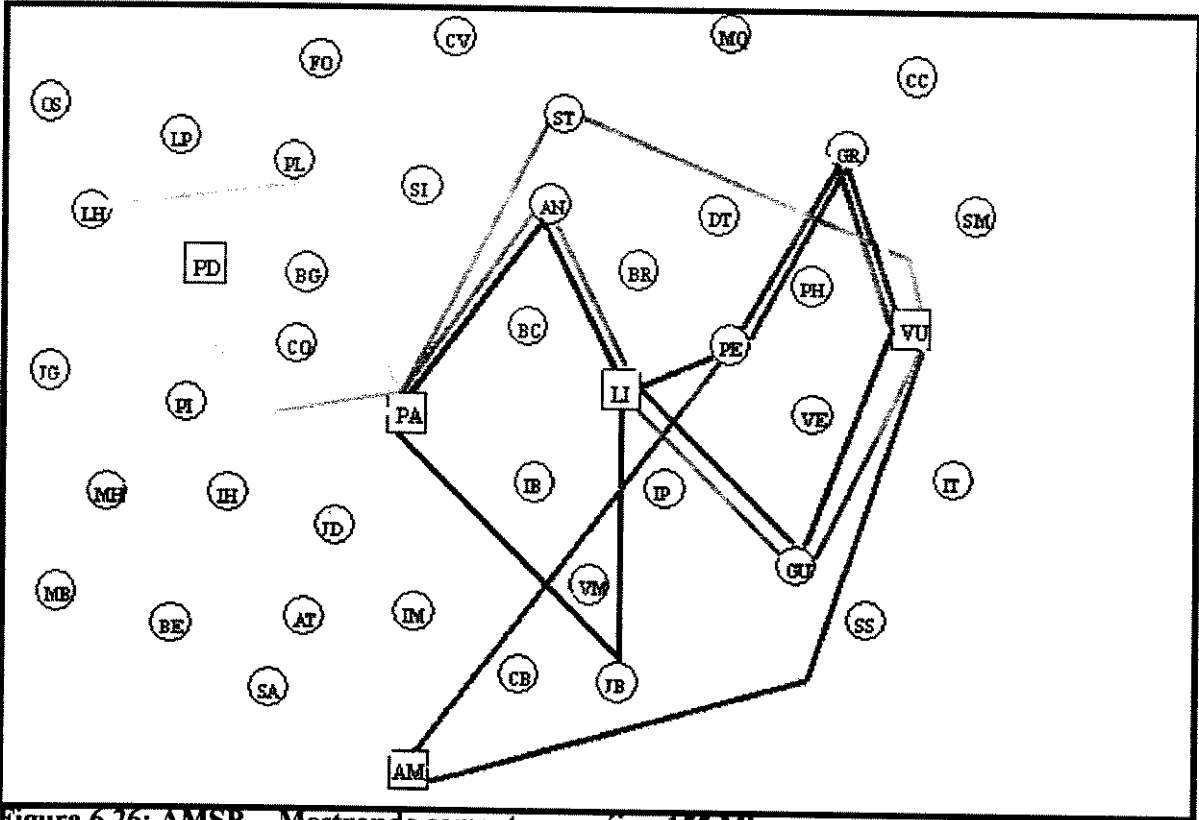


Figura 6.26: AMSP - Mostrando somente os anéis a 155 Mbps.

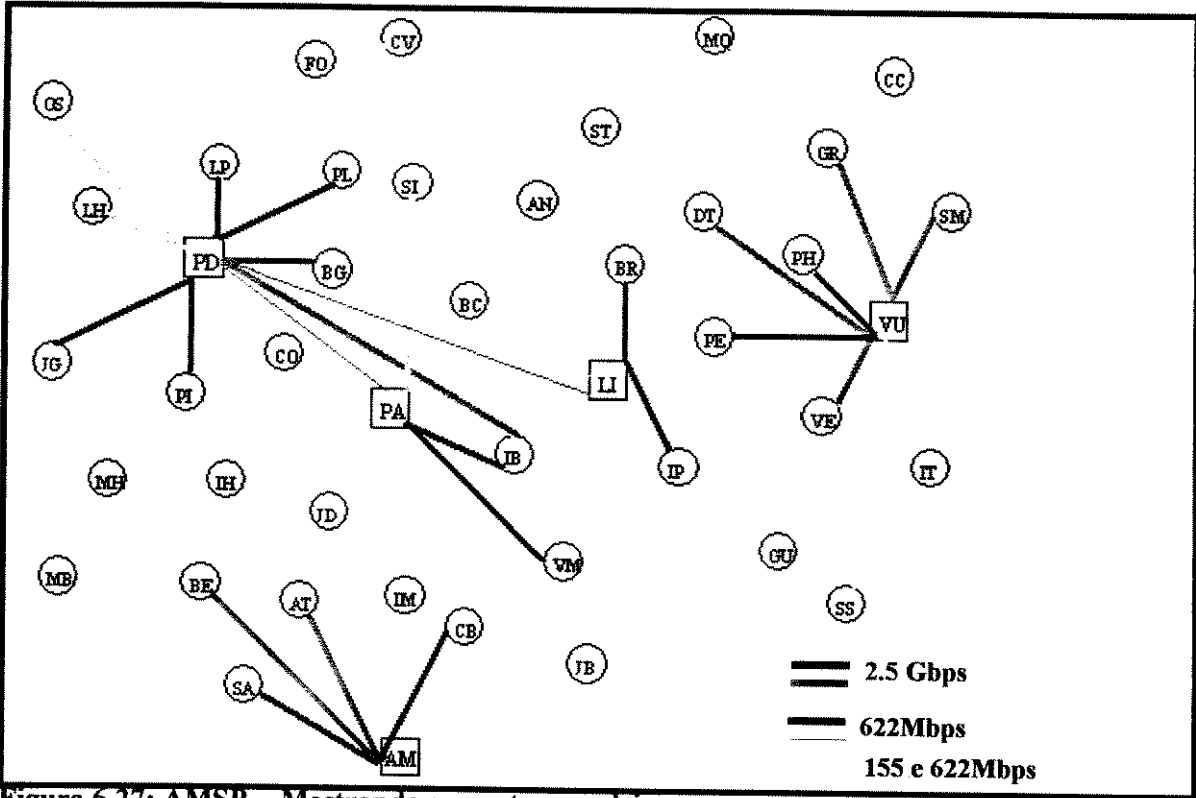


Figura 6.27: AMSP - Mostrando somente as cadeias.

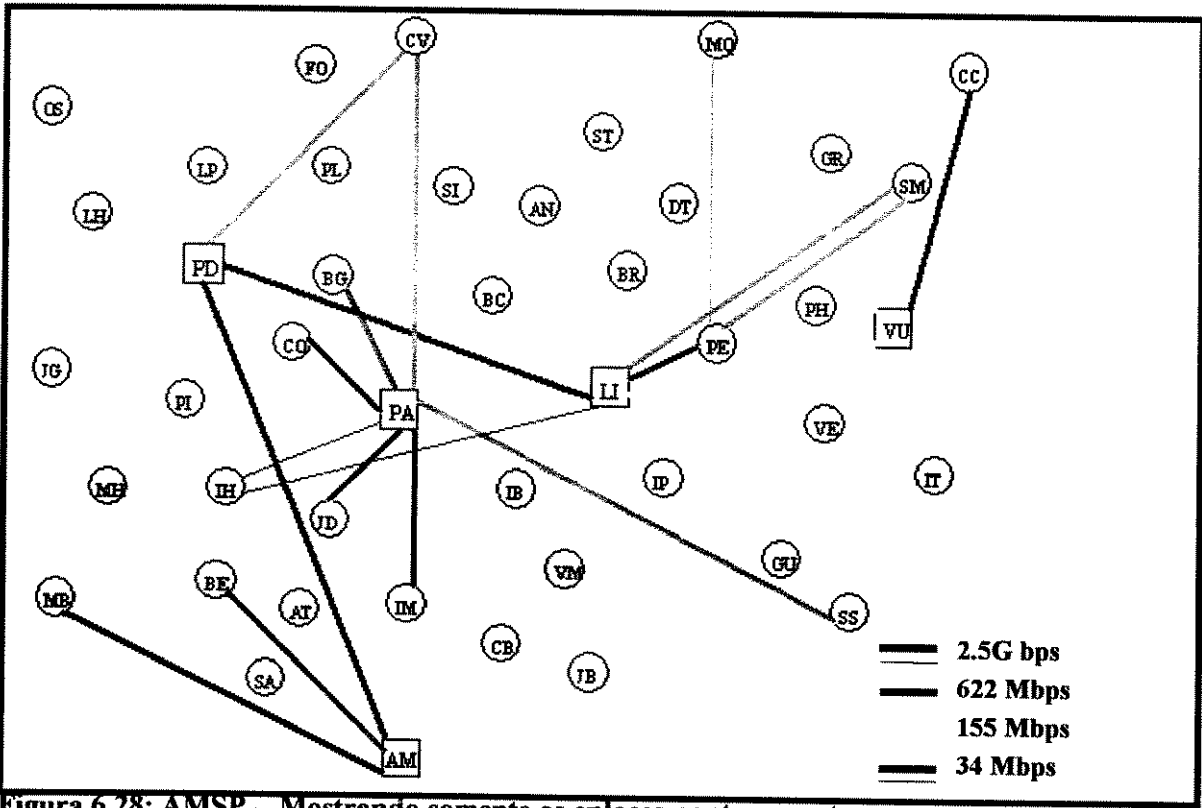


Figura 6.28: AMSP - Mostrando somente os enlaces ponto-a-ponto.

6.2.3 Análise comparativa dos resultados obtidos para a AMSP

Os resultados dos testes 1 a 5 feitos para AMSP são reapresentados na Tabela 6.22.

A solução obtida pelo planejador (teste 1) foi a mais cara e possui apenas um anel. Por outro lado, esta solução possui a maior folga, 22,23% da capacidade total da rede.

A solução de rede do teste 2 (utilizando proposta de candidatos do tipo anel e cadeia obtida pela metodologia) foi 11,02% mais barata que a solução encontrada pelo planejador, além de possuir uma quantidade de anéis bastante superior. A folga obtida é a menor dos cinco testes, 14,81% da capacidade total da rede.

O teste 3 (solução obtida com proposta da metodologia adicionada à proposta sugerida pelos planejadores) resultou na solução de menor custo: 11,88% mais barata que a solução encontrada pelo planejador. Esta solução apresenta um bom número de anéis e uma folga razoável.

A rede obtida no teste 4 (utilizando somente proposta de candidatos anéis e cadeias encontrada pela metodologia – solução somente com cadeias e anéis) apresentou o maior número de cadeias e 100% do seu tráfego é transportado através de anéis e cadeias. Em contrapartida, obteve-se um pequeno ganho em custo, apenas 1,33% em relação à solução de referência.

A solução de rede encontrada no teste 5 (utilizando proposta de candidatos da metodologia adicionada à proposta sugerida pelos planejadores) possui o maior número de anéis - 10 anéis - e tem ganho em custo igual a 3,71% em relação à solução de referência.

Vale ressaltar que os testes 2 e 4 foram realizados somente com proposta de candidatos da metodologia, com resultados satisfatórios.

TESTES	Custo Absoluto	Ganho em custo (%)	Número de enlaces pap	Número de anéis	Número de cadeias	Capacidade total (canais de 2 Mbps)	Folga total (%)
Teste 1	\$15.318	0	74	1	6	43.541	22,23
Teste 2	\$13.630	11,02	17	6	13	43.896	14,81
Teste 3	\$13.498	11,88	21	6	14	41.881	18,80
Teste 4	\$15.114	1,33	0	7	19	51.030	16,96
Teste 5	\$14.750	3,71	20	10	15	43.472	16,53

Tabela 6.22: Quadro Comparativo dos testes 1, 2, 3, 4 e 5.

CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES

O planejamento da rede de transporte ou de transmissão é uma das fases mais importantes do processo de planejamento da rede de telecomunicações. Devido a sua complexidade, o planejamento da rede de transporte é dividido em várias etapas, uma das quais é a de Enfeixamento. Um dos dados de entrada da etapa Enfeixamento é a proposta de topologias de equipamentos candidatas. A proposta de candidatos do tipo anel era feita manualmente pelo planejador e, a deficiência na qualidade destas propostas resultava em soluções com poucas topologias em anéis. Sabe-se, porém, que as atuais redes de telecomunicações requerem uma maior proteção dos serviços por ela transportados, exigindo arquiteturas de redes sobrevivenciáveis, capazes de oferecer maior confiabilidade à rede. Neste sentido, faz-se necessário um planejamento da rede enfatizando a elaboração das propostas de anéis bidirecionais.

Neste trabalho, apresentamos uma metodologia para a determinação de anéis bidirecionais dentro do contexto do planejamento da rede de transporte. Os anéis são obtidos a partir de uma solução ponto-a-ponto e utilizando a técnica de busca em grafos denominada Depth First Search (DFS). O algoritmo para a obtenção de anéis utiliza quatro critérios de avaliação, objetivando a determinação de anéis de boa qualidade.

Na fase de teste da metodologia proposta, utilizamos o pacote comercial CPLEX para a resolução do modelo matemático de programação linear inteira mista que rodou em uma estação de trabalho SUN SPARC 20 com 256 Mbytes de memória RAM, em ambiente UNIX. A montagem do modelo matemático foi feita pela ferramenta computacional denominada ENFEIXAMENTO e a proposta de candidatos pelo programa Busca_Ciclos, desenvolvido durante este trabalho. Ambos rodaram em um microcomputador Pentium 133 Mhz com 64 Mbytes de memória RAM em ambiente Windows NT.

O tempo computacional para a geração de anéis foi da ordem de segundos. É importante ressaltarmos novamente que, uma rodada do propositor automático com a opção 1 (encontrar anéis sem divisão da rede por hierarquia) só é aconselhada para redes com pequeno número de nós e arcos. Redes bastante conectadas apresentam uma quantidade de ciclos extremamente grande; caso não se limite o número máximo de anéis no programa, este pode

ficar horas rodando. Em alguns experimentos realizados para este tipo de rede, colocando um limite de 500 anéis, o tempo gasto ainda foi da ordem de segundos, o que ainda é bastante rápido.

Realizamos testes práticos aplicados à rede da Área Metropolitana de São Paulo. Nos testes feitos com propostas de anéis e cadeias da metodologia, obteve-se soluções de rede com custo menor do que aquele encontrado na solução obtida com proposta elaborada pelo planejador. Além disso, as soluções de rede obtidas utilizando anéis do propositor automático, apresentaram um número maior dessas topologias. Para a rede de São Paulo, obteve-se soluções com uma economia de até 11% em relação a solução de referência. Isto se deve ao fato de que para redes de grande porte, a dificuldade do planejador em determinar anéis de boa qualidade é ainda maior. Dessa forma, a utilização de um propositor automático de anéis não só se justifica por facilitar o trabalho do planejador, mas torna-se fundamental para a elaboração de propostas de anéis de boa qualidade.

Portanto, a metodologia apresentada auxilia no planejamento de redes SDH, nas quais topologias em anel têm sido cada vez mais implementadas, permitindo obter soluções de menor custo e mais confiáveis.

Entretanto, o trabalho de pesquisa não termina aqui. No momento, o grupo orientado pelo Prof. Raul Ribeiro está trabalhando numa metodologia de planejamento de redes SDH baseada em camadas funcionais, descrita sucintamente a seguir.

Em SDH, a atividade de arrumar eficientemente VC12 e VC3 dentro de um VC4 é muito importante, já que o VC4 acrescido de um cabeçalho de seção, torna-se um STM-1, sinal básico SDH. Tal atividade é chamada “*grooming*”.

De acordo com essas características da tecnologia SDH, propõe-se uma nova idéia de planejamento da rede de transmissão. Essa proposta se baseia numa concepção de divisão da rede em **camadas funcionais**, possibilitando que cada camada seja planejada individualmente. Considera-se quatro camadas, que são: camada de circuitos, lógica, de equipamentos e física. Cada camada é vista como alimentadora da próxima, podendo haver realimentação de informações.

Na camada lógica, o objetivo é mapear VCs de baixa ordem (VC12 e VC3) em VCs de alta ordem (VC4) de forma a minimizar o número destes, ou seja, visa-se fazer este mapeamento da melhor forma possível, diminuindo a dimensão das matrizes de demanda e o número de *grooming* nos Centros de Fios. Outros trabalhos têm sido propostos baseados nesta idéia. Em [Pereira et alii 98] é descrito um método para resolver o problema de roteamento e alocação de canais E1 dentro de *containers* VC4 em redes SDH baseadas em anel.

A rede lógica obtida nesta etapa constitui-se dos dados para a etapa de Enfeixamento, em substituição à rede de equipamentos ponto-a-ponto, utilizada para a determinação da proposta de anéis, como apresentado nesta tese.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Ahuja et alii 93] Ahuja, R. K.; Magnanti, T. L.; Orlin, J. B.; **“ Network Flows”**, Prentice Hall, 1993.

[Allen et alii 98] Allen, J. D.; Nathan, S.; Huang, J.; **“Rings in a Highly-Connected Network – an Economic Comparison”**, First International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks, Belgium, May 1998, O42, pp. 1-4.

[Bergamaschi et alii 95] Bergamaschi, M.; Ribeiro, R.; Tavares, H.; Quaglia, E.; Bortolon, S.; **“O Uso de Estruturas de Rede em Anel e Cadeia na Fase do Enfeixamento: um Estudo de Caso”**, Congresso da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional, Vitória/ES, novembro de 1995.

[Bergamaschi 96] Bergamaschi, Marco A.; **“Um Método Heurístico de Enfeixamento Aplicado a Rede de Transmissão de Grande Porte”**, Tese de Mestrado, julho de 1996, FEEC-UNICAMP.

[Bortolon 96] Bortolon, Saulo; **“Planejamento Otimizado de Redes de Transporte na Hierarquia Digital Síncrona”**, Tese de Doutorado, setembro de 1996, FEEC-UNICAMP.

[Bortolon et alii 96] Bortolon, S.; Ribeiro, R.; Tavares, H.; Bergamaschi, M.; Quaglia, E.; **“Planejamento Otimizado de Redes SDH em Telecomunicações”**, XI Simpósio Brasileiro de Automática, São Paulo/SP, pp. 251-256, setembro de 1996.

[Cosares et alii 95] Cosares, S.; Deutsch, D.; Sannie, I.; Wasem, O. J.; **“Sonet Toolkit: A Decision Support System for Designing Robust and Cost Effective Fiber-Optic Networks”**, INTERFACES, vol. 25, nº 1, January-February 1995, pp. 20-40.

- [CPLEX 89] CPLEX Optimization, Inc.; **“Using the CPLEX Callable Library”**, version 3.0, 1989-1994.
- [Flanagan 90] Flanagan, T.; **“Fiber Network Survivability”**, IEEE Communications Magazine, vol. 28, nº 6, pp. 46-53, June 1990.
- [Formigoni 95] Formigoni Filho, J. R.; **“Rede Externa: Planejamento de Rotas Estratégicas”**, Tese de Mestrado, setembro de 1995, FEEC-UNICAMP.
- [Giannoccaro & Ferraris 98] Giannoccaro, M.; Ferraris, G.; **“Comparison between a pure SDH network and a two layer network based on SDH and optical cross connects”**, First International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks, Belgium, O21, pp. 1-6, May 1998.
- [Grover et alii 91] Grover, W. D.; Bilodeau, T. D.; Venables, B. S.; **“Near Optimal Spare Capacity Planning in a Mesh Restorable Network”**, Proc. IEEE Globecom’91, pp. 2007-2012, Dec. 1991.
- [Grover 92] Grover, W. D.; **“Case Studies of Survivable Ring, Mesh and Mesh-Arc Hybrid Networks”**, Proc. IEEE Gobecom’92, pp. 633-638, Dec. 1992.
- [Grover et alii 95] Grover, W. D.; Slevinsky, J. B.; MacGregor, M. H.; **“Optimized design of ring-based survivable networks”**, Can. J. Elect. & Comp. Eng., vol. 20, nº 3, pp.139-149, 1995.
- [ITU-T Rec. G.707] ITU-T Recommendation G.707, **“Network node interface for the Synchronous Digital Hierarchy (SDH)”**, March 1996.
- [Johnson et alii 98] Johnson, D.; Veitch, P.; Hayman, N.; **“Core Transport Network Redesign”**, First International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks, Belgium, O2, pp. 1-5, May 1998.
- [Laguna 94] Laguna, M.; **“Clustering for the design of Sonet Rings in Interoffice Telecommunications”**, Management Science, vol. 40, nº 11, pp. 1533-1541, Nov. 1994.

- [Lardiés & Aguilar 98] Lardiés, A.; Aguilar, A.; **“Planning Methodology for SDH+Optical Networks”**, First International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks, Belgium, O20, pp. 1-7, May 1998.
- [Mello 96] Mello, Oderson D.; **“Sobrevivenciabilidade e Indisponibilidade no Planejamento de Redes de Telecomunicações”**, Tese de Mestrado, novembro de 1996, FEEC-UNICAMP.
- [Nakamura & Tavares 98] Nakamura, R. Y.; Tavares, H.; **“A New Model for Optimal Planning of Synchronous Digital Hierarchy Unidirectional Rings”**, Proc. SBT/IEEE ITS'98, pp. 335-340, Aug. 1998.
- [Nortel 95] _____; **“Synchronous Transmission Systems”**, Nortel Limited 1995.
- [Pereira et alii 98] Pereira, J.; Bortolon, S.; Garcia, A. S.; Pignaton, R.; Guerra, S.; **“Optimizing the Routing/Allocation of E1 over VC-4 in SDH Networks”**, First International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks, Belgium, O4, pp. 1-8, May 1998.
- [Quaglia et alii 95] Quaglia, E.; Tavares, H.; Ribeiro, R.; **“O Enfeixamento no Planejamento da Transmissão: Um Estudo de Caso”**, XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Águas de Lindóia/SP, pp. 458-463, 1995.
- [Quaglia 97] Quaglia, Eduardo J.; **“Planejamento da Rede de Transmissão em Telecomunicações: O Problema do Enfeixamento”**, Tese de Mestrado, dezembro de 1997, FEEC-UNICAMP.
- [RNT 97] RNT – Revista Nacional de Telecomunicações; **“Telesp compra SDH”**, Número 211, março/1997.
- [Slevinsky 93] Slevinsky, J. B.; Grover, W. D.; MacGregor, M. H.; **“An Algorithm for Survivable Design Employing Multiple Self-Healing Rings”**, Proc. IEEE Gobecom'93, pp. 1568-1573, Nov. 1993.

[Trindade 95] Trindade M. B.; Nakamura, R. Y.; Souza Fº, A. O.; **“Planejamento de Anéis Síncronos Unidirecionais: Modelo de Otimização e um Estudo de Caso”**, XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Águas de Lindóia/SP, pp. 452-457, 1995.

[Wu 92] Wu, T-H.; **“Fiber Network Service Survivability”**, Artech House, London, 1992.

[Wu 95] Wu, T-H.; **“Emmerging Technologies for Fiber Network Survivability”**, IEEE Communications Magazine, vol. 33, nº 2, pp. 58-74, Feb. 1995.