

702

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Setembro de 1996

mt

Planejamento Otimizado de Redes de Transporte na Hierarquia Digital Síncrona

por: **Saulo Bortolon**
orientador: **Hermano M. F. Tavares**

Tese apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da
Universidade Estadual de Campinas
como parte dos requisitos exigidos à
obtenção do título de *Doutor em Engenharia Elétrica*

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por SAULO BORTOLON
e aprovada pela Comissão
Julgadora em 09/09/96.


Orientador

B648p

29031/BC

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

B648p

Bortolon, Saulo

Planejamento otimizado de redes de transporte na hierarquia digital síncrona / Saulo Bortolon.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Hermano M. F. Tavares.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telecomunicações. 2. Pesquisa operacional. 3. Análise de redes (Planejamento). I. Tavares, Hermano M. F.. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Agradeço sinceramente

A Deus,

aos meus pais, Jenilda e Wenceslau, de quem sempre recebi apoio, conselhos e, principalmente, muito amor,

a Cristina, pelo amor e pela paciência de namorar um doutorando,

a Gláucia e Aloísio, pela confiança,

ao Hermano, pela orientação e pelas lições de coerência e de dedicação ao trabalho, que presenciei nos últimos quatro anos,

ao pessoal técnico da TELESP: Edna, Maya, Solon, Célia, Júlio, Monteiro, Paulo D'Elboux, Marcelo, Orton, Manoel, Schincariol, Edson, Ville, e outros mais, que tanto contribuíram para este trabalho,

à Edna, pelo esforço de integrar a ferramenta computacional desenvolvida aqui aos sistemas da TELESP. Parabéns !

ao Anilton, por ter aberto os caminhos que desembocaram nesta tese,

ao Bergamaschi, Eduardo, Nathan, Paulão, Antônio e Adriano, que compartilharam a experiência riquíssima de transformar idéias em código executável,

ao Raul, por ter viabilizado o Convênio da UNICAMP com a TELESP, muito importante para este trabalho,

ao Walcir e Suze, que mantiveram o laboratório em condições sempre que foi necessário, e pela amizade,

aos companheiros de pós-graduação no DENSIS. Força pessoal, falta pouco !

aos companheiros do Departamento de Informática da UFES, que aguentaram a carga de disciplinas enquanto eu pesquisava,

ao Augusto e Érica, Jorge e Clélia, Marcos e Marta, Felipe, Celso, Fred, Ricardo, César, pela amizade e pelos churrascos e papos, que amenizaram tantos fins de semana,

aos amigos que entenderam a dedicação necessária a esta tese: Celso e Miriam, Sílvia, Nishi, Seidi, Márcio e Rosângela, Norton e Yara, Jesus e Ana, Marcelo, Silas, Guilherme. Afinal, aprendemos muito juntos.

À CAPES, pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

PLANEJAMENTO OTIMIZADO DE REDES DE TRANSPORTE NA HIERARQUIA DIGITAL SÍNCRONA

Resumo

A Rede de Transporte (RT) compreende todos os sistemas responsáveis pela comunicação entre centros de fios de uma rede de telecomunicações. É talvez a porção da rede que mais rapidamente incorpora inovações tecnológicas à medida que estas alcançam o mercado. Também é uma das partes das redes de telecomunicações onde mais tradicionalmente se usam ferramentas de otimização matemática ao se efetuarem estudos de planejamento.

Nos últimos anos a RT vem sendo revolucionada pela introdução da Hierarquia Digital de Transmissão Síncrona (SDH), que viabiliza o emprego de altíssimas taxas de transmissão e de topologias inovadoras, das quais destacam-se os anéis auto-regeneradores e os hubs (roteadores). Estas novas opções tornam obsoletas as técnicas de planejamento hoje existentes, fazendo-se necessárias novas metodologias para o projeto de redes SDH.

Neste sentido, propõe-se aqui uma metodologia de planejamento para redes de transporte SDH baseada em modelos de otimização matemática. Especificamente, propõem-se modelos de Programação Linear Inteira Mista que tratam a Rede de Transporte como uma rede de fluxo multiproduto, com custos associados a componentes modulares. A metodologia prevê um alto grau de interação com planejador ao longo do processo de planejamento, o que a faz adequada a sistemas computacionais de suporte à tomada de decisão. Tal metodologia é aplicada em redes reais de grande porte, incluindo as da Área Metropolitana de São Paulo e a rede Interurbana do Estado de São Paulo, com excelentes resultados.

OPTIMIZATION-BASED PLANNING OF TRANSPORT NETWORKS WITHIN THE SYNCHRONOUS DIGITAL HIERARCHY

Abstract

The Transport Network - TN - is the part of a Telecommunications Network that provides connections between central offices. Probably, this is the part of the communications network that first incorporates any technological evolution. At least, that's what happened with voice digitalization and optical transmission. The transport network is also a network where optimization techniques are traditionally used during planning studies.

In recent years the TN has been the preferable place for introduction of the Synchronous Digital Hierarchy (SDH), that enables to use very high transmission bit-rates on inovative network topologies. Among those, self-healing rings and chains topologies have been widely used. Those new network topologies and transmission rates have led the existing planning methodologies to obsolescence. This work proposes a new planning methodology to SDH transport networks, along which several optimization techniques are used. Mixed Integer Linear programs are used to model the SDH transport network as a multicommodity flow network, with modular capacities associated with its arcs and nodes. The proposed methodology permits several interactions between network planners and the optimization models along the planning process. These optimization / interaction based approach makes the methodology very appealing to computer-based decision suport systems. Applications to real world large networks are shown, including São Paulo city metropolitan area and São Paulo state long-haul networks - for sure, the largest networks of their kind in South America.

Sumário

I.	Introdução	1
•	<u>Uma Mudança de Paradigma</u>	3
•	<u>Planejamento de Redes, Pesquisa Operacional & Interação com o Usuário</u>	3
•	<u>A Proposta desta Tese</u>	4
II.	Tecnologias de Transmissão e Métodos de Planejamento	5
II.1	Redes Pré-Ópticas	5
II.2.	Planejamento de Redes Ópticas Plesiócronicas	7
•	<u>Princípios de Multiplexação Plesiócrona</u>	7
•	<u>Impacto da Tecnologia PDH no Planejamento da Rede de Transporte</u>	9
II.3.	Introdução da Hierarquia Digital Síncrona nas Redes de Transporte	11
II.3.1.	Alguns conceitos SDH: Virtual Containers, Path, Line & Section Layers	13
•	<u>Princípios de Multiplexação Síncrona</u>	13
II.3.2.	Uma Metáfora para a Rede de Transporte	17
•	<u>Relacionamento entre as Camadas de Path e Section</u>	17
•	<u>Divisão da RT em camada de Alta e Baixa Hierarquia</u>	18
II.3.3.	Elementos de Rede (NE) da Hierarquia SDH: OLTM, ADM e SDXC	22
II.3.4.	Topologias Elementares em Redes de Transporte SDH: Anéis, Cadeias e Hubs	23
•	<u>Hubs- Nós Concentradores</u>	23
•	<u>Cadeias de ADMs</u>	23
•	<u>Anéis de ADMs</u>	24
•	<u>Anéis Biconectados</u>	26
•	<u>Combinações de Anéis e Hubs</u>	28
II.3.5.	Estratégias de Proteção para Redes SDH	29
•	<u>Automatic Protection Switching</u>	29
•	<u>Path-Switching</u>	30
•	<u>Line -Switching</u>	30
•	<u>Optical Diverse Protection</u>	31
•	<u>Comparando Estratégias de Proteção para Anéis</u>	31

III.	Metodologia de Planejamento para a Tecnologia SDH	33
III.1.	Passos para o Uso de Modelos de Fluxo Multiprodutos em Problemas de Planejamento de Redes	34
III.2	Uma Nova Metodologia de Planejamento para Redes SDH	38
III.2.1.	Fase de Agrupamento de Centros de Fios	45
	III.2.1.1 Agrupamento de Centros de Fios em Torno de Hubs	47
	III.2.1.2. Agrupamento de Centros de Fios em Anéis	49
III.2.2.	Seleção de Galerias	51
III.2.3.	Fase de Enfeixamento de Troncos	53
	III.2.3.1.Proposta de Configurações de Equipamentos Candidatas para o Enfeixamento	55
	• <u>Proposta de Candidatos do Tipo Ponto-a-Ponto</u>	55
	• <u>Usando a Matriz de Demandas e o Agrupamento de Cfs para Analisar o Fluxo em Ligações Ponto-a-Ponto</u>	55
	• <u>Escolhendo as Taxas de Transmissão Competitivas para uma Ligação Ponto-a-Ponto</u>	58
	• <u>Proposta de Candidatos do Tipo Anel ou Cadeia</u>	61
	III.2.3.2. Geração Automática de Caminhos	62
	III.2.3.3. Montagem do Modelo Matemático	66
	III.2.3.4. Obtenção e Análise de Soluções	68
III.2.4.	Fase de Arranjo e Dimensionamento de Fibras	70
III.3.	Outros Trabalhos sobre Metodologias de Planejamento de Redes SDH	72

IV.	Modelagem Matemática do Problema de Enfeixamento de Troncos	73
•	<i><u>Modelagem de Anéis Uni-Direcionais (UPSHR)</u></i>	76
•	<i><u>Usando o Modelo de Fluxo Multiprodutos para representar o Problema de Enfeixamento</u></i>	77
•	<i><u>Formulando Matematicamente o Modelo de Fluxo MultiProdutos do Enfeixamento</u></i>	78
V.	Aplicações da Metodologia Proposta em Redes Reais: Resolução do Problema de Enfeixamento de Troncos	84
V.1.	Estudo da Rede da Área Metropolitana de São Paulo: solução baseada em hubs	88
•	<i><u>Solução 1 da AMSP: somente ligações ponto-a-ponto</u></i>	94
•	<i><u>Solução 2 da AMSP: fixando o backbone e adotando um procedimento heurístico de solução</u></i>	97
•	<i><u>Solução 3 da AMSP: incorporando mais sugestões dos planejadores</u></i>	103
V.2.	Estudo da Área Metropolitana de São Paulo: solução baseada em anéis	106
V.3.	Estudo da Área Interurbana de São Paulo	109
V.4.	Observações sobre a aplicação da Metodologia Proposta a Redes Reais	116
VI.	Conclusões	117
	Referências Bibliográficas	122

I. Introdução

Nos últimos anos, as empresas de telefonia pública evoluíram da posição de “prestadoras de serviços de transmissão de voz” para “prestadoras de serviços baseados em telecomunicações”, em um ambiente cada vez mais competitivo. Neste processo, novas tecnologias e serviços alteraram profundamente cada uma das partes que compõem as Redes de Telecomunicações. Isto pode ser observado claramente na **Rede de Transporte (RT)**, com a introdução da tecnologia de transmissão SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), que serve/servirá de suporte a diversos serviços diferentes, entre eles a transmissão ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e às linhas privadas de alta velocidade.

A Rede de Transporte é a parte da rede responsável por intercomunicar os Centros de Fios (CFs), onde um CF é definido, tradicionalmente, como um edifício onde se encontram localizadas uma ou mais centrais de comutação de assinantes de serviços de voz. Todavia, o escopo da Rede de Transporte está sendo ampliado, e hoje pode-se considerar que os nós da rede de transporte incluem também rádio-bases e centrais de controle de telefonia celular, grandes assinantes, centrais de comutação de serviços de dados de alta velocidade, entre outros.

A tecnologia SDH foi definida pelo ITU (*International Telecommunications Union*) a partir do padrão SONET (*Synchronous Optical NETWORK*), um esforço do BELLCORE (*Bell Communications Research*) em estabelecer uma tecnologia de transmissão digital em substituição à anterior hierarquia PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*). A este respeito, ver **Sexton & Reid (1992)**. Buscava-se uma família de equipamentos de transmissão com maiores taxas de transmissão, mais e melhores facilidades de gerência / operação e maior interoperabilidade entre fabricantes. Esta tecnologia é atualmente considerada fundamental para a competitividade de empresas prestadoras de serviços em telecomunicações. Ela possibilita acelerar a oferta de serviços, permite garantir a qualidade e confiabilidade do transporte e oferece interfaces para gerência centralizada não disponíveis na tecnologia PDH.

Entretanto, como toda tecnologia, seus efeitos somente serão benéficos se aplicada de maneira eficaz. Isto implica em se planejar a RT tendo em mente conceitos “corretos”. Embora isto soe um tanto abstrato, o ambiente competitivo nas Telecomunicações e as novas tecnologias disponíveis exigem posturas não-tradicionais do planejador quando este projeta uma rede de transporte. Assim, os conceitos de planejamento estabelecidos há anos para as redes analógicas já não são mais aplicáveis às RTs SDH. Os itens a seguir procuram demonstrar quão extremada foi esta evolução:

- **Serviços Transportados** - Nas redes analógicas, a RT suportava majoritariamente serviços de voz comutada; hoje, suporta serviços inteligentes, voz e dados comutados, serviço móvel celular, linhas privadas não-comutadas de diversas velocidades e serviços ATM.
- **Objetivo do Planejamento** - Nas redes analógicas - em ambiente monopolístico - tinha-se por objetivo planejar a RT a um custo mínimo, garantindo uma certa qualidade de serviço. Hoje, em um ambiente competitivo, outros objetivos se sobrepõem: antecipar-se à concorrência ou gerar maiores receitas, por exemplo.
- **Perfil do Usuário** - Nas redes analógicas, cada assinante correspondia a um canal de voz. Com o tempo, surgiram as linhas-tronco digitais (30 canais de voz) e grandes assinantes que exigiam diversas destas linhas-tronco para si. A demanda era

relativamente previsível com alguns anos de antecedência. Hoje, entretanto, serviços home-banking e servidores internet exigem dezenas de linhas-tronco em um único pedido, e é preciso que a rede seja flexível para suportar estas e outras demandas. Por exemplo, uma linha de alta velocidade pode ser solicitada pelo usuário para uso por um dia apenas - ocorrência comum em feiras de informática.

- Custos Associados** - Nas redes analógicas, o custo das redes estava muito associado ao comprimento total de cabos de cobre que eram instalados. Nas atuais redes digitais, o uso de fibras ópticas reduziu a importância das distâncias, mas aumentou a importância relativa dos equipamentos nas pontas. Multiplexadores, equipamentos roteadores e dispositivos de proteção são componentes importantes do custo de uma rede. Talvez ainda mais impressionante seja o fato de que o software de gerência passou a ter um peso significativo frente ao custo total - sem contar a sua importância estratégica.
- Confiabilidade da Rede** - Nas redes analógicas, a Rede de Transporte ia sendo construída gradativamente, com a instalação de novos troncos entre centrais de comutação, aproveitando-se de cabos multipares. Esta arquitetura era inerentemente segura. Hoje, com a transmissão óptica, um único par de fibras transmitindo a 10 Giga-bits por segundo, pode ser responsável por toda a demanda entre duas centrais, ou mesmo por toda demanda originada em uma cidade. Isto exige que o planejador se preocupe, desde o primeiro instante, com a confiabilidade da rede.
- Tipos de Equipamentos Disponíveis** - O equipamento básico disponível na tecnologia PDH é o multiplexer (MUX), sempre instalado aos pares. Neste caso, o projeto da malha de equipamentos se resume às decisões de onde instalar os MUX e qual a taxa de transmissão mais econômica a ser utilizada, em redes semelhantes à apresentada na Figura 1.1. Já na hierarquia SDH, além do equipamento multiplexer, são disponíveis os equipamentos SDXC (cross-connect) e ADM (Add-Drop Multiplexer). Com estes equipamentos, podem-se construir diversas topologias bem mais complexas (anéis, cadeias, "estrela" baseada em *hubs* - veja a Figura 1.2). Conseqüentemente, as decisões de planejamento também são bem mais complicadas.

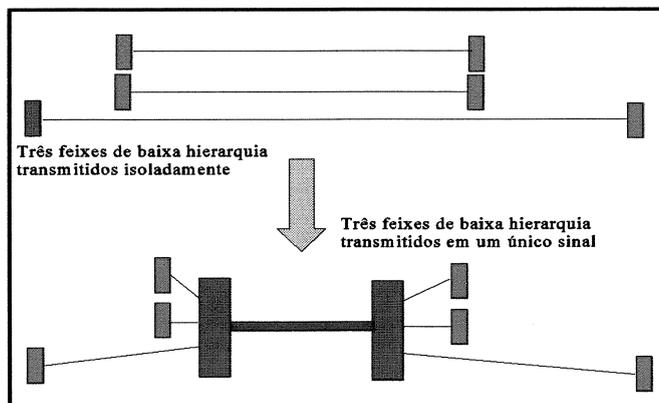


Figura 1.1: economias de escala na hierarquia PDH

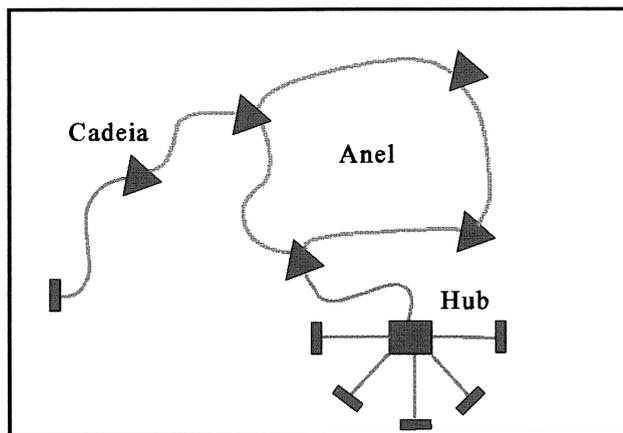


Figura 1.2: exemplos de topologias permitidas na Hierarquia SDH

Uma Mudança de Paradigma

Em resumo, ocorre uma mudança de paradigma ao se passar do planejamento de redes analógicas - ou mesmo redes PDH - para o planejamento de redes SDH. Nas primeiras, pode-se empregar uma **visão de planejamento orientada à conexão** enquanto na segunda deve-se empregar uma **visão orientada à rede** (Sexton & Reid, 1992).

As redes analógicas e PDH consistiam em uma malha de ligações ponto-a-ponto entre centros de fios. Em uma rede PDH é tecnicamente complicado (ou até inviável) implementar conceitos como *hubs* e anéis de alta velocidade. Já em RTs-SDH, os equipamentos SDXC e ADM permitem fazê-lo com certa facilidade.

Não é mera coincidência que os conceitos análogos de anéis viários e pontos de transbordo sejam de uso cotidiano em redes de transporte de mercadorias. Esta analogia será empregada no Capítulo II e em outras oportunidades ao longo deste trabalho para facilitar a mudança da visão de planejamento de redes PDH ponto-a-ponto para redes SDH com anéis e hubs.

Uma das mudanças mais denunciadoras da diferença entre as visões de planejamento PDH-SDH talvez seja o nome da “embalagem” na qual a informação é transportada nas duas tecnologias. Na PDH a informação é “multiplexada no tempo” no ponto de transmissão e reconstituída totalmente na recepção - como um caminhão em que toda a carga é embarcada na partida e totalmente desembarcada na chegada, sem paradas intermediárias. Nas redes SDH, a informação é posta em “*containers*” (o termo é exatamente este!), sendo que os *containers* transmitidos podem ou não ser retirados do meio de transmissão ao passar em um ponto intermediário da rede - exatamente o conceito de *container* das redes de transporte rodoviário.

Um outro fator nesta mudança da “visão de planejamento” é que a nova Rede de Transporte possui uma estrutura em camadas, com múltiplas alternativas para o planejador viabilizar tanto o atendimento da demanda, quanto a redução de custos ou o aumento da confiabilidade da rede. Em redes de grande porte, a quantidade de alternativas possíveis assume uma proporção assustadora. Daí, é preciso estabelecer um Método de Planejamento para maior segurança na tomada de decisão.

Planejamento de Redes, Pesquisa Operacional & Interação com o Usuário

A Pesquisa Operacional (PO) tradicionalmente tem sido aplicada no planejamento de Redes de Transporte de telecomunicações, sejam elas analógicas, plesiócronas ou síncronas. Todavia, existe uma oportunidade única na aplicação de ferramentas de PO no planejamento de redes SDH, quando comparadas com o que foi feito em relação às redes analógicas e PDH.

Um primeiro motivo é a mudança de paradigma citada nos parágrafos acima. Igualmente importante é a evolução das ferramentas de PO, que antes consistiam em um modelo matemático e em um algoritmo de resolução acoplado, com alguma forma computacionalmente simples de entrada e saída de dados. Muitas vezes, resultados brilhantes (em termos de otimização combinatória) eram ignorados pelos usuários, fosse pela dificuldade de se incorporar alguma forma de conhecimento que o planejador tinha a respeito do problema e/ou a forma pouco razoável de apresentar os resultados. Com a popularização de Interfaces Gráficas de Usuário (GUI) e o surgimento de pacotes computacionais de otimização relativamente baratos, tornou-se possível

a implementação de ferramentas de PO mais amigáveis.

O reconhecimento da importância da interação com usuário na aceitação dos resultados das ferramentas de PO não se refere apenas à apresentação gráfica de resultados. Tão ou mais importante é a valorização da participação dos usuários ao longo do processo de obtenção de soluções alternativas para cada problema apresentado (Jack, Kai & Shulman, 1995). Esta participação concorre para que as soluções obtidas sejam aceitas pelos planejadores e reduz o tempo de obtenção das soluções. Ocorre que, com o tamanho das atuais redes de transporte metropolitanas e interurbanas e com a quantidade de alternativas de implementação permitidas pela tecnologia SDH, fica virtualmente impraticável o desenvolvimento de um algoritmo de otimização capaz de processar uma busca completa no espaço das soluções e assim obter um ótimo global.

A Proposta desta Tese

Dentro deste espírito, esta tese trata da aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional no planejamento de Redes de Transporte SDH. Propõe-se - e emprega-se - uma metodologia baseada em modelos matemáticos de otimização para o planejamento de redes SDH. Exemplos de aplicação desta metodologia a redes reais de grande porte são apresentados.

A RT-SDH é traduzida em modelos de fluxo multiprodutos em redes, que são traduzíveis em modelos de programação linear inteira mista. Nesta tradução é adotada uma abordagem arco-caminho, onde as variáveis de decisão dos modelos matemáticos representam:

- as ligações ponto-a-ponto e os anéis e cadeias a serem instalados na rede (representados como variáveis binárias);
- os caminhos que os canais a serem transportados entre os centros de fios percorrem sobre estes arcos ao serem roteados sobre a rede (representados como variáveis contínuas).

A **metodologia de planejamento** proposta é basicamente uma estratégia de divisão-e-conquista e é apresentada no Capítulo III. Uma das etapas centrais é a denominada Enfeixamento, na qual se dimensionam os equipamentos SDH necessários para atender a demanda de uma rede a custos eficazes. Para este sub-problema em particular (Enfeixamento), o modelo de rede de fluxo multiprodutos é apresentado de maneira formal no Capítulo IV.

Finalmente, a metodologia proposta é aplicada para resolver o Problema de Enfeixamento em duas redes reais de grande porte: a rede metropolitana da cidade de São Paulo (AMSP) e a rede interurbana do estado de São Paulo (IUSP). Estes resultados são apresentados no Capítulo V.

O Capítulo VI é dedicado às considerações finais sobre a metodologia proposta e à apresentação de temas que julgamos poder ser objeto de futuras investigações científicas.

II. Tecnologias de Transmissão e Métodos de Planejamento

Neste capítulo será feita uma introdução às redes analógicas e plesiócronicas, discutindo-se algumas das técnicas e metodologias de planejamento desenvolvidas para elas. Também se fará um estudo sobre redes síncronas (SONET-SDH), onde se procura passar ao leitor uma série de conceitos:

- sobre a estrutura em camadas das redes de transporte SDH;
- sobre a analogia que existe entre redes SDH e redes de transporte rodoviárias;
- sobre os equipamentos (ou *Network Elements* - NE) da hierarquia SDH;
- sobre as topologias elementares nas redes SDH;
- sobre as técnicas para prover as redes SDH de maior confiabilidade.

II.1 Redes Pré-Ópticas

As redes de transporte (RT) analógicas consistiam de pares de fios de cobre que conectavam as centrais de comutação, sendo que cada par de fios podia transportar uma única chamada inter-centrais a cada vez. A Figura 2.1 representa as redes analógicas como camadas - um tipo de representação que também será empregada para as redes digitais plesiócronicas e síncronas. Na Figura 2.1, os serviços de voz comutada e as linhas privadas são transportados através de pares de fios (camada superior). Estes, por sua vez, são implementados sobre a rede de cabos multipares (camada inferior).

À medida que iam sendo exigidas mais conexões entre duas centrais, mais pares eram selecionados dentro dos cabos existentes. Somados aos pares exigidos pelo crescimento da própria rede externa, chegava-se a um ponto em que era necessário se lançar mais cabos para suportar as novas conexões. Assim, o planejamento da rede de transporte tinha uma relação íntima com o planejamento da rede externa.

Pela forma gradativa como as redes urbanas iam evoluindo, formava-se uma RT muito confiável, onde mesmo o corte de um cabo - um evento raro - dificilmente criava impactos muito fortes. Todavia, o custo linear dos circuitos era muito alto, o que impunha como objetivo primário de planejamento minimizar o número dos pares de fios. A maneira mais eficaz de reduzir o número de troncos era através do uso de centrais tandem, dividindo os circuitos entre rotas diretas (ou de alto uso) e rotas finais, indiretas, que passavam por centrais tandem intermediárias.

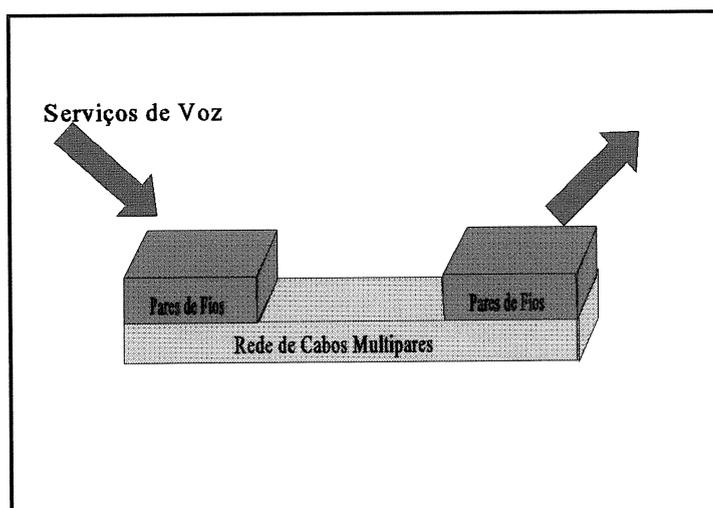


Figura 2.1: representação em camadas de uma RT analógica

O problema é que, reduzindo-se demasiadamente o número de rotas diretas, aumentava-se o número de unidades de comutação tandem e de rotas finais - e vice-versa. Assim, surgiu o problema de minimização do custo da rede de troncos em uma área multicentral, que foi profundamente estudado desde a década de 50 (Truitt (1954), Shinohara (1988), entre outros). Uma vez determinado o número de circuitos exigido entre cada par de centrais, podia-se determinar o roteamento ótimo destes circuitos sobre os cabos multipares existentes ou a serem instalados. Neste momento, como o custo de cabo/kilometro era dominante, algoritmos de caminhos mínimos eram geralmente usados.

Em resumo, adotava-se uma metodologia de divisão-e-conquista, em que um primeiro sub-problema era o Encaminhamento-Entroncamento e o segundo, o Roteamento Físico. Estes se relacionavam como apresentado na Figura 2.2.

Diversas especializações destes sub-problemas podem ser encontradas na literatura. Entre elas, destacam-se aquelas que tratam de redes de encaminhamento hierárquico com horários de pico não-coincidentes (Brazhnov & Dubrovinsky (1984), Elsner(1977)) e aquelas que tratam de redes com encaminhamento dinâmico não-hierárquico Ash, Cardwell & Murray(1984).

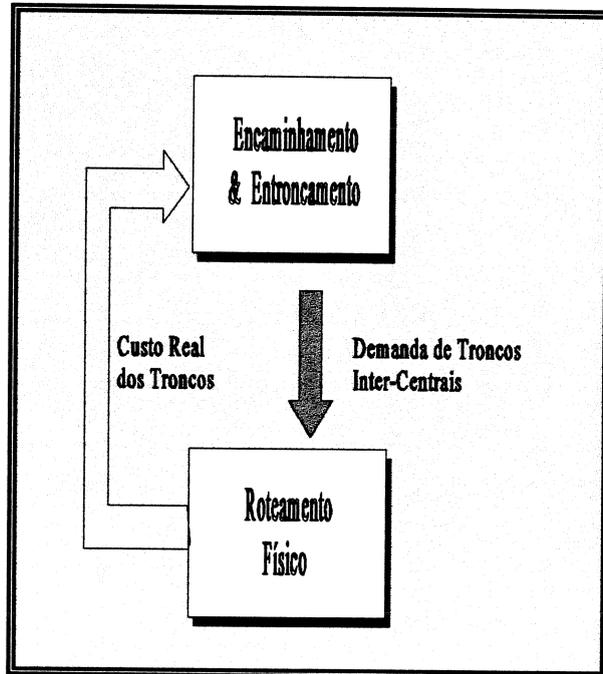


Figura 2.2: Fases na metodologia de planejamento de RT analógica

II.2. Planejamento de Redes Ópticas Plesiócronicas

Com o surgimento da técnica de transmissão digital por códigos de pulsos (*Pulse Code Modulation - PCM*) e o barateamento da eletrônica, difundiu-se na Rede de Transporte (RT) o uso de multiplexadores de sinais digitais. No padrão europeu (adotado no Brasil), 30 canais de voz digitalizada são multiplexados sobre um único circuito e transmitidos a uma taxa de 2048 bits por segundo - a este circuito denomina-se aqui alternativamente “canal 2 Mbps”, “PCM-30” ou “canal E1”. Atualmente, com a expansão do uso de centrais de comutação digitais, praticamente toda a demanda de voz comutada já “sai” das centrais na forma de canais E1.

A evolução tecnológica permitiu que mesmo estes canais E1 fossem multiplexados no tempo (*Time-Division Multiplexing*) e

transmitidos a distâncias cada vez maiores, com maior confiabilidade. Com o passar do tempo, o ITU (*International Telecommunications Union*) padronizou as técnicas de multiplexação, estabelecendo a hierarquia PDH - Plesiochronous Digital Hierarchy. A Figura 2.3 mostra uma representação em

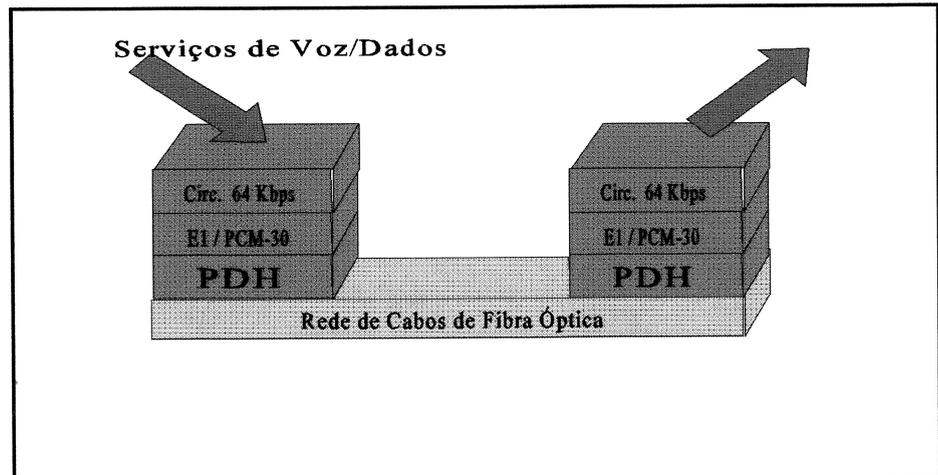


Figura 2.3: diagrama em camadas de uma RT plesiócrona

camadas de uma RT plesiócrona, onde os serviços de voz e dados são digitalizados e transportados por circuitos digitais a 64 Kbps (camada superior). Estes circuitos são multiplexados no tempo em canais E1 - 2 Mbps (segunda camada). Através de multiplexação plesiócrona, estes canais E1 são elevados às taxas ainda maiores (8, 34, 140 Mbps) da camada PDH. Finalmente, estes sinais são transportados sobre a rede de cabos de fibra óptica (camada inferior).¹

Para compreender as implicações da tecnologia PDH nas redes de transporte, será apresentada aqui uma breve introdução às técnicas de multiplexação plesiócrona.

Princípios de Multiplexação Plesiócrona²

A dificuldade em se multiplexar os sinais plesiócronicos é que se admite uma certa flutuação na taxa de transmissão destes sinais. Assim, enquanto um canal pode estar entregando bits “a mais”, outro pode estar entregando bits “a menos”.

¹Também se pode transmitir sinais PDH 34 e 140 Mbps através de rádio

² Partes desta seção correspondem a uma tradução quase literal das seções 3.1 e 3.2 do livro *Transmission Networking: SONET and the Synchronous Digital Hierarchy*, de Mike Sexton & Andy Reid, Artech House, 1992

A técnica desenvolvida para este tipo de multiplexação consiste em **umentar a taxa de transmissão** de cada sinal a ser multiplexado para uma taxa que é sincronamente derivada da taxa do novo sinal agregado. A partir daí, basta se fazer a intercalação de bits dos sinais sincronizados com a adição de informação de alinhamento de *frames* e de *overheads* de OAM para formar o sinal multiplexado.

O processo pelo qual o sinal tributário é adaptado ao sinal síncrono é denominado justificação, ou mais graficamente, *bit-stuffing*, já que ele depende da inserção de bits “de enchimento” extras em instantes/posições apropriadas na estrutura do *frame* PDH. Isto é obtido sob o controle de um processo adaptativo que é dirigido pela comparação da fase dos sinais tributários e do sinal agregado. O processo de justificação é ilustrado - metaforicamente - na Figura 2.4, para um caso de multiplexação de quatro sinais em um, que é a estrutura empregada no padrão europeu. Uma explicação mais detalhada pode ser encontrada em **Belamy (1992)**.

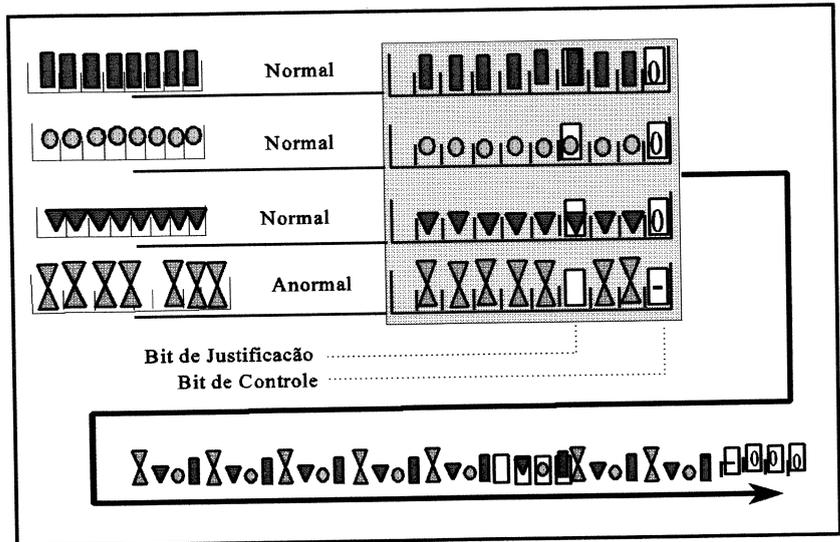


Figura 2.4: mecanismo de multiplexação plesiócrona

Note na Figura 2.4, os quatro tributários chegam ao MUX, são adaptados ao sinal síncrono (dentro do MUX), recebendo um bit de justificação e outro de controle. Note também que os três primeiros tributários chegam ao multiplexador dentro da taxa esperada enquanto isto o último tributário chega com uma taxa inferior, e por isto recebe uma marca de “falta” no bit de controle. Nos três primeiros tributários, o bit de justificação leva informação real, enquanto no último tributário, leva um bit-vazio. Finalmente, os bits de todos os tributários, acrescidos destes bits de justificação e controle, são intercalados para formar o sinal agregado. Neste exemplo, para facilidade de visualização, todos os instantes de início de cada *frame* foram considerados coincidentes. Isto não precisa ocorrer necessariamente, i.e., o início do *frame* de um tributário não precisa estar em sincronismo com os outros.

Para uma multiplexação ainda maior, emprega-se uma estrutura como a da

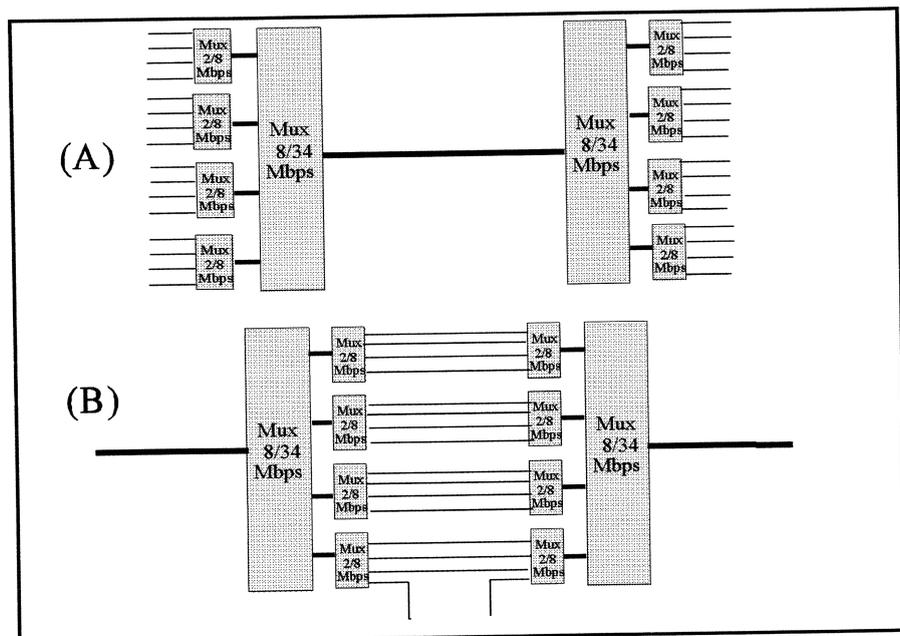


Figura 2.5: Exemplo de multiplexação plesiócrona em dois níveis

Figura 2.5.a, onde 16 sinais 2 Mbps são multiplexados para formar um sinal PDH 34 Mbps. Observe na Figura 2.5.b o que é necessário para inserir/retirar um sinal 2 Mbps dentro de um outro a 34 Mbps. Primeiro, é preciso efetuar toda uma de-multiplexação do sinal 34 Mbps para o nível 8 Mbps, daí para 2 Mbps, obtendo com isto 16 sinais tributários 2 Mbps. **Cada uma destas de-multiplexações implica em processamentos para analisar o conteúdo dos bits de stuffing/control e permitir assim identificar o ponto de início de cada frame dos tributários.** Faz-se então - fisicamente - a retirada/inserção do sinal E1. Finalmente, os tributários são re-multiplexados, primeiro para a taxa de 8 Mbps e depois para 34 Mbps.

Este é um dos problemas das redes PDH: para retirar um tributário de baixa hierarquia de dentro de um sinal de alta hierarquia, é preciso desmontar TODO o sinal de alta hierarquia. Como se verá a seguir, a mesma operação é executada de forma bem mais simples em um Add-Drop Multiplexer SDH.

Impacto da Tecnologia PDH no Planejamento da Rede de Transporte

Do ponto de vista do planejamento da rede, o emprego da tecnologia PDH alterou tanto a otimização do encaminhamento-entroncamento quanto o roteamento físico dos meios de transmissão. O emprego de técnicas de otimização do número de troncos semelhantes àqueles empregados nas RT-analógicas continuou importante nas RT-pleisiócronas, mas passou a ser necessário considerar que os circuitos são instalados em módulos de tamanho fixo. A este respeito, ver **Dedoborschch, Ilna & Levina (1985) ou Elsner (1980).**

O roteamento físico dos meios de transmissão na “Era PDH” foi marcado pelo barateamento dos cabos de fibra óptica.

Em RTs metropolitanas, o custo dos meios de transmissão é significativamente menor que os custos dos equipamentos de ponta. Assim, fica sendo **MENOS** importante minimizar o comprimento total de cabos da rede, e **MAIS** importante aproveitar corretamente as economias de escala proporcionadas pela multiplexação nas pontas - quanto maior o número de canais E1 passando por um par de fibras ópticas, menor o custo por canal - veja a Figura 2.6.

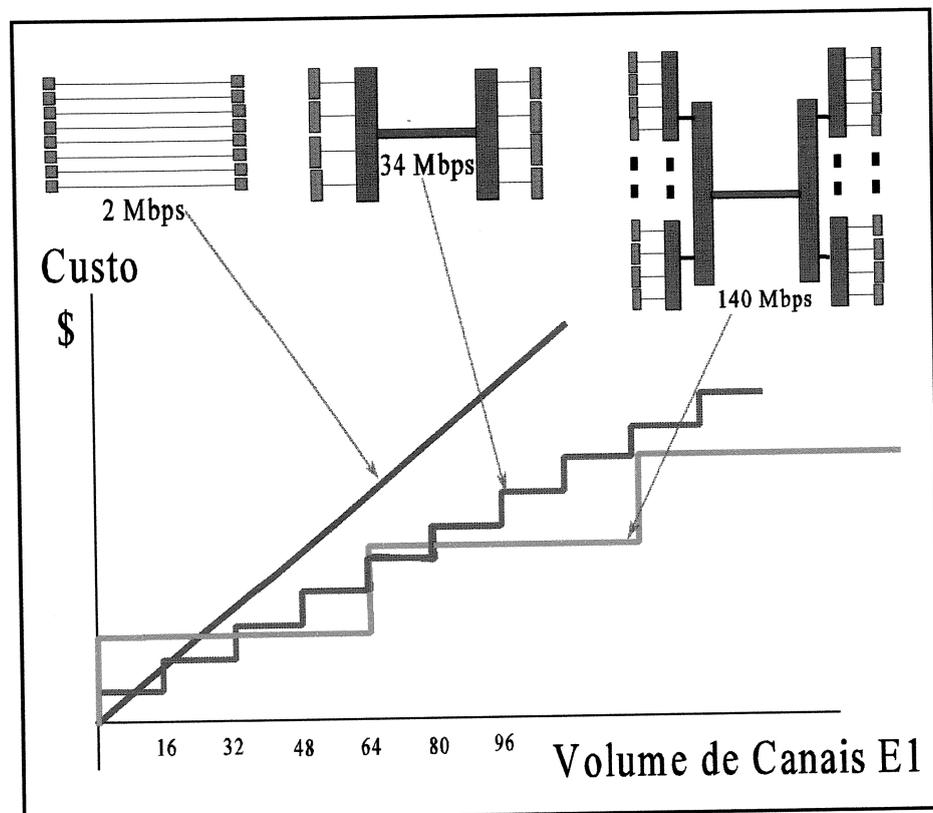


Figura 2.6: economias de escala no custo das hierarquias PDH

Por outro lado, quanto maior o número de canais multiplexados em um par de fibras, maior o impacto provocado por falhas na rede. Daí, passou a ser importante para o planejador prever formas de garantir a rede PDH contra falhas. Esquemas de proteção automática foram desenvolvidos para as redes PDH, a maior parte deles prevendo a necessidade de roteamentos físico dos pares de fibras através de caminhos disjuntos. A respeito, ver **Cardwell, Monma & Wu (1989)**.

Em resumo, ao planejar uma RT plesiócrona, o planejador defronta-se com os seguintes problemas:

- qual a melhor taxa de transmissão a empregar entre dois pontos?
- onde localizar as extremidades dos enlaces em fibra óptica?
- como proteger a rede contra falhas nos enlaces ópticos ?
- como utilizar equipamentos multiplexadores em uma configuração *back-to-back* para se aproveitar de oportunidades de drop&continue como as da Figura 2.5 (b) ?

Novamente, técnicas baseadas em otimização foram criadas para auxiliar o planejador a resolver estas questões. Apresenta-se aqui uma lista com algumas delas:

- Programas PRETA: desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, ligados ao Convênio TELEBRAS & UNICAMP. Basicamente, adotam técnicas heurísticas de resolução dos problemas de programação linear inteira mista resultantes de uma modelagem da RT-PDH através de redes de fluxo multiproduto. Nestas heurísticas é importante o uso de técnicas de programação linear-por-partes, desenvolvidas na própria UNICAMP. Referências: **Garcia(1987)**, **Bortolon (1991)**.
- Programas Fiber-Options: desenvolvidos no BELLCORE, para os clientes daquela instituição. Uma referência particularmente interessante é o trabalho de **Doverspike (1991)**, onde uma formulação completa do problema é desenvolvida, e diversos sistemas de planejamento da malha de multiplexadores são comparados. Um resumo sobre outros programas desenvolvidos no Bellcore para o planejamento de redes plesiócronas é apresentado por **Cardwell, Monma & Wu (1989)**, ou **Wu (1992)**.
- Programas desenvolvidos pela US West: uma abordagem interessante é descrita por **Cox, Kuehner, Parrish & Qiu (1993)**. Um problema de programação linear inteira mista para planejamento de redes plesiócronas é apresentado. Trata-se de um modelo relativamente complexo, incluindo até mesmo os custos de compra e instalação de cabos de fibra e a necessidade de reservas de fibra para proteção.
- Programas desenvolvidos pela TELERJ: **Moreno (1991)** descreve um modelo matemático proposto na TELERJ, utilizando uma modelagem de programação linear inteira mista.

II.3. Introdução da Hierarquia Digital Síncrona nas Redes de Transporte

A Hierarquia Digital Síncrona é um padrão proposto ITU - *International Telecommunications Union*, uma adaptação da tecnologia de transmissão SONET (*Synchronous Optical NETWORK*) proposta pelo Bellcore (*Bell Communications Research*). Os objetivos ao se criar esta nova hierarquia de transmissão foram:

- prover maiores taxas de transmissão;
- permitir a interoperabilidade de equipamentos de fabricantes diferentes;
- prover mais e melhores facilidades de Operação, Administração, Manutenção e Provisionamento (OAM&P);
- eliminar a necessidade de se demultiplexar todo um sinal de alta hierarquia para obter um tributário ali inserido.

Taxa	PDH América do Norte	PDH Europeu/ Brasileiro	SDH (container)	SDH (transporte)	SONET (container)	SONET (transporte)
2,5 G				STM-16		STS-48 OC-48
467 M						STS-9 OC-9
622 M				STM-4		
155 M			VC4	STM-1		
140 M		E4	VC4			
51 M						STS-1 OC-1
45 M	DS3/T3				VC3	
34 M		E3	VC3			
8 M		E2				
6 M	DS2/T2					
2 M		E1	VC12			
1,5 M	DS1/T1				VC11	
64 k	DS0/T0	E0				

Tabela 2.1: Taxas de transmissão PDH americana, PDH brasileira/européia, SDH e SONET

As taxas de transmissão disponíveis nas hierarquias PDH americano, PDH europeu/brasileiro, SDH e SONET estão descritas na Tabela 2.1. Note que as taxas disponíveis na hierarquia síncrona são significativamente maiores que as da plesiócrona. A interoperabilidade entre fabricantes já foi alcançada quanto ao sinal óptico transmitido. Contudo, algum esforço de padronização ainda é necessário para o software de OAM&P da rede SDH (Sexton & Reid, 1992). De qualquer maneira, é a forma como são multiplexados e transportados os sinais SDH que trazem maiores novidades para os planejadores da Rede de Transporte.

Para compreender o que muda no planejamento de redes SDH, é interessante conhecer, ainda que de forma aproximada, os conceitos de *virtual containers* (VC), *paths* e *sections*. A partir da compreensão destes conceitos, ficará mais fácil entender as funcionalidades dos equipamentos básicos SDH/SONET, que são:

- OLTM: Optical Line Terminal Multiplexer;
- ADM: Add-Drop Multiplexer;
- SDXC: Synchronous Digital Cross-Connect.

E, finalmente, conhecendo os equipamentos e suas funcionalidades, pode-se apresentar com mais clareza as topologias elementares permitidas pelas redes SDH, principalmente:

- cadeias de ADMs;
- anéis uni- e bi-direcionais ;
- estrelas baseadas em hubs (*hub-based stars*).

Antes de abordar cada um destes tópicos, vale ressaltar que, com a concentração de milhares de canais sobre uma única fibra óptica, a preocupação com a confiabilidade passa a se tornar prioritária para o planejador de redes de transporte. Uma das contribuições mais importantes da tecnologia SDH é justamente prover uma alta confiabilidade através dos anéis auto-regeneradores (*Self-Healing Rings - SHR*), sejam uni- ou bi-direcionais. Além deles, técnicas de regeneração para redes baseadas em cross-connects também estão sendo desenvolvidas. É fundamental que o planejador considere aspectos de segurança logo no início do projeto de uma rede.

II.3.1. Alguns conceitos SDH: Virtual Containers, Path, Line & Section Layers

Nesta seção alguns conceitos de redes SDH importantes para a visão de planejamento de RTs serão abordados. Os conceitos são explicados de maneira aproximada, algumas vezes empregando analogias. O objetivo não é apresentar detalhadamente a tecnologia SDH; bons livros sobre o assunto já existem. Procura-se, em primeiro lugar, apontar para o leitor acostumado à tecnologia PDH os pontos em que as duas tecnologias diferem substancialmente e, em segundo lugar, preparar o mesmo leitor para uma visão da rede SDH como rede de transporte multiproduto, com uma arquitetura em *layers*.

Princípios de Multiplexação Síncrona

Todo o processo de digitalização de voz e de multiplexação plesiócrona básica (de 64 Kbps para 2 Mbps) baseia-se em um frame síncrono de 125 microsegundos derivado da taxa de amostragem usada para sinais de voz. A multiplexação SDH estende este princípio definindo novos níveis derivados pela intercalação direta de sinais síncronos com frames de 125 microsegundos. Estes formatos de frames permitem o uso de matrizes de comutação eficientes do tipo TST (*time-space-time*) e de multiplexação do tipo deriva/insere relativamente simples.

A Figura 2.7 apresenta uma visão em camadas (layers) da rede SDH, baseada em uma estrutura sugerida por **Kumar (1994)**. Cada camada requisita os serviços da camada inferior para transportar algum “conteúdo” de um ponto para o outro. A Tabela 2.2 relaciona cada uma das camadas ao seu tipo de “conteúdo”. As camadas apresentadas na Figura 2.7 são:

- Camada de Serviços
- Camada de *Path*, subdividido em camada de ordem superior e inferior;
- Camada de *Line/Section*
- Camada de Fotônica
- Camada de Cabos de fibra Óptica.

A Rede de Cabos de Fibra Óptica

lida com o transporte de pares de fibra óptica entre os centros de fios e pode ser implementada de diversas maneiras. Em redes metropolitanas, podem ser cabos diretamente enterrados, suspensos ou ainda lançados em galerias. Na prática, também podem ser

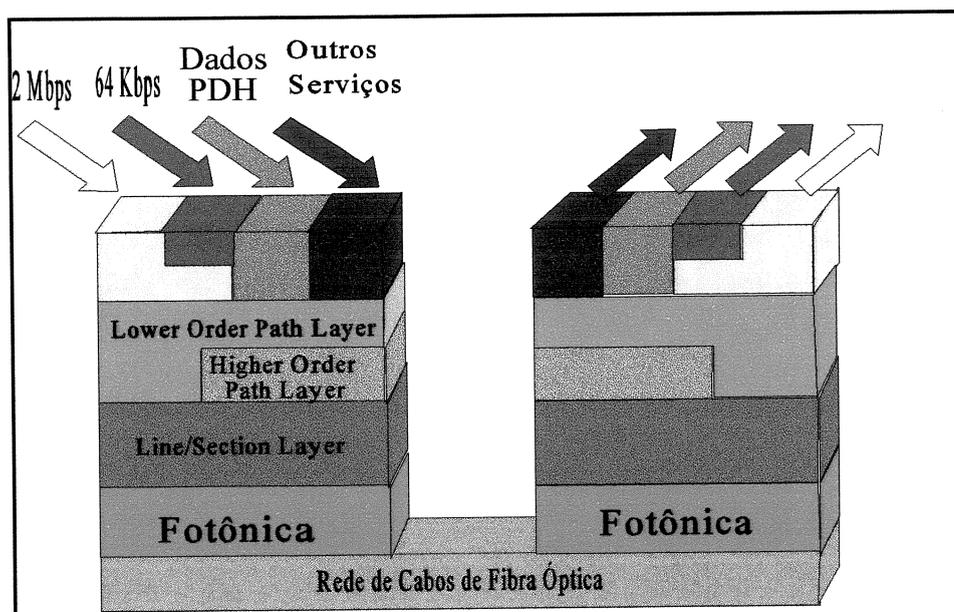


Figura 2.7: uma visão em camadas da rede SDH/SONET

utilizados enlaces de rádio digital. Em qualquer destes casos, os custos dos cabos e da sua instalação são menores que o custo da infraestrutura que eles utilizam ou que o custo dos equipamentos que serão instalados em suas extremidades. Do ponto de vista do planejamento, em redes urbanas o que importa é que a topologia da rede de cabos de fibra óptica garanta a conectividade entre os nós. Entre nós “mais importantes” pode ser exigido um grau de conectividade maior, mantendo a comunicação entre aqueles nós mesmo com o corte de um cabo de fibras.

Em redes interurbanas, contudo, os custos da Rede de Cabos de Fibra Óptica assumem uma outra magnitude, devido ao aumento das distâncias e à necessidade de infraestrutura dedicada. Todavia, para estas redes, as decisões de planejamento se baseiam menos em aspectos de custo e mais em estratégias de longo prazo da empresa de telecomunicações - sejam estratégias políticas ou de mercado. Por exemplo, a decisão de ligar uma cidade de porte médio à rede de cabos de fibra

Camada	Tipo de “Carga” Transportada
de Serviços	Canais 2 Mbps, 34 Mbps, 140 Mbps, etc
de <i>Path</i> De baixa ordem De alta ordem	containers VC12, VC3 e VC4 containers VC4
de <i>Line/Section</i>	frames STM-1, STM-4, STM-16
de Fotônica	emissões ópticas em diversos comprimentos de onda
de Cabos de Fibra	pares de fibra óptica

Tabela 2.2: elementos transportados em cada uma das camadas da RT-SDH

óptica irá mobilizar a prefeitura local, ou mesmo o governo estadual. Ou ainda, uma parceria de mercado entre a empresa operadora e uma empresa de transmissão elétrica regional para a instalação de cabos OPGW (Optical Ground-Wire) suspensos pode DEFINIR a topologia da rede.

A camada de Rede Óptica (Fotônica) lida com o transporte de sinais ópticos nos diversos comprimentos de onda sobre a malha de pares de fibra óptica. Da mesma forma que as outras camadas, podem ser feitas operações de multiplexação e comutação puramente óptica, embora seu uso não esteja generalizado. Para isto, utilizam-se, respectivamente, as tecnologias Wavelength Division Multiplexing (WDM) e dispositivos de comutação óptica (*Optical Cross-Connects*). **Brackett (1996)** descreve uma experiência (test-bed) de rede puramente óptica levada a cabo com sucesso pelo Optical Networks Technology Consortium (ONTC) em San Diego - USA, baseada nestas duas tecnologias. **Lowe (1996)**, por sua vez, apresenta uma análise econômica sobre a oportunidade de se utilizar WDM e comutação óptica em uma rede, ao invés de técnicas mais “tradicionais”, como um aumento da taxa de transmissão e a comutação SDH “tradicional”.

O emprego de WDM multiplica a capacidade de transporte da rede pela quantidade de comprimentos de onda empregados, enquanto os dispositivos de comutação óptica vêm sendo propostos como uma forma viável de fornecer segurança a redes ópticas. Pode-se afirmar que a

consideração da camada fotônica será obrigatória no planejamento/projeto das futuras redes de alta velocidade.

Do ponto de vista do planejamento, as seções e linhas SDH podem ser consideradas uma única camada. Uma seção (*section*) SDH lida com o transporte de *frames* entre equipamentos terminais e/ou regeneradores, *frames* estes que são repetidos a cada 125 μ s e que podem ser identificados por uma palavra de alinhamento de frame fixa. Estes frames são denominados STM (*Synchronous Transfer Module*) e consistem de informação a ser transportada (*payload*), e de um *section overhead* (SOH) que inclui a palavra de alinhamento e informações adicionais necessárias ao gerenciamento no nível de *section* e à adaptação desta aos níveis de circuito (*path*) SDH. Estes conceitos serão retomadas logo a seguir.

Uma linha (*line*) SDH lida com o transporte dos *frames* STM entre equipamentos terminais. Regeneradores não são equipamentos terminais - apenas repetem o sinal originado/terminado em outros elementos. Note a diferença:

- as extremidades de um *SDH-section* podem ser: dois equipamentos terminais (ADMs, SDXC ou OLTM), um equipamento terminal e um regenerador, ou dois regeneradores;
- as extremidades de um *SDH-line* podem ser apenas dois equipamentos terminais (ADMs, SDXC ou OLTM).

Esta diferença pode ser fundamental para compreender protocolos de operação dos equipamentos SDH, mas não têm importância do ponto de vista do planejamento. Assim, consideramos aqui que os processamentos a nível de *SDH-section* e *SDH-line* ocorrem em uma única camada.

A camada de SDH-paths (circuito) lida com a criação e o transporte de containers SDH entre equipamentos terminais. Um SDH-path pode ser constituído por vários *SDH-line* em sequência, isto é, embora tenha apenas um par de equipamentos terminais origem-destino, um *SDH-path* pode passar por diversos equipamentos ADM, OLTM e SDXC intermediários.

Toda informação a ser transportada pela camada de *SDH-paths* é “empacotada” em virtual-containers (VC) específicos. Por exemplo, o sinal E1 é empacotado em um container do tipo VC12. Cada um destes containers recebe um cabeçalho (*path-overhead* - POH), como é representado na Figura 2.8.

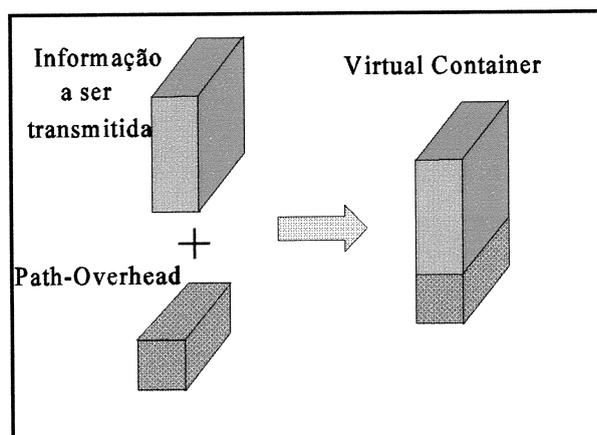


Figura 2.8: formação de um Virtual-Container SDH

Um Virtual-Container “pequeno” pode ser agrupado com outros de “tamanho” semelhante e “empacotado” em um VC “maior”, recursivamente. Por exemplo, até 63 VC12 podem ser agrupados dentro de um virtual-container do tipo VC-4, como na Figura 2.9. Todos os virtual containers (VC) são formatados individualmente de acordo com os mesmos princípios recursivos para formar *payload* e *overhead*. Formatos foram definidos para todos os tipos de serviços existentes e planejados, em um ou outro dos VC *payloads*.

Assim, os Virtual-Containers montados na camada de *SDH-paths* são mapeados para dentro do *payload* transmitido em um *SDH-section*, isto é, para dentro de um módulo de transporte STM-n.

A capacidade de cada um destes módulos STM-n é dividida entre um número de *Higher Order Virtual Containers (HVC)*, cada um consistindo de seu próprio *overhead* e *payload*. O *payload* de cada HVC, por sua vez, é subdividido em *lower order virtual containers (LVC)* que também consistem de *overhead* e *payload*.

A definição entre um VC ser de alta ou baixa ordem (*higher & low order*) é relativa, e reflete uma relação cliente-provedor entre os dois níveis. Assim, uma camada HVC pode agir como “provedora de transporte” para conexões do nível de uma camada LVC, mas não o inverso.

Ainda dentro da camada de SDH-section, agrega-se ao payload a ser transmitido um cabeçalho (Section Overhead- SOH), como já foi citado anteriormente.

A Figura 2.10 apresenta uma “metáfora” para este processamento. Neste exemplo, os dois “caminhões” representam módulos STM-1 e STM-4, que são a informação trocada a nível de camada de SDH-section. Um módulo STM-4 transporta 4 (quatro) Virtual-Containers VC4, enquanto um módulo STM-1 transporta 1 (um) VC4. E, como foi explicado, cada VC4 pode levar até 63 VC12 (com sinais 2 Mbps) dentro dele. Assim, neste caso, o VC4 é considerado o container de ordem superior, e os VC12 os de ordem inferior. O leitor poderá encontrar outros exemplos deste tipo de mapeamento na bibliografia específica.

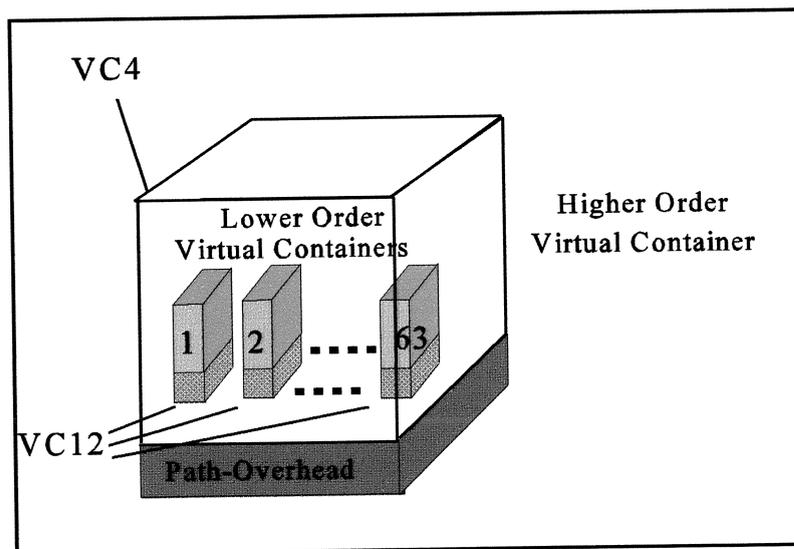


Figura 2.9: formação de um VC de alta ordem a partir de vários VC de baixa ordem

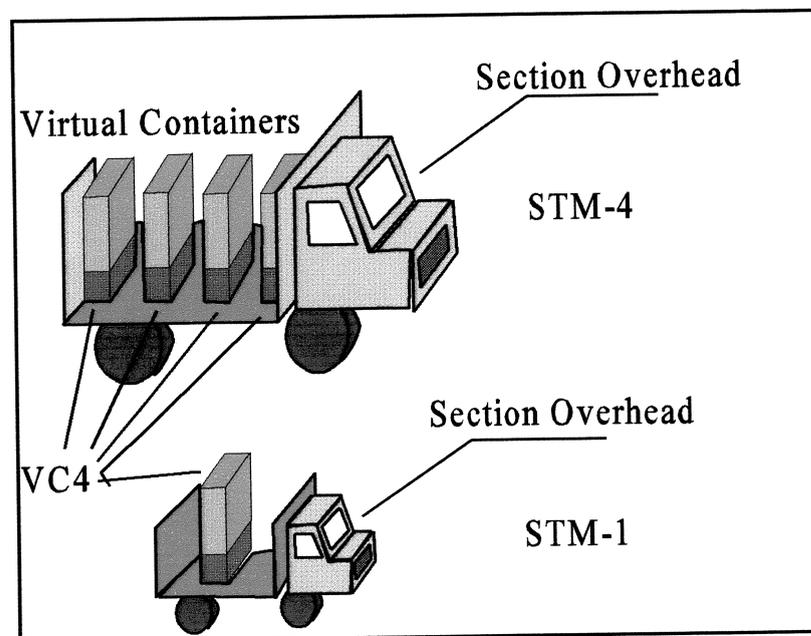


Figura 2.10: mapeamento de virtual containers dentro de módulos STM-n

II.3.2. Uma Metáfora para a Rede de Transporte

Aproveitando-se daquela visão metafórica da rede de transporte, serão construídas analogias com redes de distribuição de mercadorias em *containers*. Estas serão retomadas quando for apresentada a modelagem matemática do Problema do Enfeixamento e para explicar o funcionamento de anéis uni- e bi-direcionais. A seguir, são apresentadas analogias entre a Rede de Telecomunicações SDH e Redes de Transporte de Mercadorias sobre os seguintes tópicos:

- Relação entre os conceitos de *SDH-section* e *SDH-path* em uma rede exemplo;
- Divisão da Rede de Transporte em um backbone de alta hierarquia e sub-redes de “acesso”;

Relacionamento entre as Camadas de Path e Section:

Considere a rede exemplo apresentada na Figura 2.11. Cada um dos nós representa um Centro de Fios (CF), um edifício dentro do qual existe um equipamento terminal SDH. Os arcos ligando os nós são conexões em fibra óptica ligando aqueles equipamentos. Cada um destes pares de fibra óptica suporta uma *SDH-section*. Uma *SDH-section* com taxa de 155, 622 e 2488 Mbps, implica no uso de Synchronous Transport Modules do tipo STM-1, STM-4 e STM-16, respectivamente. É através destas seções SDH que devem escoar os 50 canais E1 entre A e B.

Como é ilustrado na Figura 2.12, estes canais E1 são empacotados em containers VC4, recebendo um POH que leva informações relacionadas ao processamento destes containers ao longo

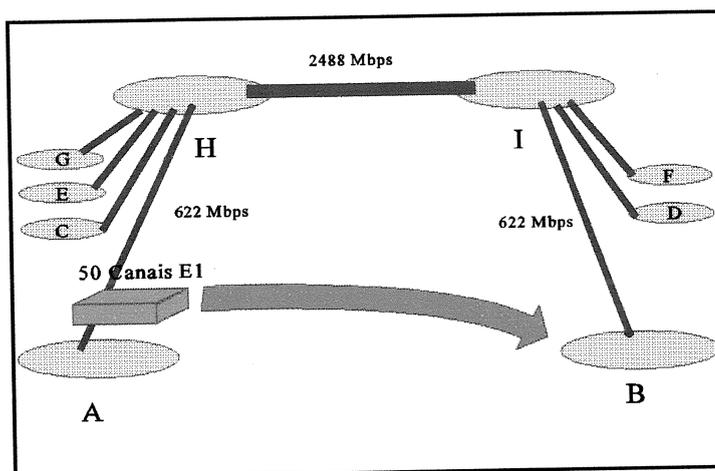


Figura 2.11: rede exemplo com conexões SDH ponto-a-ponto

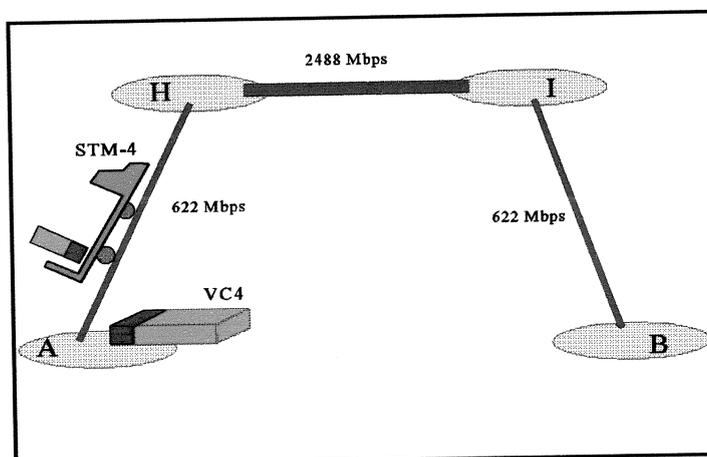


Figura 2.12: levando os containers VC4 em módulos STM-4 entre A e H

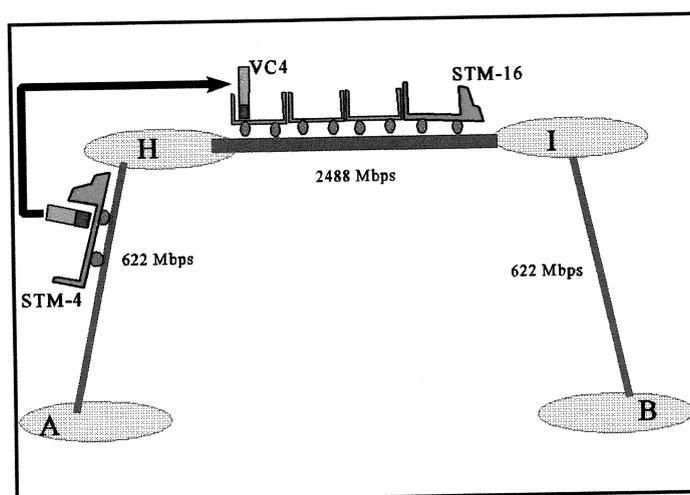


Figura 2.13: transferindo o container VC4 de uma *SDH-section* para outra

do caminho. Em um primeiro momento, imagine que TODOS os canais E1 originados em A tenham B como destino.

Ainda na Figura 2.12, o virtual container VC4 é carregado nos Synchronous Transport Module STM-4 que fazem a conexão entre A e H, e são enviados a 622 Mbps através do par de fibras A-H. No equipamento terminal SDH instalado em H, todos os containers VC4 são “retirados” do módulo de transporte STM-4, e processados de acordo com as informações contidas em seus respectivos POH. Neste processo (Figura 2.13) novos módulos de transporte são montados, desta vez do tipo STM-16, para percorrerem a ligação entre H e I a uma taxa de 2488 Mbps.

O mesmo procedimento é repetido no CF “I”, com a desmontagem dos módulos STM-16 que chegam de H e a montagem de novos módulos STM-4 para serem remetidos a B, como na Figura 2.14. No equipamento terminal SDH existente em B, finalmente, os containers VC4 são também desmontados e a informação final (os canais 2 Mbps) é extraída (Figura 2.15).

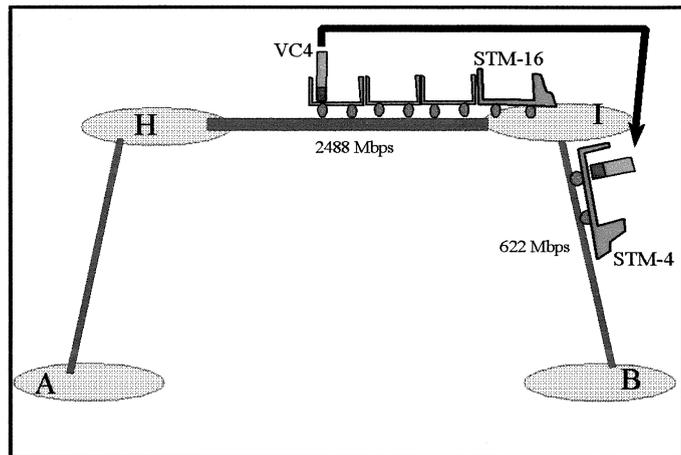


Figura 2.14: roteamento do container VC4 em I

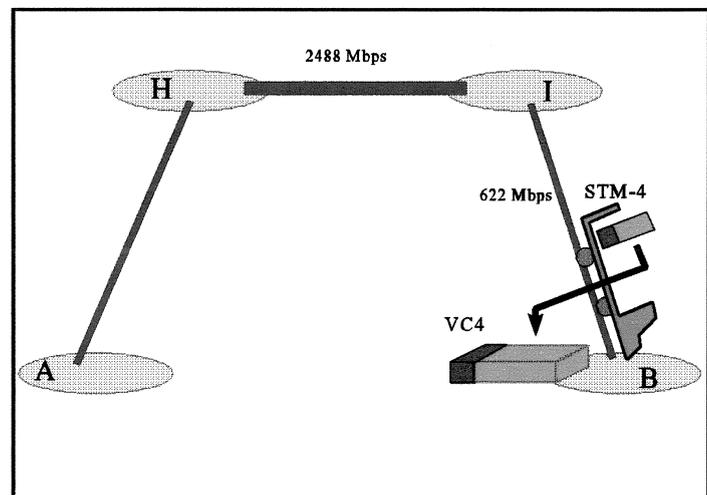


Figura 2.15: retirada do container VC4 de dentro do módulo de transporte STM-4 no CF “B”

Divisão da RT em camada de Alta e Baixa Hierarquia :

Nas Figuras 2.11 a 2.15, foi ilustrado o processamento de UMA demanda entre dois centros de fios. Em redes de telecomunicações, contudo, a situação mais comum é que cada CF queira se comunicar com diversos outros - não com apenas um. Imagine então, na rede apresentada na Figura 2.11, que o CF A tenha 8 demandas diferentes, para B, C, D, E, F, G, H e I. Estas demandas terão que ser distribuídas entre os containers VC4 que saem de A de alguma forma, estes containers processados em equipamentos intermediários e roteados - de *SDH-section* em *SDH-section* - até alcançar o seu destino.

Continuando com a rede exemplo da Figura 2.11, nota-se que a demanda entre A e B (50 canais E1) preenche em 79% a capacidade de um container VC-4 (pois $50 / 63 = 79\%$). Imaginando uma rede de transporte de mercadorias, é desejável que o container fechado em A seja aberto somente em B, já que ele está quase cheio.

Imagine, no entanto, que uma outra demanda - entre A e D, por exemplo - fosse igual a apenas 10 canais. Ocupar todo um container VC4 com apenas 10 canais seria um desperdício: ele seria levado quase vazio pelas seções A-H, H-I e I-D. Neste caso, por que não aproveitar e carregá-lo

com outras informações com destino a B? Ou ainda, poder-se-ia aproveitar a capacidade ociosa entre A e H para carregar naquele container canais com origem em A e com destino a outros CFs que não B. Este tipo de “aproveitamento” está apresentado na Figura 2.16, **considerando ainda “apenas” as demandas originadas/terminadas em A ou B.**

Note que as demandas A-B, A-C, A-E, B-C e B-E completam - cada uma delas - um container VC4 inteiro. Já as demandas A-D, A-F, A-G, B-D, B-F e B-G ocupam - cada uma delas - apenas meio container VC4. Com isto, ainda na Figura 2.16, cinco containers VC4 são transportados no módulo STM-16 entre H e I:

- um VC4 100% ocupado com canais entre A e B;
- um VC4 100% ocupado com canais entre B e C;
- um VC4 100% ocupado com canais entre B e E;
- um VC4 50% ocupado com canais entre A e D e 50%, entre A e F;
- um VC4 50% ocupado com canais entre B e G.

Estes processamentos implicam em alguma eletrônica instalada nos equipamentos SDH e,

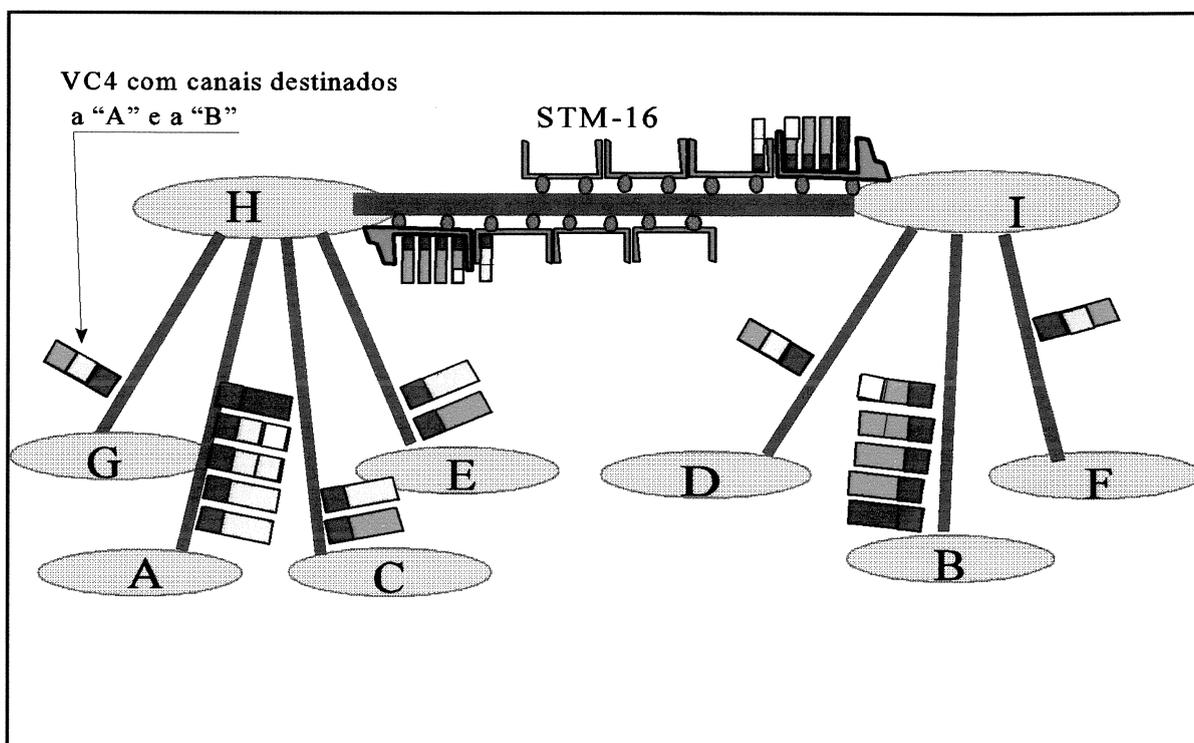


Figura 2.16: roteamento de canais em H e I para demandas originadas/terminadas em A e B

evidentemente, em maior complexidade e custo dos mesmos. Felizmente, existe uma grande variedade de combinações de funcionalidades SDH possíveis em um mesmo equipamento.

Compare os três equipamentos a seguir:

- equipamento I: retira containers VC4 de módulos de transporte STM-16 (2488 Mbps) e permite processar seu conteúdo a nível de containers VC12 (2 Mbps);
- equipamento II: retira containers VC4 de módulos de transporte STM-16 (2488 Mbps)

- e permite processar seu conteúdo a nível de containers VC4 (155 Mbps);
- equipamento III: retira containers VC4 de módulos de transporte STM-1 (155 Mbps) e permite processar seu conteúdo a nível de containers VC12 (2 Mbps).

Empregando a analogia com redes de transporte de mercadorias, cada um destes equipamentos é comparável a armazéns intermediários, onde é feito o manuseio de containers:

- o equipamento I é comparável a um armazém que recebe caminhões com 16 containers cada, containers de grande porte, que carregam até 63 itens cada. Neste armazém, itens são transferidos de um container para o outro, e - eventualmente - trocam-se também containers fechados de um caminhão para o outro;
- o equipamento/armazém II recebe os mesmos containers de grande porte, nos mesmos caminhões, mas não abre nenhum destes containers. Apenas os transfere - fechados - de um caminhão para o outro;
- o equipamento/armazém III recebe apenas caminhões pequenos (um container cada) e rearruma os itens dentro dos containers, fazendo transferências de itens de um container para o outro, antes de despachar os mesmos containers nos mesmos caminhões. Por assim dizer, os containers não precisariam ser retirados dos caminhões.

Ao se voltar à representação da RT-SDH em camadas apresentada no início do capítulo, os containers de grande porte são equivalentes aos VC-4, da camada de *SDH-path* de ordem superior. Os itens dentro destes containers são equivalentes aos VC-n de ordem inferior (camada de *SDH-path* de ordem inferior), e os caminhões são equivalentes aos módulos STM-n, da camada de *SDH-section*.

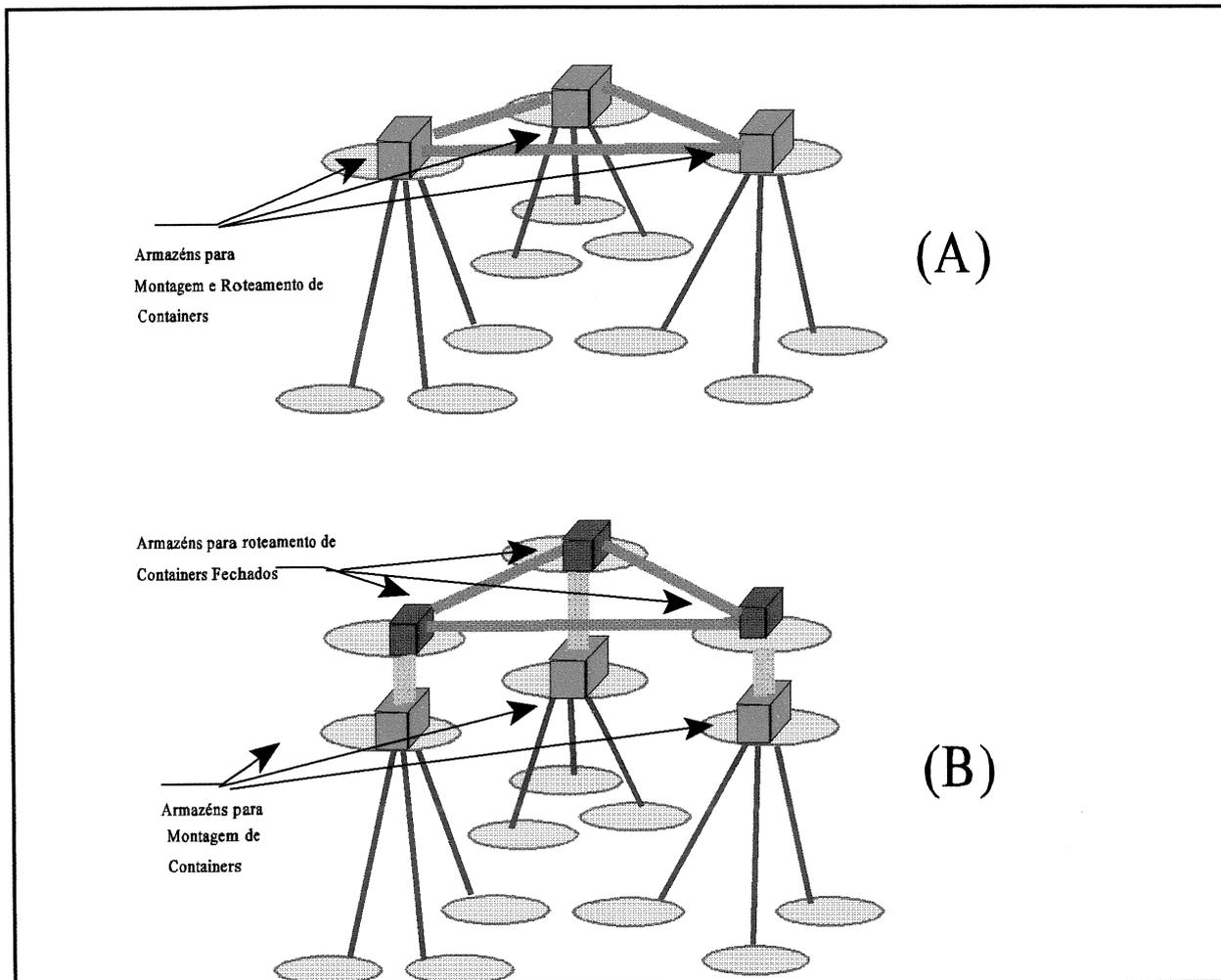


Figura 2.17: duas formas de implementar uma rede de transporte de containers

Uma rede semelhante à da Figura 2.15 poderia ser toda implementada apenas com equipamentos do tipo I (como na Figura 2.17-a), **ou** apenas com equipamentos do tipo II e III dispostos em duas camadas distintas, como na Figura 2.17-b. Na maioria das vezes, a segunda solução é a melhor, imitando o que as redes de transporte de mercadorias fazem há anos. Nestas, a operação de transporte tem as seguintes fases:

- em um conjunto de armazéns mais importantes (**hubs**) apenas grandes containers - **fechados** - são recebidos e despachados, sem ser abertos. A conexão entre estes armazéns é feita por caminhões (ou outro meio) de alta capacidade;
- em um segundo conjunto, que inclui os armazéns menos importantes (armazéns periféricos), os containers são abertos, desmontados, re-montados e despachados para outros armazéns periféricos e/ou para os armazéns centrais.

Em redes de transporte de telecomunicações, é possível implementar a mesma estrutura, empregando os equipamentos dos tipos II e III descritos acima. Equipamentos do tipo III são denominados 4/4, pois recebem e processam containers VC4. Equipamentos do tipo II são denominados 4/1, pois recebem containers VC4 e os processam a nível de VC12. Um exemplo de estrutura em dois níveis empregando anéis de ADMs será descrita ainda neste capítulo.

II.3.3. Elementos de Rede (NE) da Hierarquia SDH: OLTM, ADM e SDXC

Os Network Elements (NE) na hierarquia SDH são :

- **OLTM:** Optical Line Terminal Multiplexer;
- **ADM:** Add-Drop Multiplexer;
- **SDXC:** Synchronous Digital Cross-Connect.

Um OLTM consiste em um multiplexador e um terminal de linha óptico acoplados. Um exemplo possível de OLTM é apresentado na Figura 2.18. Este recebe até 63 canais 2 Mbps, acomoda-os em um container VC4 que é “colocado” em um módulo de transporte STM-1.

Um ADM consiste em dois terminais de linha ópticos (*mainstream*) e um conjunto de tributários, conectados por uma matriz de comutação SDH, que promove operações de inserção/retirada dos tributários sobre o sinal principal - veja a Figura 2.19. Ali, os dois primeiros canais 2 Mbps em um container VC4 são retirados e os dois últimos são inseridos.

Um SDXC consiste em um conjunto de matrizes de comutação SDH associados a um conjunto de tributários, de forma que sinais provenientes de um tributário podem ser conduzidos a qualquer outro tributário diferente (ver Figura 2.20). Esta capacidade de *grooming* de canais E1 é aproveitada para organizar o conteúdo dos *containers* VCn em pontos estratégicos da rede.

Também se pode fabricar equipamentos ADM com funções cross-connect, já que o padrão SDH não cria restrições quanto a funcionalidades dos equipamentos; daí existir uma ampla variação entre equipamentos de fabricantes diferentes. Isto cria ainda mais variações para o projeto de redes SDH. Quanto a isto, cabe aqui uma palavra de cautela. A interoperabilidade entre fabricantes SDH ainda tem que ser consolidada, em especial no que toca a facilidades de gerência de rede.

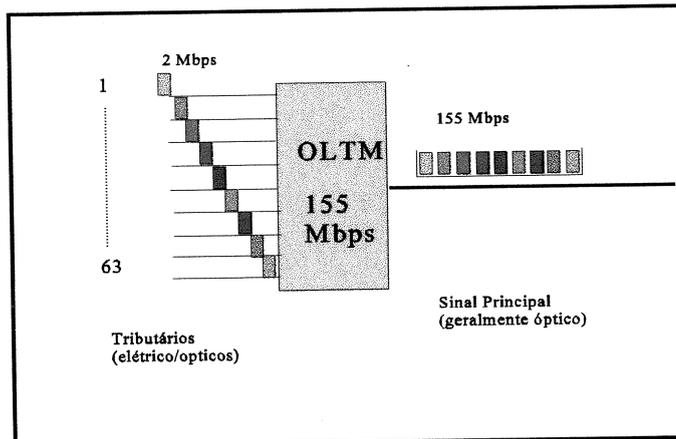


Figura 2.18: exemplo de equipamento OLTM

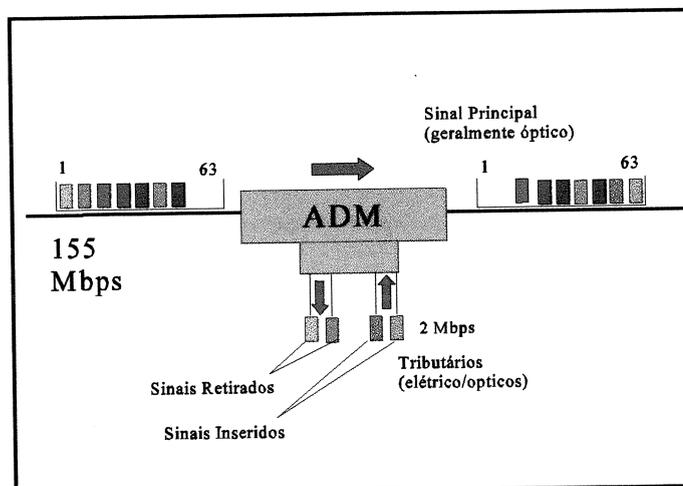


Figura 2.19: exemplo de equipamento ADM:

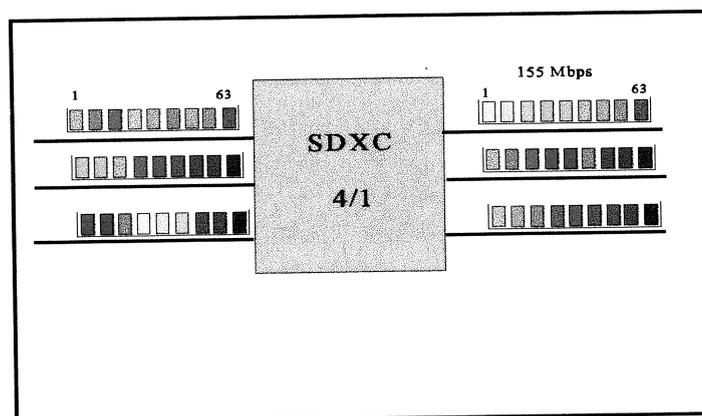


Figura.20: exemplo de equipamento cross-connect 4/1

II.3.4. Topologias Elementares em Redes de Transporte SDH: Anéis, Cadeias e Hubs

Os equipamentos OLTM, ADM e SDXC podem ser combinados para produzir diversas estruturas topológicas diferentes. Nesta seção, algumas destas alternativas serão apresentadas.

Hubs - Nós Concentradores

Os equipamentos SDH podem ser instalados nos centros de fios de maneira a transformar alguns deles em *hubs*. Em redes de grande porte, mais de um hub pode ser instalado, distribuindo a função de cross-conexão em mais de um CF. A Figura 2.21 apresenta uma rede exemplo, com 12 centros de fios, em que três destes CFs possuem SDXCs neles instalados. Nesta rede, os CFs A, B e C são hubs, cada um deles com um cluster de outros centros de fios filiados a si. Algumas observações sobre este tipo de redes:

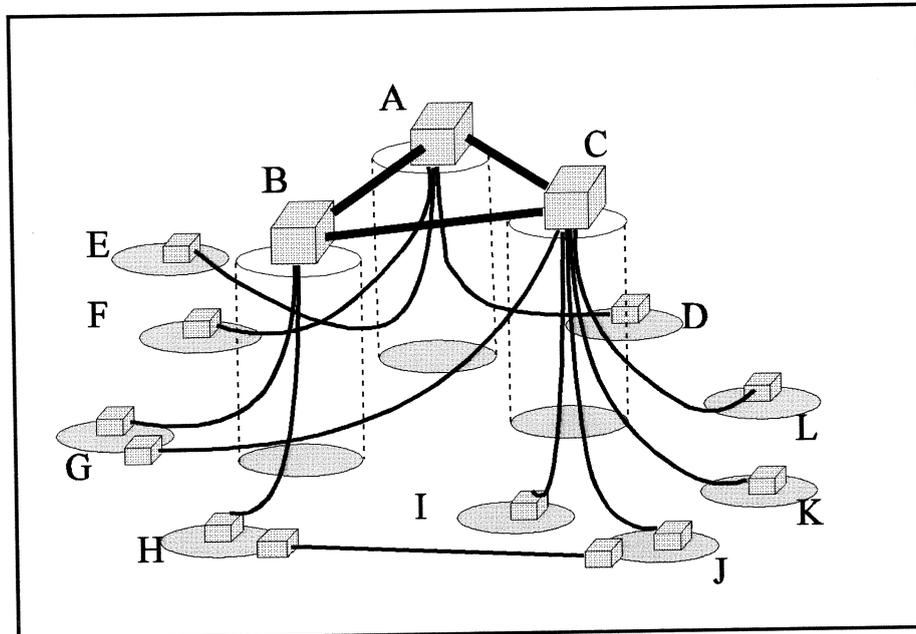


Figura 2.21: Exemplo de rede baseada em hubs

- um CF pode estar filiado a mais de um hub (e.g., CF G é ligado a B e C) ;
- podem ser efetuadas ligações diretas entre centros de fios não-hubs (e.g., entre os CFs H e J);
- na Figura 2.21, todos os hubs são conectados diretamente entre si - isto pode não acontecer em redes reais;
- os hubs podem conter equipamentos 4/4, dividindo a rede em dois níveis hierárquicos, como explicado anteriormente.

Cadeias de ADMs

Equipamentos ADM podem ser dispostos de maneira a formar uma cadeia, também conhecida como barramento, em uma analogia aos barramentos de redes elétricas. A Figura 2.22 ilustra um exemplo deste tipo de estrutura. As estruturas em cadeia podem, teoricamente, ser implantadas como uma sequência de OLTMs (ver

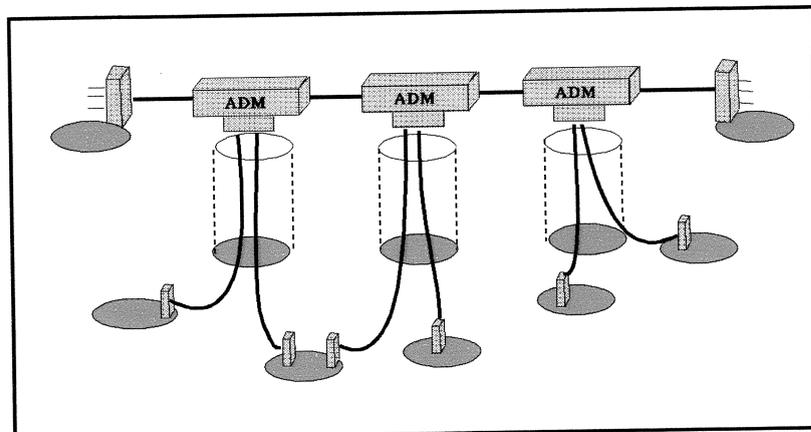


Figura 2.22: exemplo de uma cadeia de ADMs

Figura 2.23), como era feito na tecnologia PDH. Neste caso, cada CF teria um par de OLTMs, dispostos back-to-back. Todavia, este tipo de estrutura faria perder muito da flexibilidade permitida pela tecnologia SDH. Uma cadeia pode ser reconfigurada - à distância - à partir de uma estação de trabalho conectada à rede. Enquanto isto, para alterar a configuração das conexões dos OLTMs seria preciso enviar um técnico até cada um dos CFs.

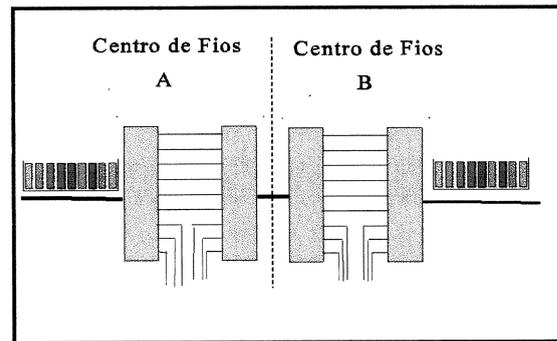


Figura 2.23: implementação de uma cadeia de OLTMs

Anéis de ADMs

Uma cadeia de ADMs pode ser disposta de forma que as suas extremidades coincidam, formando um anel. Se os ADMs de um anel possuem funcionalidades para se reconfigurar na presença de falhas, aproveitando-se da dupla conectividade permitida pelo anel, então tem-se um anel auto-regenerável (*self-healing ring* - SHR). Um anel pode ser classificado de acordo com suas características:

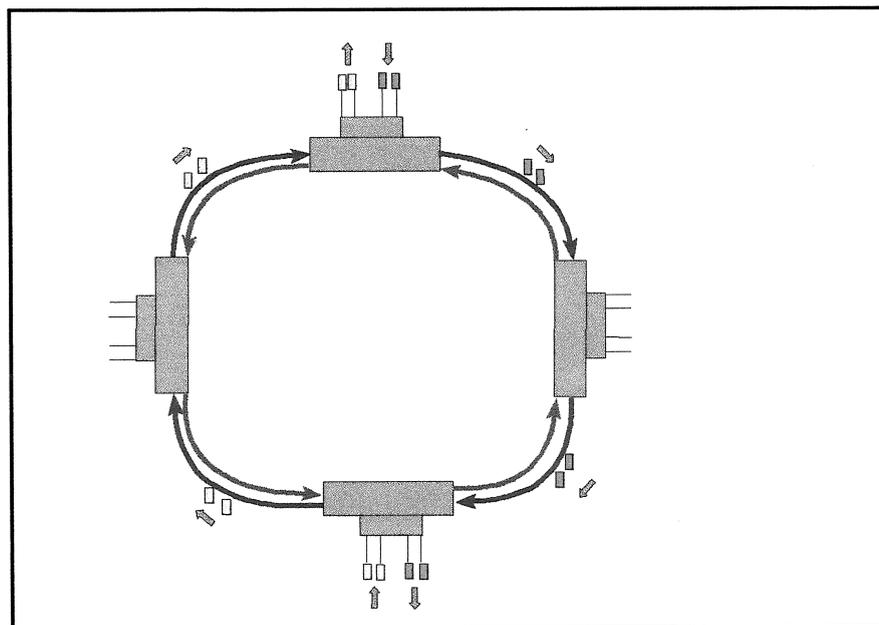


Figura 2.24-a: anel unidirecional, 2 fibras

- anéis uni- ou bi-direcionais: dependendo do sentido com que a informação “flui” através dele. Compare as Figuras 2.24-a e 2.24.b;
- anéis a 2 ou a 4 fibras: dependendo do número de fibras entre seus ADMs. Compare as Figuras 2.24-b e 2.24-c.

Maiores detalhes sobre o funcionamento dos diversos tipos de anéis SDH podem ser encontrados em Gillan (1989), Wu & Burrowes (1990), Wu, Kong & Lau (1992), Krause (1994), Smith & Yackle (1994). Com estas topologias elementares, constroem-se combinações, como anéis biconectados ou estruturas mesclando anéis ou cadeias com hubs.

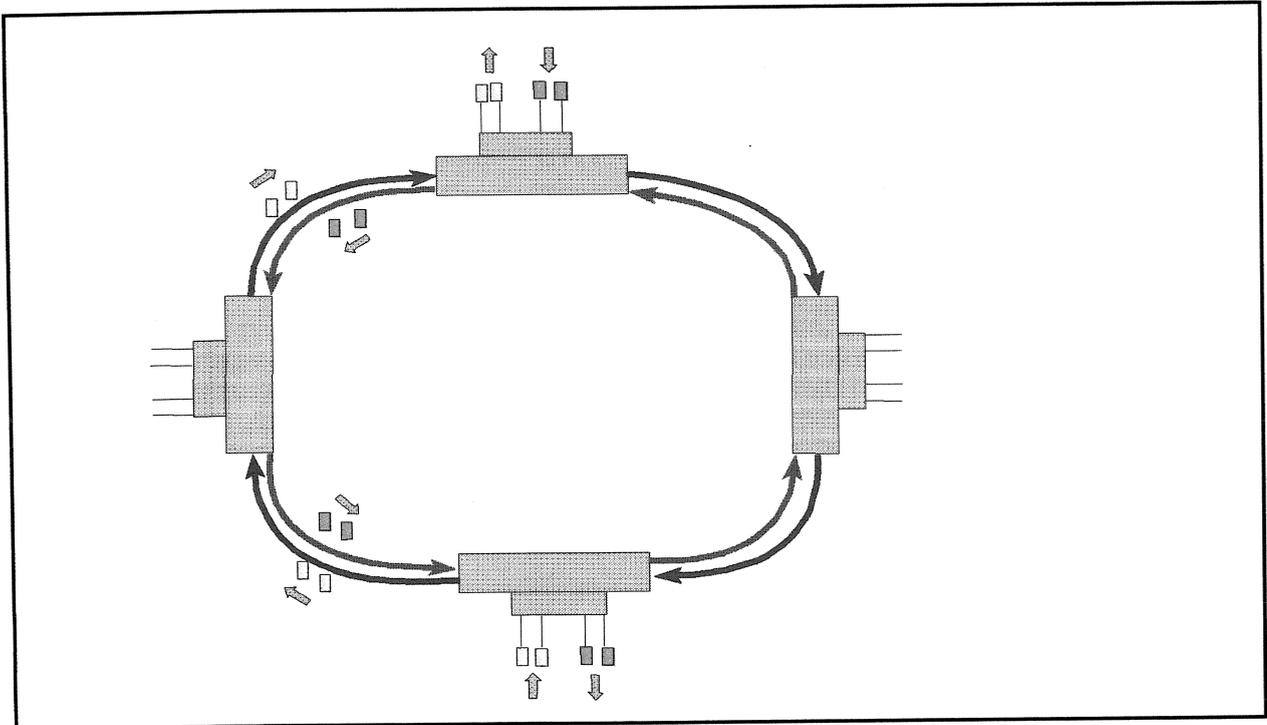


Figura 2.24-b: anel bidirecional a 2 fibras

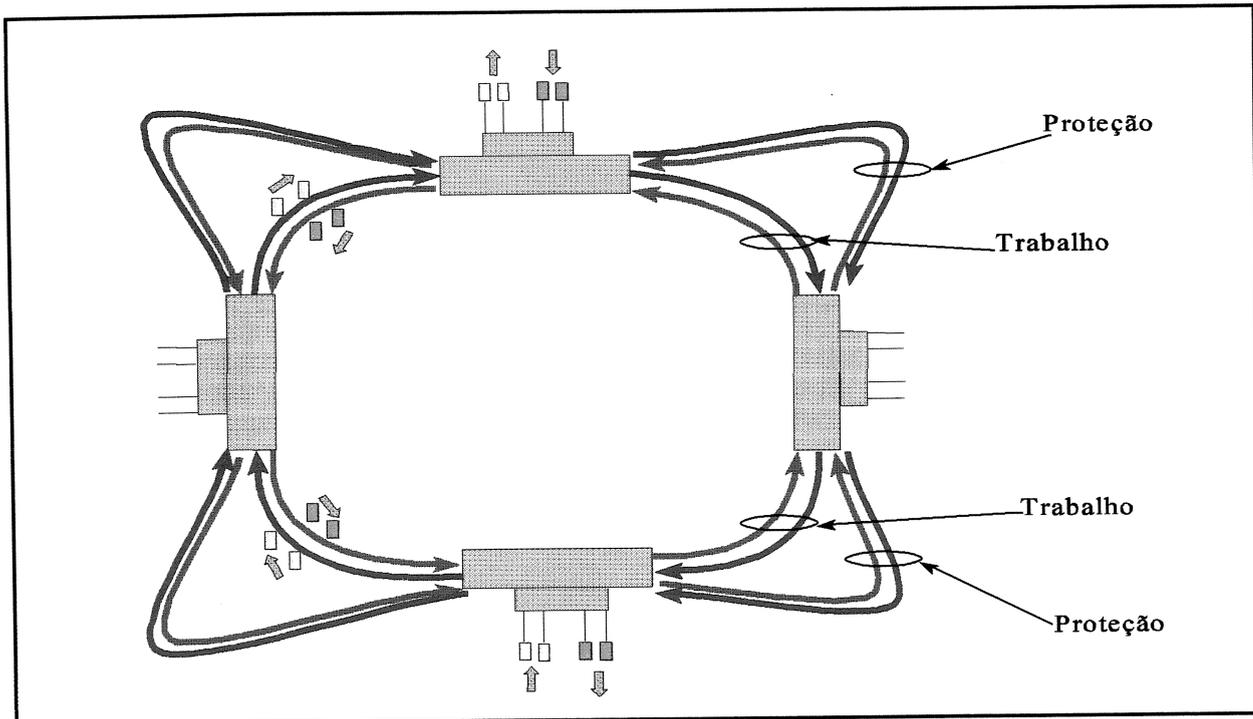


Figura 2.24-c: anel bidirecional a 4 fibras

Anéis Biconectados

Se for necessário fazer a conexão entre dois anéis SHR dentro de uma área local, e se esta conexão for realizada ligando apenas um ADM de cada anel, então terá sido criado um ponto fraco na rede, do ponto de vista da confiabilidade. A solução é se duplicar esta conexão, como apresentado na Figura 2.25.

Note que a mesma informação é duplicada e transportada de um anel para o outro nos dois pontos de conexão. Este esquema de proteção é denominado Drop & Continue. Maiores detalhes a respeito podem ser encontrados em **Krause (1994)**.

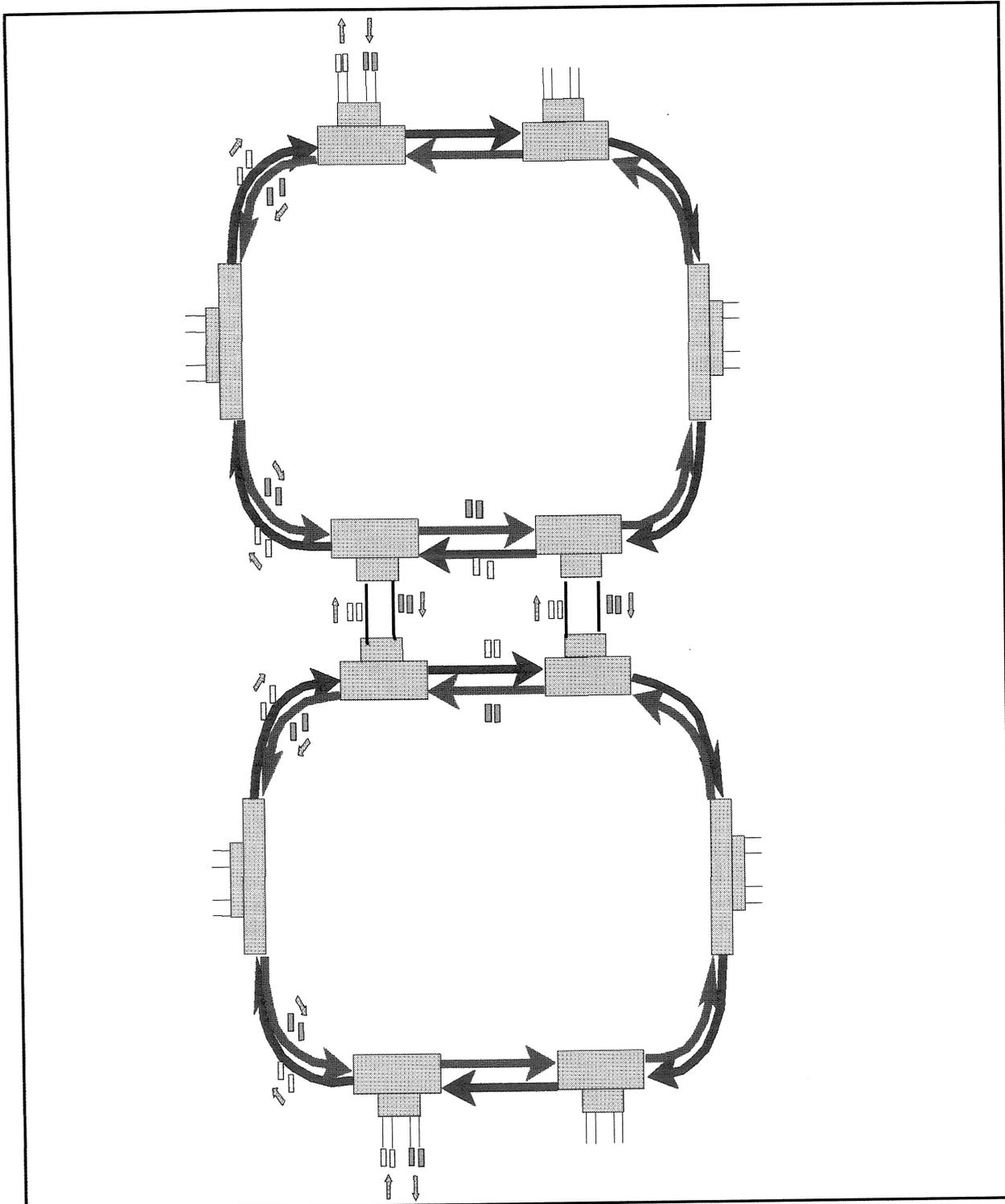


Figura 2.25: anéis bi-conectados com esquema de proteção drop & continue

Combinações de Anéis e Hubs

Em redes de grande porte, pode ser necessário usar tanto anéis quanto hubs na rede de transporte. Duas estratégias podem ser utilizadas (ou mesmo combinadas): mesh-ring e mesh-arc. Ambas supõem a existência de um conjunto de hubs fortemente conectados. Na estratégia mesh-ring, os anéis de ADMs passam ao lado dos SDXCs, com conexões back-to-back entre ADMs e SDXCs fazendo a ligação entre anéis e a malha de SDXCs (veja a Figura 2.26-b). Na estratégia mesh-arc, os anéis se inserem na malha de SDXCs, como apresentado na Figura 2.26-a. Uma comparação entre estas duas topologias pode ser encontrada em **Brown, Grover, Slevinsky & MacGregor (1994)**.

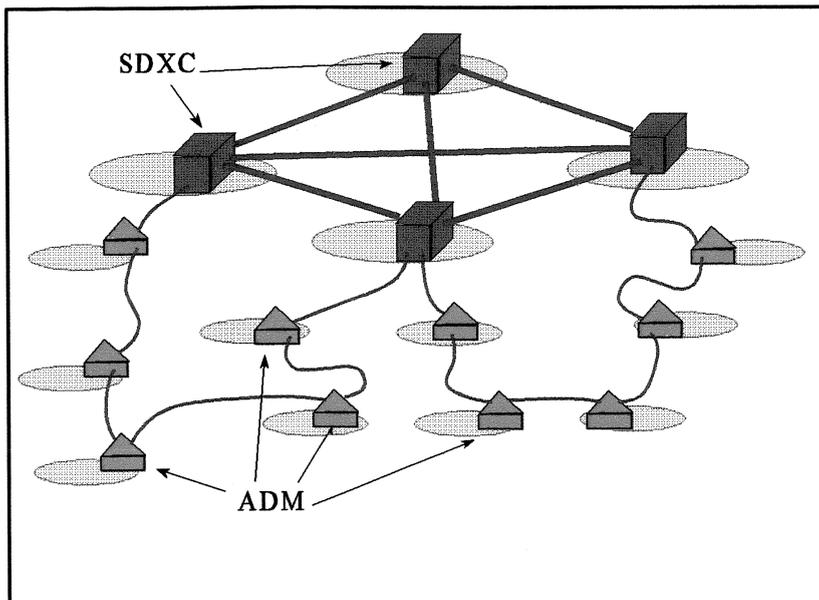


Figura 2.26-a: topologia mesh-arc

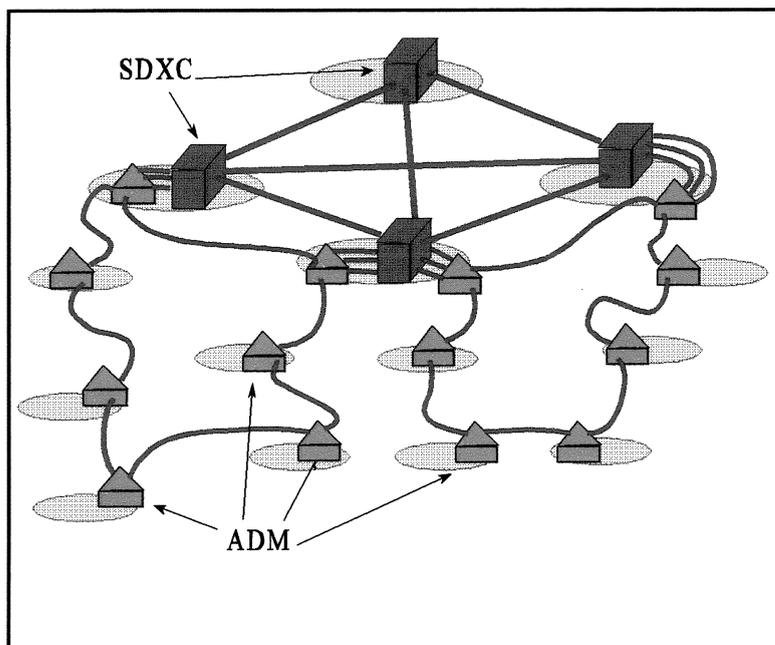


Figura 2.26-b: topologia mesh-ring

II.3.5. Estratégias de Proteção para Redes SDH

Diversos esquemas de proteção podem ser combinados em uma mesma rede SDH para torná-la mais confiável. A escolha da combinação adequada começa junto com o planejamento da rede. Nesta seção alguns destes esquemas serão apresentados de forma resumida:

- *Automatic Protection Swithcing (APS)*: geralmente associada a ligações OLTM-OLTM, mas que também pode ser encontrado em anéis, cadeias e ligações entre SDXCs.
- *Path Switching*: geralmente associada a anéis unidirecionais (Unidirectional Path-Switched Self-Healing Rings - UPSHR), mas também pode ser usada em outras situações;
- *Line Switching*: geralmente associada a anéis bidirecionais (Bidirectional Line-Switched Self-Healin Rings - BLSHR), a 2 ou 4 fibras;
- *Optical Diverse Protection*: uma alternativa aos esquemas de proteção APS.

Existem ainda outras formas de proteção que **não** serão expostas neste trabalho:

- Esquemas de Proteção via Regeneração de Rede: envolve protocolos de regeneração, geralmente associada a malhas de SDXCs. A respeito, ver **Doverspike & Jha (1993)**, e **Johnson et alii (1994)**;
- Esquemas de Proteção via Redes de Comutação Óptica: a este respeito, ver uma série de artigos em *Journal of Lightwave Technology - Special Issue: Multiwavelength Optical Technology and Networks* (June 1996, vol.14 issue 6);

Automatic Protection Swithcing (APS)

Neste esquema de proteção, o módulo de transporte STM-n é duplicado (eletronicamente) e emitido através de fibras ópticas distintas (*working* e *protection*), que - se possível - devem seguir caminhos disjuntos até o equipamento-destino. Ali, o sinal de trabalho é escolhido e o outro é descartado, até o momento em que as condições de chegada do módulo STM-n exijam a troca para o sinal de proteção. Uma representação de um esquema APS encontra-se na Figura 2.27. Maiores detalhes são apresentados por **Wu(1992)**.

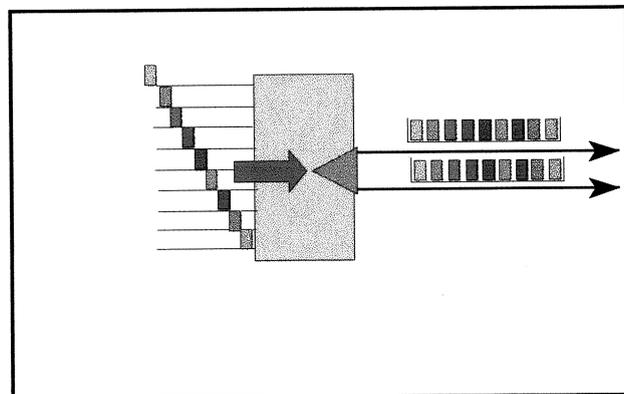


Figura 2.27: esquema de proteção APS

Utilizando-se a analogia com redes de transporte de containers, a proteção APS seria o equivalente a duplicar o caminhão e seu container **no momento em que este está saindo de um armazém**, e mandar cada uma das cópias (*working* e *protection*) sobre uma rodovia diferente. **Ao entrar no próximo armazém**, o caminhão que passou pela rodovia em melhor estado seria escolhido, e o outro descartado.

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 é descartado. Este é o esquema de proteção mais comum em anéis uni-direcionais. A Figura 2.28 apresenta um anel unidirecional a 2 fibras com proteção baseada em *path-switching* (isto é, um anel UPSHR).

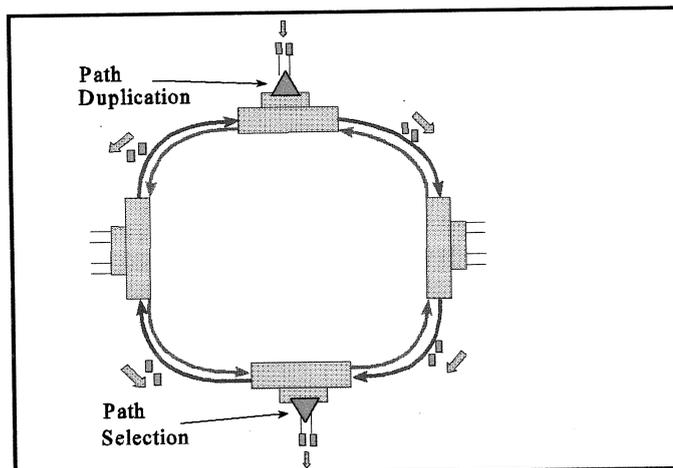


Figura 2.28: anel UPSHR com path-switching

Utilizando-se a analogia com redes de transporte de containers, a proteção via *path-switching* seria o equivalente a duplicar o container a ser transportada **no armazém de origem**, remetê-la por dois caminhões diferentes, que irão passar por diversos armazéns intermediários, com as consequentes trocas de caminhões. Ao chegar **no armazém de destino**, o container em melhor condições é escolhido, e o outro descartado.

Line Switching

Neste esquema de proteção, quando ocorre uma falha em um enlace óptico (uma SDH-line), o módulo de transporte STM-n que seria remetido por ele é desviado para uma linha de reserva, percorrendo a rede por um outro caminho, até chegar ao seu destino final (veja Figura 2.29).

Utilizando-se a analogia com redes de transporte de containers, a proteção via *line-switching* seria o equivalente a reservar um caminho alternativo para cada trecho de rodovia entre dois armazéns. Quando um

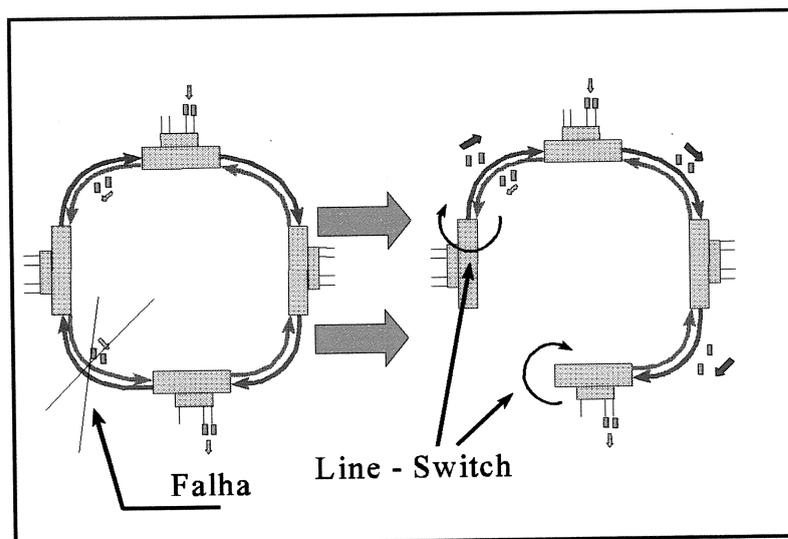


Figura 2.29: proteção via line-switch

trecho de rodovia é interrompido, todos os caminhões que passavam por ali são desviados para o roteiro alternativo. Com isto, às vezes os containers acabam fazendo caminhos mais longos, passando por mais armazéns, e às vezes passando duas vezes por um mesmo armazém (em dois sentidos diferentes), até que a rede seja restaurada.

Neste tipo de esquema de proteção é preciso utilizar um protocolo de comunicação entre os diversos equipamentos SDH, preparando a malha reserva para suportar o tráfego desviado da linha-SDH danificada. Isto faz com que este esquema de proteção exija um tempo maior para recuperar a rede.

Optical Diverse Protection

Neste esquema de proteção, cada módulo de transporte STM-n é duplicado opticamente no momento de sua emissão, e um dispositivo óptico acionado mecânicamente seleciona o sinal óptico a ser recebido. A diferença deste esquema para o esquema via line-switching é que um ocorre a nível eletrônico (camada de *SDH-sections*) e outro a nível óptico (camada de fotônica).

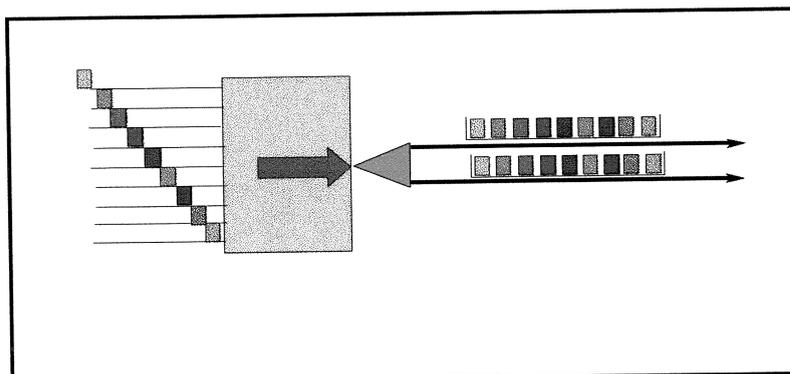


Figura 2.30: proteção Optical Diverse Protection

Compare as Figuras 2.27 e 2.30.

Utilizando-se a analogia com redes de transporte de containers, o esquema Optical Diverse Protection seria o equivalente a duplicar o caminhão e seu container **logo após este sair de um armazém**, e colocar cada uma das cópias (*working* e *protection*) sobre uma rodovia diferente. **Imediatamente antes de entrar no próximo armazém**, o caminhão que passou pela rodovia em melhor estado seria escolhido, e o outro descartado.

Comparando Estratégias de Proteção para Anéis

Quando empregado em anéis, o esquema de proteção baseado em *Line-Switching* potencializa um melhor aproveitamento da capacidade de transporte do anel, se comparado a um esquema baseado em proteção via path-switching. Isto será demonstrado através de dois casos extremos.

Primeiro, imagine o caso extremo apresentado na Figura 2.31. Ali, um anel de 6 nós tem uma matriz de demanda peculiar: nós vizinhos no anel têm demanda igual a 20 canais, enquanto nós não-vizinhos têm demanda nula - um total de $6 \times 20 = 120$ canais a serem transportados. O anel UPSHR da Figura 2.31 tem um fluxo de canais homogêneo em todos os arcos, igual a 120 canais, enquanto o anel BLSHR da Figura 2.31 apresenta um fluxo homogêneo de 20 canais.

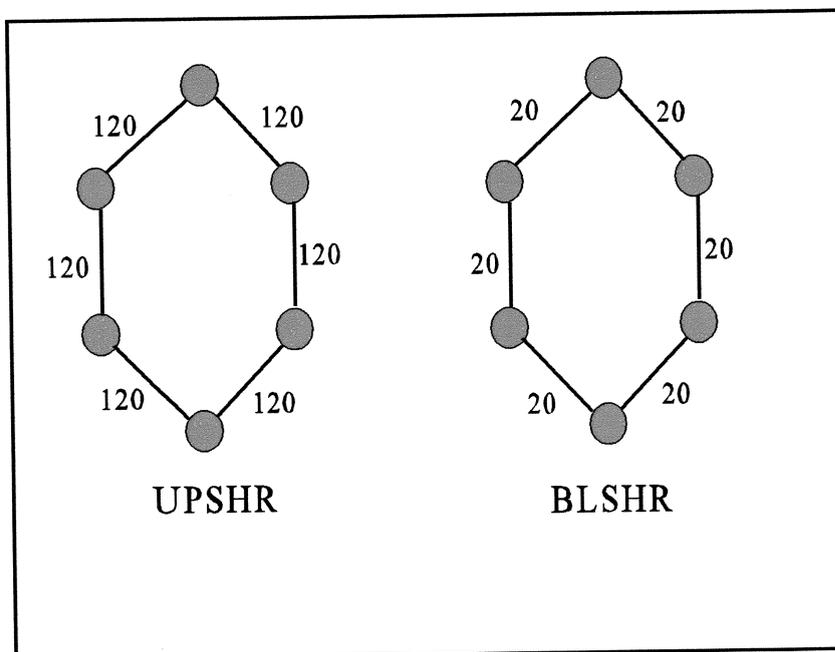


Figura 2.31: anéis com demandas apenas entre nós vizinhos

Enquanto o anel UPSHR necessita de uma capacidade equivalente a um STM-4 (252 canais), o anel BLSHR exige apenas uma capacidade equivalente a um STM-1 (63 canais). Claramente, o esquema de proteção BLSHR é superior quando se compara a capacidade de

transporte dos anéis.

Considere agora uma outra situação extrema, a da Figura 2.32. No mesmo anel de 6 nós, considere que a demanda entre TODOS os nós é igual a 8 canais E1. Note que a soma do número de canais é a mesma da situação anterior ($(6 \times 5 / 2) \times 8 = 120$). No anel UPSHR, o fluxo será igual a 120 canais em cada arco, enquanto no anel BLSHR, será de 32 ou 40 canais em cada arco. Para obter esta última distribuição, basta rotear os canais entre dois CFs pelo caminho mais curto (em número de arcos). Em caso de empate (nós diametralmente opostos), roteia-se apenas no sentido horário. Novamente, o esquema BLSHR é superior.

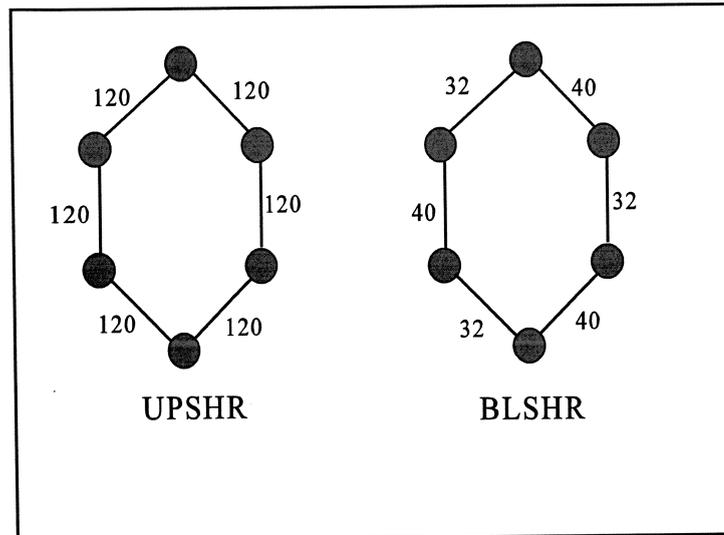


Figura 2.32: anéis com demandas homogêneas entre os nós

O esquema BLSHR irá superar o UPSHR - em termos de capacidade de transporte - sempre que for possível garantir que as maiores demandas percorram o menor caminho possível pelo anel. Assim, a melhor topologia para um anel bidirecional dependeria do perfil de distribuição das demandas de canais entre os nós dos anéis.

Por outro lado, os protocolos de restauração da rede são bem mais complexos nos anéis BLSHR, já que a falha em um enlace provoca alteração da operação em diversos equipamentos da rede. Com isto, o software de gerência é mais complicado. Daí o anel UPSHR ter sido o primeiro a alcançar o mercado. Comparações semelhantes à que foi desenvolvida aqui são encontradas em **Wu (1992)** e **Krause (1994)**.

Ainda mais complexos, contudo, são os protocolos de restauração necessários para redes em malha, baseadas em equipamentos cross-connect. Esta complexidade chega a tal ponto que, com a tecnologia disponível hoje, não é aconselhável se projetar redes SDH de grande porte baseando-se neste tipo de restauração.

Enfim, de todas as topologias apresentadas neste capítulo, a que acabou ganhando a preferência das equipes de planejamento ao longo dos estudos realizados combina a idéia de rede em dois níveis hierárquicos com o conceito de anéis bi-conectados. No nível de baixa ordem, anéis, cadeias e equipamentos ponto-a-ponto a 155 e 622 Mbps atuam como uma “rede de acesso” para um backbone (nível superior), baseado em anéis bi-conectados, em taxas de 2488 Mbps e de 10 Gbps (em futuro próximo). Neste backbone superior, todas as conexões são feitas a nível de VC4 (equivalente ao sinal a 155 Mbps). Os trabalhos de Bortolon et alii (1996) e de Shi & Fonseca (1994) tratam do planejamento deste tipo de redes.

III. Metodologia de Planejamento para a Tecnologia SDH

No planejamento de redes de transporte SDH procura-se uma rede capaz de atender à demanda prevista, que seja eficaz em termos de custo (*cost effective network*) e que atenda a requisitos de confiabilidade (Cosares et alii , 1995). Na prática, além disso, os planejadores levam em conta outros fatores - quase subjetivos. Por exemplo, redes excessivamente concentradas em algum centro de fios são rejeitadas pelo planejador, mesmo que sejam as mais “econômicas”.

Incorporar este tipo de preferências é fundamental para que os resultados de uma metodologia sejam aceitos. Além disso, como existe uma grande incerteza quanto aos dados de custo, de demanda e de confiabilidade nas novas redes de telecomunicações, a participação do planejador é uma forma de reduzir os riscos de se fazer um mau projeto devido a erros nos dados de entrada. Uma outra característica das atividades de planejamento das novas Redes de Transporte é a rapidez com que novas “etapas de planejamento” são solicitadas. Praticamente o tempo todo se instalam novos equipamentos nas redes, buscando atender rapidamente um mercado competitivo.

Assim, uma metodologia de planejamento deve ser flexível tanto para incorporar interferências do planejador quanto para se submeter a revisões frequentes. Neste sentido, propõe-se neste capítulo uma metodologia para o planejamento de redes de transporte SDH, dividindo o planejamento em fases. **Esta metodologia e a modelagem matemática do mais complexo dos seus subproblemas (o Enfeixamento de Troncos) são as principais contribuições deste trabalho.** Todavia, mesmo para aqueles problemas em que não se chega a formular um modelo matemático de resolução, apresentam-se soluções de qualidade desenvolvidas em outros trabalhos.

Este Capítulo apresenta também procedimentos de otimização que são (ou que, pelo menos, podem ser) empregados na metodologia de planejamento. Em sequência, são apresentados:

- os passos seguidos para utilizar modelos de fluxo multiprodutos na solução de problemas de planejamento de redes. Trata-se de uma estratégia comum em aplicações de Pesquisa Operacional, mas com a qual engenheiros de telecomunicações podem não estar familiarizados;
- a proposta da **metodologia de planejamento**, propriamente dita. Esta metodologia é dividida em fases, de forma a reduzir a complexidade de cada subproblema e introduzir pontos de interferência do planejador. Esta divisão em fases facilita também a execução de revisões parciais no processo de planejamento. Isto é, a mudança de parte dos dados de entrada não obriga a refazer todo o processo, necessariamente. Em alguns casos, podem ser reexecutadas apenas algumas das fases de planejamento.

Neste trabalho, iremos supor que não se utilize nem a técnica WDM nem comutadores ópticos na RT-SDH. Assim, a camada de fônica da rede fica simplificada. A consideração destes aspectos é uma possibilidade interessante em trabalhos futuros.

III.1. Passos para o Uso de Modelos de Fluxo Multiprodutos e Problemas de Planejamento de Redes

Qualquer que seja a metodologia empregada ao planejar redes de grande porte, depara-se com problemas em que a quantidade de informações a serem tratadas é enorme. Todavia, uma vez definido um sub-problema de planejamento (por exemplo, obter uma malha de equipamentos de custo mínimo que atenda à demanda prevista), este muitas vezes pode ser traduzido como um problema de otimização em redes de fluxo multiproduto. Este tipo de problemas, por sua vez pode ser resolvido computacionalmente através de algoritmos de otimização (por exemplo algoritmos SIMPLEX ou de Pontos Interiores para problemas de Programação Linear, ou Branch & Bound, Busca Tabu ou Algoritmos Genéticos para problemas de Programação Inteira). **Não é do escopo deste trabalho desenvolver tais algoritmos, mas sim trabalhar sobre o processo que vai da definição do problema de planejamento até a montagem do modelo matemático.** Este processo se repetirá algumas vezes ao longo da metodologia de planejamento proposta aqui, e pode ser resumido em uma sequência de passos (veja Figura 3.1):

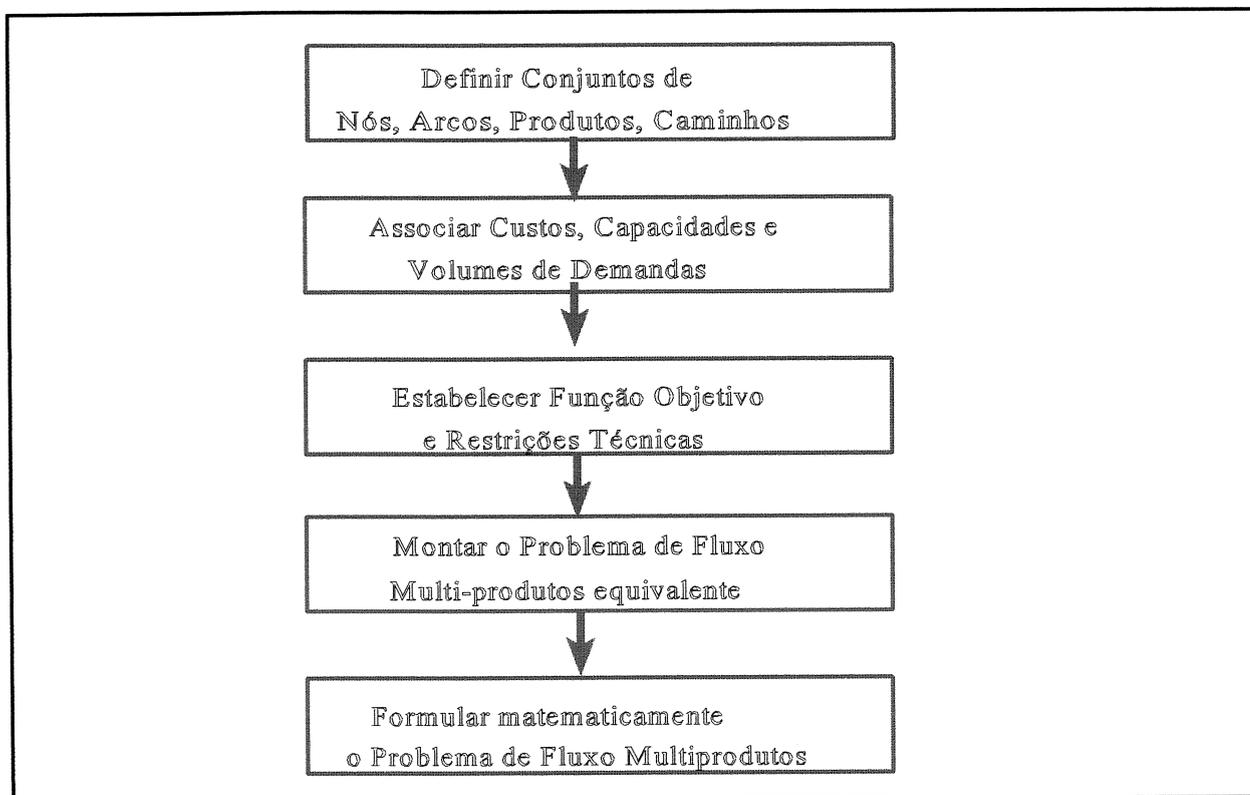


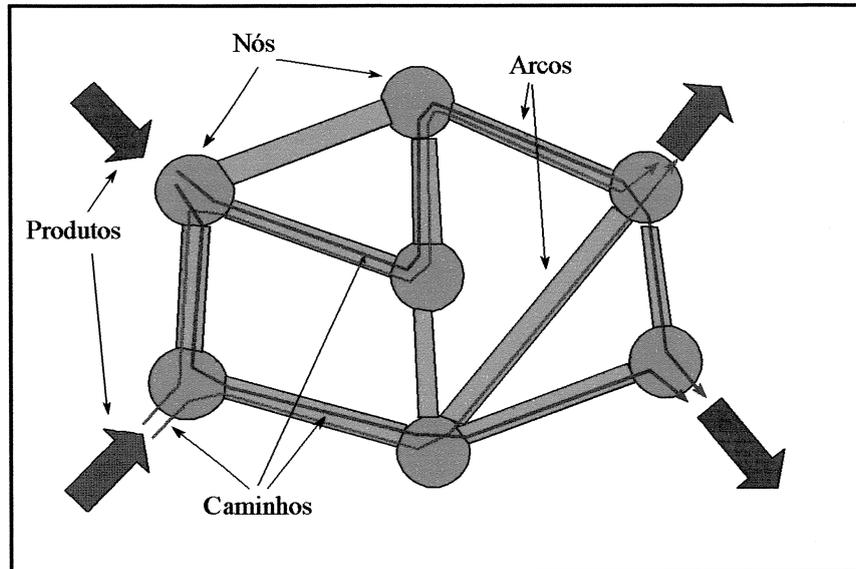
Figura 3.1: passos para a montagem de um modelo matemático para problemas de fluxo multiprodutos

O **primeiro passo** para montar um modelo de fluxo multiprodutos é definir os seguintes conjuntos (acompanhe através da Figura 3.2):

- **conjunto dos nós:** que são os pontos de origem/destino dos produtos que irão fluir na rede **e/ou** os pontos de passagem dos caminhos que levam estes produtos;
- **conjunto dos arcos:** os arcos de uma rede multiproduto são definidos pelos seus

respectivos nós-ponta. Estes, evidentemente, devem fazer parte do conjunto dos nós;

- **conjunto dos produtos:** um produto é definido basicamente pelos seus nós origem/destino. A cada produto se associa um *volume* de demanda a ser atendida;
- **conjunto dos caminhos:** ao “escoar” através dos arcos da rede, cada produto utiliza um ou mais caminhos entre sua origem e seu destino. Estes caminhos podem ser pré-selecionados, no início da modelagem matemática.



Em um **segundo passo**, associam-se capacidades e custos aos nós e/ou aos arcos da rede multiproduto.

Por exemplo, um cabo óptico (que será modelado como um arco) tem dentro dele uma capacidade finita de pares de fibra óptica. De forma análoga, um equipamento SDXC (que pode ser modelado como um nó) tem uma capacidade finita de processamento de canais 2 Mbps.

O **terceiro passo** é estabelecer uma ou mais funções objetivo, assim como uma ou mais restrições técnicas. Geralmente, problemas de planejamento de redes revelam-se problemas multi-objetivo. Algumas funções objetivo típicas são:

- *minimizar a soma dos custos de compra/instalação dos módulos instalados nos arcos / nós;*
- *maximizar a soma das folgas nos arcos da rede;*
- *maximizar a soma das capacidades de transmissão nos arcos,*

enquanto algumas restrições técnicas típicas são:

- *a soma dos fluxos nos caminhos que atendem a um produto deve ser igual ao volume demandado por aquele produto (“restrições de atendimento à demanda”);*
- *a soma dos fluxos nos caminhos que passam por um arco deve ser menor que a soma das capacidades de transporte dos módulos instalados naquele arco (“restrições de capacidade dos arcos”);*
- *a soma dos custos de compra/ instalação dos módulos instalados nos arcos / nós deve ser menor que um certo valor limite (budget constraints);*

O **quarto passo** é traduzir o modelo de rede de fluxo multiprodutos em um Problema de Programação Matemática, associando valores fixos ou variáveis de decisão (inteiras ou lineares) aos elementos dos conjuntos de nós, de arcos, de produtos e de caminhos e/ou a suas propriedades

(custo, confiabilidade, capacidade, fluxo, folga, etc). As funções objetivo e as restrições técnicas são então traduzidas em equações ou inequações matemáticas, em um problema de Programação Linear, ou mesmo um Problema de Programação Linear Inteira Mista. Existem duas estratégias básicas para se fazer esta tradução (Ahuja et alii, 1994): associar valores de fluxo aos arcos (arc-flow variables) ou associá-los aos caminhos (path-flow variables). A primeira estratégia é denominada aqui de Nó-Arco, e a segunda, de Arco-Caminho.

Na estratégia nó-arco, as variáveis de fluxo estão associadas aos fluxos dos diferentes produtos que passam em cada arco, enquanto restrições de balanço de fluxo (de cada produto) são associadas a cada nó da rede (veja a Figura 3.3). O primeiro grupo de variáveis refere-se ao fluxo de cada produto em cada arco da rede. O segundo grupo de variáveis refere-se ao fluxo total em cada arco da rede. O primeiro grupo de restrições refere-se ao equilíbrio de fluxo de cada produto, entrando / saindo de cada nó da rede, enquanto o segundo grupo de restrições refere-se ao cálculo do fluxo total em cada arco da rede.

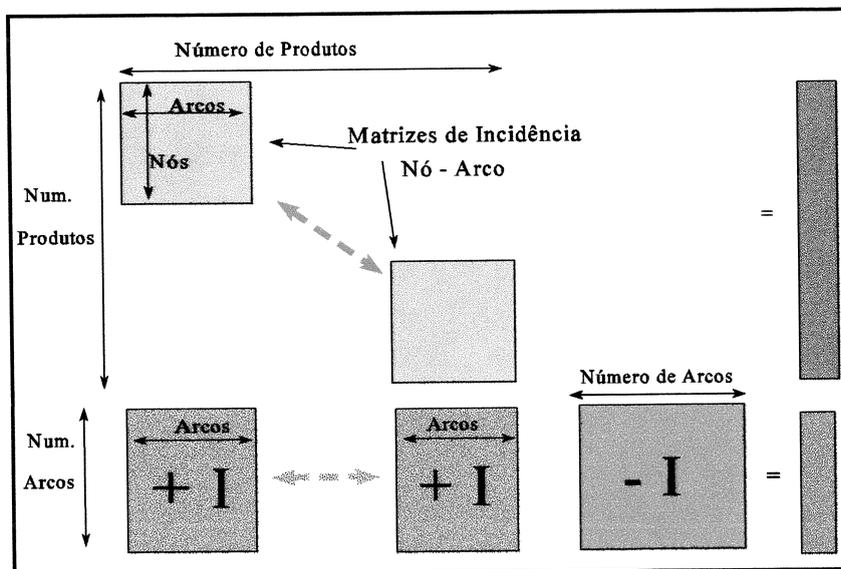


Figura 3.3: representação gráfica da formulação nó-arco

Na estratégia arco-caminho, as variáveis de fluxo estão associadas ao fluxo de produtos em cada caminho (cada caminho leva apenas um produto), enquanto equações de satisfação de demanda são associadas a cada produto (veja a Figura 3.4). O primeiro grupo de variáveis refere-se ao fluxo nos caminhos da rede, enquanto o segundo refere-se ao fluxo/capacidade de cada arco. O primeiro conjunto de restrições refere-se ao cálculo do fluxo total em cada um dos arcos da rede, enquanto o segundo grupo de restrições refere-se ao atendimento da demanda de cada produto.

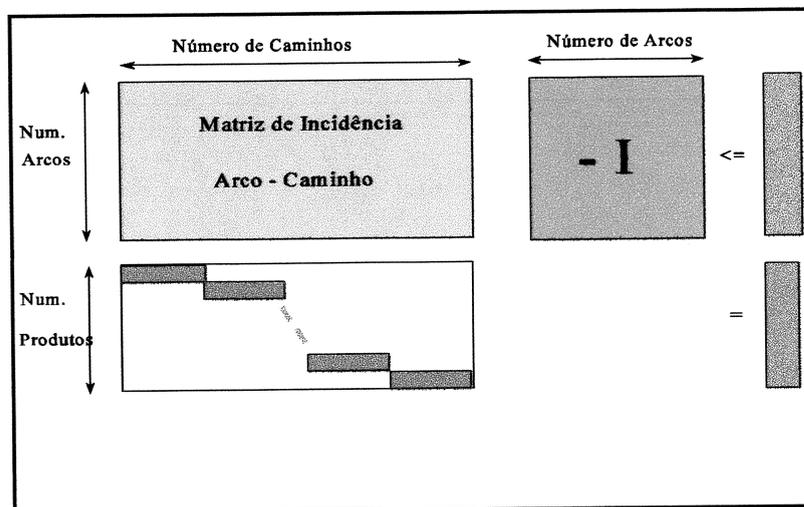


Figura 3.4: representação gráfica da formulação arco-caminho

Em ambas as formulações, restrições de capacidade de fluxo são associadas a cada arco da rede.

Cada uma destas abordagens traz vantagens e desvantagens. Neste trabalho adotou-se a **modelagem arco-caminho**, pelas seguintes razões:

- apresenta uma maior “aderência” aos problemas sendo estudados. Os planejadores estão acostumados a tomar decisões em termos de “qual o volume de troncos na rota que passa por ...”;
- algumas situações - anéis bi-conectados com drop & continue, proteções via path-switching - são difíceis de representar em modelos nós-arco, pois nelas existe duplicação do “fluxo” em um nó, para fins de segurança. Isto “quebra” a regra de “Conservação do Fluxo”;
- teoricamente, a estratégia Nó-Arco é mais completa, pois ela considera todos os caminhos possíveis na rede, enquanto a estratégia Arco-Caminho é incompleta, pois deixa de considerar os caminhos que não forem explicitados na forma de uma variável. Todavia, na prática, isto se revela uma vantagem da segunda estratégia, já que muitos caminhos, apesar de serem “teoricamente” mais econômicos, são impraticáveis por motivos de gerência e operação. A estratégia Arco-Caminho permite pré-selecionar aqueles caminhos que são praticáveis na rede.

Todavia, não se deve descartar a possibilidade de aplicação de formulações nó-arco em alguma etapa da metodologia. Cox, Kuehner, Parrish & Qiu (1993), por exemplo, adotam tal formulação para resolver um problema de dimensionamento em redes plesiócronas.

Finalmente, após a modelagem matemática ter sido feita, o **quinto passo** é resolver o Problema Matemático através de algum algoritmo apropriado, obtendo uma ou mais soluções. Aqui utilizaram-se pacotes comerciais como CPLEX, OSL e LINDO, que utilizam técnicas de Branch & Bound para a solução de problemas de programação inteira. Estas soluções são apresentadas aos planejadores para análise, após o que pode se decidir retornar a algum dos passos anteriores, ajustando / enriquecendo o modelo.

É importante ressaltar neste ponto que o uso de computadores é extremamente útil em todas as etapas, de preferência com interfaces gráficas para melhor visualização, e com suporte de bancos de dados para garantir a integridade da informação fornecida. Em redes de médio e grande porte, a quantidade de dados que deve ser trabalhada é realmente muito grande. Assim, fica muito complicado para o planejador preparar “manualmente” os arquivos de entrada para um sistema como este. Ressalte-se que **na formulação do modelo matemático o uso de suporte computacional** é praticamente obrigatório. Um modelo arco-caminho, para uma rede de médio para grande porte, com 50 nós, 250 arcos e 200 demandas, com uma média de 10 caminhos alternativos para cada demanda, teria aproximadamente 450 linhas e 2250 colunas. É inviável elaborar mesmo um modelo como este “manualmente”, em um editor de texto. E em uma sessão de planejamento típica **dezenas** destes modelos são criados para uma mesma rede em poucas horas!

III.2 Uma Nova Metodologia de Planejamento para Redes SDH

A metodologia apresentada aqui trata do problema de planejamento estático - isto é, uma única matriz de demandas entre os centros de fios deve ser atendida por uma RT-SDH. Uma extensão do método apresentado aqui para tratar do problema dinâmico é descrita em **Zanandrea(1996)**. Ali, diversas matrizes de demanda devem ser atendidas ao longo de um período de planejamento - uma matriz para cada estágio de planejamento.

Problemas de planejamento são geralmente problemas multi-objetivos, em que não existe o que se costuma chamar de “a solução ótima”. A meta em uma sessão de planejamento de redes de telecomunicações é mais a obtenção de soluções/cenários “Pareto-ótimas” (**Current & Min, 1985**) que satisfaçam a algum compromisso entre atendimento da demanda, minimização de custos e obtenção de redes confiáveis, com alguma “margem de segurança”. Por exemplo, para uma mesma rede podem ser geradas duas soluções de planejamento:

- I - solução de custo mínimo que atenda à demanda;
- II - solução de máxima confiabilidade que atenda à demanda.

Quadro 3.1 Resultados procurados no Planejamento de Redes de Transporte

1. **Previsão** da demanda de canais 2 Mbps a ser atendida
2. **Roteamento** da demanda de canais 2 Mbps em SDH-paths, **considerando a capacidade** dos containers VC-4 que podem ser utilizados
3. **Roteamento** dos containers VC-4 sobre a malha de equipamentos, **considerando as capacidades** das SDH-sections e dos equipamentos SDH em cada CF;
4. **Roteamento** das SDH-sections sobre os diferentes comprimentos de onda disponíveis na rede, **considerando as capacidades dos pares** de fibra entre os centros de fios e dos cross-connects ópticos;
5. **Roteamento** dos pares de fibra entre os CFs sobre a malha de cabos de fibra, **considerando as capacidades** dos próprios cabos de fibra e dos distribuidores intermediários ópticos nos CFs;
6. **Roteamento** dos cabos de fibra óptica sobre a infraestrutura física (galerias, cabos OPGW, etc), **considerando a capacidade** de infraestrutura, se for o caso.

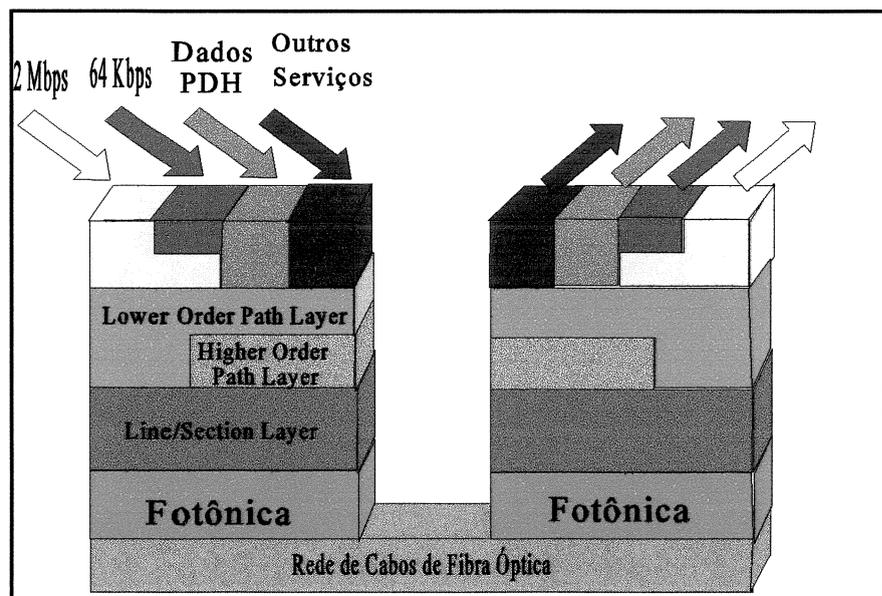


Figura 3.5: estrutura em camadas da rede de transporte (RT) SDH

A **melhor** rede será um compromisso entre estas duas, isto é, ela será mais cara que a primeira rede e mais barata que a segunda, ao mesmo tempo em que será mais confiável que a primeira e menos confiável que a segunda. O que definirá tal solução como Pareto-ótima é a impossibilidade de se obter alguma outra solução ainda melhor em ambas as funções objetivo **simultaneamente**. Assim, para garantir que uma solução com custo “C” e confiabilidade “R” é Pareto-ótima, deve-se provar que não existe uma outra com custo “C’ < C” e confiabilidade “R’ > R”. Daí uma solução deste tipo ser chamada também de “não-dominada”.

Em problemas de planejamento de redes de grande porte, todavia, obter tais soluções Pareto-ótimas é relativamente complicado. De qualquer forma, para o planejador é importante saber - *ao menos* - o quanto cada solução se afasta do mínimo custo, ou da máxima confiabilidade. Estes resultados servem como uma “baliza” para o planejador.

Os resultados que se esperam ao fim de um processo de planejamento/projeto de uma RT-SDH, a partir da previsão de demanda de canais 2 Mbps, podem ser vistos como uma sequência recursiva de “roteamentos” de “unidades de fluxo” de uma camada da RT-SDH sobre a malha de transporte da camada subjacente. Compare o conteúdo do Quadro 3.1 com a Figura 3.5.

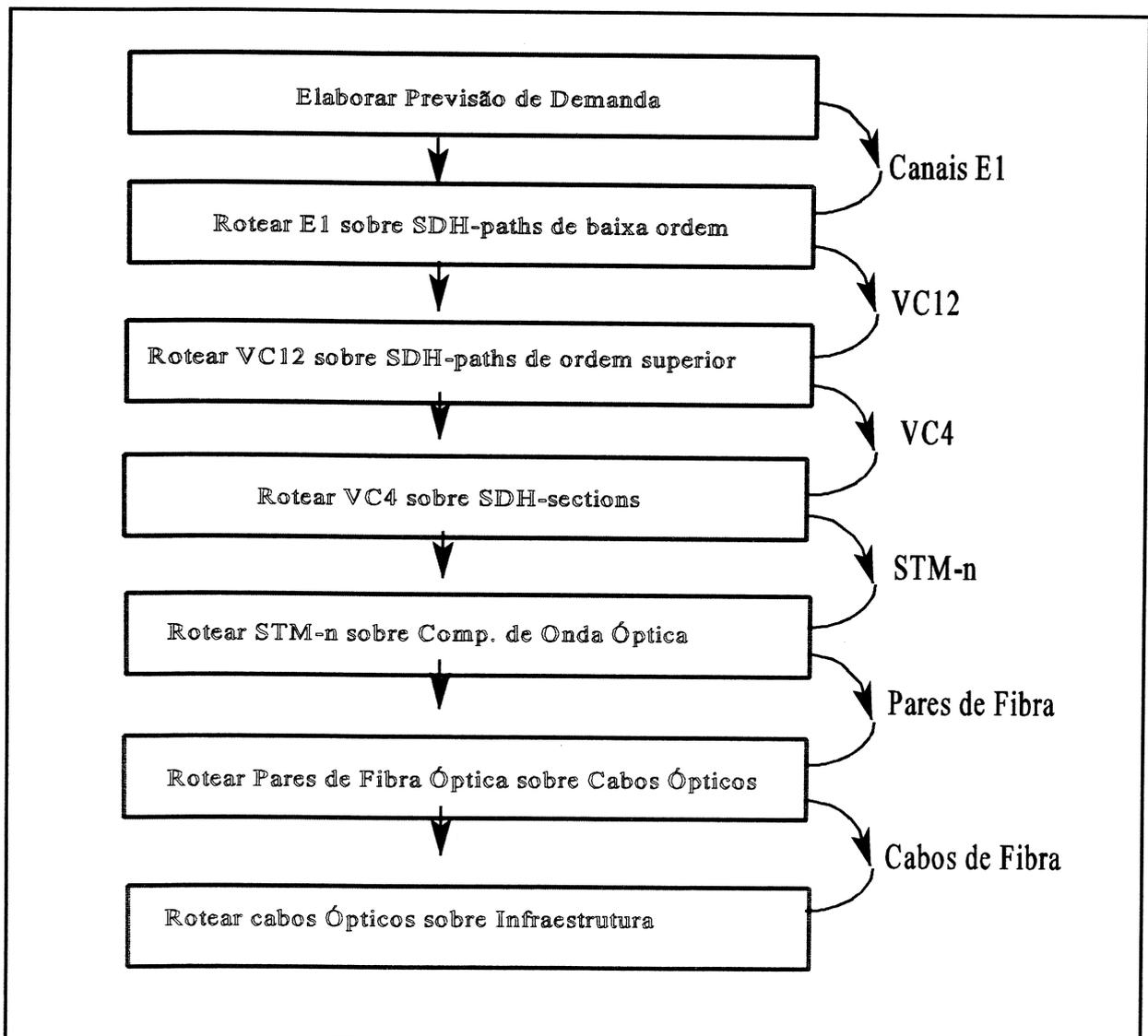


Figura 3.6: uma sequência de planejamento top-down, sem considerar custos/capacidades

Uma metodologia possível para planejar uma RT-SDH seria resolver passo-a-passo cada item do Quadro 3.1, como na Figura 3.6. A desvantagem desta possível metodologia é que a sua sequência de obtenção de resultados privilegiaria obter primeiro informações relativas à operação da rede (item 2), e não ao seu dimensionamento. Em outras palavras, ela não consideraria *primeiro as “coisas” mais importantes para o planejamento*.

Como já foi apontado, o objetivo do planejamento da RT-SDH é buscar um compromisso entre custo e confiabilidade. A metodologia apresentada aqui inicia a busca desta solução de compromisso definindo primeiro soluções de custo mínimo, com uma folga suficiente para se garantir a confiabilidade em uma etapa seguinte. Ora, para minimizar os custos em um projeto de rede, primeiro é preciso identificar onde eles se concentram.

Os custos de uma RT-SDH se concentram nos NE (equipamentos) e/ou na malha de cabos de fibra. Em redes urbanas, a maior parte dos custos está nos NE, enquanto nas interurbanas está nos cabos ópticos e na infraestrutura que os suportam. Lembre-se que nas RT interurbanas as distâncias são maiores e a infraestrutura para transmissão **não** é compartilhada com outras partes da rede (com a Rede Externa, por exemplo).

Dentro do Quadro 3.1, a definição da malha de equipamentos é obtida no item 3, enquanto a definição da malha de cabos de fibra é obtida no item 5, e a sua infraestrutura - se for o caso - no item 6. Suponha que o planejador receba a previsão de demanda em canais 2 Mbps. Como se deseja minimizar custos, então é razoável que o planejamento da rede comece por um destes itens (3 ou 5). Propõe-se aqui o seguinte:

- **Para Redes Urbanas (veja Figura 3.7):**
 - Primeiro defina a malha de NEs e conexões STM-n entre centros de fios, procurando o **custo mínimo**, a partir da demanda de canais 2 Mbps. Preveja alguma folga para atender a requisitos de confiabilidade. Este problema é denominado de Enfeixamento de Canais;
 - Depois defina a malha de cabos ópticos, considerando a demanda de pares de fibras ópticas entre os NE, procurando garantir o nível de **confiabilidade** da rede. A demanda de pares de fibras é obtida como resultado da primeira fase. Este problema é denominado de Arranjo e Dimensionamento de Fibras;
 - Por último, detalhe a malha de equipamentos, roteando as demandas de forma a obter as melhores **condições de confiabilidade e de operação** sobre aquela rede. Defina o conteúdo dos STM-n, VC4 e VC12 para toda a rede (inter e intra-CFs).

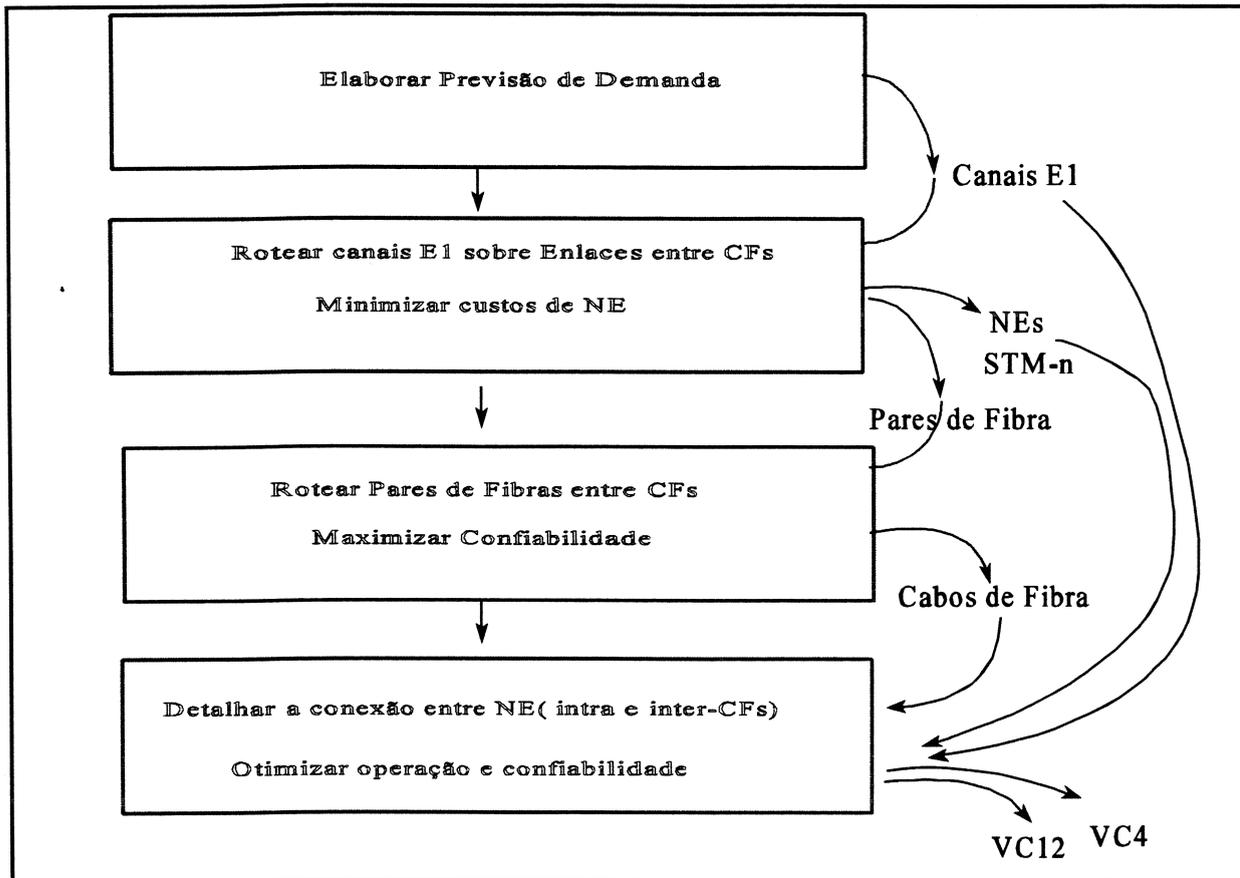


Figura 3.7: fluxo de informações na proposta de metodologia para planejamento de redes urbanas

- **Para Redes Interurbanas** (veja Figura 3.8):
 - Primeiro defina a malha de cabos ópticos, mesmo que de forma aproximada, a partir da demanda de canais 2 Mbps. O objetivo é **garantir a conectividade** da rede, a custos razoáveis. Preveja alguma folga, de forma a garantir a confiabilidade posteriormente;
 - Depois, defina a malha de NEs, **minimizando os custos** de equipamentos e pares de fibra, que são obtidos como resultado da primeira fase. Novamente, garanta alguma folga para a posterior garantia de confiabilidade. Trata-se praticamente do mesmo problema de Enfeixamento de Troncos;
 - Defina com maior detalhe o roteamento dos pares de fibra óptica sobre os cabos ópticos propostos inicialmente, buscando garantir a **confiabilidade**. Trata-se do mesmo problema de Arranjo de Fibras. Detalhe também a malha de equipamentos, roteando as demandas de forma a obter as melhores condições de **confiabilidade e de operação**.

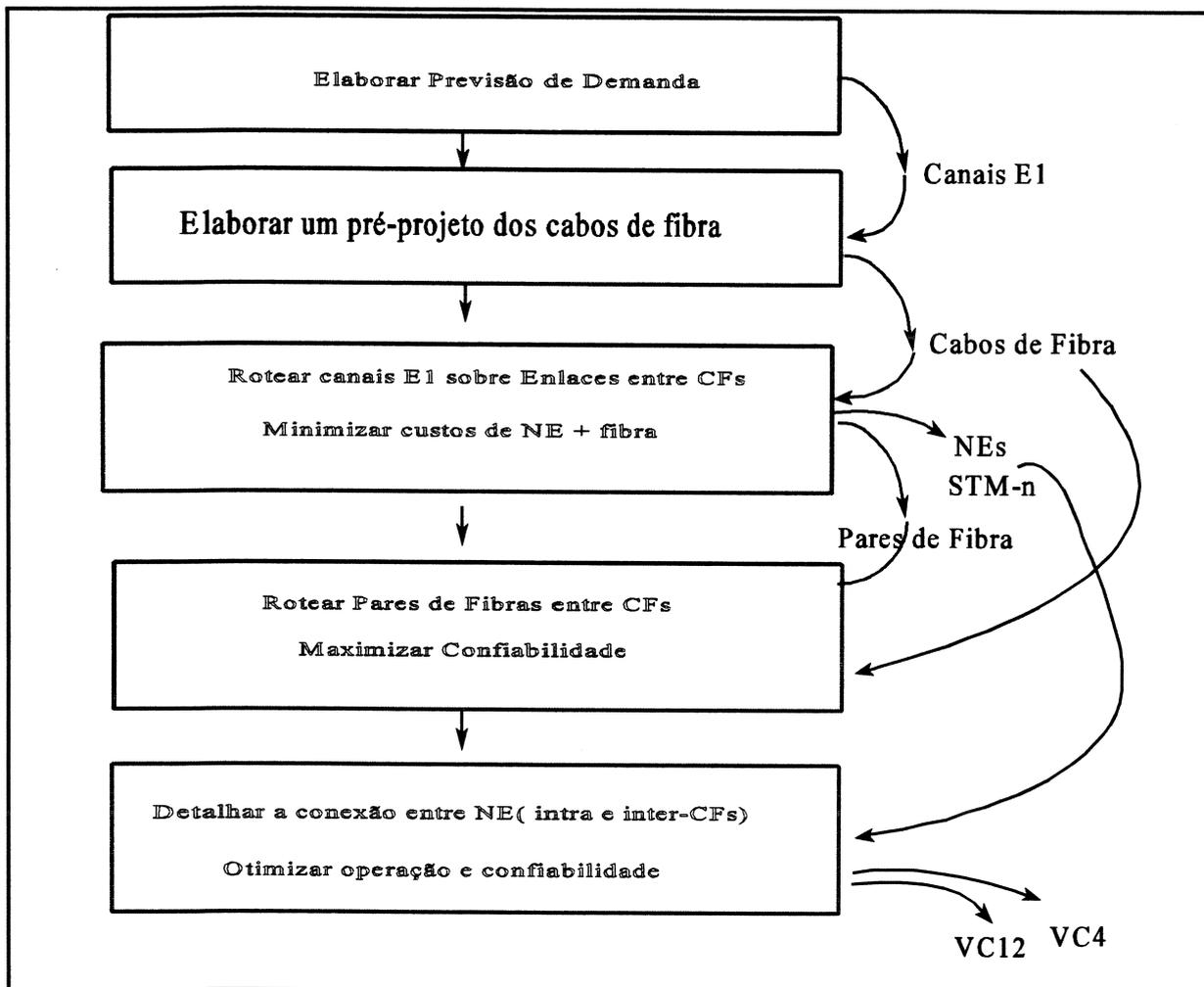


Figura 3.9: fluxo de informações na proposta de metodologia para redes interurbanas

Os dois problemas mais complexos são o Enfeixamento de Troncos e o Arranjo de Fibras. No Capítulo IV, é apresentado um modelo de fluxo multiprodutos para o Problema de Enfeixamento, que é traduzido em um problema de programação linear inteira mista.

Antes de analisar mais detalhadamente estes dois problemas, serão definidos dois outros: o problema de Agrupamento de Centros de Fios e o problema de Seleção de Galerias, que embora não estejam explicitados na proposta acima, devem precedê-los.

Durante o Agrupamento de Centros de Fios, procura-se estabelecer uma classificação dos centros de fios como *CFs pendentes, periféricos, centrais ou hubs*. Em redes reais, a maior parte da demanda se concentra em relativamente poucos CFs de uma rede. A idéia é identificar estes CFs na fase de Agrupamento, e organizá-los em clusters. Com isto, pode-se simplificar a resolução do Problema de Enfeixamento.

Da mesma forma que o Agrupamento é uma forma de simplificar a etapa de Enfeixamento de Troncos, também a Seleção de Galerias pode também ser considerada uma forma de simplificar o Arranjo e Dimensionamento de Fibras. Ocorre que - em redes urbanas - a malha de galerias entre os CFs costuma ser bastante “densa”, já que ela também suporta a rede externa (RE). E as necessidades de infraestrutura física para a RT são significativamente menores do que as da RE. Além disso, em redes urbanas as distâncias são relativamente curtas, e a importância relativa dos

custos de fibra é pequena frente aos custos de equipamentos. Assim, o roteamento dos cabos de fibra óptica sobre a infraestrutura de galerias tem mais impacto sobre a confiabilidade da rede do que sobre o custo total da mesma. Assim, é necessário escolher um sub-conjunto dentre as galerias da rede que garanta a conectividade entre os centros de fios. CFs com maior importância irão exigir entre si um grau de conectividade 2 ou 3 (isto é, não há como se perder a conexão entre eles com a “falha” de apenas uma ou mesmo de duas galerias), enquanto CFs de menor importância podem ter uma conectividade de grau 1 (um).

Com estes acréscimos, o planejamento de RT-SDH para áreas urbanas passa a ter quatro fases principais, como ilustrado na Figura 3.9.

Note (ainda na Figura 3.9) que existe uma realimentação entre os problemas de enfeixamento e de arranjo de fibras. Para se resolver o enfeixamento, é preciso se “conhecer” o custo de um par de fibras entre dois CFs. Só que o conhecimento exato deste custo só é obtido ao fim do Arranjo de Fibras. Já para se resolver o Arranjo de Fibras, é preciso se “conhecer” a demanda de pares de fibras entre os CFs. E o conhecimento exato desta demanda só se obtém ao fim do Enfeixamento. É preciso então definir uma sequência para abordá-los, escolhendo-se um subproblema como ponto de partida, fazendo-se uma estimativa prévia do dado de entrada “desconhecido”, resolvendo o primeiro sub-problema, obtendo-se um resultado viável, para então se resolver o segundo subproblema.

O que se propõe aqui é que, em redes urbanas, faça-se uma estimativa dos custos em fibra entre os centros de fios para se iniciar o planejamento pela determinação da malha de equipamentos (Enfeixamento). Em casos em que há abundância de fibra, pode-se mesmo desprezar estes custos (custo estimado = zero). Por outro lado, propõe-se que, em redes interurbanas, faça-se uma estimativa da demanda de pares de fibra entre os centros de fios, para iniciar o planejamento pela determinação da malha de cabos ópticos (Arranjo de Fibras). Como os cabos de fibra devem ser planejados com uma folga razoável, não decorrerá nenhum problema em se errar esta demanda

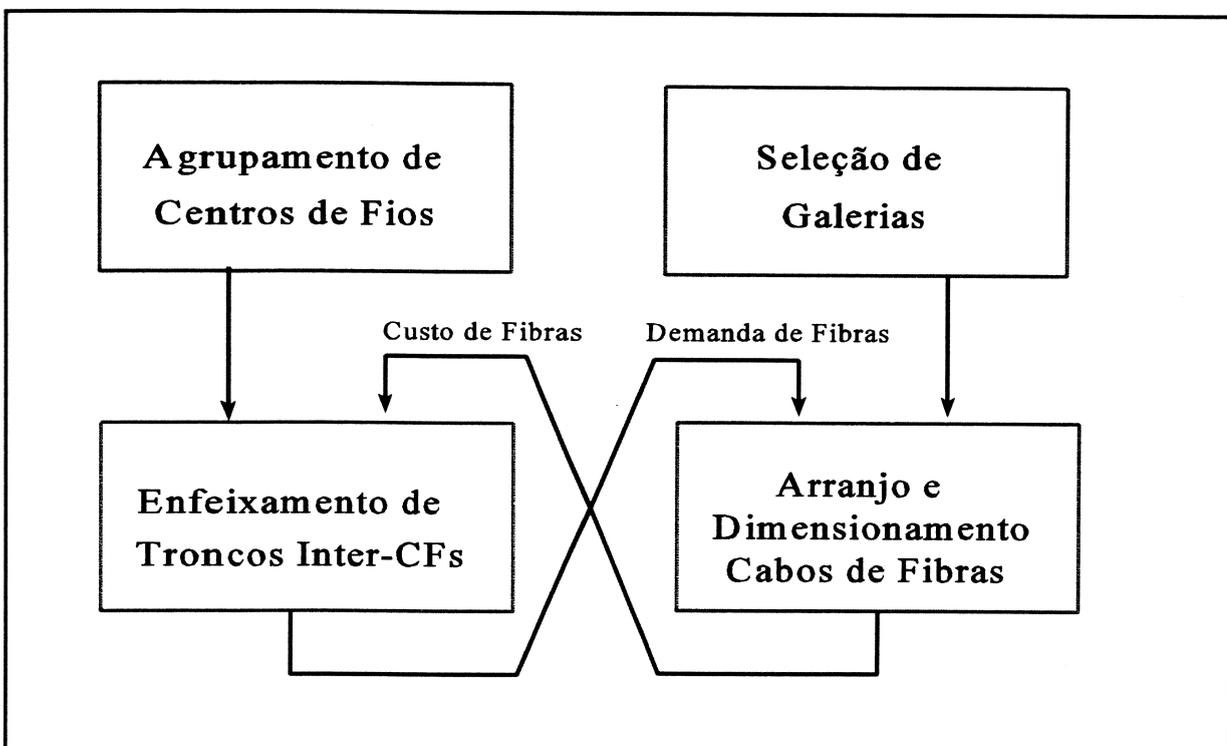


Figura 3.9: realimentação entre os problemas de Enfeixamento e Arranjo de Fibras

em alguns pares. Na dúvida, a sensibilidade dos planejadores pode ser útil para se “calibrar” esta estimativa prévia.

Finalmente, seja em redes urbanas ou interurbanas, propõe-se como última etapa da metodologia que se faça o detalhamento dos outros resultados de planejamento. Ou seja, que se faça:

- o detalhamento das SDH-sections entre os NE (isto é, das conexões entre os equipamentos) localizados em um mesmo CF,
- o roteamento dos canais 2 Mbps sobre os VC4, detalhando os SDH-paths de baixa ordem usados para atender cada demanda;
- o roteamento dos VC4 sobre as SDH-sections, detalhando os SDH-paths de ordem superior.

Com estes “detalhamentos”, obtém-se o conteúdo de cada VC4 da rede. Note que este é um detalhamento da rede já quase a **nível de operação**. Embora seja possível elaborar modelos de otimização também para estes problemas, os mesmos não serão estudados neste trabalho.

No restante deste capítulo, cada uma das quatro etapas de planejamento é estudada com maior detalhe.

III.2.1. Fase de Agrupamento de Centros de Fios

Nesta fase os centros de fios são classificados e agrupados quanto ao volume e à distribuição de sua demanda. Um centro de fios pode ser classificado como:

- **Pendente:** um centro de fios, geralmente com pequeno volume de demanda, onde a maior parte dos canais tem como destino um único centro de fios (CF “mãe”);
- **Periférico:** um centro de fios com volume total de demanda reduzido¹, se comparado aos maiores CFs de uma rede;
- **Central:** centro de fios com grandes volumes de demanda originados/terminados nele. Em geral, coincidem com os centros comerciais das grandes cidades (em redes urbanas) ou com as maiores cidades de uma região (redes interurbanas);
- **Hub:** centro de fios com características centralizadoras de demanda. Diversos fatores influem para classificar um CF como hub, entre eles: grande volume de demanda originada no CF, localização geográfica central, boa infraestrutura para transmissão, presença de centrais de comutação tandem.

Em redes urbanas, CFs pendentes, periféricos, centrais e hubs geralmente assumem uma distribuição semelhante à da Figura 3.10.

Nesta fase, os CFs são agrupados em clusters. Dois critérios frequentemente usados na formação de clusters são a minimização da demanda inter-clusters e a proximidade geográfica. **Aubry(1995)** descreve algoritmos de agrupamento que levam em conta simultaneamente os dois critérios. “Acidentes geográficos” também têm influência na definição dos clusters: um rio ou uma avenida com infraestrutura “congestionada” pode ser um limite nítido entre dois clusters.

A escolha de Hubs tem sempre uma forte participação do planejador. Um hub é um CF com condições de suportar muitos equipamentos da rede de transporte, ou pelo menos, alguns equipamentos de grande porte. Entre estas condições, deve-se levar em conta: o estado da infraestrutura do prédio e das galerias de acesso ao CF, as suas condições de fornecimento de energia, a existência de espaço físico para expansão das instalações de transmissão e a existência de centrais de comutação tandem.

Através da classificação e do agrupamento de CFs ganha-se “intuição” sobre outras etapas de

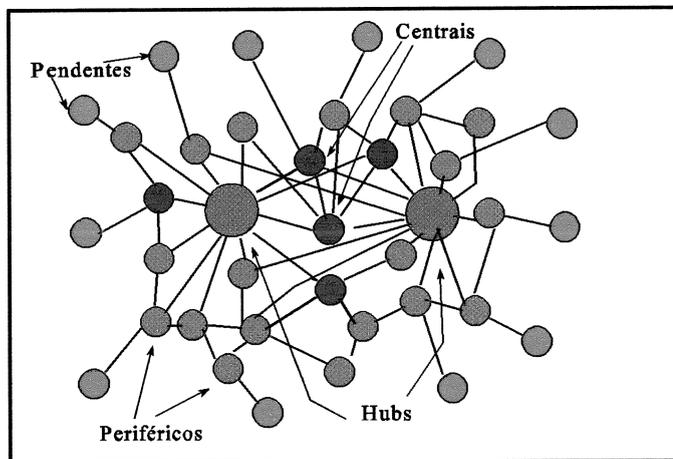


Figura 3.10: distribuição geográfica dos diferentes tipos de CFs em uma rede urbana

¹ Cabe aqui um comentário: em algumas situações, um centro de fios com pequeno volume de demanda deve ser considerado não-periférico do ponto de vista do planejamento. Basta que a receita referente a este CF seja alta. Isto ocorre, por exemplo, com centros empresariais que se instalam nas periferias das grandes cidades, shopping centers, etc.

planejamento, simplificando-as. Por exemplo:

- os CFs pendentes somente irão exigir conexões em fibra óptica para o seu CF “mãe”. Isto simplifica tanto a fase de Enfeixamento quanto a de Arranjo de Fibras Ópticas. Na prática, os centros de fios pendentes podem ser “eliminados” da matriz de demanda do enfeixamento, e a demanda originada/terminada neles agregada aos respectivos CFs-mãe (veja a Figura 3.11)
- contando com algumas suposições simplificadoras, a divisão da rede em clusters permite determinar o fluxo máximo que pode fluir entre dois CFs. Isto é de utilidade na fase de proposta de candidatos ponto-a-ponto, dentro da fase de Enfeixamento de Troncos.
- a hierarquia de importância dos CFs, associada à filiação dos CFs aos hubs, é útil na fase de geração automática de caminhos, também no Enfeixamento;
- o mesmo se aplica em relação à proposta de anéis candidatos, se o algoritmo de agrupamento for voltado ao projeto de anéis de ADMs.

Serão analisados aqui dois trabalhos que apresentam modelos e algoritmos de otimização para Problemas de Agrupamento de Centros de Fios. Para o primeiro (Aubry, 1995) interessa apenas agrupar os CFs em clusters, sem preocupar-se com a forma pela qual eles irão se comunicar. O segundo (Laguna, 1994) supõe todas as conexões sendo feitas através de anéis unidirecionais.

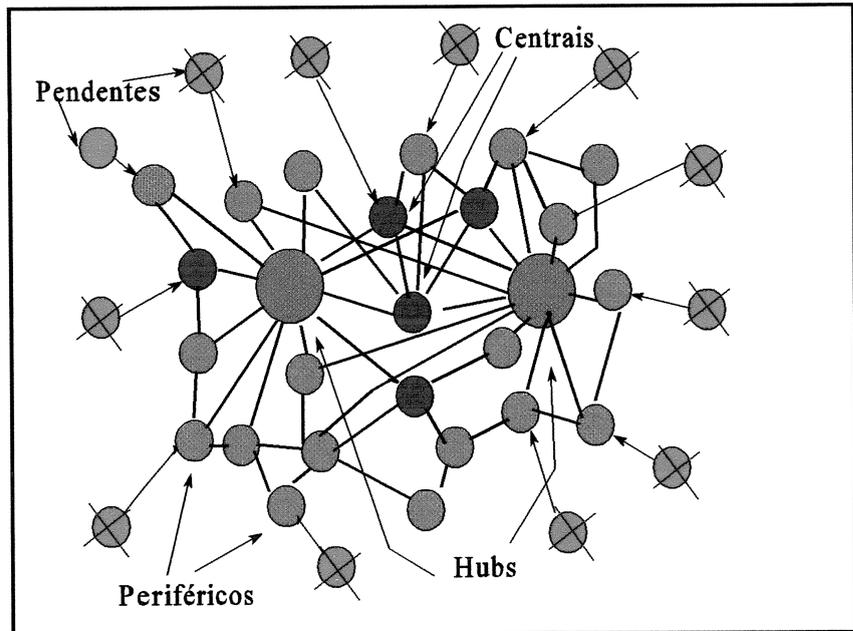


Figura 3.11: eliminação dos CFs pendentes

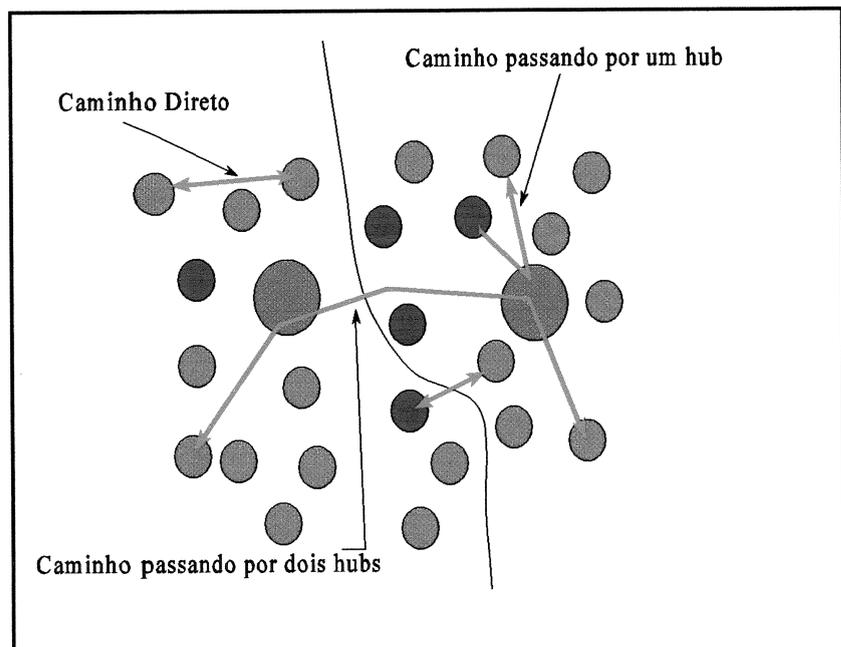


Figura 3.12: tipos de caminhos permitidos

III.2.1.1 Agrupamento de Centros de Fios em Torno de Hubs

O problema a que Aubry (1995) se propõe a resolver é otimizar o agrupamento de CFs . Ao fazê-lo empregando algoritmos baseados em sementes, gera uma política ótima de filiação dos CFs a hubs. Suas funções objetivo são a minimização da demanda inter-clusters e o respeito à proximidade geográfica dos centros de fios.

Considere que todos os CFs-hub sejam ligados diretamente entre si, e que uma demanda - para ser atendida - possa passar apenas pelos seguintes tipos de caminhos:

- caminho diretos, passando por apenas uma ligação ponto-a-ponto;
- caminho passando por um CF-hub intermediário, que é o hub de um dos CFs;
- caminho passando por dois CFs-hub intermediários, que são os respectivos hubs dos CFs.

Ao obter um agrupamento minimizando a demanda inter-cluster, Aubry (1995) procura minimizar a soma total do fluxo nos caminhos do terceiro tipo. Caminhos diretos inter-cluster não são *penalizados*. Estes tipos de caminhos estão apresentados na Figura 3.12. A idéia é que grandes demandas podem ser atendidas por ligações outras que não as inter-hub, pois elas sozinhas já justificam - por exemplo - um enlace ponto-a-ponto. Considerá-las seria, portanto, uma distorção, pois elas não acrescentariam - de fato - nenhum custo aos hubs.

O método de resolução proposto por Aubry (1995) consiste nas seguintes fases:

1. Identificar os centros de fios pendentes, reduzindo as dimensões da matriz de demandas;
 2. “Enxugar” a matriz de demandas, retirando aqueles volumes de troncos entre CFs não-hub tão altos que justifiquem uma conexão direta entre eles. Volumes de troncos acima de um **Limite de Enxugamento** são atendidos por ligações CF-a-CF, e não são roteados através dos hubs. A determinação deste limite é função dos custos das ligações entre os CFs e das economias de escala entre as diversas taxas de transmissão. Em redes interurbanas, a tendência é ter limites muito altos (menos ligações CF-a-CF, economizando fibra óptica) enquanto em redes urbanas a tendência é ter limites mais baixos (mais ligações CF-a-CF, economizando capacidade de *cross-connecting*);
 3. Elaborar um grafo “imaginário” de declaração de vizinhança entre os CFs. Aqueles CFs que podem ficar em um mesmo cluster são conectados por um arco neste grafo, a cada arco se associando um valor relacionado à dificuldade ou facilidade de conexão entre eles. Isto permite considerar eventuais “acidentes geográficos”;
- Otimizar o agrupamento dos centros de fios da rede, usando a matriz de demandas enxugada e as declarações de proximidade entre centros de fios através de algoritmos de clustering. Maiores detalhes no trabalho citado.

É bom ressaltar - no trabalho de Aubry (1995) - a preocupação em considerar duas funções objetivo na última fase: proximidade geográfica e minimização da demanda inter-cluster. Um dos algoritmos propostos por Aubry considera a função objetivo como uma combinação linear entre estas duas funções:

$$\begin{aligned} \text{Objetivo} &= \text{Peso1} \times \text{“Proximidade Geográfica”} + \\ &\quad \text{Peso2} \times \text{“Mínima Demanda Inter-cluster”} \\ &\quad , \text{ onde } \text{Peso1} + \text{Peso2} = 1 \end{aligned}$$

e a Proximidade Geográfica e a Demanda Inter-Cluster são valores normalizados entre 0 e 1;

Muitas vezes, principalmente após o enxugamento da demanda, centros de fios geograficamente muito afastados podem vir a ter demandas com perfis semelhantes, e a partir daí tendem a se reunir em um mesmo cluster. Este tipo de solução é péssima operacionalmente, ainda que possa gerar as menores demandas inter-cluster. Para redes interurbanas, o uso de algoritmos de Agrupamento baseando-se somente no critério de fluxo inter-cluster chega a gerar soluções “ridículas”, que colocam em um mesmo cluster CFs localizados em pontos extremos da rede. A combinação das duas funções objetivo em uma única, através da atribuição de pesos ajustáveis pelo planejador - como proposto por **Aubry (1995)** - também é uma alternativa muito interessante para facilitar a interação homem-máquina, e assim obter diversas alternativas de rede.

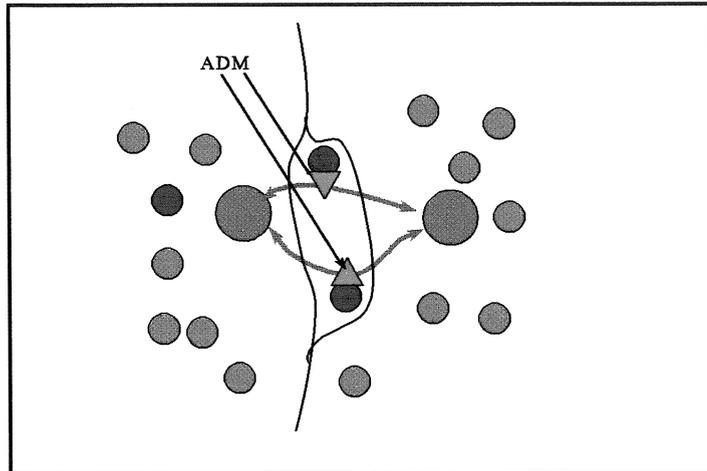


Figura 3.13: dupla filiação (bi-hubbing)

Note também que não se consideram custos e capacidades de equipamentos, já que o que se busca é “só” uma organização dos CFs em clusters. O dimensionamento da malha de equipamentos é **todo** feito na etapa seguinte: o Enfeixamento.

Uma acréscimo interessante a este trabalho seria a inclusão de algoritmos que considerassem a filiação de CFs centrais a mais de um hub. Esta situação ocorre frequentemente em redes SDH, permite atender melhor requisitos de confiabilidade (através de proteção via path-switching) e é implementada através de equipamentos ADM, como na Figura 3.13.

III.2.1.2. Agrupamento de Centros de Fios em Anéis

Laguna (1994) se propõe a resolver, através de algoritmos de Busca Tabu, o problema de Agrupamento para o Projeto de Anéis SONET. Trata-se da primeira parte de uma metodologia de planeamento (semelhante à proposta aqui), dividida nas seguintes fases:

- Projeto lógico de anéis SONET
- Mapeamento das demandas de fibras sobre a rede óptica existente;
- Estudo da conexão de anéis e do roteamento do tráfego.

O problema de Projeto lógico de anéis pode ser resumido como no Quadro 3.2. As variáveis de decisão do modelo relacionam-se com a filiação ou não de um centro de fios a um anel (variáveis discretas) e ao fluxo de canais T1 entre centros de fios (variáveis contínuas). As variáveis de fluxo se dividem entre aquelas relativas a CFs pertencentes a anéis diferentes e aquelas relativas a CFs pertencentes ao mesmo anel. Note que são considerados aspectos de custo e capacidade de equipamentos. Assim, este problema considera também aspectos relacionados ao Enfeixamento,

Quadro 3.2 **Modelo de Fluxo Multiprodutos para o Problema de Agrupamento em Anéis**

Estabeleça uma filiação dos Centros de Fios a um conjunto de anéis

Minimize

a soma dos custos (estimados) dos anéis propostos mais
a soma dos custos (também estimados) de interconexão entre os mesmos,

sujeito a:

- para cada demanda entre centros de fios:
 - a soma dos fluxos nos caminhos entre aqueles CFs é igual ao volume de demanda entre os mesmos;
 - se os dois CFs pertencem a um mesmo anel, a demanda pode ser atendida por caminhos intra-anel, sem necessidade de interconexão;
 - se os dois CFs pertencem a anéis diferentes, a demanda só pode ser atendida por caminhos inter-anel, com necessidade de interconexão entre os mesmos;
- para cada anel da rede:
 - a soma dos caminhos que passam por aquele anel é menor ou igual à capacidade do anel;
 - a quantidade de centros de fios pertencentes a um anel é menor ou igual a um número limite, relacionado à capacidade do anel;

ainda que somente para anéis unidirecionais.

O método de resolução consiste em partir de uma solução factível inicial, executar uma série de movimentos de inserção e retirada (dos CFs nos anéis) até que um limite de tempo seja alcançado. Técnicas de busca-tabu são usadas para selecionar as melhores soluções e escapar a mínimos

locais.

No mesmo trabalho, confirmando a experiência prática que ocorreu neste trabalho, Laguna aponta que:

In the real-world implentation of this system, the user is also allowed to define fixed rings. These rings are considered by the system in terms of available capacity, but they are not modified during the search. This kind of flexibility is important to network planners ...

Isto é, mesmo com técnicas de busca mais “refinadas”, como o caso da busca-tabu, o planejador prefere fixar a priori alguns anéis que ele “tem certeza” que devem estar na solução final.

Note que o método descrito por **Laguna (1994)** é aplicado exclusivamente a anéis unidirecionais devido à simplicidade de cálculo da capacidade ocupada nestes anéis. Segundo ele mesmo aponta, maiores pesquisas são necessárias para a modelagem de anéis bi-direcionais.

Uma possibilidade interessante a ser explorada é aproveitar técnicas de busca baseadas em inserção/retirada de CFs em anéis para a geração de anéis candidatos, uma das fases do Enfeixamento. Na implementação atual da metodologia proposta aqui, a escolha destas topologias de anéis é feita diretamente pelo planejador. O problema é que em redes de grande porte a quantidade de anéis tende a crescer explosivamente.

Uma outra possibilidade interessante é adicionar na “função objetivo” do agrupamento de CFs em anéis alguma forma de consideração da proximidade geográfica entre os CFs, a exemplo do que é proposto por Aubry (1995)..

III.2.2. Seleção de Galerias

A malha de galerias em uma Rede Urbana apresenta uma configuração parecida com a da Figura 3.14. De todas as galerias, apenas uma parte tem condições de infraestrutura para suportar cabos ópticos, o que já reduz a malha física a ser considerada no planejamento. Todavia, ainda restará uma rede relativamente densa de galerias para ser considerada.

Quanto menor a quantidade de galerias suportando a RT, mais barata a rede. Evidentemente, existe um compromisso desta minimização de custos com a confiabilidade da rede. Uma rede em “árvore”, por exemplo, teria o menor número de galerias possível, mas seria também a menos confiável.

Como - em redes urbanas - os custos de equipamentos se sobrepõem aos dos cabos de fibra, e o custo de infraestrutura é compartilhado com a rede externa, a principal preocupação do planejador passa a ser identificar um subconjunto de galerias que garanta a conectividade desejada entre centros de fios. Para estas redes, a Seleção de Galerias pode ser resolvida de acordo com a seguinte estratégia, semelhante à proposta por Wu (1992). Acompanhe na Figura 3.15:

1. Estabelecer uma hierarquia de importância dos centros de fios, de acordo com a sua demanda. Os resultados do cluster são um bom indicador, mas também deve ser considerada a possibilidade de existência de clientes privilegiados filiados a cada CF. Por exemplo, se o palácio do Governo do Estado estiver filiado a um CF declarado “pendente” no Agrupamento, isto não impedirá de se declarar tal CF como altamente importante nesta fase;

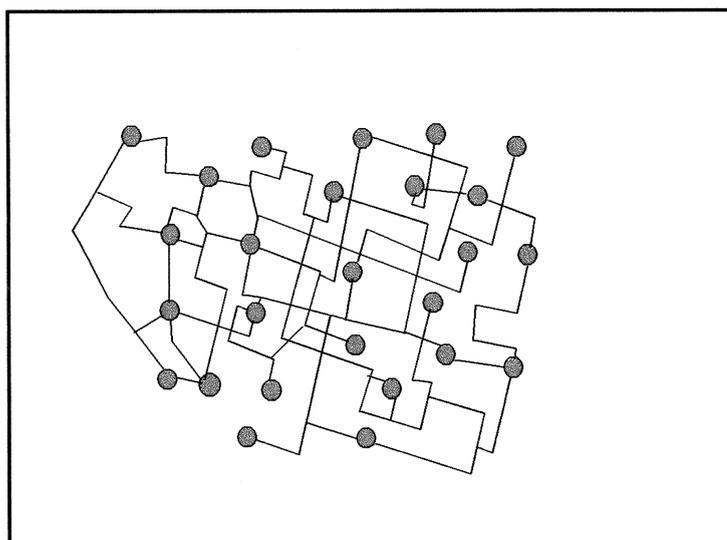


Figura 14: exemplo típico de malha de galerias em uma área urbana

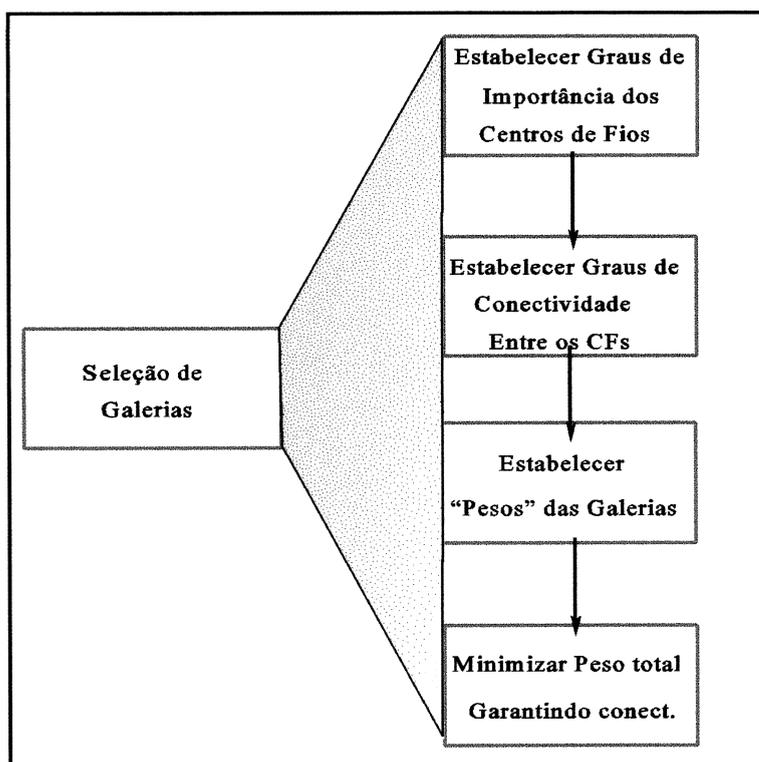


Figura 3.15: Fases na Seleção de Galerias

2. Estabelecer graus de conectividade mínimo entre os CFs, de acordo com a sua declaração de importância. Por exemplo, entre dois CFs muito importantes, exigir-se-ia grau de conectividade 3, enquanto entre dois CFs não-importantes, grau 1;
3. Associar pesos às galerias. Este pesos podem ser uma combinação do comprimento com a qualidade da infraestrutura oferecida em cada galeria. Por exemplo, galerias muito ocupadas ou sujeitas a inundação teriam pesos altos, enquanto galerias novas, secas e pouco ocupadas teriam pesos baixos;
4. Procurar a rede que garanta a confiabilidade exigida de forma que o peso total da rede não seja excessivo. Esta busca pode ser feita através de algoritmos heurísticos, como os descritos por Wu (1992) ou por Mello et alii (1995).

A metodologia acima se aplica a redes urbanas. Em redes interurbanas, o problema assume outras características:

- não existe uma malha densa de infraestrutura disponível (ocorre justamente o contrário!);
- não existe uma “Rede Externa” com que compartilhar o uso da infraestrutura;
- as distâncias são medidas em dezenas ou centenas de quilômetros, e não em metros;
- em muitas oportunidades, a alternativa mais eficaz para conectar duas cidades pode ser através de rádio, desde que o relevo facilite uma visada direta entre elas, ou mesmo uma “sequência de visadas”;
- em outras oportunidades, a alternativa é negociar com empresas de transportes (ferrovias, rodovias) o uso de sua infraestrutura para instalar cabos ópticos suspensos ou enterrados. Mais recentemente surgiu a possibilidade de se usar os cabos pára-raio das redes de transmissão de alta voltagem para transportar cabos ópticos (Optical Ground Wire - OPGW).

Assim, no caso de redes interurbanas, o estudo de uma infraestrutura mínima para suportar a rede de cabos ópticos é voltado primeiro a aspectos de custo, e depois, a aspectos de confiabilidade. Outra diferença é que a quantidade de alternativas não é grande; os planejadores praticamente conseguem enumerar todas elas. Assim, para redes interurbanas, sugere-se fazer uma análise econômica das diversas alternativas de infraestrutura e obter uma estimativa do custo do quilometro do par de fibras entre as cidades da rede. Esta é a informação que efetivamente será usada no Enfeixamento de Troncos (a etapa seguinte).

III.2.3. Fase de Enfeixamento de Troncos

Nesta fase, dimensionam-se os equipamentos de transmissão entre os centros de fios. O problema aqui é determinar qual a melhor combinação de ligações ponto-a-ponto, anéis uni- ou bi-direcionais, cadeias de ADMs e estrelas baseadas em SDXC para montar a malha de equipamentos. Basicamente, o problema é resolvido através de uma competição entre diversas configurações de equipamento candidatas, cada rede solução sendo formada por uma combinação entre tais configurações. As combinações vencedoras são determinadas pelos algoritmos de otimização combinatoria de pacotes computacionais (neste trabalho, empregaram-se algoritmos de branch & bound).

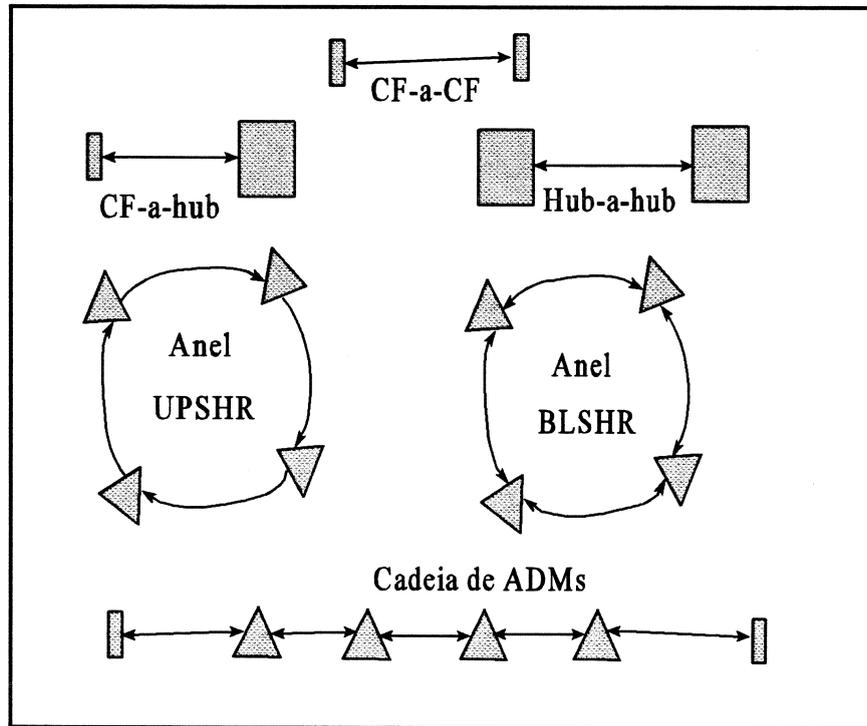


Figura 3.16: Tipos de configuração de equipamentos consideradas neste trabalho

São considerados aqui os seguintes tipos de configuração candidatas (veja a Figura 3.16):

- *ligações CF-a-CF*: implementadas através de OLTMs instalados aos pares;
- *ligações CF-a-hub*: implementadas através de um OLTM (no CF não-hub) e uma conexão em um equipamento com capacidade de cross-connection (seja um ADM ou um SDXC);
- *ligações hub-a-hub*: implementadas através de duas conexões entre equipamentos com capacidade de cross-connection localizados em CFs hub;
- *anéis de ADMs*: que podem ser uni- ou bi-direcionais. Maiores explicações podem ser encontradas no Capítulo II;
- *cadeias de ADMs*: maiores explicações também no Capítulo II.

É sem dúvida a fase mais complexa do planejamento, dada a quantidade de alternativas possíveis. Na metodologia proposta aqui, a solução do enfeixamento é dividida em sub-fases (veja a Figura 3.17):

- proposta de candidatos: tanto através de interferência do planejador, quanto através de procedimentos computacionais automáticos, propõe-se um conjunto de configurações

de equipamentos candidatas (ligações CF-a-CF, CF-*a-hub*, *hub-a-hub*, anéis uni- e bi-direcionais, cadeias de ADMs). Para cada uma destas configurações podem ser sugeridas uma ou mais taxas de transmissão ;

- montagem de caminhos: dadas as topologias formadas pelos candidatos sugeridos na etapa anterior e a classificação dos CFs feita na etapa de Agrupamento, diversos caminhos são montados. As demandas de canais entre os CFs serão atendidas sempre por um sub-conjunto destes caminhos, de acordo com os equipamentos selecionados em cada solução;
- montagem do modelo matemático: com os dados obtidos das etapas anteriores, pode-se passar à elaboração de um modelo matemático. O modelo usado na etapa do enfeixamento é descrito no Capítulo IV. Restrições técnicas determinadas pelo planejador também podem ser modeladas e inseridas no modelo ao longo do processo de resolução do problema;
- obtenção e análise de soluções: a cada modelo matemático gerado, obtém-se uma série de soluções, que são analisadas junto com o planejador. Características indesejáveis das soluções obtidas podem ser forçadas a “desaparecer” acrescentando novas restrições técnicas.

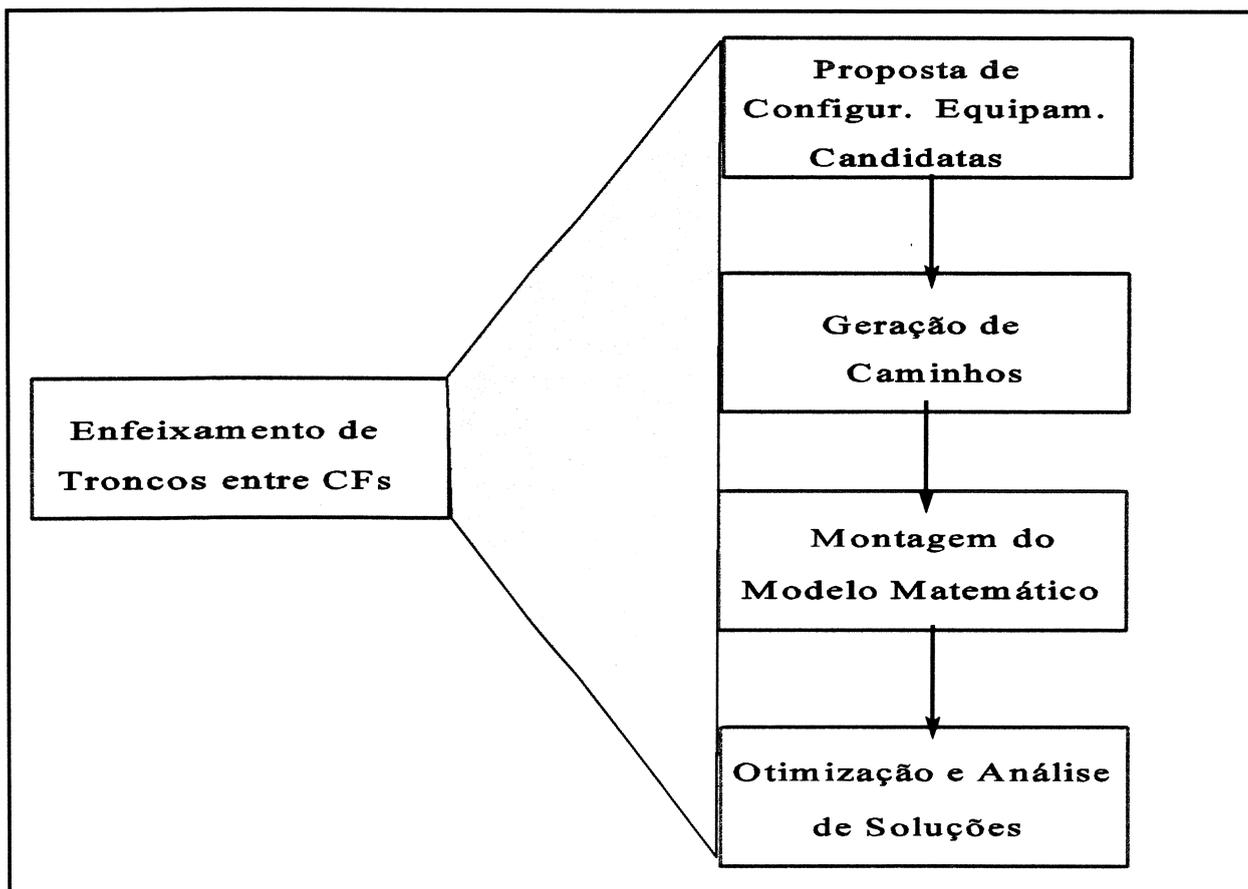


Figura 3.17: fases da resolução do problema do enfeixamento de troncos

III.2.3.1. Proposta de Configurações de Equipamentos Candidatas para o Enfeixamento

A primeira sub-fase do Enfeixamento é a proposta de configurações de equipamento candidatas.

Dois tipos básicos de geração de propostas serão analisados aqui: a primeira para configurações do tipo ponto-a-ponto (CF-a-CF, *CF-a-hub* e *hub-a-hub*), e a segunda para configurações do tipo anel ou cadeia.

● **Proposta de Candidatos do Tipo Ponto-a-Ponto**

Será apresentada aqui uma técnica para propor de forma semi-automática as configurações do tipo CF-a-CF, *CF-a-hub* e *hub-a-hub*. Esta técnica se baseia em informações de custos de equipamentos, da organização dos CFs em clusters e na matriz de demanda entre os CFs, e segue os seguintes passos (veja Figura 3.18) :

- estabelecer um limiar mínimo de fluxo de canais para a proposta de uma ligação ponto-a-ponto candidata. Este fluxo de canais mínimo é escolhido pelos planejadores apenas uma única vez para toda a rede. Limiares menores permitem que sejam criados mais candidatos ponto-a-ponto; limiares maiores vão restringindo a proposta de candidatos a uma quantidade mínima de ligações *CF-a-hub* e *hub-a-hub*;
- para cada par de CFs da rede, calcular o fluxo máximo que pode fluir através de uma ligação ponto-a-ponto entre eles. Para isto, empregam-se informações resultantes do agrupamento dos CFs e a matriz de demanda de canais 2 Mbps;
- ainda para aquele par de CFs sendo estudado - analisar o custo e a capacidade de atendimento das diversas taxas de transmissão. Na ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, consideraram-se as taxas de 34 Mbps (PDH), 155 Mbps, 622 Mbps, 2488 Mbps e 10Gbps (SDH). Apenas as taxas com *custos por canal competitivos* para aquela ligação são propostas como candidatas, e isto somente se o fluxo máximo entre aqueles CFs for superior ao limiar mínimo de fluxo pré-estabelecido;
- finalmente, todas as propostas feitas automaticamente são submetidas aos planejadores, que identificam quais aquelas que eles julgam absurdas por algum motivo alheio aos custos e capacidades das ligações, ou mesmo identificam alguma proposta que não foi feita automaticamente, mas que eles julguem necessária como candidata;
- incluem-se ainda, no conjunto de candidatos ponto-a-ponto entre os centros de fios, as ligações ponto-a-ponto já instaladas e com folgas disponíveis, ou mesmo instaladas e que estão atendendo demandas que podem ser re-roteadas. Isto é, inclui-se a capacidade instalada da rede em ligações ponto-a-ponto. Demandas que serão re-roteadas devem então ser acrescentadas na matriz de demandas “previstas”.

Nas sub-seções seguintes, explica-se como usar a matriz de demandas e os resultados do Agrupamento para identificar o fluxo máximo e as taxas de transmissão competitivas em ligações ponto-a-ponto entre dois CFs.

- **Usando a Matriz de Demandas e o Agrupamento de CFs para Analisar o Fluxo em**

Ligações Ponto-a-Ponto

Considere a rede hipotética apresentada na Figura 3.19. Note que alguns CFs hub têm filiados a eles um conjunto de outros CFs não-hub, formando clusters de CFs. Note também que alguns CFs são filiados a mais de um hub, mas que um destes hubs é declarado como o *home-hub* para aquele CF, enquanto os outros são declarados como *foreign-hub*. Esta denominação é sugerida por Wu (1992) para um procedimento heurístico de Enfeixamento de canais T1 em containers VC3, e foi adotada também aqui.

Considere agora a mesma rede hipotética na Figura 3.20, onde será analisada a demanda entre os centros de fios A e B. Suponha que todos os hubs da rede possuam ligação direta entre si. Suponha também que qualquer demanda só possa ser atendida ou através de ligações diretas (CF-a-CF), ou então através de rotas que passem por 1 ou (no máximo) 2 hubs, como na Figura 3.20. Estas duas suposições são usadas para simplificar o cálculo do fluxo máximo entre os CFs, mas será relaxada para as fases seguintes do Enfeixamento.

Baseado nas suposições acima, é possível determinar o fluxo máximo que pode passar através de cada ligação ponto-a-ponto entre CFs da rede. Por exemplo, na Figura 3.21:

- o fluxo máximo entre "A" e "B" é igual à própria demanda entre "A" e "B", já que ambos são CFs não-hub;
- o fluxo máximo entre "A" e "H" é igual à soma das demandas originadas ou terminadas em "A", já que "H" é o home-hub de "A";
- o fluxo máximo entre "A" e "I" é igual à soma das demandas originadas em "A" e com destino a algum CF que esteja filiado a "I" (o próprio CF "I", inclusive), já que "I" é foreign-hub de "A";
- o fluxo máximo entre "H" e "I" é igual à soma das

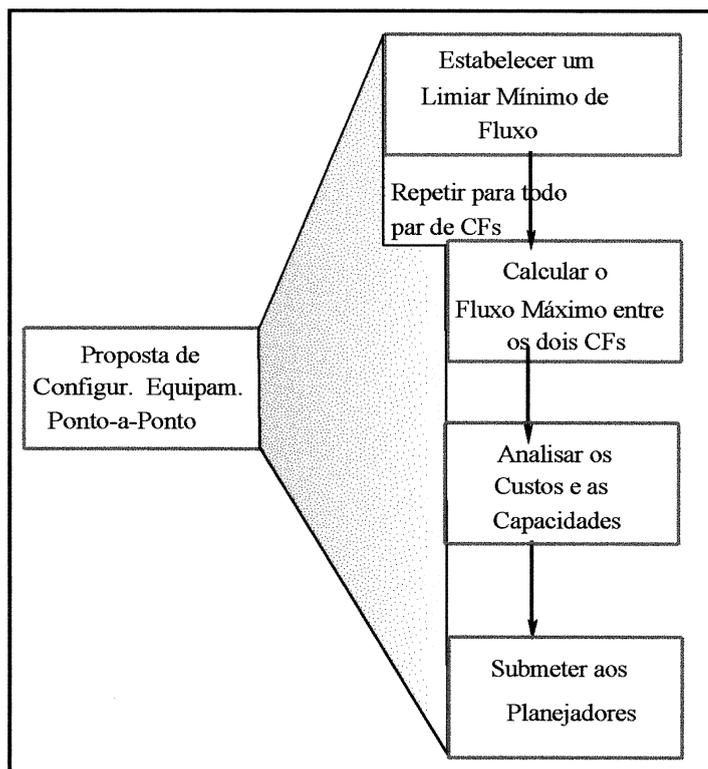


Figura 3.18: fases para proposta automatizada de equipamentos ponto-a-ponto

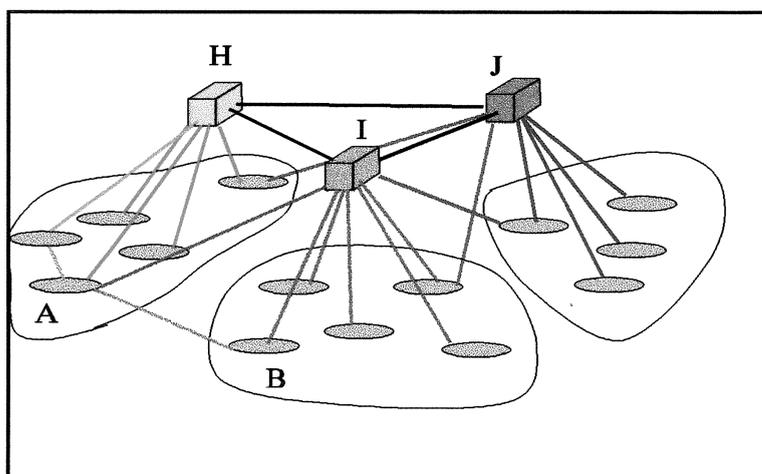


Figura 3.19: rede hipotética com 3 clusters

demandas cuja origem está em CFs filiados a “H” (o próprio H, inclusive) e destino em algum CF filiado a “I” (o próprio “I”, inclusive).

Na ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, fez-se a suposição que cada CF teria apenas um home-hub. Esta suposição pode (e deve) ser relaxada para alguns CFs da rede, permitindo assim analisar casos de multi-filiação. Ao estabelecer uma filiação CF-home-hub, obriga-se a que exista pelo menos uma ligação entre os dois centros de fios.

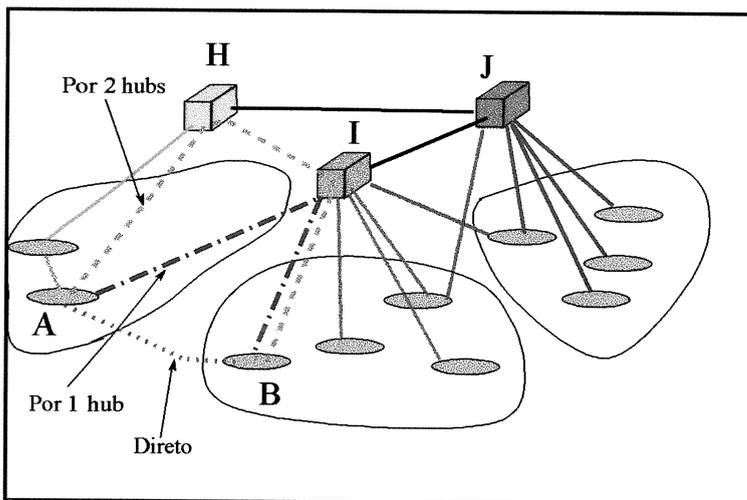


Figura 3.20: caminhos possíveis entre A e B

Se o valor do fluxo máximo possível entre dois CFs for superior ao limiar mínimo definido pelo planejador, então serão automaticamente propostos um ou mais candidatos ponto-a-ponto entre aqueles dois CFs. Entretanto, para se fazer esta proposta, resta ainda definir quais as taxas de transmissão *competitivas* nestes candidatos. A forma de se fazer esta proposta é apresentada na próxima seção.

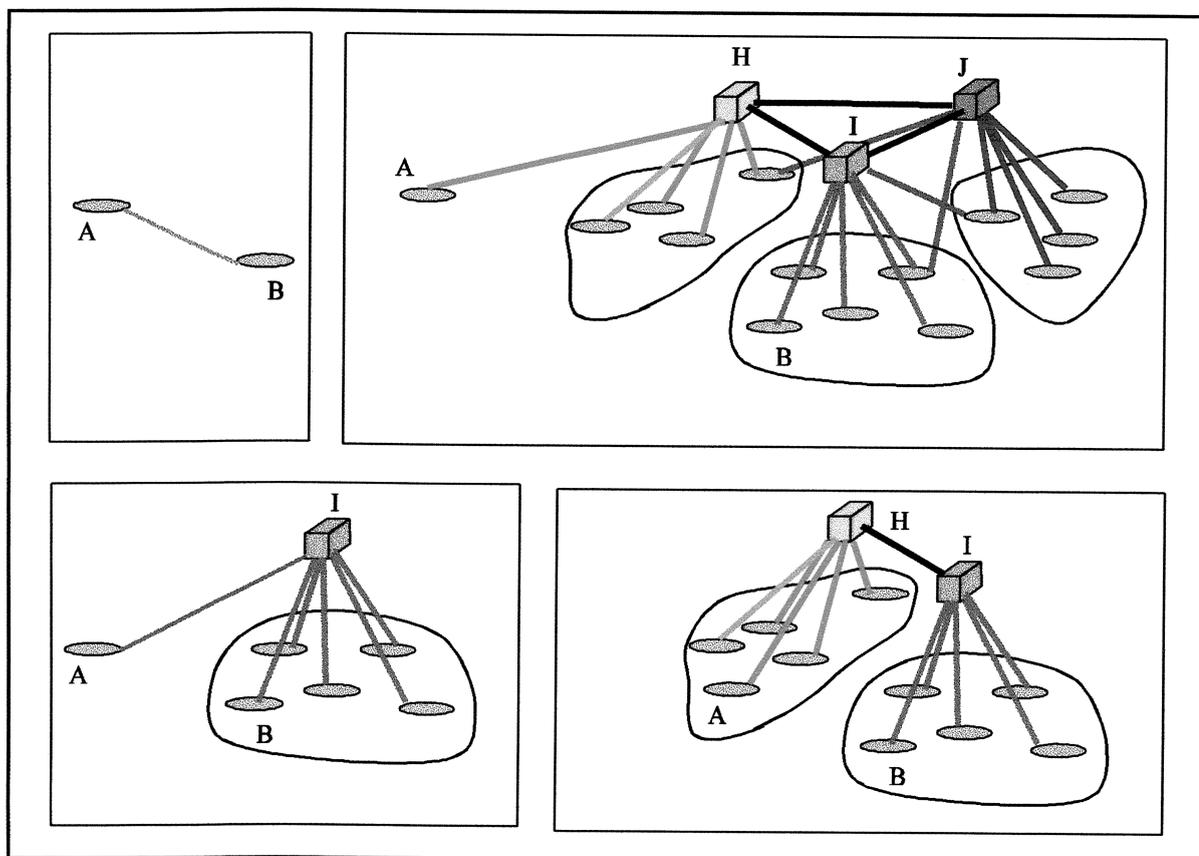


Figura 3.21: partes da rede que podem ser atendidas pelos arcos A-B, A-H, A-I e H-I

- Escolhendo as Taxas de Transmissão Competitivas para uma Ligação Ponto-a-Ponto

Para avaliar quais as taxas “competitivas” entre dois CFs, a primeira coisa a se fazer é calcular o

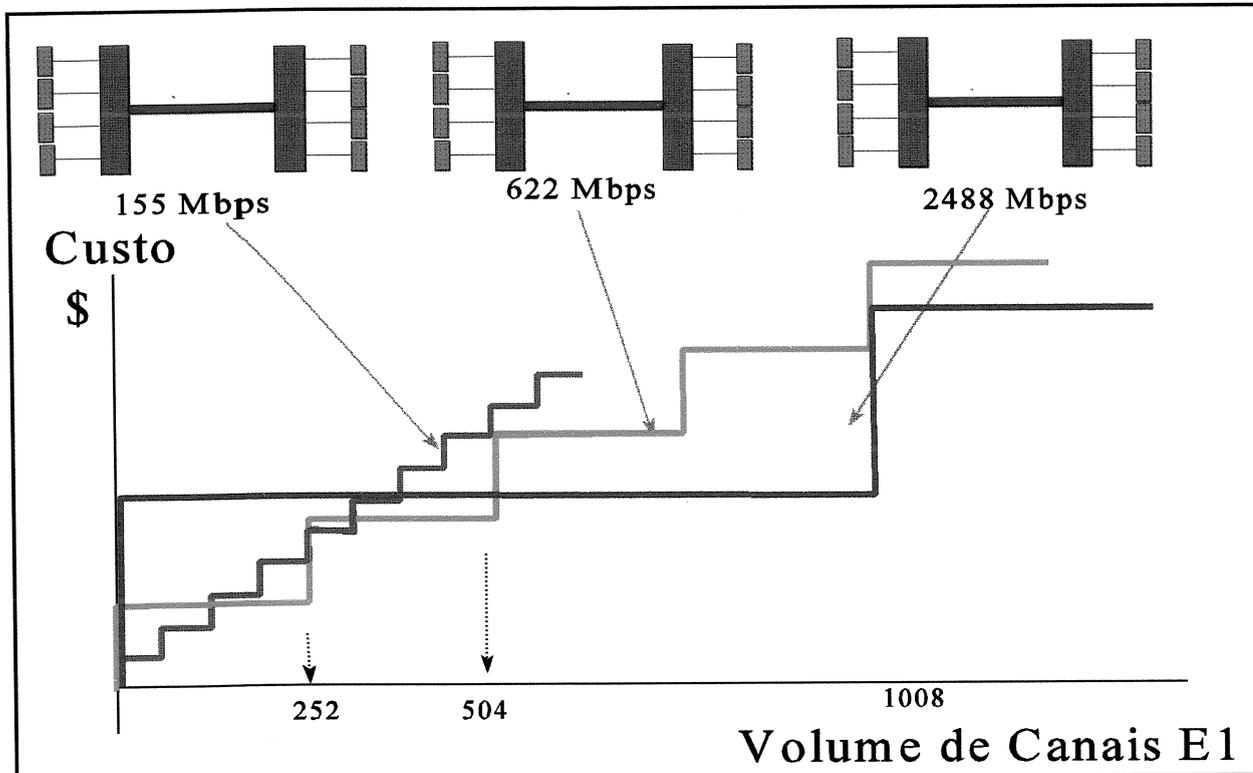


Figura 3.22: economias de escala nas hierarquias SDH

custo do enlace (seja ele CF-a-CF, CF-a-hub e hub-a-hub), para cada hierarquia. O custo de um enlace se divide entre o custo dos equipamentos-ponta e o custo do par de fibras entre eles.

Em redes urbanas nas quais se despreze o custo de fibra, a distância entre os CFs não influi no cálculo do custo. Já para redes interurbanas, em que o custo de fibra é importante, é preciso considerar a distância entre os CFs, e - de alguma forma - os custos de infraestrutura, compra e instalação de cabos. Uma forma razoável de fazê-lo é dividindo estes custos pelo maior número de fibras que se pode usar em um cabo naquela rede. Para infraestrutura de construção civil, pode-se usar apenas uma fração do custo total, já que a vida útil de um equipamento é geralmente bem menor que a das obras de infraestrutura.

Os custos dos equipamentos-ponta podem ser uma média entre o custo de um multiplexer completo e o de uma terminação para cross-connect. Para cada taxa de transmissão (34, 155, 622, 2488 Mbps ou 10Gbps) tem-se um custo associado aos equipamentos-ponta. É razoável supor uma economia de escala entre as diferentes taxas de transmissão (como na Figura 3.22), mas algumas vezes as regras de mercado surpreendem a lógica, e equipamentos na taxa 2488 Mbps podem até mesmo ser oferecidos por um fabricante a um preço menor que seus equipamentos na taxa de 622 Mbps!

Enfim, calculado o custo do enlace, em cada taxa de transmissão, escolhem-se aquelas que têm maiores chances na “competição” para fazer parte da solução final. Isto é feito para cada par de CFs onde se esteja analisando candidatos ponto-a-ponto. Para isto, utiliza-se a seguinte regra:

1. Verifica-se qual a taxa de transmissão mais barata com capacidade suficiente para suportar o fluxo máximo possível entre aqueles dois CFs;
2. Esta taxa de transmissão é a primeira candidata. Se para valores de fluxo inferiores ao máximo existirem outras taxas de transmissão mais baratas, então estas também serão candidatas, com um máximo de duas taxas de transmissão diferentes para o mesmo enlace.

Do ponto de vista da operação da ferramenta computacional que foi desenvolvida neste trabalho, pode-se acrescentar a estas duas taxas de transmissão candidatas uma terceira, inferior, só que com suas variáveis candidatas associadas “linearizadas”. Isto permite identificar se existe a possibilidade de que a terceira taxa de transmissão faça parte de boas soluções de rede, sem aumentar a quantidade de variáveis binárias do modelo. No Capítulo V explica-se como se geram estas variáveis “linearizadas”.

As capacidades de transmissão dos enlaces em cada taxa de transmissão estão apresentadas na Tabela 3.1. Todavia, é interessante planejar o enfeixamento de troncos da rede procurando uma rede de custo mínimo, mas preservando alguma folga para poder garantir a confiabilidade e a operacionalidade da rede em uma etapa posterior. Assim, sugere-se efetuar uma redução nestas capacidades, por exemplo, de cerca de 25%. Daí, um enlace 155 Mbps teria capacidade para apenas 48 canais 2 Mbps, e assim por diante. Por simplicidade, ao longo deste capítulo toda análise será feita **sem** esta redução.

Reduzindo-se demasiadamente o número e a capacidade de configurações candidatas em uma rede, pode-se chegar a uma situação em que a capacidade de todos os candidatos não é suficiente para atender à demanda da rede. Para prevenir esta situação, podem ser empregadas variáveis linearizadas (que serão explicadas no Capítulo V), sem limitação de capacidade, e custos elevados. Esta técnica permite obter soluções matematicamente factíveis, indicando os potenciais pontos de estrangulamento na capacidade das configurações candidatas (ver Bergamaschi, 1996).

Para determinar quais as melhores taxas de transmissão candidatas, é preciso observar as economias de escala das taxas de transmissão. Por exemplo, utilizando a mesma distribuição de custos da Figura 3.22, tem-se as seguintes faixas de custos (veja a Figura 3.23):

- até 126 canais, a taxa de transmissão mais barata é a de 155 Mbps. Até 63 canais, basta um módulo de transmissão; a partir daí, são necessários dois deles;
- de 127 até 504 canais, a taxa de transmissão mais barata é a de 622 Mbps. Até 252 canais basta um módulo de transmissão; a partir daí são necessários dois deles;
- acima de 504 canais, a taxa de transmissão mais barata é a de 2488 Mbps. Até 1008 canais, basta um módulo de transmissão; a partir daí, são precisos mais módulos.

Taxa	Capacidade
155 Mbps	63 canais E1
622 Mbps	252 canais E1
2488 Mbps	1008 canais E1
10 Gbps	4016 canais E1

Teoricamente, podem ser formadas combinações com diversas taxas para implementar as conexões entre dois CFs. Por exemplo, para um valor de fluxo igual a 1050 canais, a combinação mais econômica seria a de um enlace a 2488 Mbps (1008 canais de capacidade) com um outro a 155 Mbps (63 canais de capacidade). Todavia, é muito pouco provável que esta combinação seja aceita pelo planejador. Embora esteja sendo analisado aqui um problema estático, é preciso não perder de vista a evolução da rede. No caso daqueles dois CFs, com fluxo de 1050 canais, uma folga de apenas 21 canais ($1008 + 63 - 1050 = 21$) é muito pouco para atender ao crescimento da demanda. E os custos de instalação de um enlace a 155 Mbps, 622 e 2488 Mbps não são muito diferentes. Assim, é mais razoável combinar entre estes CFs um enlace a 2488 Mbps com outro a 622 Mbps, por exemplo. Por isto, sugere-se aqui limitar a quantidade e a “diferença de capacidade” dos módulos de transmissão ponto-a-ponto candidatos entre dois CFs a - no máximo - duas taxas de transmissão diferentes.

Limitar o número de taxas de transmissão candidatas por enlace tem relação com uma regra de simplificação do planejamento. Se o fluxo máximo entre dois CFs for grande o suficiente para justificar um enlace a 2488 Mbps, é admissível que um enlace a 622 Mbps também seja candidato, mas não um a 155 Mbps. Isto seria admitir simultaneamente dois enlaces candidatos, um deles com capacidade igual a 1/16 do outro. Usando a analogia com redes de transporte de mercadorias, isto seria o mesmo que planejar uma rede de transporte considerando ao mesmo tempo (entre duas cidades) o uso de caminhões pesados ou de carros de passeio: um contra-senso!

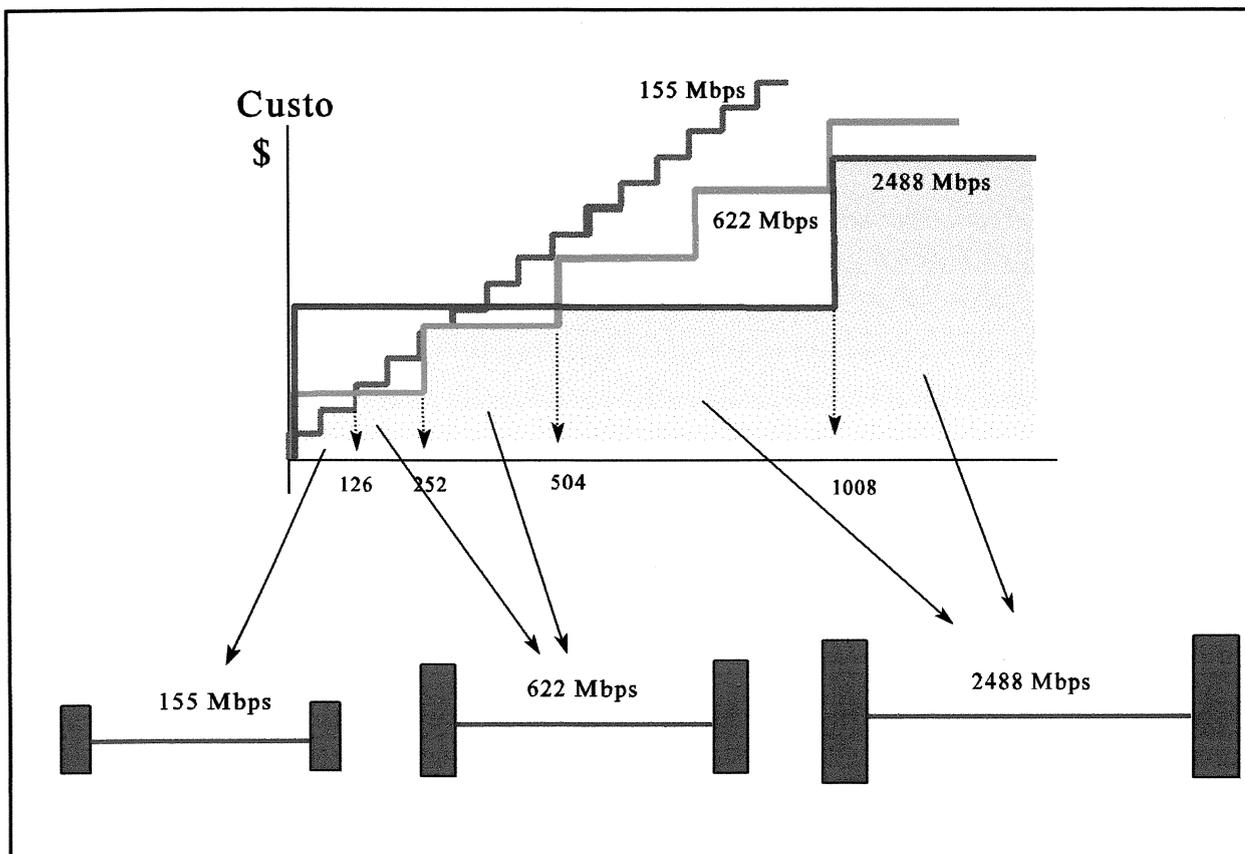


Figura 3.23: melhores taxas de transmissão para um conjunto de custos específico

- **Proposta de Candidatos do Tipo Anel ou Cadeia**

Automatizar a proposta de anéis e cadeias candidatos, todavia, é uma tarefa mais complexa, pois a quantidade de alternativas aumenta em uma “explosão combinatorial”. Algumas abordagens são descritas na literatura, geralmente empregando heurísticas otimizantes (Wasem (1991), Cosares et alii (1995)) para propor topologias de anéis SDH automaticamente.

Neste trabalho, apesar de não se ter desenvolvido algoritmos computacionais neste sentido, identificou-se um comportamento “interessante” dos planejadores quanto a propostas de anéis feitas por terceiros em redes que eles conheçam profundamente: eles têm facilidade em dizer quais topologias eles NÃO querem, e porque. Sendo assim, uma forma eficaz de implementar um gerador automático de anéis candidatos é reunir em uma ferramenta de software uma boa heurística para a geração automática de propostas de anéis como candidatos, e uma interface gráfica que permita aos planejadores visualizá-las, e a partir daí, aceitar, recusar ou alterar as propostas. Um número suficientemente grande de candidatos poderia ser gerado em uma hora de trabalho.

De qualquer forma, pode-se apontar aqui que uma ferramenta automática de geração de anéis candidatos deveria considerar:

- a matriz de demanda entre os CFs, procurando propor anéis de forma a que se maximize a demanda que circula dentro de cada anel, comparada à demanda que é “obrigada” a fluir para fora do mesmo. Quanto maior a demanda “intra-anel”, melhor a proposta;
- alguma forma de filiação de CFs externos ao anel aos CFs que fazem parte do anel, como na Figura 3.24.
- a proximidade geográfica entre os CFs. Anéis ligando pontos extremos da rede, sem passar por pontos intermediários tendem a ser péssimas propostas;
- prever a necessidade de dupla conexão entre anéis, para garantir a conectividade da rede na eventualidade de falhas;
- a topologia da malha de cabos de fibra subjacente, especialmente em redes interurbanas.

III.2.3.2. Geração Automática de Caminhos

A geração automática de caminhos é a segunda fase na solução do Problema de Enfeixamento. Após a escolha de candidatos (ponto-a-ponto, anéis uni- e bi-direcionais e cadeias de ADMs), uma série de algoritmos de geração de caminhos em grafos são aplicados para cada demanda de canais entre dois CFs. O objetivo é formar - para cada demanda- um conjunto de caminhos em

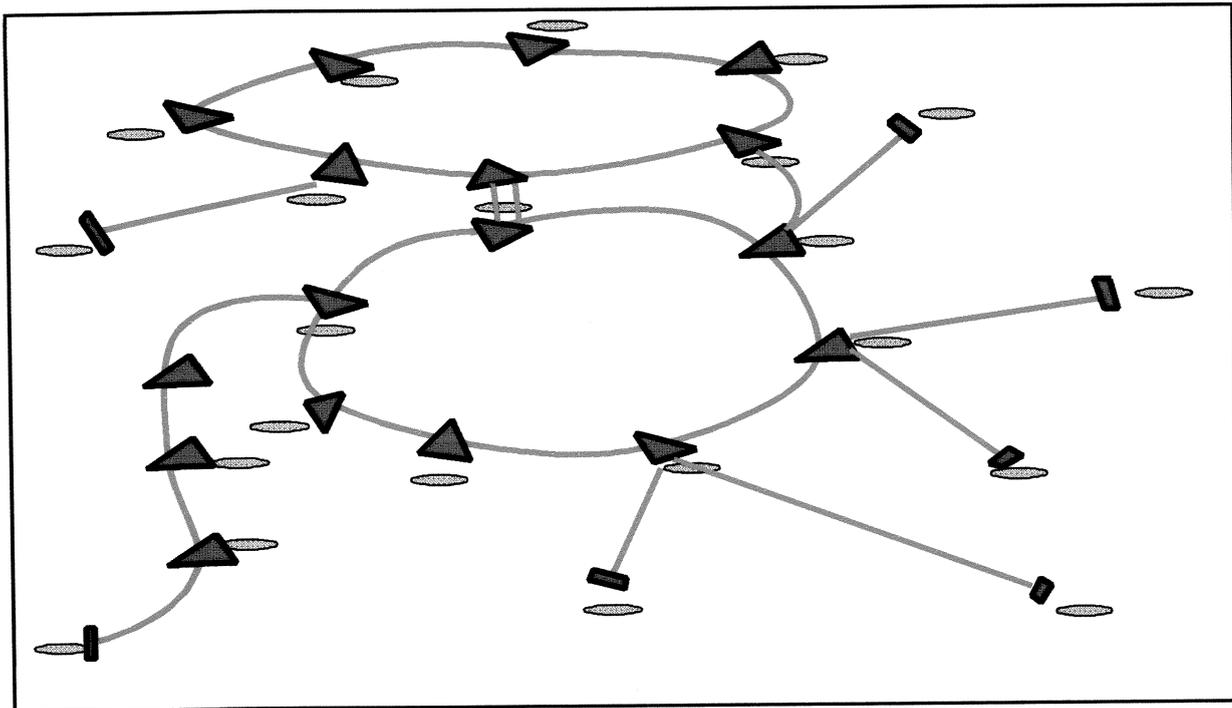


Figura 3.24: exemplo de topologias de anéis, com bi-conexão e filiação de CFs fora-do-anel

quantidade suficiente para atendê-la de forma satisfatória, em quaisquer das múltiplas combinações de equipamentos que serão geradas ao longo do processo de busca.

Para tornar os caminhos gerados mais aceitáveis do ponto de vista de operação da rede, aproveitam-se informações provenientes da fase de Agrupamento de CFs e da primeira etapa do Enfeixamento (proposta de configurações). O que se procura fazer - em uma primeira etapa - é uma hierarquização dos CFs, filiando-os uns aos outros para fins de geração de caminhos. Esta hierarquização é feita da seguinte forma:

- os CFs periféricos e centrais são filiados a seu *home* e aos eventuais *foreign-hub*. Por exemplo, na Figura 3.25, o CF “I” é filiado ao CF “O”;
- CFs periféricos podem ser filiados a CFs *não-hub*, desde que estes pertençam a anéis ou cadeias e exista alguma conexão CF-a-CF entre eles. Por exemplo, os CF “E” está filiado ao CF “D”, e o CF “A” está filiado ao CF “L”;
- CFs vizinhos em um mesmo anel ou cadeia são filiados mutuamente entre si. Por exemplo, os pares de CFs “K - N” e “N - O” são mutuamente filiados entre si;

- da mesma forma, todos os CFs hub são mutuamente filiados entre si. Ainda na Figura 3.25, isto ocorre entre os CFs “O” e “Q”.

A idéia é que um CF é capaz de ter outros “filiados” a ele quando comporta algum NE capaz de efetuar conexão-cruzada (cross-connection) entre os tributários que chegam a ele. Isto ocorre em hubs (que supostamente possuem um equipamento SDXC) e em CFs pertencentes a anéis e

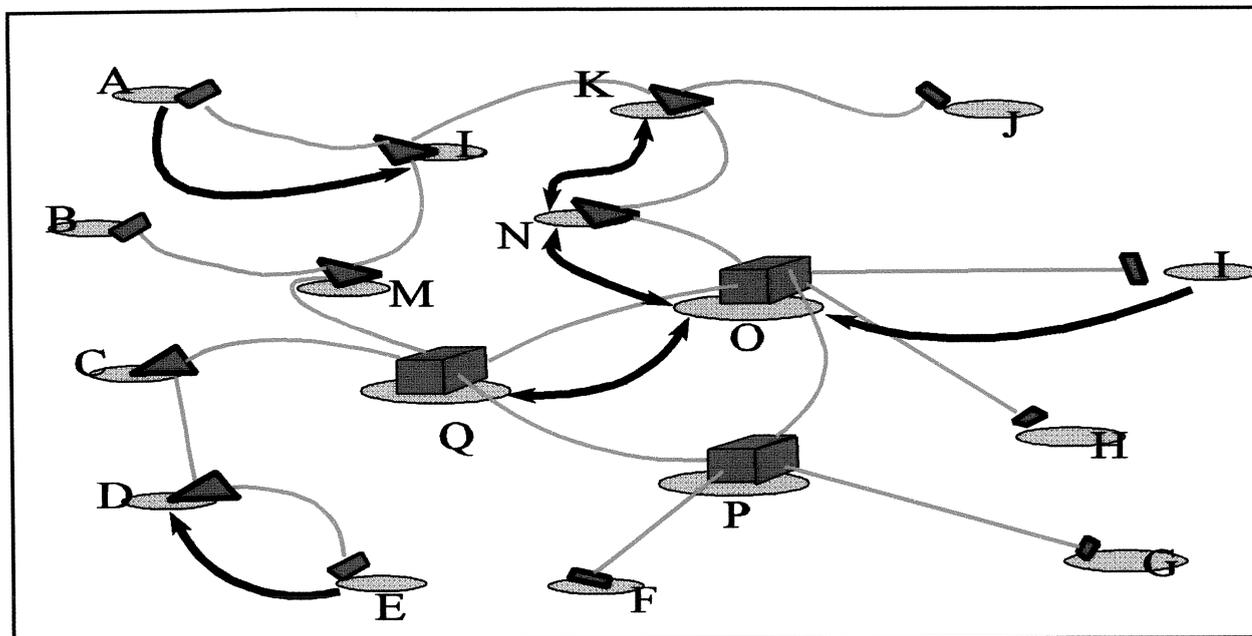


Figura 3.25: exemplos de filiação entre CFs, a partir de uma proposta de configurações de equipamentos candidatas

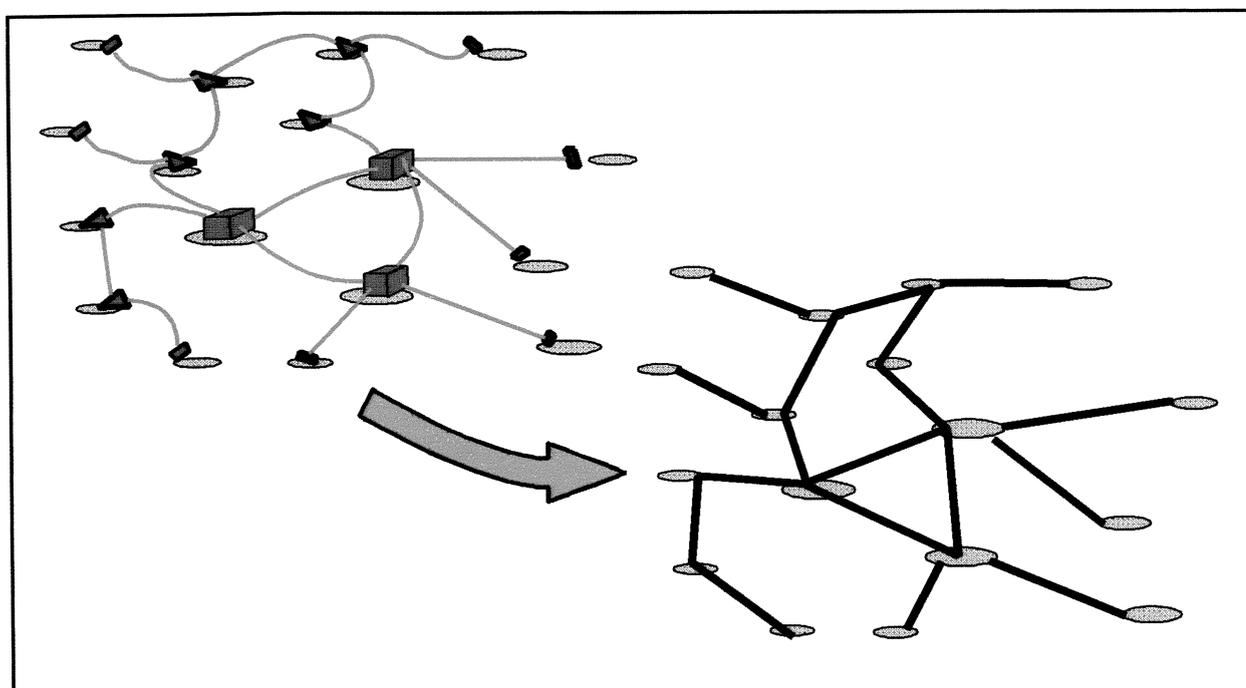


Figura 3.26: exemplo de um grafo de conexão, obtido a partir das configurações de equipamentos candidatas da Figura 3.25

cadeias (que possuem ADMs instalados neles).

Assim, a etapa de Geração de caminhos em um problema de planejamento deve considerar dois

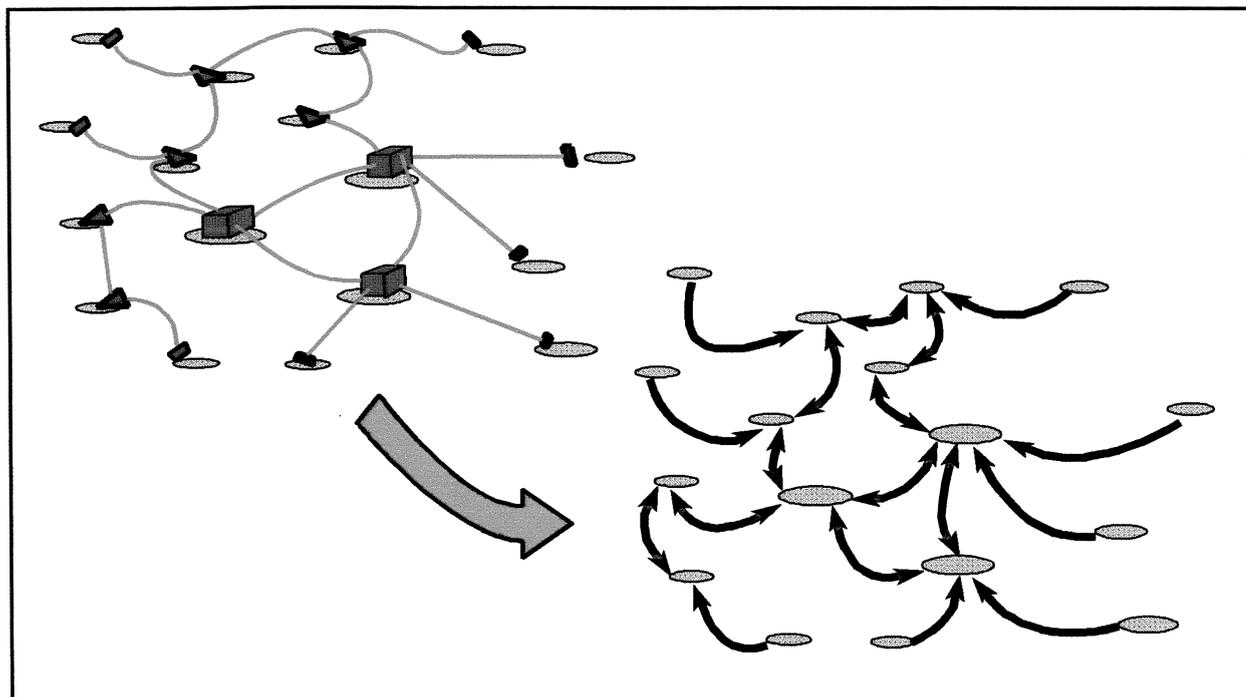


Figura 3.27: exemplo de grafo de filiação para geração de caminhos, obtida a partir da mesma proposta de configuração de equipamentos candidatas da Figura 3.25

grafos diferentes sobre a mesma rede:

- um **grafo de conexão** entre os CFs, onde os nós representam os CFs e os arcos indicam a presença de alguma conexão NE-a-NE entre os dois CFs. Esta pode ser uma ligação ponto-a-ponto ou um arco de um anel ou cadeia (veja a Figura 3.26). Este primeiro grafo é não orientado;
- um **grafo de filiação** entre os CFs, onde os nós novamente representam os CFs e os arcos indicam a hierarquia de filiação como descrita acima. Este segundo grafo é um grafo orientado (veja o grafo da Figura 3.27).

Pode-se dizer que aqueles arcos do grafo de filiação que possuem dupla orientação são parte do backbone da rede, pois ou são ligações entre hubs ou integram anéis ou cadeias. Os arcos com orientação simples indicam um “acesso” ao backbone. Um caminho é formado por uma sequência de arcos no grafo de conexão, obedecendo a uma das seguintes **regras de formação em relação ao grafo de filiação** (veja a Figura 3.28):

- um caminho é formado por apenas um arco: CF-a-CF, CF-a-Hub ou Hub-a-Hub;
- um caminho é formado por um primeiro arco para alcançar o backbone, e a partir dali, por uma sequência de arcos sobre o backbone (CF-backbone)
- um caminho é formado por um primeiro arco para alcançar o backbone; a partir dali, por

uma sequência de arcos sobre o backbone, e um último arco deixando o backbone em direção ao CF destino² (CF-backbone-CF).

Uma vez obtidos os dois grafos, parte-se para a geração de caminhos propriamente dita,

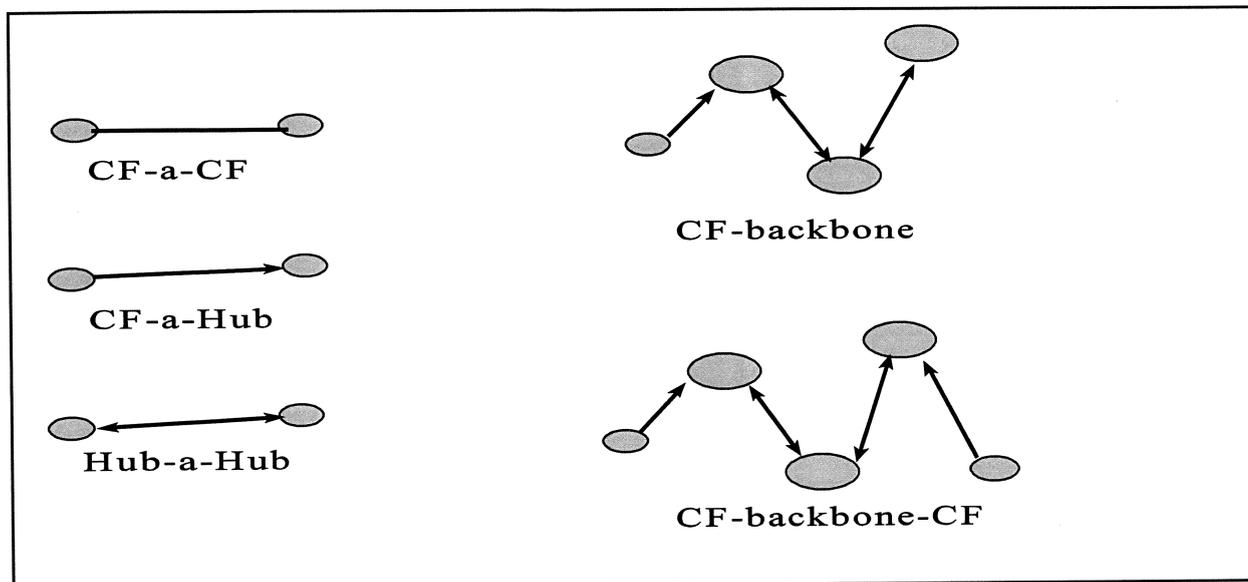


Figura 3.28: sequências possíveis sobre o grafo de filiação para se formar um caminho entre dois CFs

obedecendo àquelas regras. Na ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, desenvolveram-se algoritmos para gerar os seguintes tipos de caminhos (veja a Figura 2.30):

- caminhos diretos, sem passar por nenhum CF intermediário;
- caminhos passando por 1 CF intermediário do backbone;
- caminhos passando por 2 CFs intermediários do backbone;
- caminhos passando por 3 CFs intermediários do backbone;
- caminhos passando por 4 CFs intermediários do backbone;
- caminhos passando por um anel ou cadeia do backbone;
- caminhos passando por dois anéis ou cadeias do backbone.

Uma boa estratégia para a geração de caminhos é gerar uma grande quantidade de caminhos “curtos”, isto é, que passam por poucos (1, 2 ou máximo de 3) CFs intermediários. Isto porque - como passam por menos NEs - tais caminhos são mais confiáveis e potencialmente mais econômicos. Pelos mesmos motivos, ao se planejarem redes baseadas em anéis, os melhores caminhos são aqueles que passam pelo menor número de conexões inter-anel, e - dentre estes - aqueles de menor comprimento. Todavia, dependendo da combinação de equipamentos selecionada em uma solução de enfeixamento, alguns deles podem se tornar inviáveis, pois alguma das conexões candidatas que fazem parte de um caminho pode “ficar de fora” da rede. Daí o motivo de se gerar muitos destes caminhos.

Todavia, o número de caminhos em uma rede de grande porte pode assumir grandes proporções. Sugere-se então uma estratégia de geração de caminhos “seletiva”, de acordo com o volume de

²Embora se fale aqui em CF-origem e CF-destino, não há distinção entre um e outro.

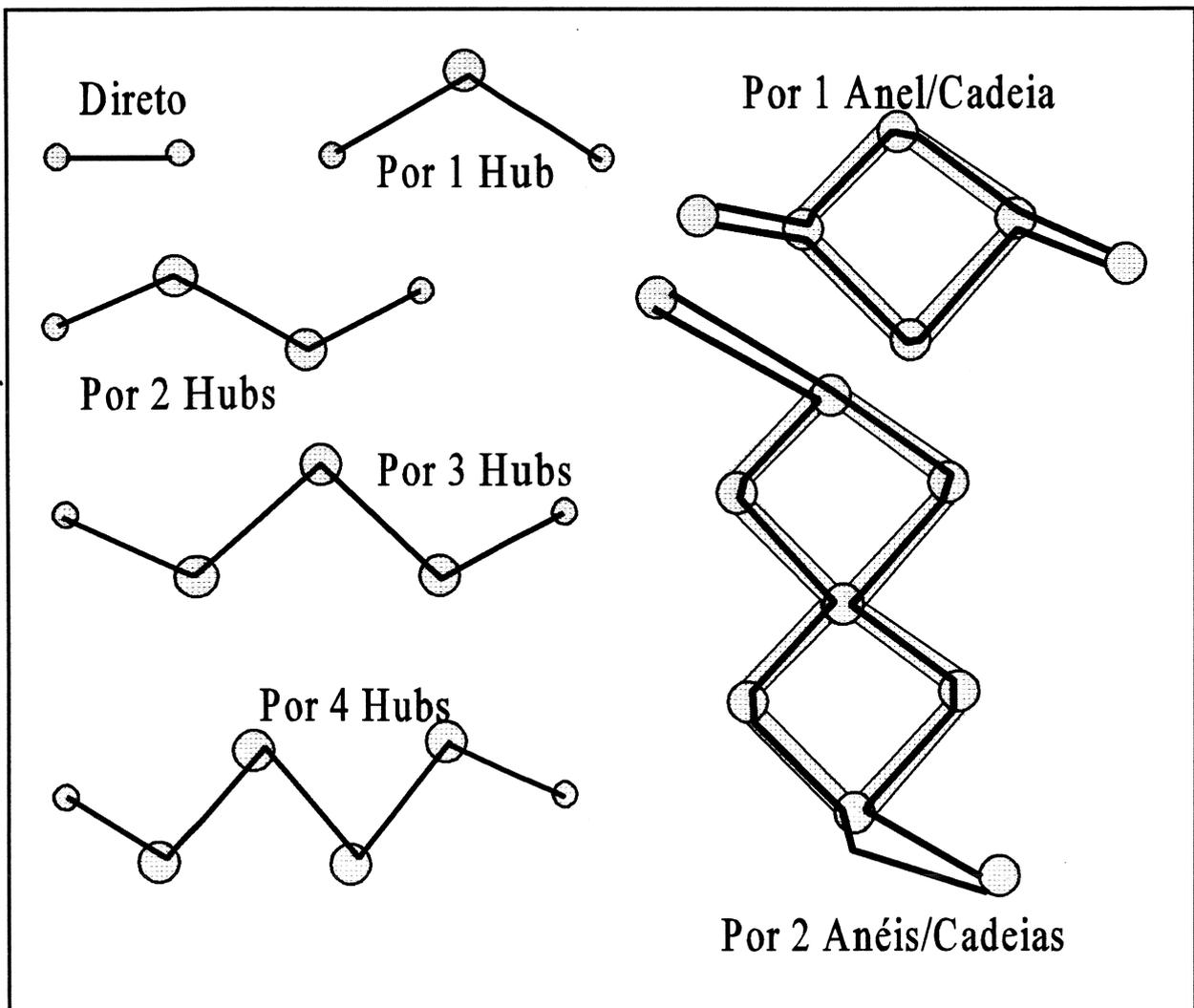


Figura 3.29 tipos de caminhos gerados automaticamente neste trabalho

demanda exigido entre os Cfs: *quanto maior a demanda entre dois CFs, maior será a quantidade de caminhos gerados para aquela demanda.*

Esta estratégia foi implementada na ferramenta computacional desenvolvida ao longo deste trabalho. Fica a critério do planejador escolher a quantidade de caminhos que podem ser gerados para um “produto”, de acordo com o volume de troncos exigido entre os CFs origem/destino.

Observando a Figura 3.29, verifica-se que é possível gerar 2 caminhos sobre um anel bidirecional: um no sentido horário e outro no sentido anti-horário. E em caminhos que passam por 2 anéis, é possível construir até 4 caminhos diferentes, combinando os sentidos de uso de cada anel. Todas estas possibilidades foram contempladas neste trabalho.

Os algoritmos implementados nesta ferramenta basearam-se em técnicas de busca exaustiva - a solução mais simples de implementar e a mais cara computacionalmente. Em redes de grande porte, a tarefa de geração de caminhos pode se tornar computacionalmente pesada. Isto pode ser resolvido satisfatoriamente aproveitando estruturas de dados baseadas nos grafos de conexão e de filiação, para construir algoritmos mais elaborados.

III.2.3.3. Montagem do Modelo Matemático

A montagem do modelo matemático é a terceira etapa na solução do problema de Enfeixamento,

após a escolha das configurações de equipamentos candidatas e da geração de caminhos. O objetivo é montar um arquivo-texto com um problema no padrão “.LP”³, que pode ser lido pelo software de otimização que irá fazer a busca das melhores soluções. Um exemplo de um destes modelos é apresentado no Apêndice I.

A montagem do modelo matemático foi **completamente** automatizada, neste trabalho, por vários motivos:

- a maioria dos planejadores não tem formação em Pesquisa Operacional, necessária para poder ler e interferir diretamente no modelo matemático;
- até mesmo em redes de médio porte (uma dezena de CFs) o tamanho do modelo matemático torna impraticável sua leitura ou alteração via editores de texto. Para a rede da área metropolitana de São Paulo (40 nós) , por exemplo, criaram-se modelos com mais de 10.000 variáveis e cerca de 2000 linhas de restrição;
- a experiência mostrou que, mesmo para alguém com experiência em PO e com o modelo matemático em si, a probabilidade de erro ao se mexer diretamente no mesmo é muito grande. E que este tipo de erro é muito difícil de ser detectado.

O software desenvolvido para a montagem do modelo matemático usa as informações sobre as configurações de equipamentos e sobre os caminhos gerados para montar a função-objetivo e as restrições de atendimento à demanda e de capacidade do modelo matemático, como descritas no próximo capítulo.

³Também se poderia usar o padrão “.mps”, o que efetivamente foi feito durante parte do trabalho

III.2.3.4. Obtenção e Análise de Soluções

A obtenção e análise de soluções deve ser feita também com suporte de software para interação com o planejador. Pacotes de otimização como o CPLEX permitem diversos tipos de interação homem-máquina, das quais é possível tirar proveito se o usuário conhecer a formulação do problema sendo resolvido, as particularidades da rede sendo planejada e a própria linguagem de interação. Exemplos deste tipo de interação, que foram usadas para planejar as redes estudadas neste trabalho, são:

- limitar o custo total da rede a um orçamento máximo;
- obrigar a que a folga em alguma parte da rede fosse maior que um valor mínimo;
- forçar a entrada ou a saída de uma configuração de equipamentos em uma solução.

Nos testes efetuados sobre as redes da Área Metropolitana de São Paulo e do Interurbano do estado de São Paulo, havia uma equipe multidisciplinar, reunindo pessoal de planejamento da empresa operadora (no caso a TELESP - Telecomunicações de São Paulo S.A.) com o pessoal com formação em Pesquisa Operacional que havia desenvolvido as ferramentas de software para automatização da metodologia proposta aqui. Em algumas oportunidades, restrições técnicas que

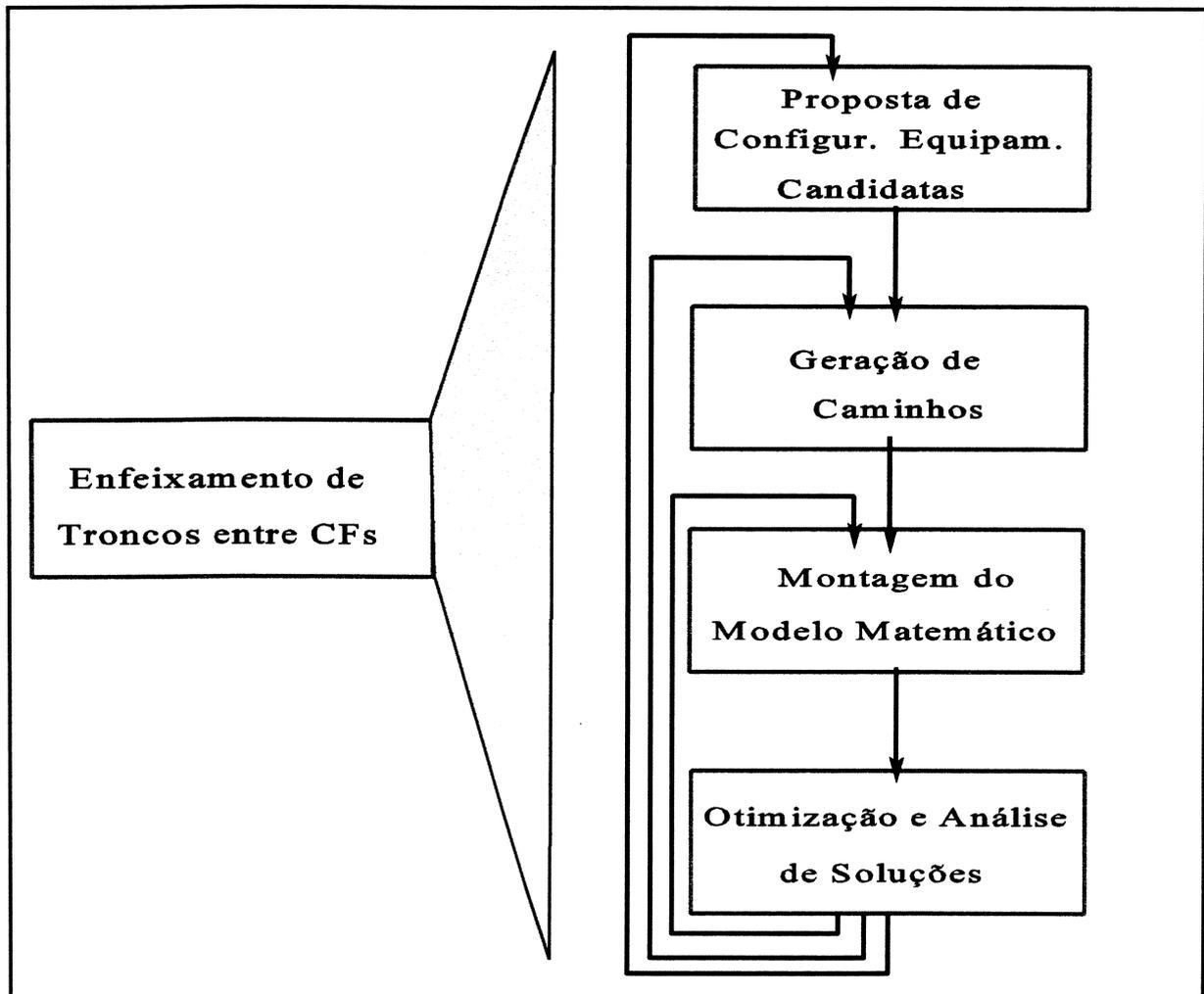


Figura 3.30: possibilidades de realimentação nas fases do problema de Enfeixamento de Troncos

não haviam sido previstas na fase de projeto e desenvolvimento das ferramentas eram estabelecidas pelos planejadores durante a fase de análise de soluções. Em muitos destes casos, a interação com o pacote de otimização era suficiente, enquanto em outros era preciso providenciar manutenções no software de montagem do modelo matemático, para incorporar *aquela* sugestão *naquela* rede.

Por exemplo, em certa experiência, dados os custos e a matriz de demandas de uma rede, em praticamente todas as soluções geradas havia um conjunto de (6) seis enlaces ponto-a-ponto sendo sugeridos para efetuar ligações entre uma cidade do Interior de São Paulo e a Capital. E esta solução foi claramente rejeitada pelo planejador: um ou dois enlaces seriam aceitos, mas não seis. A solução foi elaborar uma restrição técnica limitando o número de enlaces ponto-a-ponto que saíam daquela cidade a dois, e otimizar novamente o problema. A solução assim obtida foi mais bem aceita.

A tendência é irem surgindo mais e mais tipos de restrições técnicas diferentes com o uso de ferramentas de otimização para o planejamento de redes. Um ponto forte da metodologia proposta aqui para a solução do Enfeixamento é a facilidade com que estas restrições podem ser modeladas e incorporadas nos problemas de otimização.

Durante o processo de planejamento de uma rede, pode ocorrer que o planejador visualize uma topologia de anel, ou uma cadeia que não havia sido considerada na fase de proposta de candidatos. Neste caso, é possível voltar à etapa de proposta de candidatos, inserir a nova topologia, gerar apenas os caminhos que passam por aquela topologia, verificando se os mesmos já não haviam sido gerados antes, e voltar à etapa de otimização. A Figura 3.30 ilustra estes tipos de ocorrências.

III.2.4. Fase de Arranjo e Dimensionamento de Fibras

Esta é a fase onde se faz o roteamento dos pares de fibra sobre a rede física, procurando garantir a confiabilidade da rede. Pela metodologia proposta aqui, em redes urbanas, ela deve suceder ao Enfeixamento, pois ao fim deste se obtém a demanda de pares de fibra entre as centrais da rede.

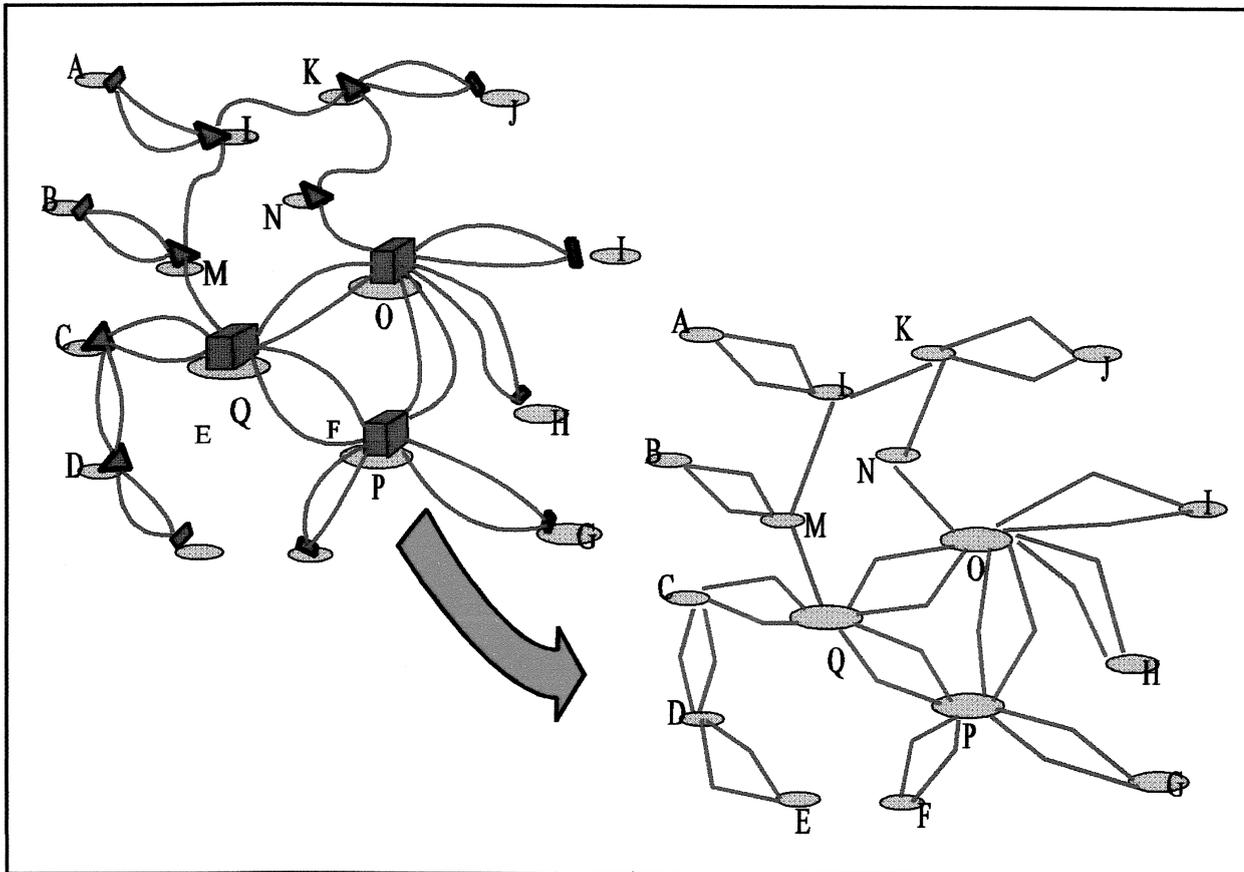


Figura 3.31: uma malha de SDH-sections gerando uma demanda de pares de fibra entre os centros de fios de uma rede

De todas as combinações possíveis de pares de CFs, apenas um subconjunto irá exigir conexões em fibra óptica. Esta “demanda de pares de fibra óptica” é obtida como resultado do dimensionamento da rede SDH, já que uma SDH-section entre dois CFs exige um par de fibras entre os mesmos para ser implementada. Pode mesmo exigir dois pares: um de trabalho e outro de proteção. Veja por exemplo, a rede da Figura 3.31. No lado esquerdo, a malha de SDH-sections, algumas com proteção 1+1 (working & protection), e no lado direito, a demanda de pares de fibra óptica resultante, com restrições de disjunção de caminhos físicos.

Por exemplo, as fibras ópticas do anel K-L-M-Q-O-N-K não devem compartilhar o mesmo cabo de fibras, ou a mesma galeria, sob pena de se comprometer a confiabilidade do anel. Isto é: rompido tal cabo, não haveria como o anel se “regenerar”, pois tanto a “capacidade” de trabalho quanto a de proteção teriam sido afetadas. Em um outro exemplo, os dois pares de fibra entre I-O devem seguir por caminhos disjuntos, pelo mesmo motivo. O mesmo ocorre com A-L, K-J, B-M, D-E, etc.

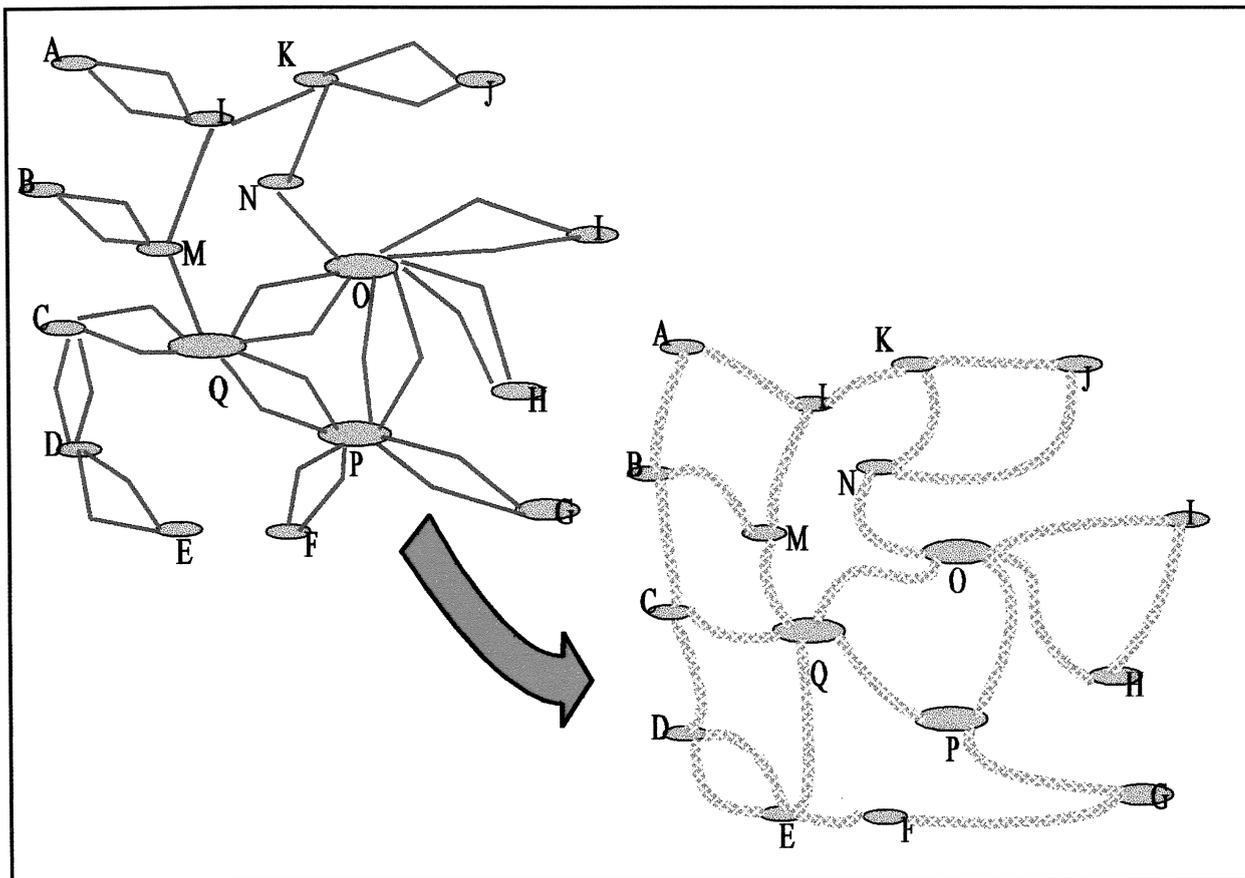


Figura 3.32: exemplo de demanda de pares de fibra e topologia da malha de cabos de fibra óptica sobre uma mesma rede.

Não é razoável lançar um cabo de fibra óptica com 8 pares para suportar apenas um par de fibras. Assim, o que se faz é compartilhar - em um mesmo cabo - pares de fibras com origens/destinos diferentes, realizando emendas adequadas em CFs intermediários, no que se denomina de Distribuidor Intermediário Óptico (DIO), como apresentado na Figura 3.32. O problema é definir por onde rotear os pares de fibra entre CFs sobre a malha de cabos/galerias, e eventualmente, entre que CFs lançar novos cabos para atender àquela demanda. Em redes urbanas, a principal preocupação ao resolver tal problema é garantir a confiabilidade da rede.

Cox, Kuehner, Parrish & Qiu (1993) propõem um modelo matemático que considera em um mesmo problema aspectos de Enfeixamento de Troncos e aspectos de Arranjo de Fibras. É uma abordagem bastante interessante, embora - naquele trabalho - não se apresente como modelar topologias em anel e cadeia.

Já **Carneiro et alii (1995)** propõem métodos heurísticos para rotear os pares de fibra óptica sobre a malha física de galerias da rede, considerando as restrições de disjunção de caminhos e - de forma heurística - procurando gerar soluções de baixo custo.

Finalmente, **Mello et alii (1996)** apresentam um estudo sobre a confiabilidade de soluções de arranjo/dimensionamento, apontando os ganhos que se obtém ao empregar proteção por caminhos disjuntos e por proteção "1+1" em uma rede. Este tipo de análise é cada vez mais importante em redes SDH, pois a confiabilidade da rede está se tornando um instrumento de competição entre as empresas de telecomunicações.

III.3. Outros Trabalhos sobre Metodologias de Planejamento de Redes SDH

Nesta seção apontam-se trabalhos desenvolvidos em outros centros de pesquisa sobre o planejamento de redes SDH. Na maior parte das vezes, estes trabalhos são patrocinados por algum grande fabricante de equipamentos (Northern Telecom, Alcatel), ou por centros de pesquisa de operadoras de telecomunicações (Bellcore, Bell South, GTE, British Telecom).

Um dos grupos de pesquisa/desenvolvimento que têm alcançado bons resultados neste campo é o dos **Laboratórios Bellcore**. Este desenvolveu uma série de ferramentas que associam um núcleo de algoritmos de Pesquisa Operacional a interfaces gráficas e bancos de dados para o planejamento de redes SDH/SONET. A base para este desenvolvimento veio dos programas *Fiber Options* e *Strategic Options*, desenvolvidos no final da década de 80 (a respeito, ver **Wu (1992)**). O trabalho que melhor descreve os últimos desenvolvimentos destas ferramentas é o de **Cosares et alii (1995)**. Na ferramenta *SONET Toolkit*, aplicam-se algoritmos heurísticos para elaborar propostas de anéis, cadeias e ligações ponto-a-ponto, em interações sucessivas, até que todas as demandas da rede sejam atendidas. Nisto, difere da metodologia apresentada aqui, em que todas as propostas são apresentadas previamente, para depois competirem em um modelo de programação inteira.

Um outro trabalho do conhecimento deste autor é o desenvolvido dentro dos laboratórios **BNR (Bell Northern Research)**, para a **Northern Telecom**. Até onde se pôde apurar, as ferramentas desenvolvidas ali não possuem algoritmos de otimização nelas embutidos. Seus pontos fortes são as interfaces gráficas e as bases de dados, que permitem ao planejador um domínio invejável sobre as informações. A prática tem demonstrado que esta flexibilidade é fundamental no planejamento de redes.

Também a **Bell South** tem investido em ferramentas de otimização para o planejamento de redes SDH. Para tanto, mantém convênios de pesquisa com a University of Colorado, em Boulder (CO). Exemplos dos resultados deste esforço são apresentados por Laguna (1994). A característica destes trabalhos é o uso de técnicas de busca tabu para resolver os problemas de otimização que surgem na metodologia de planejamento ali desenvolvida.

A **British Telecom** mantém um grupo de pesquisas em otimização para o planejamento de redes em seu centro de pesquisas em Ipswich. Este tem desenvolvido pesquisas interessantes sobre o planejamento de redes SDH. São particularmente interessantes os trabalhos que consideram o emprego de WDM e de comutação óptica sobre a rede de transporte (**Lowe et alii, 1996**), e os que tratam do planejamento de redes ATM sobre a rede de transporte SDH (**Medova et alii, 1996**). Este último trabalho trata as redes ATM/SDH através de modelos de fluxo multiproduto arco-caminho, muito semelhantes aos adotados aqui.

Finalmente, também a **Alcatel** tem se debruçado sobre o planejamento de redes SDH. **Stepanenko et alii (1996)** apresenta um método desenvolvido dentro daquela empresa para otimizar o projeto da topologia de anéis de transporte.

IV. Modelagem Matemática do Problema de Enfeixamento de Troncos

O problema de Enfeixamento de Troncos é a etapa da Metodologia de Planejamento da RT-SDH na qual se define a malha formada por equipamentos, conectados por fibra óptica e localizados nos Centros de Fios. É sem dúvida o problema mais complexo dentro da metodologia proposta, dada a quantidade de alternativas possíveis. A modelagem matemática do Enfeixamento é uma das sub-etapas para a sua resolução através de algoritmos de otimização. Para se poder formular o modelo matemático que será exposto neste capítulo é preciso antes passar por duas sub-etapas na resolução do Enfeixamento: a proposta de configurações de equipamento candidatas e a geração de caminhos. Estas duas sub-etapas foram descritas no capítulo anterior.

Considere uma RT-SDH sendo planejada, para a qual já se definiu um conjunto de configurações de equipamento candidatas e um conjunto de caminhos sobre estas configurações. Então, para esta rede, pode-se estabelecer um modelo de fluxo multiproduto como a seguir:

- conjunto dos nós: definido pelo conjunto dos centros de fios com equipamentos SDH neles instalados;
- conjunto dos arcos: definido pelo conjunto de pares de CFs conectados diretamente por alguma seção SDH. Uma exceção ocorre quando as únicas ligações diretas entre estes CFs são seções de um ou mais anéis unidirecionais (UPSHR). Este caso será modelado de forma particular;
- conjunto dos produtos: um produto é definido pelos seus centros de fios ponta (origem e destino);
- conjunto dos caminhos: um caminho é definido pela seqüência dos arcos por onde um produto pode passar. As extremidades de um caminho são sempre os CFs origem/destino da demanda que aquele caminho atende. Como um arco é definido pelos seus CFs leste e oeste, então um caminho pode ser definido como uma seqüência de centros de fios.

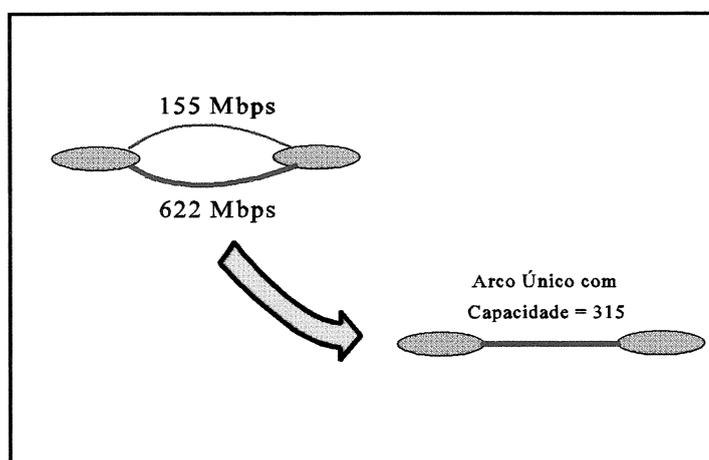


Figura 4.1: representação dos arcos no modelo de redes multiproduto para o problema do Enfeixamento

Neste modelo, a capacidade de um arco é igual à soma das capacidades das conexões entre os dois CFs. Assim, se dois centros de fios A e B estiverem ligados por uma conexão STM-1 (taxa = 155 Mbps; capacidade = 63 canais E1) e outra STM-4 (taxa = 622 Mbps; capacidade = 252 canais E1), a capacidade do arco A-B será igual a 315 canais E1 ($63 + 252 = 315$). Este exemplo é ilustrado na Figura 4.1.

Acompanhe o exemplo a seguir, baseado na rede apresentada na Figura 4.2. Nela representa-se

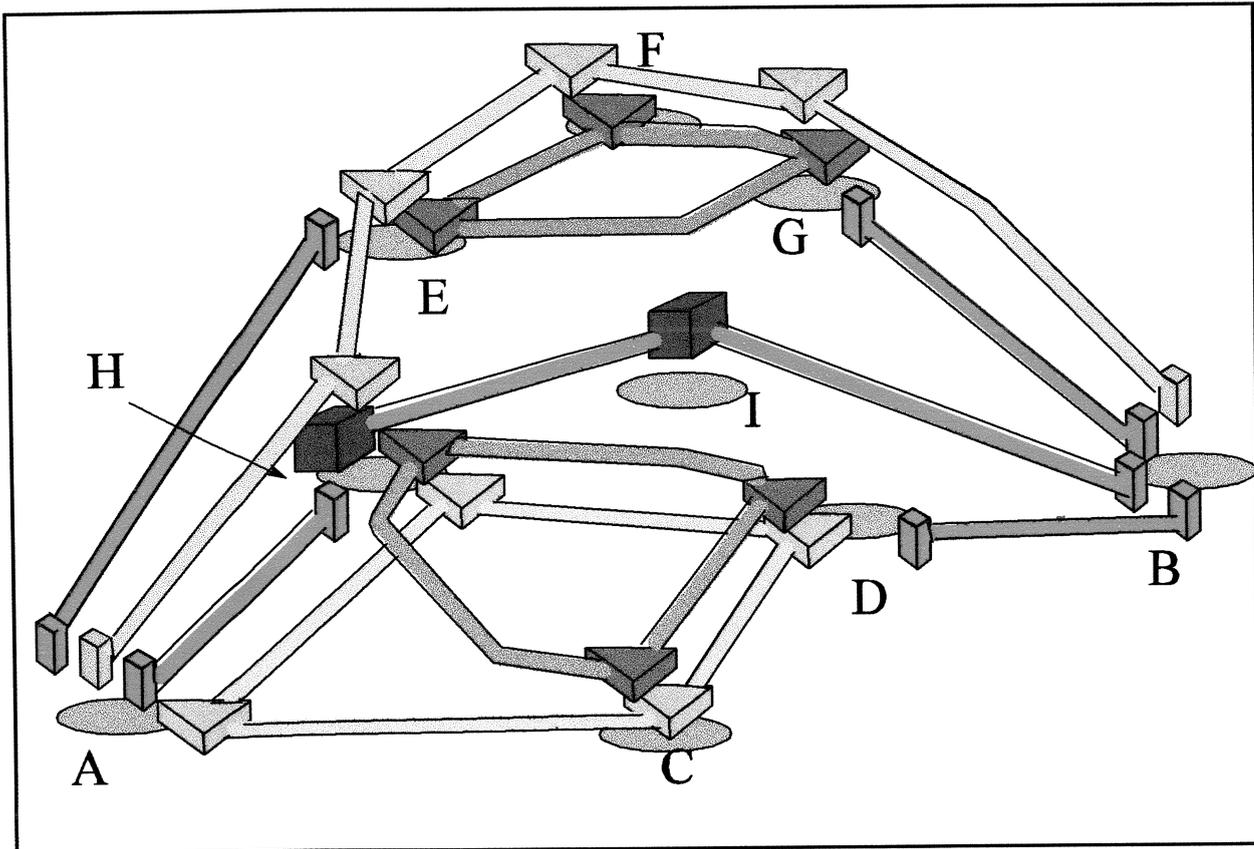


Figura 4.2: rede exemplo com um anel unidirecional, anéis bidirecionais, cadeia e ligações ponto-a-ponto

uma rede de 9 CFS, com dois hubs H e I, dois anéis bi-direcionais (A-C-D-H, C-D-H), uma cadeia de ADMs (A-H-E-F-G-B) e um anel unidirecional (E-F-G). Algumas ligações ponto-a-ponto entre os CFS também estão representadas: A-E, A-H, G-B, I-B, D-B. Neste exemplo, não importam (ainda) as taxas de transmissão destas configurações de equipamentos.

Considere o par de CFS origem / destino A-B, com uma demanda de 150 canais E1 entre eles. Imagine que um conjunto de 6 (seis) caminhos é disponível para transportar os canais de A para B (veja a Figura 4.3):

- Caminho 1: vai de A para E, entra no anel unidirecional E-F-G, é retirado dele em G, e daí vai de G para B;
- Caminho 2: entra na cadeia A-H-E-F-G-B em A, saindo somente em B;
- Caminho 3: vai de A para o hub H, daí para o hub I e para B;
- Caminho 4: vai de A para o hub H, onde entra no anel bidirecional C-D-H, atravessa este anel de H para D, onde os canais são retirados e transportados para B;
- Caminho 5: entra no anel bidirecional A-C-D-H em A, sendo retirado em D, percorrendo-o no sentido horário (A-H-D). De D, os canais são levados para B;
- Caminho 6: entra no anel bidirecional A-C-D-H em A, sendo retirado em D, percorrendo-o no sentido anti-horário (A-C-D). Em D, os canais são retirados e levados para B.

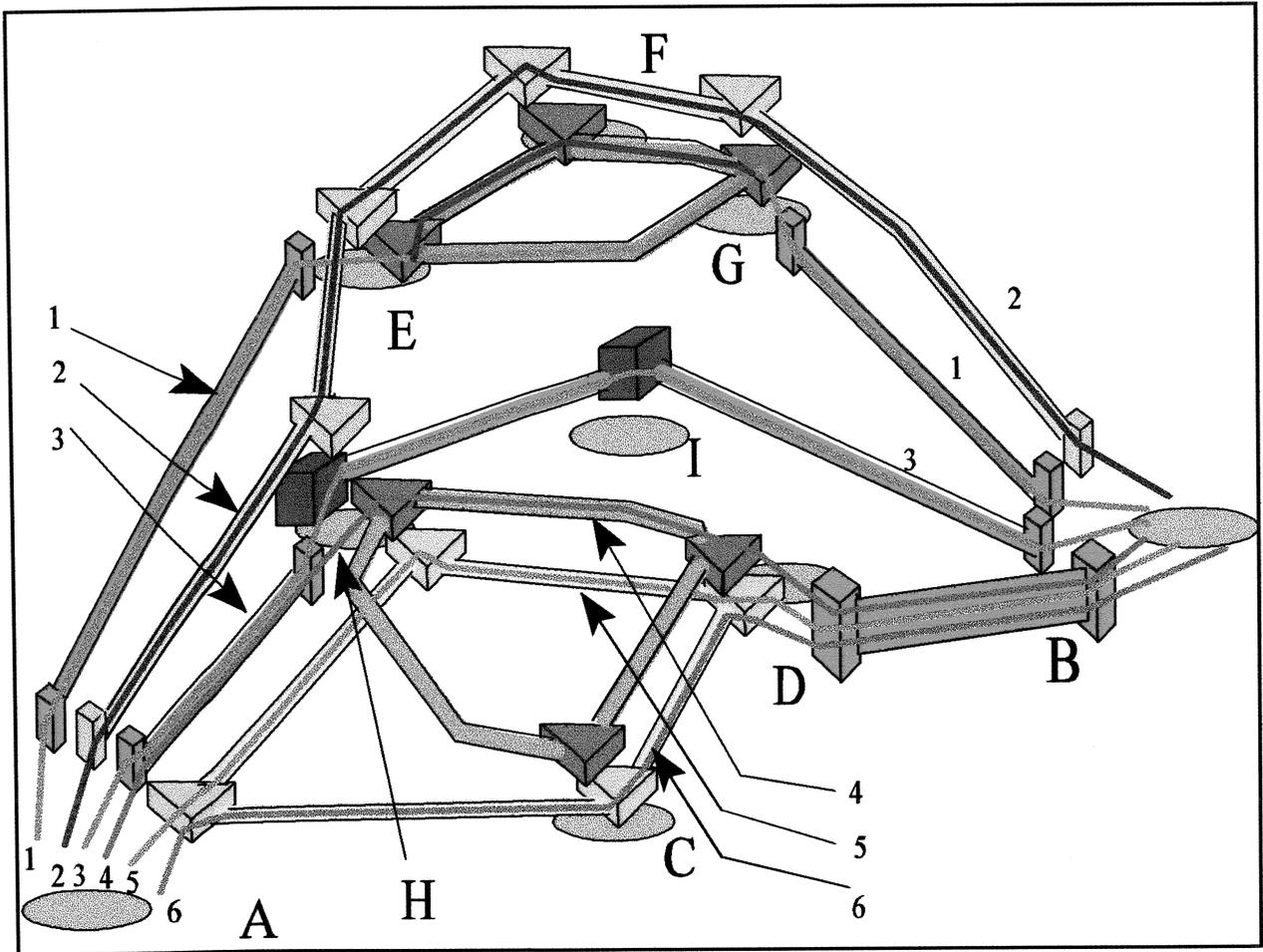


Figura 4.3: caminhos disponíveis para atender à demanda A-B

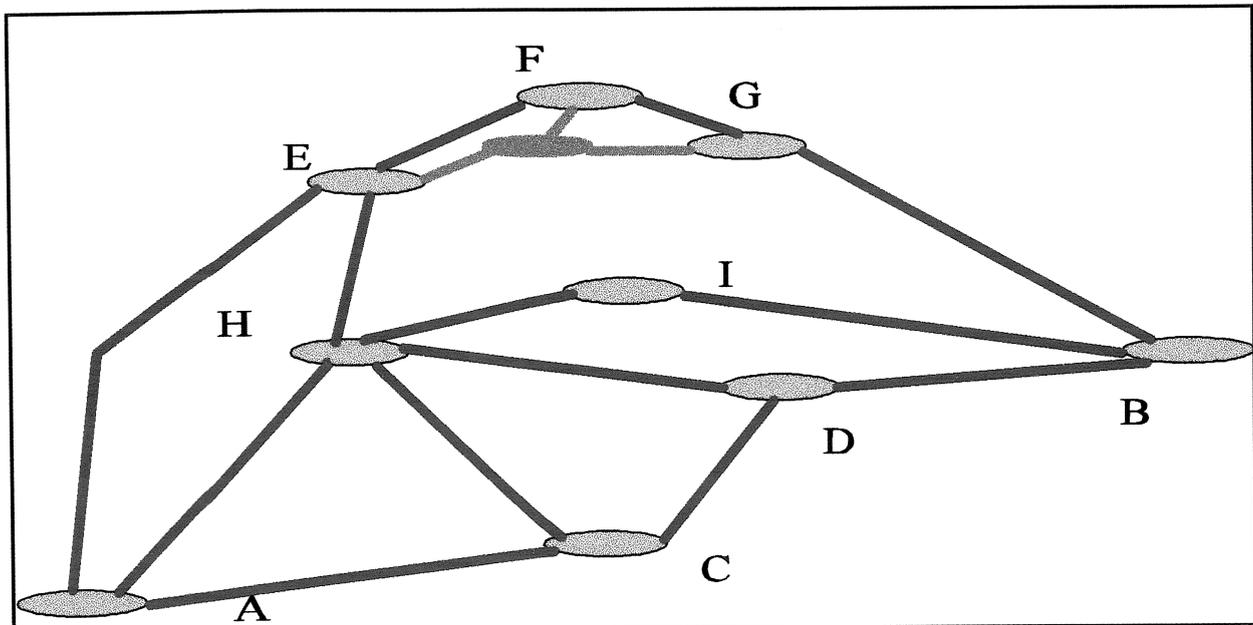


Figura 4.4: grafo (nós e arcos) para modelagem do problema de enfileiramento de troncos baseado na proposta de equipamentos da Figura 4.2

A Figura 4.4 apresenta o grafo (nós e arcos) sobre o qual será montado o modelo de fluxo multiprodutos. Note que no arco H-D existem duas configurações alternativas para implementar conexões SDH, uma pelo anel D-C-H, e outra pelo anel A-C-D-H. O mesmo acontece em outros arcos da rede. Todavia, a capacidade de cada arco (para fins do modelo de enfeixamento) é igual à soma das capacidades de todas as configurações de equipamento candidatas (que sejam efetivamente escolhidas na solução final) capazes de implementar uma conexão-SDH entre os CFs-ponta do arco. Isto vale para ligações ponto-a-ponto, anéis bidirecionais e cadeias de ADMs. Os arcos de anéis unidirecionais recebem uma representação diferente das demais, que será explicada mais à frente.

Tome novamente o arco D-H da Figura 4.3. Além dos caminhos que atendem à demanda A-B, diversos outros pares de CFs origem-destino podem ter caminhos para atender às suas demandas passando através daquele arco. O importante é que, para uma solução ser tecnicamente factível, a soma dos fluxos de canais E1 em todos estes caminhos deve ser menor ou igual à capacidade de transmissão do arco. Isto define uma restrição de capacidade de arco.

Por outro lado, a soma dos fluxos de canais sobre os caminhos que levam canais entre dois de CFs (ou seja, de um mesmo produto) deve ser igual à quantidade de canais solicitada entre eles. Por exemplo, somando-se o fluxo nos caminhos “1” a “6” apresentados na Figura 4.3, o resultado deve ser igual a 150, que é a demanda entre os CFs “A” e “B”. Isto define uma restrição de atendimento à demanda.

- Modelagem de Anéis Unidirecionais (UPSHR)

Em um Anel Unidirecional UPSHR, todos os arcos transportam exatamente a mesma carga útil (veja explicação no Capítulo II). De certa forma, é como se houvesse uma emissão em *broadcast* de todo canal que chega ao anel unidirecional para todos os nós que compõem o anel. Uma outra interpretação seria imaginar um anel UPSHR não como uma seqüência de equipamentos de transmissão,

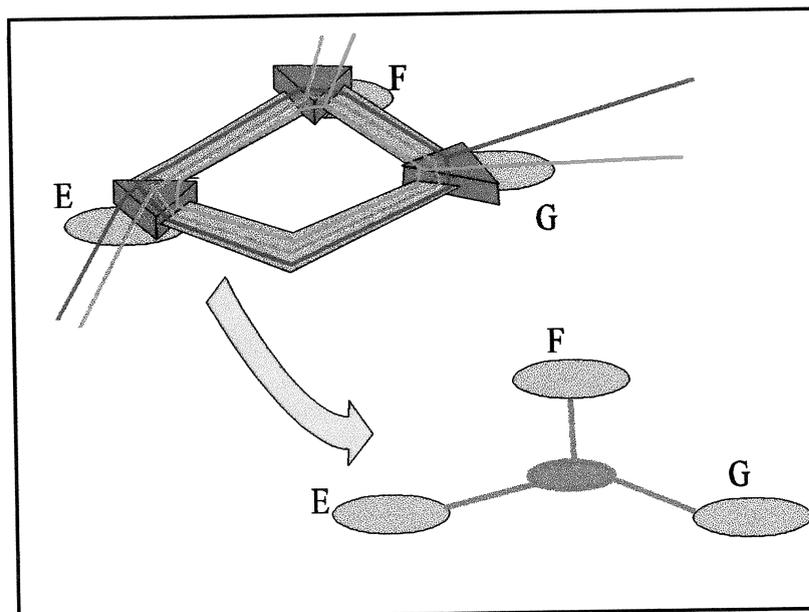


Figura 4.5: representação de anéis unidirecionais como um único “arco”

mas como um conjunto solidário de equipamentos de transmissão (veja a Figura 4.5). Doravante, um anel unidirecional será representado por um “arco” no modelo de fluxo multiprodutos.

Ainda observando o a Figura 4.5, se poderia afirmar que todo canal que “chega” ao anel unidirecional é duplicado para ambas as saídas (leste e oeste) do ADM através do qual aquele canal “chega” do anel. Com isto, cada canal percorre todos os arcos do anel. Já em um anel bidirecional, cada canal é transmitido por apenas uma das saídas (leste ou oeste) do ADM através de “entrada no anel”. Mais explicações sobre o funcionamento de anéis unidirecionais são

apresentadas no Capítulo II.

Nesta interpretação, um anel UPSHR pode então ser representado como um único “arco” do modelo de fluxo multiprodutos. Em uma rede SEM anéis unidirecionais, cada arco representará apenas uma ligação entre dois centros de fios. Todavia, ao incluir um anel unidirecional (que liga vários CFs) basta a inclusão de apenas mais um “arco” no modelo. Neste caso, um “arco” passa a representar uma ligação entre vários centros de fios - tantos quantos são os que compõem o anel.

• **Usando o Modelo de Fluxo Multiprodutos para representar o Problema de Enfeixamento**

Imagine um problema de dimensionamento de uma rede de equipamentos SDH, onde se procura minimizar o custo. Usando um modelo de rede de fluxo multiprodutos como base, este problema pode ser formulado como no Quadro 4.1.

As variáveis de decisão do problema se referem (1) à instalação ou não de cada uma das configurações de equipamento candidatas, e (2) ao valor do fluxo de canais em cada um dos caminhos previamente gerados.

A função objetivo do problema se refere ao custo da rede, que é calculado somando-se os custos das configurações de equipamento escolhidas.

O primeiro grupo de restrições refere-se ao atendimento da demanda. É necessário montar uma restrição de atendimento da demanda para cada produto da rede (lembre que um produto equivale a um par de CFs com demanda de canais não-nula entre eles).

O segundo grupo de restrições se refere ao cálculo da capacidade total de transmissão entre cada par de CFs diretamente conectados. É necessário montar uma restrição de cálculo de capacidade para cada arco da rede.

O terceiro grupo de restrições se refere ao cálculo do fluxo total de canais e da folga de transmissão entre cada par de CFs. Também é necessário montar uma restrição deste tipo para cada arco da rede.

Quadro 4.1

Um Exemplo de Formulação de Problema de Enfeixamento Baseada em Redes de Fluxo Multiproduto

Defina :

- um conjunto de configurações de equipamento candidatas, e
- os valores dos fluxos nos caminhos que atendem às demandas, através das configurações escolhidas,

tendo por objetivo minimizar o custo total da rede,

sujeito a :

- Para cada produto da rede:
 - que a soma dos fluxos nos caminhos que atendem àquele produto deve ser igual ao volume de demanda daquele produto;
- Para cada arco da rede:
 - que a capacidade do arco seja igual à soma das capacidades dos módulos de transmissão relacionados àquele arco que forem instalados;
 - que a folga do arco seja igual à diferença entre a capacidade de transmissão e a soma dos fluxos nos caminhos que passam por aquele arco;

• **Formulando Matematicamente o Modelo de Fluxo MultiProdutos do Enfeixamento**

Para formular matematicamente as equações do modelo de fluxo multiprodutos do Problema de Enfeixamento, será usada a seguinte notação:

- D** conjunto de pares de CFs com alguma demanda de canais E1 entre eles. Cada par de CFs define um produto a ser transportado;
- d_p número de canais E1 do produto $p \in D$ a serem transportados;
- A** conjunto de arcos (pares de CFs conectados diretamente) da rede;
- L** conjunto de ligações ponto-a-ponto (CF-a-CF, CF-a-hub, hub-a-hub) definidas como candidatas;
- U** conjunto de anéis unidirecionais definidos como candidatos;
- Z** conjunto de anéis bidirecionais definidos como candidatos;
- W** conjunto de cadeias de ADMs definidas como candidatas;
- L_a um subconjunto de **L**; trata-se do conjunto de ligações ponto-a-ponto candidatas que são paralelas ao arco $a \in A$. Isto é, que são alternativas para implementar a conexão SDH entre os CFs ponta do arco $a \in A$;
- Z_a um subconjunto de **Z**; trata-se do conjunto de anéis candidatos que têm um arco paralelo ao arco $a \in A$;
- W_a um subconjunto de **W**; trata-se do conjunto de cadeias de ADM candidatas que têm um arco paralelo ao arco $a \in A$;
- C** conjunto de todos os caminhos gerados para a rede em estudo;
- C_p um subconjunto de **C**; trata-se do conjunto de caminhos que podem ser usados para transportar o produto $p \in D$;
- $C^{1,a}$ um subconjunto de **C**; trata-se do conjunto dos caminhos que passam através do arco $a \in A$;
- $C^{2,u}$ um subconjunto de **C**; trata-se do conjunto dos caminhos que passam através do anel unidirecional $u \in U$;
- B** conjunto de taxas de transmissão admitidas na rede;
- $\beta^{1,l}$ um subconjunto de **B**; trata-se do conjunto de taxas de transmissão admitidas para a ligação ponto-a-ponto $l \in L$;
- $\beta^{2,u}$ um subconjunto de **B**; trata-se do conjunto de taxas de transmissão admitidas para o anel unidirecional $u \in U$;
- $\beta^{3,z}$ um subconjunto de **B**; trata-se do conjunto de taxas de transmissão admitidas para o anel unidirecional $z \in Z$;
- $\beta^{4,w}$ um subconjunto de **B**; trata-se do conjunto de taxas de transmissão admitidas para a cadeia de ADMs $w \in W$;
- M_b capacidade de uma configuração de equipamentos implementada na taxa de transmissão $b \in B$;

- $\varphi_b^{1,l}$ custo de compra e instalação da ligação ponto-a-ponto $l \in L$, na taxa de transmissão $b \in B$;
- $\varphi_b^{2,u}$ custo de compra e instalação do anel unidirecional $u \in U$, na taxa de transmissão $b \in B$;
- $\varphi_b^{3,z}$ custo de compra e instalação do anel bidirecional $z \in Z$, na taxa de transmissão $b \in B$;
- $\varphi_b^{4,w}$ custo de compra e instalação da cadeia de ADMs $w \in W$, na taxa de transmissão $b \in B$;
- $x_{l,b}$ variável de decisão discreta; define a quantidade de configurações ponto-a-ponto $l \in L$, a serem instaladas na taxa de transmissão $b \in B$;
- $u_{u,b}$ variável de decisão discreta; define a quantidade de configurações anel unidirecional $u \in U$, a serem instaladas na taxa de transmissão $b \in B$;
- $z_{z,b}$ variável de decisão discreta; define a quantidade de configurações anel bidirecional $z \in Z$, a serem instaladas na taxa de transmissão $b \in B$;
- $w_{w,b}$ variável de decisão discreta; define a quantidade de configurações cadeia de ADMs $w \in W$, a serem instaladas na taxa de transmissão $b \in B$;
- y_c variável de decisão contínua; define a quantidade de canais E1 que serão transportados pelo caminho $c \in C$;
- $CAPL_l$ capacidade de transmissão (em canais E1) instalada na ligação ponto-a-ponto $l \in L$;
- $CAPU_u$ capacidade de transmissão (em canais E1) instalada no anel unidirecional $u \in U$;
- $CAPZ_z$ capacidade de transmissão (em canais E1) instalada no anel bidirecional $z \in Z$;
- $CAPW_w$ capacidade de transmissão (em canais E1) instalada na cadeia de ADMs $w \in W$;
- $CAPT_a$ capacidade total de transmissão (em canais E1) entre os CFs ligados pelo arco $a \in A$;
- $TOTT_a$ fluxo total de canais E1 passando entre os CFs ligados pelo arco $a \in A$;
- $TOTU_u$ fluxo total de canais E1 passando no anel unidirecional $u \in U$;
- $FLGT_a$ folga total (em canais E1) disponível entre os CFs ligados pelo arco $a \in A$;
- $FLGU_u$ folga total (em canais E1) disponível no anel unidirecional $u \in U$.

O modelo matemático, propriamente dito, é apresentado na Figura 4.6. A função objetivo calcula a soma (para todas as configurações propostas e para todas as taxas de transmissão admitidas em cada uma delas) dos custos das ligações ponto-a-ponto, dos anéis unidirecionais, dos anéis bidirecionais e das cadeias de ADMs.

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize} && \sum_{l \in L} \sum_{b \in \beta^{l,l}} \varphi_b^{l,l} x_{l,b} && + \sum_{u \in U} \sum_{b \in \beta^{2,u}} \varphi_b^{2,u} u_{u,b} \\
& && + \sum_{z \in Z} \sum_{b \in \beta^{3,z}} \varphi_b^{3,z} z_{z,b} && + \sum_{w \in W} \sum_{b \in \beta^{4,w}} \varphi_b^{4,w} w_{w,b} \\
& \text{subject to} && \\
& && \sum_{c \in C_p} y_c = d_p && \text{for all } p \in D \\
& && \sum_{c \in C^{1,a}} y_c = \text{TOTT}_a && \text{for all } a \in A \\
& && \sum_{b \in \beta^{l,l}} M_b x_{l,b} = \text{CAPL}_l && \text{for all } l \in L \\
& && \sum_{b \in \beta^{3,z}} M_b z_{z,b} = \text{CAPZ}_z && \text{for all } z \in Z \\
& && \sum_{b \in \beta^{4,w}} M_b w_{w,b} = \text{CAPW}_w && \text{for all } w \in W \\
& && \sum_{z \in Z_a} \text{CAPZ}_z + \sum_{l \in L_a} \text{CAPL}_l + \sum_{w \in W_a} \text{CAPW}_w = \text{CAPT}_a && \text{for all } a \in A \\
& && \text{CAPT}_a - \text{TOTT}_a = \text{FLGT}_a && \text{for all } a \in A \\
& && \sum_{c \in C^{2,u}} y_c = \text{TOTU}_u && \text{for all } u \in U \\
& && \sum_{b \in \beta^{2,u}} M_b u_{u,b} = \text{CAPU}_u && \text{for all } u \in U \\
& && \text{CAPU}_u - \text{TOTU}_u = \text{FLGU}_u && \text{for all } u \in U \\
& && y_c \geq 0 && x_{l,b} = 0/1/2/3 && z_{z,b} = 0/1/2/3 && u_{u,b} = 0/1/2/3 && w_{w,b} = 0/1/2/3 \\
& && \text{CAP}_i, \text{TOT}_i, \text{FLG}_i && \geq 0
\end{aligned}$$

Figura 4.6: modelo matemático para o problema do enfeixamento

O primeiro conjunto de restrições (atendimento da demanda) garante que a soma dos fluxos nos caminhos que atendem a um produto é igual ao volume exigido por ele (em canais E1).

O segundo conjunto de restrições calcula o fluxo total (em canais E1) passando por um arco da rede, isto é, o fluxo que passa entre dois CFs da rede, através de ligações ponto-a-ponto ou de arcos de anéis bidirecionais ou cadeias de ADMs.

O terceiro conjunto de restrições calcula a capacidade de transmissão (em canais E1) entre pares de CFs ligados através de ligações ponto-a-ponto, somando as capacidades dos candidatos escolhidos entre cada par de CFs. Candidatos com taxas de transmissão diferentes contribuem com diferentes capacidades.

O quarto conjunto de restrições calcula a capacidade de transmissão (em canais E1) de cada anel bidirecional, somando as capacidades dos candidatos escolhidos para cada anel. Novamente, candidatos com taxas de transmissão diferentes contribuem com diferentes capacidades.

O quinto conjunto de restrições calcula a capacidade de transmissão (em canais E1) de cada cadeia de ADMs, somando as capacidades dos candidatos escolhidos para cada cadeia. Novamente, candidatos com taxas de transmissão diferentes contribuem com diferentes capacidades.

O sexto conjunto de restrições calcula a capacidade total disponível em um arco (em canais E1), somando as capacidades oferecidas através de ligações ponto-a-ponto, anéis bidirecionais e cadeias de ADMs.

O sétimo conjunto de restrições calcula a folga disponível (em canais E1) entre cada par de CFs da rede através de ligações ponto-a-ponto, anéis bidirecionais ou cadeias de ADMs.

O oitavo conjunto de restrições calcula o fluxo total (em canais E1) passando através de cada anel unidirecional.

O nono conjunto de restrições calcula a capacidade de transmissão (em canais E1) em cada anel unidirecional, somando as capacidades dos candidatos escolhidos. Candidatos com taxas de transmissão diferentes contribuem com diferentes capacidades.

Note que as variáveis de cálculo de fluxo, de folga e de capacidade poderiam ser retiradas do modelo, condensando as restrições de cálculo do fluxo total e as de cálculo de capacidade em uma única restrição para cada arco da rede (ou para cada anel unidirecional, quando é o caso). Todavia, a presença destas variáveis facilita a montagem de restrições técnicas e de funções objetivos secundárias relacionadas a folgas e capacidades nos arcos da rede. Por isto, elas são mantidas, mesmo implicando em um maior número de restrições no modelo.

Um exemplo de um modelo matemático dentro deste padrão é apresentado no Apêndice I.

Importante: as variáveis de decisão discretas podem ser modeladas como variáveis inteiras propriamente ditas (valor igual a 0, 1, 2, 3,...), ou como combinações de variáveis binárias (valores iguais a 0 ou 1). Embora seja formalmente incorreto, ao longo deste trabalho se usará indistintamente a qualificação de inteiras ou binárias para as variáveis de decisão discreta.

Finalmente, para gerar modelos neste formato automaticamente, foi implementado um sistema de software (veja a Figura 4.7) com as seguintes características:

- aceita como entradas arquivos gerados pelos bancos de dados da empresa de telecomunicações, descrevendo a matriz de demanda, a proposta de configurações de equipamento candidatas e os custos e capacidades dos equipamentos utilizados;
- permite interação com o planejador para selecionar taxas de transmissão em cada um dos candidatos ou alteração nos seus custos;
- permite considerar equipamentos existentes na rede, o que é fundamental em uma atividade de planejamento;
- permite fixar configurações de equipamentos. Isto é, exigir que uma configuração sempre esteja presente nas soluções obtidas. Também permite retirar configurações, isto é, impedir que alguma configuração de equipamento entre nas soluções obtidas;
- gera automaticamente os caminhos da rede, considerando as configurações de

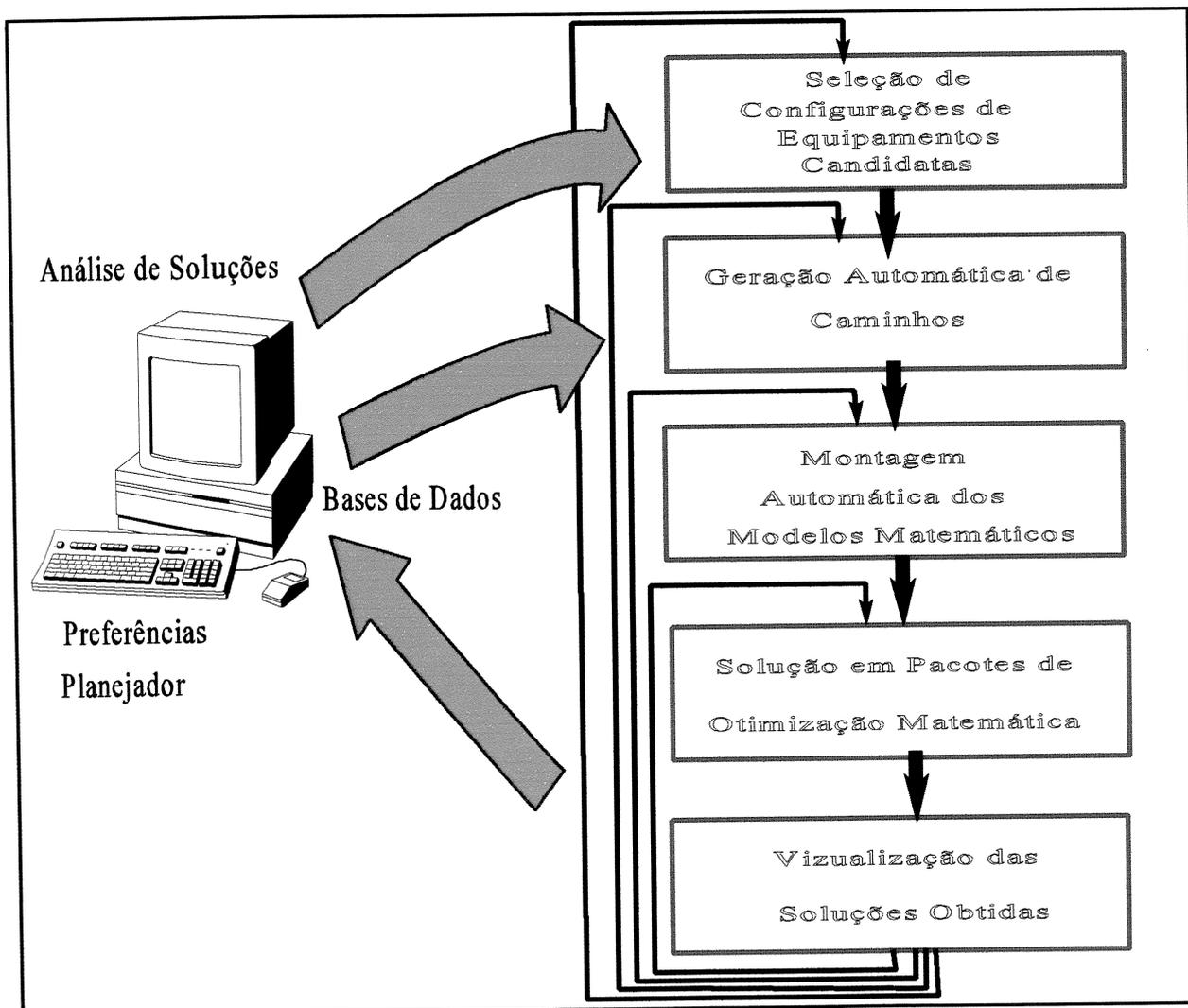


Figura 4.7: esquema básico da ferramenta computacional construída neste trabalho

equipamento propostas e as regras de agrupamento / filiação dos CFs. Usa para isto os algoritmos descritos no Capítulo III. Permite diversos tipos de interação com o planejador neste processo;

- elabora o modelo matemático como definido neste Capítulo;
- permite visualizar graficamente as soluções obtidas, o que facilita muito a análise das mesmas.

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++¹. Maiores detalhes em **Bortolon (1996-3)**.

¹A interface de visualização gráfica foi desenvolvida apenas para micro-computadores.

V. Aplicações da Metodologia Proposta em Redes Reais: Resolução do Problema de Enfeixamento de Troncos

Neste capítulo serão apresentadas resoluções do problema de enfeixamento de troncos inter-centrais em redes reais de grande porte. Três estudos de rede foram selecionados:

- estudo da Área Metropolitana de São Paulo, com uma solução baseada em hubs e ligações ponto-a-ponto (**Bortolon, 1996-1; Bortolon, 1996-2**);
- estudo da parte central da rede da Área Metropolitana de São Paulo, com uma solução baseada em anéis e cadeias (**Bortolon, 1996-4**);
- estudo da rede da Área Interurbana do Estado de São Paulo, com uma solução baseada tanto em ligações ponto-a-ponto quanto em anéis e cadeias (**Bortolon, 1996-5**).

Outras redes foram estudadas ao longo dos testes desta metodologia, como Belo Horizonte, Campinas e Santos (**Quaglia, 1995**). As redes selecionadas aqui são as maiores redes testadas até o momento, e são bastante representativas como redes urbanas e interurbanas de grande porte.

A Área Metropolitana da Cidade de São Paulo (AMSP) é uma das maiores concentrações urbanas do mundo. A previsão para o ano 2000 é que cerca de 22 milhões de habitantes vivam/trabalhem nesta cidade. Em junho de 1994, contavam-se cerca de 25000 prédios no município de São Paulo, que é o maior entre os que compõem a área metropolitana. A previsão é que no ano 2000, cerca de 10 milhões de pessoas vivam no Município de São Paulo. Um outro dado relevante é o número de agências bancárias na Cidade e no Estado; os bancos são grandes clientes do mercado de telecomunicações atual. São 5200 agências bancárias no estado de São Paulo, sendo cerca de 1500 somente na área metropolitana¹.

Na AMSP, para o ano de 1997 (18ª Fase de Planejamento), está sendo prevista uma demanda de canais E1 com volume total de **39 mil canais**. A Figura 5.1 apresenta a malha de cabos ópticos existente hoje (1996) entre os CFs da rede. Os totais (em quilômetros) dos diferentes cabos de fibra são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1
Quilometragem de Cabos Ópticos na Área Metropolitana de São Paulo

	CABO	6 FO	12 FO	18 FO	24 FO	30 FO	36 FO	72 FO
TELESP	multimodo monomodo	150	38 314	26	106 271		34 1814	354
CTBC	multimodo monomodo	14 10	44 20	30	57	47	17 110	

¹ Dados fornecidos pela TELESP - Telecomunicações de São Paulo S.A.
CTBC - Companhia Telefônica Borda do Campo

A **rede interurbana** do Estado de São Paulo (IU-SP) está em um processo de opticalização da sua rede de transporte. A previsão de crescimento da malha de cabos ópticos (em quilômetros) é mostrada na Figura 5.2. A malha de cabos prevista irá ter uma topologia semelhante à mostrada na Figura 5.3. Estudos ainda estão sendo feitos e acordos sendo negociados para ampliar o uso de cabos OPGW - em parcerias com a CESP (Centrais Elétricas de São Paulo - S.A.) , e de cabos enterrados, em parcerias com as administradoras de rodovias e ferrovias no Estado.

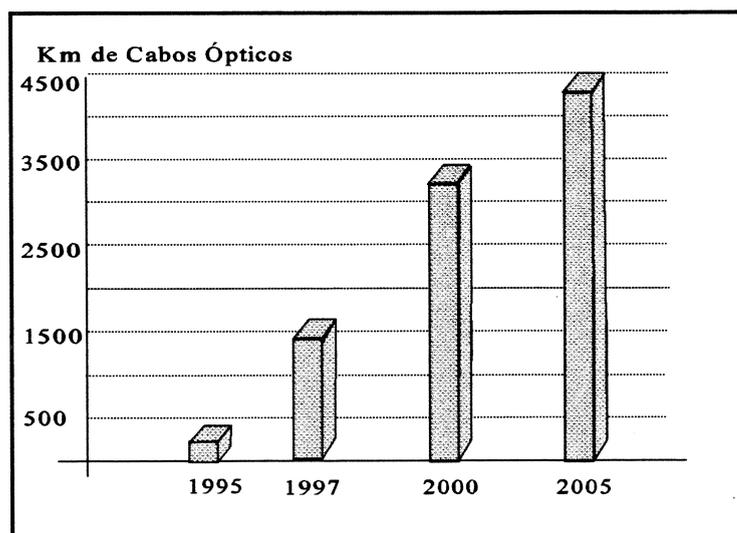
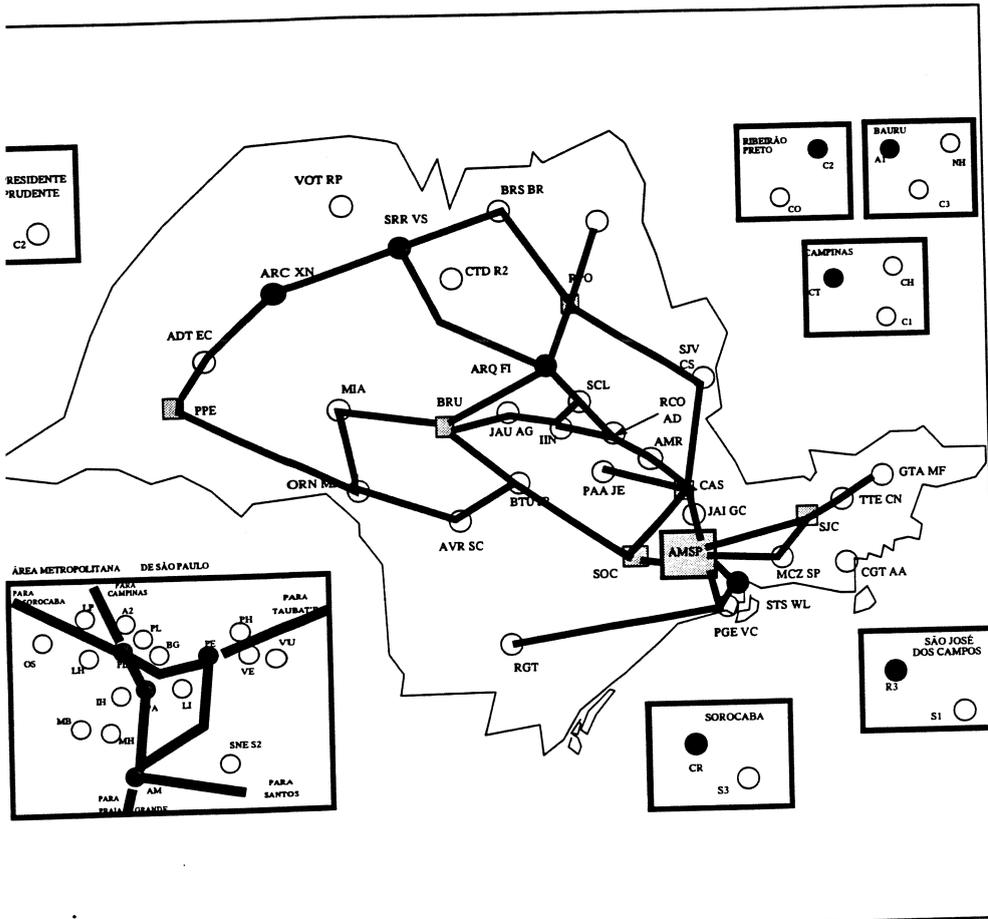


Figura 5.2: processo de opticalização da rede de transporte da Área Interurbana do estado de São Paulo

Sobre variações destas duas redes é que serão efetuados os estudos de enfeixamento deste capítulo. Ressaltamos que as matrizes de demanda usadas aqui foram obtidas **a partir de alterações propositais** sobre previsões de demandas reais, com volumes de troncos sendo alterados para mais ou para menos, mas mantendo-se o perfil de distribuição das demandas. Estudos com as matrizes de demanda reais também foram feitos, mas não são apresentados neste trabalho.

Serão apresentados estudos sobre três variações de redes diferentes:

- um estudo sobre a **AMSP**, considerando os 40 CFs principais em uma rede baseada em hubs de grande porte. Assim, dentre aqueles 40 Cfs, serão escolhidos 5 hubs com função de concentrar a demanda. Estes estudos foram realizados ao longo da fase de testes da metodologia proposta. O principal objetivo foi verificar a aplicabilidade da metodologia a redes de grande porte. Assim, em algumas situações os “planejadores” foram os próprios membros da equipe de pesquisa envolvida neste trabalho;
- um estudo sobre a **AMSP**, considerando apenas os 14 CFs principais em uma rede baseada em anéis e cadeias multiconectados, sem que um CF se sobressaísse como hub dos demais. Este estudo foi realizado na fase final de implementação/validação da metodologia, a pedido da TELESP. Embora a interface gráfica para os planejadores não estivesse pronta naquela altura, todas as participações dos planejadores foram reais - isto é, houve participação efetiva de engenheiros de telecomunicações da TELESP. Este estudo serviu, inclusive, como subsídio a uma licitação de compra de equipamentos SDH que se realizou posteriormente;
- um estudo sobre a **IU-SP**, considerando uma rede que combinasse ligações ponto-a-ponto com anéis e cadeias. Este estudo foi realizado para validação final da metodologia de planejamento proposta, inclusive da interface gráfica.



NOME DO CENTRO DE FIOS	SÍMBOLO
AMSP - Paraisópolis	PA
AMSP - Perdizes	PD
AMSP - Penha	PE
AMSP - Americanópolis	AM
AMSP - Liberdade	LI
AMSP - Vila União	VU
AMSP - Osasco	OS
AMSP - Santo André	S2
Santos	PGE VC
Prata Grande	SJC
São José dos Campos	STS WL
Taubaté	TTE CN
Guaratinguetá	GTA MF
Sorocaba	SOC
Avaré	AVR SC
Campinas	CAS
Jundiaí	JAI GC
Piracicaba	PAA JE
Rio Claro	RCO AD
Bauru	BRU
Ourinhos	ORN MP
Araraquara	ARQ FI
Ribeirão Preto	RPO
São José do Rio Preto	SRR VS
Presidente Prudente	PPE
Araçatuba	ARC XN
Barretos	BRS BR
Botucatu	BTU JP

Figura 5.3: rede de cabos de fibra óptica da rede IUSP (previsão para o ano 2000)

Nome dos CFs

V.1. Estudo da Rede da Área Metropolitana de São Paulo: solução baseada em hubs

A Figura 5.4 apresenta os Centros de Fios (CFs) entre os quais deve ser planejada uma Rede de Transporte SDH. São 91 centros de fios, com uma demanda total de pouco mais que 20000 troncos E1 entre eles.

Analisando-se a demanda entre os CFs, identificou-se que 51 deles eram CFs pendentes, isto é, CFs que tinham sua demanda quase que totalmente concentrada em um único “CF-mãe”. Retirando-se estes CFs, passa-se à rede da Figura 5.5, que tem uma demanda de canais E1 total de 18590 troncos.

Algumas informações sobre a matriz de demanda entre estes 40 CFs não-pendentes:

- dimensões e esparsidade: como são 40 CFs, contam-se 780 posições possíveis na matriz ($(40 \times 39)/2$). Destas, 695 têm valor diferente de zero. Portanto, quase 90% das demandas são **não-nulas**. Definitivamente, não é uma matriz esparsa!
- concentração da demanda: a Tabela 5.2 apresenta a distribuição dos CFs em relação ao número de demandas originadas/terminadas neles. Outro dado relevante: 16 dos CFs concentram 70% da demanda da rede.

Tabela 5.2
Distribuição do Número de CFs quanto à Quantidade de Canais E1 Originados

Quantidade de Canais E1	Número de CFs com tal quantidade de canais E1
até 250 E1	1
de 251 a 500	8
de 501 a 1000	18
de 1001 a 2000	11
acima de 2001	2

Cinco deste CFs foram escolhidos como hubs centrais pelos planejadores (a saber: PD - Perdizes, PA - Paraíso, LI - Liberdade, AM - Americanópolis e VU - Vila União). As razões para estas escolhas não foram as mesmas para todos os hubs. Por exemplo, VU foi escolhida porque lá se esperam as maiores taxas de crescimento em terminais telefônicos da rede. Vila União é um CF importante da Zona Leste de São Paulo, região populosa e com demanda reprimida de terminais telefônicos. Já PD (Perdizes) foi escolhido basicamente devido ao grande volume de troncos ali centralizados hoje (é o CF com maior volume de troncos na rede).

Uma análise de agrupamento foi feita sobre estes CFs, tomando estes CFs hub como sementes. Resultados muito semelhantes são apresentados em Aubry(1995). É bom ressaltar que os planejadores interferiram durante e após o processo de agrupamento, adaptando os resultados ao conhecimento que eles têm da rede. A Figura 5.6 apresenta a filiação “CF-home hub” adotada ao final.

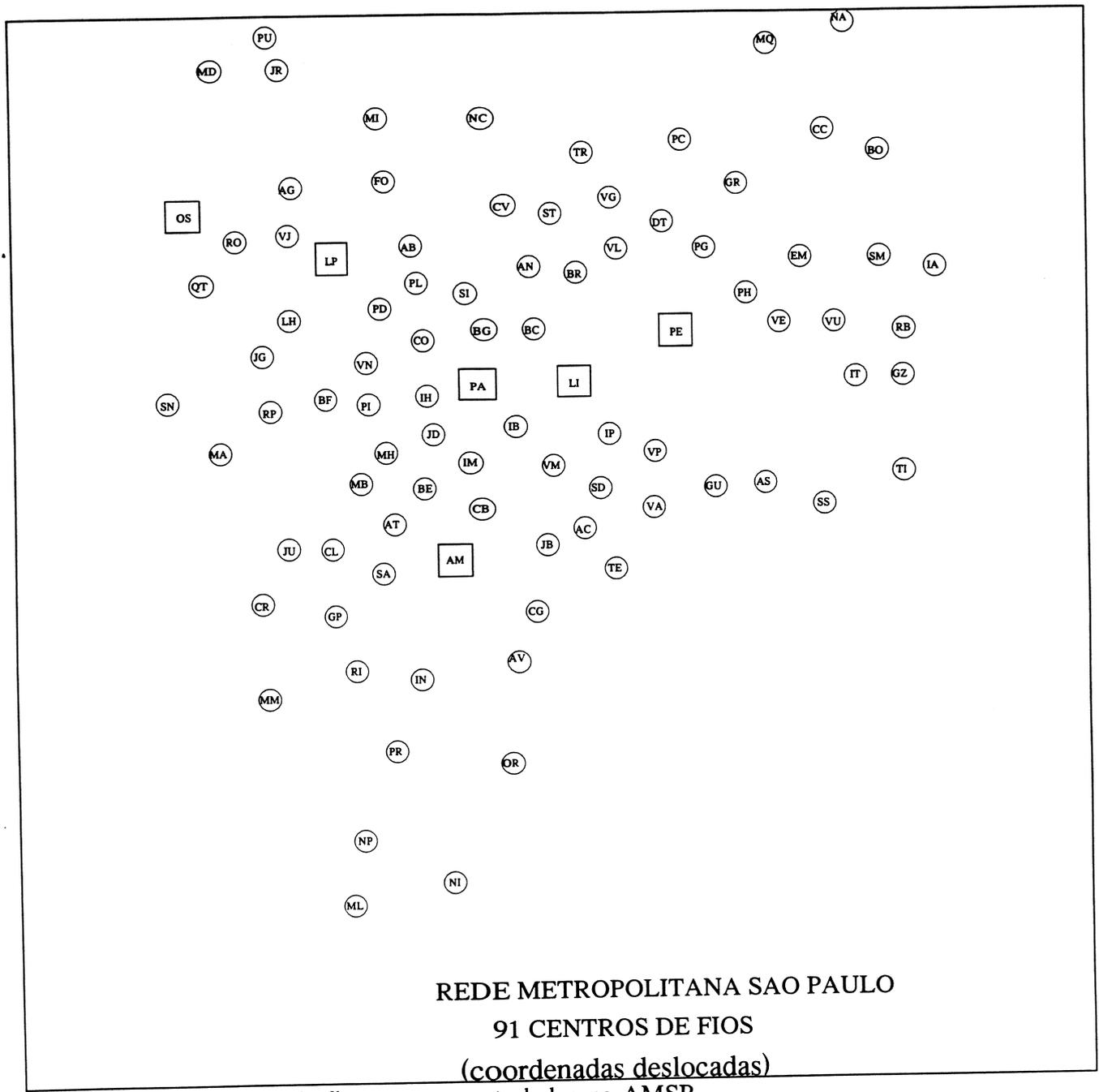


Figura 5.4: 91 centros de fios a serem estudados na AMSP

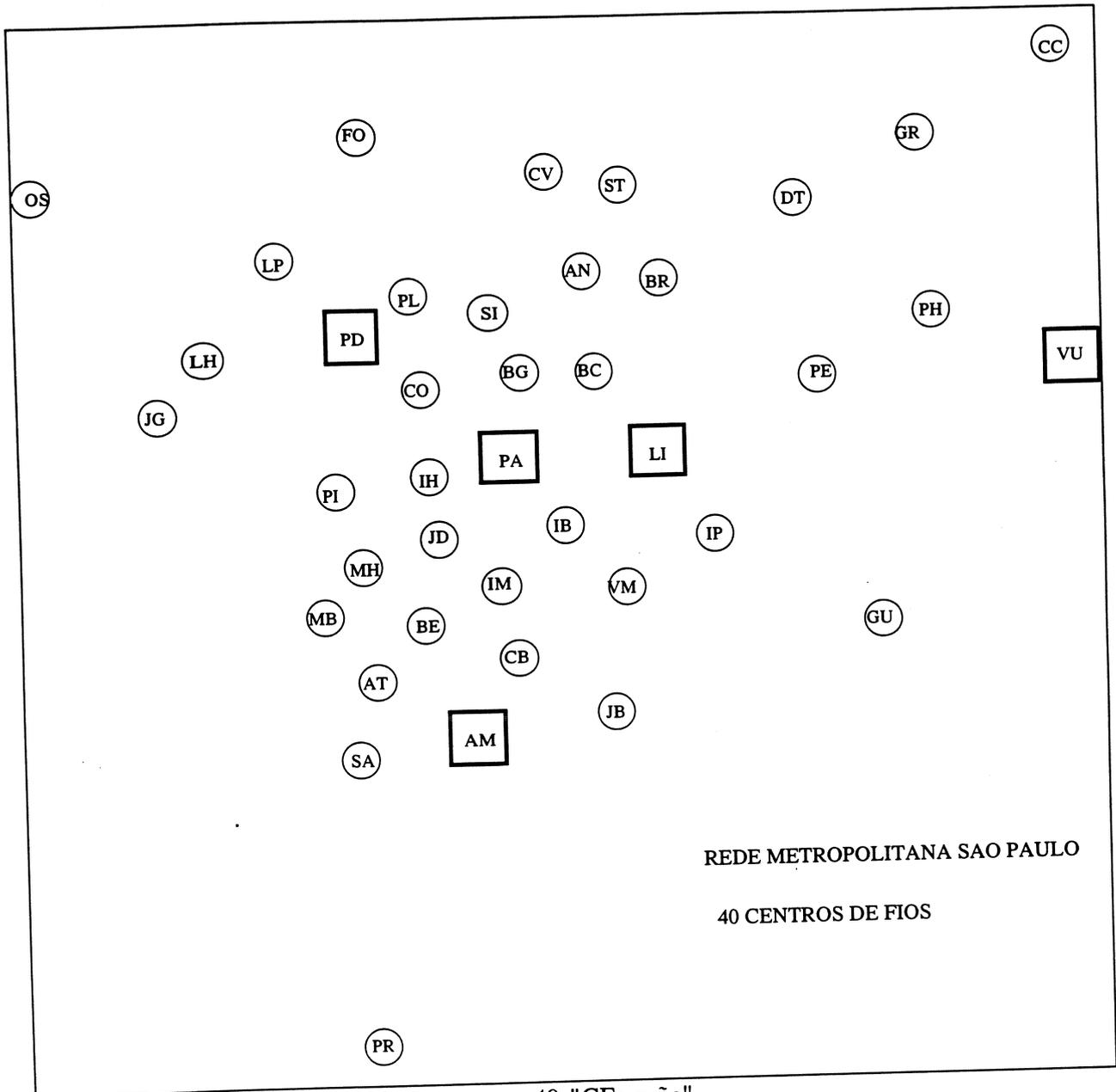


Figura 5.5: rede AMSP somente com os 40 "CFs-mãe"

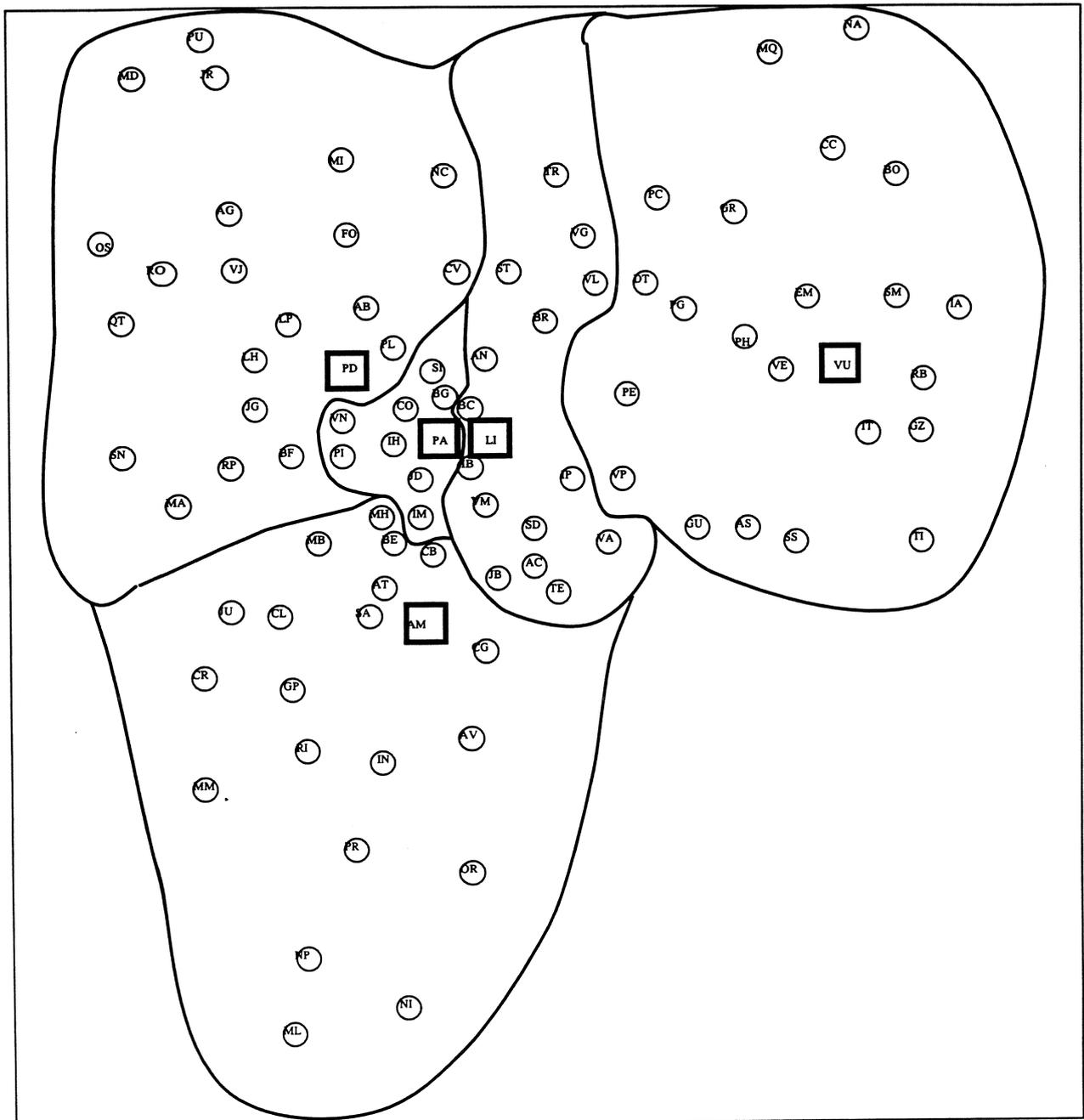


Figura 5.6: uma divisão da AMSP em clusters

Foi feita uma proposta automatizada de configurações de **equipamentos ponto-a-ponto**. Neste processo, gerou-se um **grafo de conexão com 123 arcos**. Isto é: 123 pares de CFs diferentes receberam propostas de alguma ligação ponto-a-ponto entre eles. Na modelagem matemática que se seguiu, estes candidatos ponto-a-ponto foram modelados através de 906 variáveis binárias diferentes².

Foram propostas também 45 diferentes **cadeias de ADMs**, dos tipos ilustrados na Figura 5.7. A maior parte delas foram cadeias para bi-filiação de CFs. Estas cadeias “cobriram” 36 dos 40 CFs da rede, isto é: apenas 4 CFs da rede não tiveram alguma proposta de cadeia sobre eles. Como cada cadeia podia ser proposta em mais que uma hierarquia / quantidade, durante a modelagem matemática foram geradas 147 variáveis binárias relativas a elas.

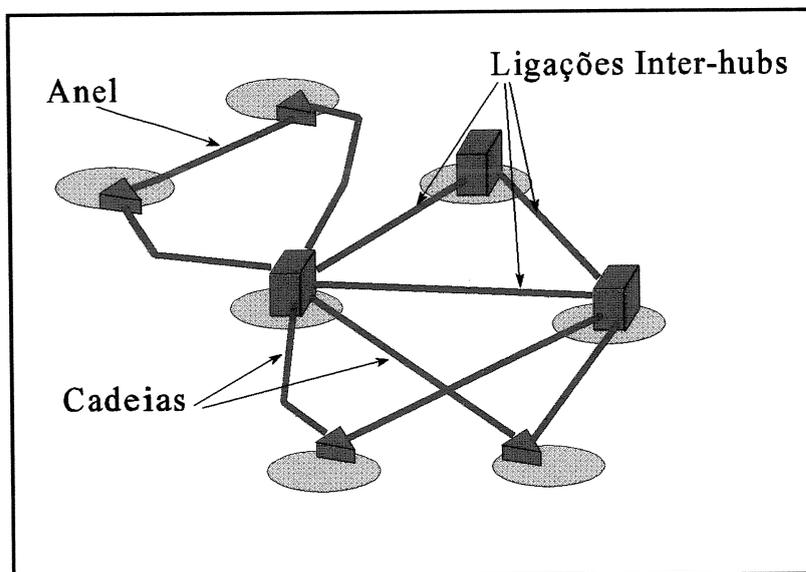


Figura 5.7: tipos de anéis e cadeias propostos no estudo de enfeixamento da AMSP com 40 nós

Foram propostas também 14 diferentes topologias de **anéis bi-direcionais**, envolvendo 18 CFs distintos. Estes anéis foram responsáveis por 54 variáveis binárias no modelo matemático final.

Durante a **geração automática de caminhos**, foram criados cerca de 6500 caminhos diferentes sobre a rede. Em média, portanto, cerca de uma dezena de caminhos para cada demanda.

Somando-se os arcos das cadeias, dos anéis e as propostas de equipamentos ponto-a-ponto, 245 diferentes pares de CFs receberam alguma conexão entre si. Isto é: o **grafo de conexão final** apresentou 245 arcos.

Em resumo, o modelo matemático gerado apresentou as seguintes dimensões:

- cerca de 6500 variáveis “de fluxo sobre caminhos”, que são variáveis reais;
- 695 restrições de “atendimento à demanda”;
- 245 restrições de “capacidade de arcos”;
- 1107 variáveis binárias, sendo 147 relativas a cadeias de ADMs, 54 a anéis bidirecionais e 906 relativas a variáveis ponto-a-ponto.

Dada a quantidade de variáveis binárias e o tamanho do problema de programação linear a ser resolvido a cada iteração do Branch & Bound, o software usado para resolver o problema tornou-se “insuficiente”. Assim, alguns métodos de simplificação e heurísticas de resolução foram

²A quantidade de variáveis binárias é exagerada neste estudo, pois não se aplicou aqui a regra de simplificação do planejamento citada no capítulo III. De fato, este estudo foi feito antes que se adotasse definitivamente esta regra na proposta de equipamentos ponto-a-ponto;

desenvolvidos. São apresentadas aqui três métodos diferentes (Bortolon, 1995):

1. Estudar somente as conexões ponto-a-ponto da hierarquia SDH: com isto, busca-se reduzir o número de variáveis binárias do modelo. São eliminadas todas as variáveis binárias relacionadas a anéis e cadeias, e a enlaces ponto-a-ponto a 34 Mbps. Sobram apenas aquelas relacionadas a enlaces ponto-a-ponto a 155, 622 e 2488 Mbps. Para o problema da AMSP (considerando apenas os 40 CFs centrais), o número de variáveis binárias é reduzido de 1107 para 440;
2. Fixar o backbone e usar um procedimento heurístico para resolver o enfeixamento: fixar os valores das variáveis relacionadas ao backbone inter-hubs é uma forma de restringir o espaço de busca das soluções do enfeixamento. Como só esta “fixação” não foi suficiente, elaborou-se um algoritmo heurístico para obter boas soluções em tempos aceitáveis. Basicamente, a heurística proposta é uma repetição de passos de categorização, fixação e relaxamento da integralidade de variáveis. Um resumo é apresentado a seguir:
 - categorizar as variáveis binárias de acordo com a capacidade de transporte associada a cada uma delas. Assim, anéis e enlaces a 2488 Mbps estão em uma categoria “superior”, enquanto enlaces a 155 Mbps estão em uma categoria inferior;
 - as “*N* primeiras” variáveis (em ordem decrescente de categoria) permanecem como variáveis binárias, enquanto todas as outras têm sua restrição de integralidade relaxada. Com isto, obtém-se um problema de programação inteira “menor”, que pode ser resolvido em tempo razoável;
 - algumas variáveis podem ser fixadas usando-se a solução do problema anterior como base. A partir daí, repete-se a sequência: categorizar - relaxar - fixar.
3. adotar uma série de restrições e fixações de valores de variáveis obtidas através de sugestões dos planejadores, incluindo-as no modelo matemático. Por exemplo, escolhe-se previamente o backbone inter-hubs (da mesma forma que no método anterior), provocando uma fixação do valor de algumas variáveis binárias antes de se iniciar a busca. Mas, principalmente, estabelecem-se restrições “técnicas” para os principais CFs da rede. Por exemplo, qualquer CF com volume total de troncos acima de 500 canais E1 passa a ser obrigado a ter associado a ele (pelo menos) um equipamento a 622 Mbps. CFs com volume superior a 1000 são obrigados a ter associados a eles (pelo menos) um equipamento a 2488 Mbps. Estas restrições são formuladas matematicamente e acrescentadas ao modelo do enfeixamento.

● Solução 1 da AMSP: somente ligações ponto-a-ponto

É muito pouco provável que uma rede de transporte SDH de grande porte seja planejada usando-se apenas ligações ponto-a-ponto, isto é, que sejam empregados apenas equipamentos OLTM e SDXC. O mais provável é que ocorra uma combinação de ligações ponto-a-ponto com anéis e cadeias de ADMs. 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.

Neste estudo, todos os caminhos que dependiam das topologias de anéis e cadeias foram retirados do modelo de fluxo multiprodutos. Isto implicou em uma redução também no número de variáveis de fluxo de canais nos caminhos da rede (que são as variáveis “y” no modelo matemático). O número destas variáveis foi reduzido de cerca de 6500 para cerca de 1700.

Uma utilidade de estudos de enfeixamento baseando-se apenas em ligações ponto-a-ponto é a possibilidade de comparar diversas soluções “razoáveis”, observando nelas algum enlace ponto-a-ponto que ocorra repetidamente. Na rede AMSP, isto ocorreu - por exemplo - com o CF “PR” (Parelheiros), que neste estudo se ligou sempre a “AM” através de um enlace a 622 Mbps. Analisando-se este tipo de ocorrências, pode-se fixar o valor das variáveis binárias relacionadas àqueles arcos (como efetivamente foi feito com o arco “AM-PR”), ou outras relacionadas àqueles CFs (por exemplo, eliminaram-se ligações ponto-a-ponto entre “PR-PA” e “PR-LI”). Com isto, vai-se reduzindo a quantidade de variáveis binárias do problema e os tempos de obtenção de soluções através dos algoritmos de busca. Ressaltamos que isto é mais viável se houver suporte computacional com interfaces gráficas, permitindo alterar o modelo de forma “transparente” para o usuário. Isto é, o usuário do sistema computacional não precisaria conhecer o formato do arquivo “padrão .LP” que serve de entrada ao CPLEX.

Uma sugestão interessante ao se utilizar estratégias de busca para a solução do problema do enfeixamento de troncos em redes de grande porte é estabelecer uma ordem de precedência das variáveis em função da taxa de transmissão dos enlaces que elas (as variáveis) representam. Neste estudo, por exemplo, o processo de B&B (Branch & Bound) que é utilizado no CPLEX, foi dirigido de maneira a primeiro se estabelecerem os valores (zero ou um) de todas as variáveis relacionadas a enlaces a 2488 Mbps, para somente então estabelecer os valores de variáveis relacionadas a enlaces a 622 Mbps, e assim por diante.

Esta estratégia não garante que a solução ótima é encontrada mais rapidamente. Todavia, diversas experiências feitas com redes de grande porte geraram maiores quantidades de soluções viáveis em menos tempo de processamento adotando esta ordem de prioridade. Isto atende ao objetivo do estudo de redes usando apenas enlaces ponto-a-ponto, que é obter uma boa quantidade de soluções para análise posterior.

Em um dos estudos de Enfeixamento mais significativos feitos sobre a AMSP usando-se somente enlaces ponto-a-ponto, além de priorizar variáveis de acordo com a “taxa de transmissão”, eliminou-se também a possibilidade de emprego de enlaces a 34 Mbps. Com isto, o número de variáveis binárias foi reduzido de 906 para 440. Algumas observações sobre este estudo:

- a solução do problema de programação linear obtido com o relaxamento das restrições de integralidade das variáveis binárias foi de \$ 11.2×10^6 . Assim, este é o *lower-bound inicial* para o valor da solução ótima.
- a melhor solução obtida após a exploração de 64×10^3 nós da árvore de busca foi de \$ 13.5×10^6 . E após todos estes nós terem sido explorados, o *lower-bound* para o valor da solução ótima foi de \$ 11.9×10^6 . Isto é, por mais que se continuasse a busca por

novas soluções, garante-se que não existe nenhuma com custo inferior a \$ 11.9 x 10⁶.

- em uma estação RISC (com capacidade equivalente a uma SUN-Sparc10), a obtenção desta “melhor solução” tomou mais de 8 horas. Isto é, mais que um dia útil de trabalho. A melhor solução obtida é apresentada na Figura 5.8. Ela compreende 20 enlaces na taxa 155 Mbps, 26 na taxa 622 Mbps e 34 na taxa de 2488 Mbps. Algumas observações sobre esta solução:
- note que ela é uma solução em que se privilegiam topologias em estrela, com a maioria dos CFs sendo filiados a um único hub;
- ocorrem apenas 8 ligações CF-a-CF, sem passar por hubs. São elas:
 - a 622 Mbps: GR-PE, GU-PE
 - a 155 Mbps: LP-JG, OS-IB, VM-MH, IM-BE, MH-BE, MH-CB

Esta solução - ao ser apresentada aos planejadores - foi bastante criticada. Por exemplo, observou-se que ela provocaria uma excessiva concentração sobre os CFs hub, o que comprometeria a confiabilidade da mesma³. Estas críticas, todavia, podem ser modeladas através de restrições técnicas adicionais e acrescentadas ao modelo, como é sugerido a seguir.

Para limitar a concentração de canais E1 sobre os hubs, uma alternativa é adicionar uma restrição ao modelo de programação linear inteira mista que é submetido ao Branch & Bound. Tal restrição procura limitar a soma do fluxo de canais que passa em cada um dos CFs hub a uma porcentagem do fluxo total da rede.

No caso, o fluxo total da rede é de cerca de 18000 canais. Como são 5 hubs, se todo canal da rede passasse por apenas um hub, seriam cerca de 3300 canais fluindo através de cada hub. Todavia, há que se considerar a demanda originada nos próprios CFs hub. Em PD (Perdizes), por exemplo, são originados cerca de 2000 canais E1. Uma possibilidade, então, seria arbitrar que nenhum hub poderia rotear uma quantidade de canais superior a 1500 canais, por exemplo. E não se contaria nesta soma aqueles canais E1 originados nos próprios hubs.

Note que o objetivo do problema de enfeixamento continua a ser minimizar o custo total, e se mantém todas as restrições descritas no Capítulo IV. Apenas se adiciona um grupo de restrições a mais (uma para cada um dos hubs da rede). E este tipo de restrição, como um “benefício colateral”, acaba por aumentar a quantidade de ligações CF-a-CF e as ocorrências de dupla filiação na rede, cujo baixo número também foram objetivo das críticas dos planejadores.

Ao formular esta restrição empregando as variáveis usadas na definição do modelo matemático do enfeixamento, chega-se ao seguinte tipo de “equação”:

Em cada hub “H”, o somatório do valor das variáveis de fluxo em caminhos (variáveis y_c), dos caminhos que passam através de “H”, tais que atendam a demandas não originadas/terminadas em “H” deve ser menor que 1500 canais.

A implementação computacional da adição destas equações ao modelo matemático é relativamente simples. Esta é uma qualidade positiva da abordagem de planejamento adotada aqui: sugestões elaboradas pelos planejadores muitas vezes podem ser acatadas pelos modelos de otimização, uma flexibilidade que se apontou necessária ainda no início deste tese.

³Outras críticas também foram feitas, mas somente esta será analisada aqui. Por exemplo, fez-se objeção à falta de dupla filiação de CFs importantes como VM (Vila Mariana) e JD (Jardins), entre outros.

- **Solução 2 da AMSP: fixando o backbone e adotando um procedimento heurístico de solução**

O segundo método de solução para a rede da AMSP apresentado aqui aproveita sugestões dos planejadores sobre o backbone inter-hubs e um procedimento heurístico desenvolvido ao longo dos testes da metodologia.

A sugestão dos planejadores foi simplesmente “fixar” as taxas de transmissão a serem usadas nos enlaces inter-hubs. Assim, nos “arcos” AM-VU e PD-VU, seriam usados somente um módulo de transmissão na taxa de 622 Mbps, enquanto em todos os outros “arcos inter-hubs” seria usado somente um módulo, na taxa de 2488 Mbps, com uma exceção entre PA e LI (Paraíso e Liberdade): neste arco seriam usados dois módulos na taxa de 2488 Mbps.

Quanto à metodologia de solução, é um método baseado em sucessivas iterações de busca via Branch & Bound (B&B), com fixações e linearizações de variáveis entre cada uma das iterações.

Fixar uma variável significa pré-estabelecer seu valor em 1 (um) antes de uma busca B&B, determinando que uma configuração de equipamentos (anel, cadeia ou ponto-a-ponto), em alguma taxa de transmissão, estará presente em qualquer solução de enfeixamento obtida. Também se pode pré-estabelecer o valor da variável em 0 (zero), o que obriga a que uma configuração de equipamentos **não** esteja presente em nenhuma solução de enfeixamento naquela iteração de busca.

Linearizar uma variável significa relaxar a restrição de integralidade associada a ela no modelo matemático. Isto diminui o custo computacional da busca B&B. Ao mesmo tempo, cria uma “*distorção*” no custo da solução sendo analisada, como é explicado abaixo.

Por exemplo, suponha que um enlace ponto-a-ponto a 155 Mbps tenha um custo igual a \$100. Assim, se este enlace for utilizado para se montar uma solução de enfeixamento da rede, então a função objetivo deve ser acrescida de \$100, independente do fluxo que passe neste enlace. Porém, suponha agora que a variável relativa a este enlace ponto-a-ponto foi “linearizada”. Se este enlace for utilizado para se montar uma solução de enfeixamento da rede, então a função objetivo será acrescida de um valor entre zero e \$100, proporcional ao fluxo que passe pelo enlace, naquela solução de enfeixamento. Como se trata de um custo fixo modular, haverá uma *distorção*, determinada pela ocupação do módulo.

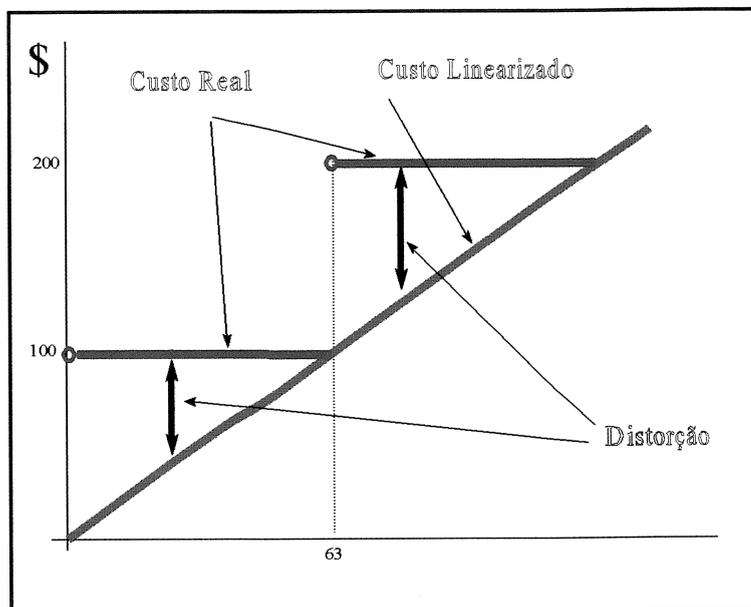


Figura 5.9: diferença entre os custos real e linearizado de uma variável relativa a um enlace ponto-a-ponto na taxa de 155 Mbps

Note que a *distorção* é maior quando o valor da variável se aproxima de zero ou imediatamente após “ultrapassar” o valor de 63, que equivale à capacidade de canais do enlace a 155 Mbps. Da

mesma forma, a distorção tende a zero quando o valor da variável se aproxima de 63 (ou um múltiplo disso). **Garcia (1987)**, sugere uma heurística de penalização sobre o custo destas variáveis linearizadas, de forma a corrigir a distorção do valor da função objetivo a cada vez que se obtém uma solução de enfeixamento em redes PDH. Isto é feito como ilustrado na Figura 5.10. Note que, ao obter um valor da variável igual a 1,42 (equivalente a um fluxo de 90 canais sobre o enlace ponto-a-ponto a 155 Mbps), a nova função de custo “penalizada” assumiria um novo custo por canal no segundo módulo de transmissão - isto é, a partir do valor 1.

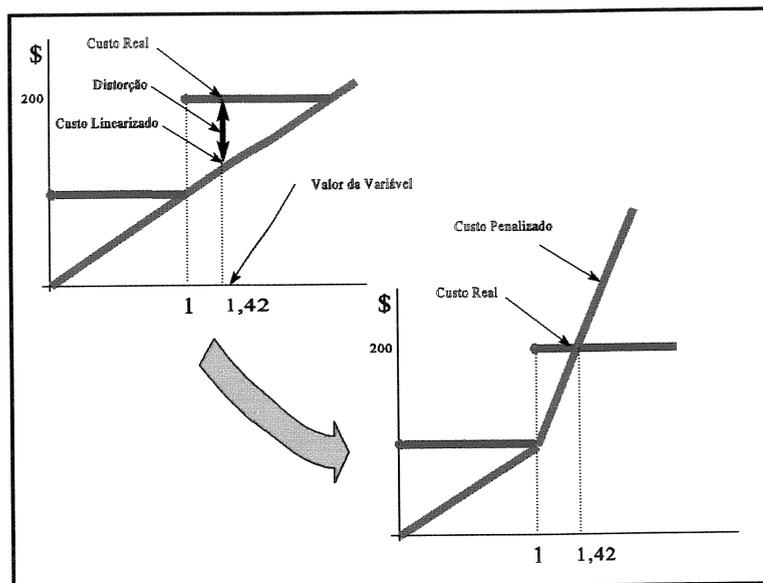


Figura 5.10: função de custo penalizada proposta por **Garcia (1987)**

Bergamaschi (1996) propõe uma adaptação desta regra de penalização, que dispensa o emprego de algoritmos especializados de programação linear por partes e é ilustrada na Figura 5.11. Por outro lado, ela exige que se trabalhem com mais variáveis a cada iteração, umas fixadas, outras penalizadas. Mais que isto, **Bergamaschi (1996)** propõe e automatiza um método heurístico que combina etapas de fixação, linearização e penalização de variáveis, e aplica este método a redes SDH de grande porte modeladas da mesma forma que proposto no Capítulo IV do presente trabalho.

Uma diferença entre os métodos heurísticos propostos por **Garcia (1987)** e **Bergamaschi (1996)**

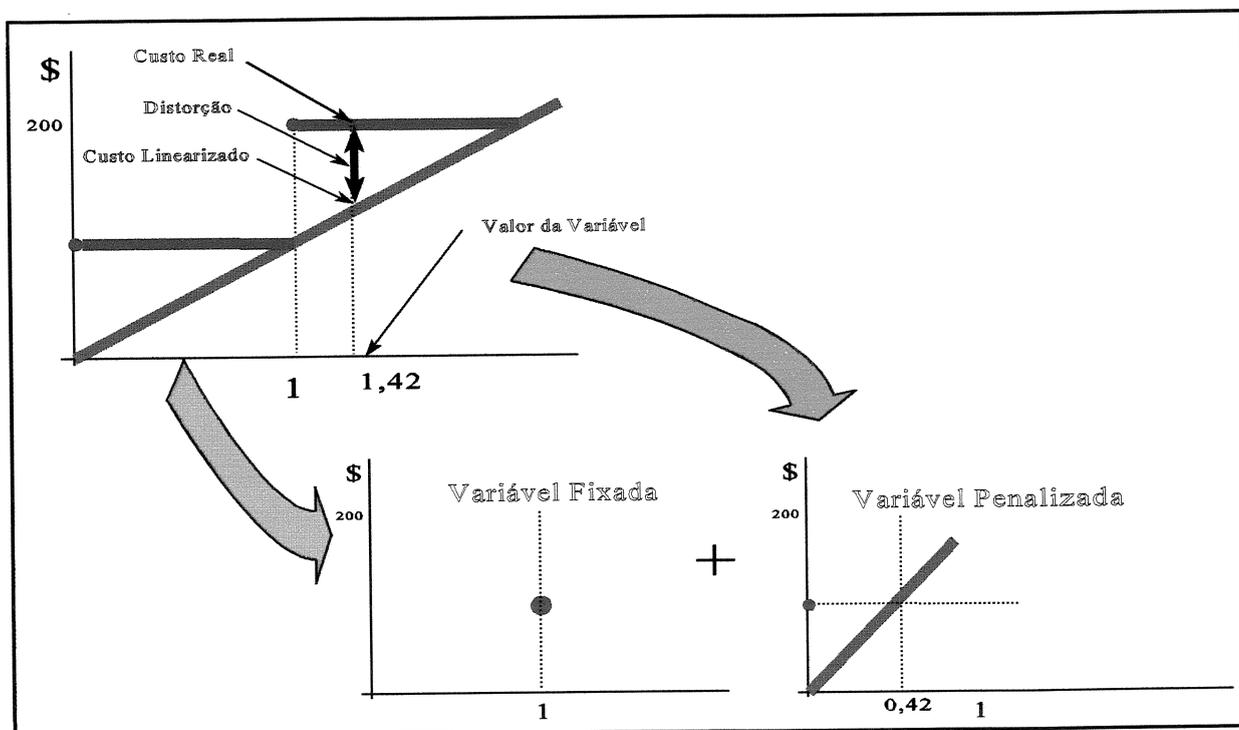


Figura 5.11: heurística de penalização proposta por **Bergamaschi (1996)**

é que o primeiro realiza etapas de penalização ou linearização *simultaneamente* em todas as variáveis do problema, a cada iteração do método heurístico. Já o último realiza fixação, linearização ou penalização das variáveis *alternativamente*, a cada iteração do método heurístico proposto, dependendo do valor da variável sendo analisada.

No estudo apresentado aqui, empregou-se um método heurístico semelhante ao proposto por **Bergamaschi (1996)**, descrito por **Bortolon (1996-1)**. Nele, basicamente, são efetuados os seguintes passos (veja a Figura 5.12):

1. Toda variável relativa a enlaces a **2488 Mbps** é mantida como inteira, enquanto todas as outras variáveis são “linearizadas”. O problema de programação linear inteira mista (MILPP) resultante é resolvido através de B&B;
 2. As variáveis são categorizadas de acordo com seu valor e hierarquia (taxa de transmissão):
 - Variáveis inteiras com valor igual a um na solução final do passo anterior são fixadas em 1;
 - Variáveis inteiras com valor igual a zero, por sua vez, permanecem como inteiras, para competir em um próximo MILPP;
 - Algumas variáveis linearizadas com fluxo diferente de zero são selecionadas para retornar à condição de inteiras. Escolhem-se aquelas que alcançaram os maiores valores equivalentes de canais E1, respeitando-se um limite de - por exemplo - 60 variáveis inteiras selecionadas a cada passagem. Variáveis não selecionadas permanecem como variáveis “linearizadas”.
- O novo MILPP resultantes é resolvido através de B&B;

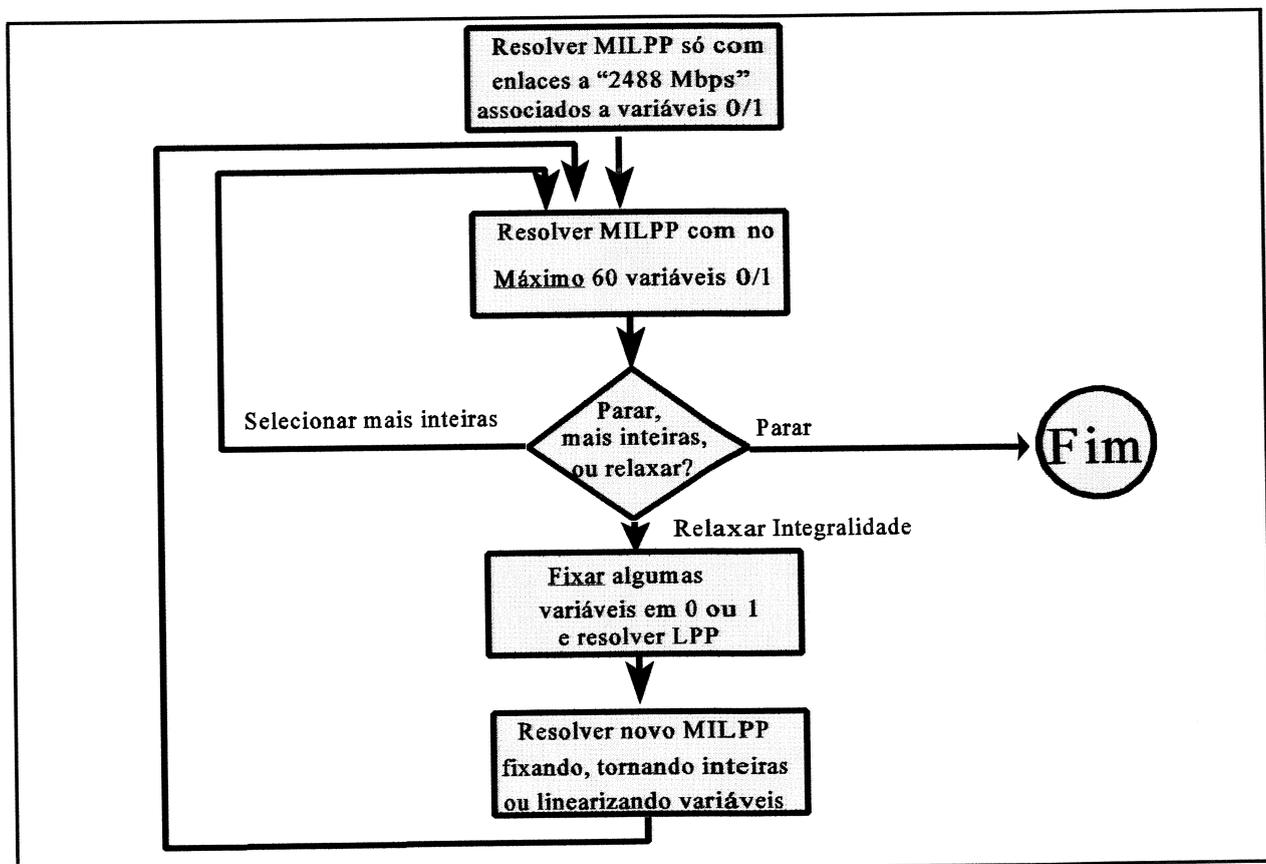


Figura 5.12: método heurístico de solução do problema de enfeixamento

3. Escolhe-se uma entre três opções: repetir o passo 2, passar ao passo 4 ou finalizar o procedimento. A escolha é feita arbitrariamente, baseado em um raciocínio que é explicado a seguir.
4. Variáveis inteiras ou lineares selecionadas pelo usuário são fixadas em 1 (um) ou 0 (zero). Todas as outras restrições de integralidade são relaxadas, isto é, toda variável não fixada é linearizada. Um problema de programação linear “pura” (LPP) é resolvido;
5. Variáveis linearizadas que alcançaram valores iguais ou próximo a 1 no passo anterior são fixadas em 1; variáveis com valor próximo a zero permanecem lineares. O restante das variáveis linearizadas do passo anterior são transformadas em variáveis inteiras. Forma-se, com isto, um novo MILPP, que é resolvido através de B&B. Volta-se então ao passo 2.

Cada resolução de MILPP pode ser considerada uma competição entre variáveis inteiras, ou seja, entre enlaces das diversas hierarquias. O *passo 1* procura obter uma solução de rede *razoável* para os enlaces na hierarquia mais alta (2488 Mbps). Como somente eles recebem variáveis inteiras neste primeiro passo, ocorre uma competição “de igual para igual” entre eles. Já as variáveis relacionadas a taxas de transmissão menores competem com um custo subestimado, já que suas variáveis são linearizadas.

Da competição do passo 1, um subconjunto de enlaces a 2488 Mbps sai “vencedor”. Estes são fixados. No passo 2, todos os enlaces 2488 Mbps “perdedores” passam a competir contra os enlaces a 622 Mbps melhor classificados no passo 1. Note que, antes, estes enlaces entravam favorecidos na competição, pois tinham seu custo subestimado (linearizado), e agora - no passo 2 - têm que competir utilizando seu custo “real”, pois passam a ser representados por variáveis inteiras. Mantendo-se um conjunto relativamente pequeno (60) de variáveis inteiras, garante-se que a solução ótima é rapidamente encontrada.

Da competição feita no passo 2, um novo subconjunto de vencedores é obtido. Com isto, podem ser incluídos novos enlaces no conjunto de variáveis inteiras. Há uma convergência a uma solução factível, formada somente através de variáveis inteiras e fixadas. No *passo 3*, decide-se **entre**:

- finalizar o processo, com um conjunto de soluções factíveis já obtido;
- retornar ao passo 2, mantendo-se no processo até convergir a uma solução formada apenas por variáveis fixadas e inteiras;
- ou passar ao passo 4, que se irá *mexer* na solução, para que a próxima sequência de passos do tipo 2 chegue a um novo ponto de convergência, diferente do atual;

No *passo 4*, inverte-se o valor de algumas variáveis que haviam sido fixadas (de zero para um e vice versa) - *retirando* ou *colocando* configurações de equipamento na solução existente. O usuário-planejador é quem faz a seleção destas mudanças. O critério para esta seleção fica por conta do planejador. Enlaces que ele julgue inconvenientes por qualquer motivo são desabilitados para as próximas competições, e suas variáveis fixadas em zero. Enlaces que ele julgue muito bons, ao contrário, são pré-declarados “vencedores”, e suas variáveis fixadas em 1.

Variáveis não-fixadas são então linearizadas, e um problema de programação linear é resolvido. O objetivo é identificar entre as diversas hierarquias quais são os competidores em “melhores condições”, considerando que alguns enlaces estão já fixados. Com isto, tenta-se afastar do ótimo local para onde convergiu a sequência de competições anterior. Linearizar todas as variáveis não-fixadas é só uma forma arbitrária de fazê-lo.

O *passo 5* é uma reinicialização para uma nova sequência de passos 2. A partir do resultado do passo 4, seleciona-se quais variáveis irão passar a inteiras, ser fixadas em zero ou em um, ou permanecer como lineares. Usam-se os mesmos critérios do passo 2.

Este processo foi aplicado à rede da AMSP, obtendo-se a solução da Figura 5.13. O custo desta solução da Figura 5.13 foi de 13.5×10^6 , bastante próximo da solução ponto-a-ponto obtida via B&B puro (aquela da Figura 5.8). Todavia, este novo resultado foi obtido a partir de um conjunto muito maior de variáveis (1107 contra 440), em muito menos tempo (menos de 1 hora de processamento, contra mais de 8 horas da solução ponto-a-ponto). A rede obtida compreende 3 enlaces ponto-a-ponto a 34 Mbps, 22 a 622 Mbps e 30 a 2488 Mbps. Também inclui 10 anéis e cadeias a 622 Mbps e 1 a 2488 Mbps.

Bergamaschi (1996) descreve como aperfeiçoar e automatizar este método para obter tempos de processamento ainda menores.

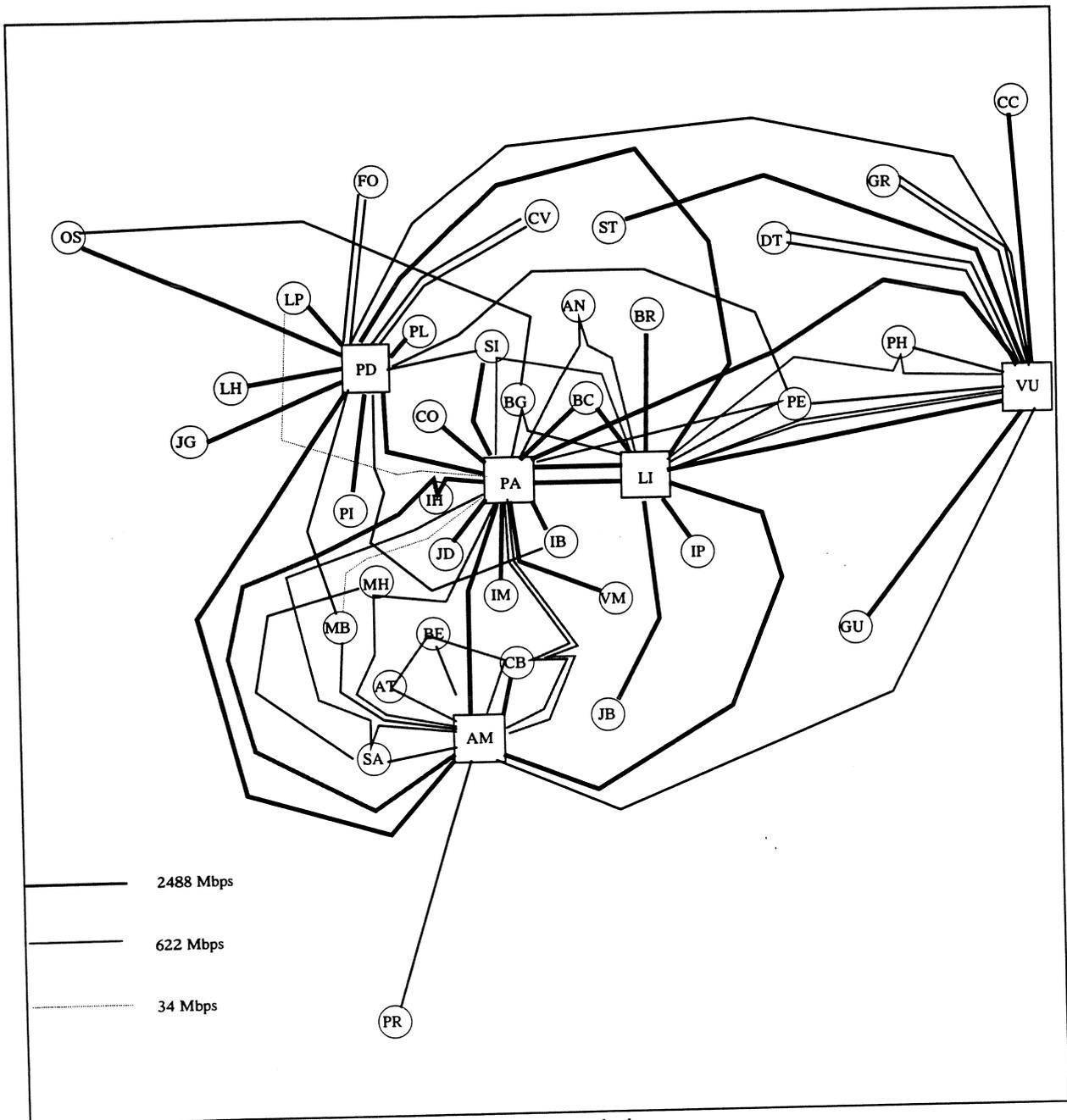


Figura 5.13: rede obtida através de método heurístico

● Solução 3 da AMSP: incorporando mais sugestões dos planejadores

O terceiro estudo tomando como base a rede da AMSP, reduzida aos seus 40 CFs mais importantes é descrito aqui. Analisando as soluções anteriores, identificaram-se as seguintes características como desejáveis na rede solução:

- que o backbone tivesse as mesmas características daquele proposto no Estudo 2, isto é: que o par de CFs-hub PA-LI fosse conectado por 2 enlaces a 2488 Mbps, que AM-PA, AM-LI, PD-AM, PD-PA, PD-LI fossem conectados por 1 enlace a 2488 Mbps, e que AM-VU e LI-VU fossem conectados por um enlace a 622 Mbps;
- que não se utilizasse nenhum enlace ponto-a-ponto a 34 Mbps; somente se aceitasse enlaces ponto-a-ponto a 155, 622 e 2488 Mbps;
- que não se utilizasse nenhum anel ou cadeia a 155 Mbps; somente se aceitasse anéis e cadeias a 622 e 2488 Mbps;
- que CFs importantes da rede, como OS (Osasco), VM (Vila Mariana), IB (Ibirapuera), JD (Jardins), entre outros fossem conectados por pelo menos um enlace de alta hierarquia (2488 Mbps), e por no máximo 2, 3 ou 4 destes enlaces, dependendo do volume de canais originado ali;
- da mesma forma, CFs de importância média, como FO (Freguesia do Ó), CV (Casa Verde), BG (Basílio da Gama), AN (Anhangabaú), BE (Berrini), seriam conectados por pelo menos um enlace de “média hierarquia” (622 Mbps), mas aceitando os de alta hierarquia (2488 Mbps), se fosse esta a solução mais barata;

As duas primeiras características foram assimiladas pelo modelo matemático através de fixação de variáveis binárias nos valores zero ou um, dependendo do caso. Já a terceira característica exigiu que se adicionassem restrições técnicas ao modelo. Estas restrições técnicas são descritas abaixo:

Em cada CF “importante” H , o somatório do valor das variáveis de instalação de configuração de equipamentos (variáveis X_i, Z_i, W_i), relacionadas a equipamentos de alta hierarquia instalados em “H”, deve ser maior ou igual a 1, e menor ou igual a um limite máximo, dependendo do fluxo total originado em H .

O efeito que estas restrições adicionais criaram foi, principalmente, o de reduzir o universo das soluções factíveis, e por consequência, o tempo de processamento dos algoritmos de branch & bound. Os tempos de processamento dos dois últimos estudos (procedimento heurístico e incorporando sugestões dos planejadores) são comparáveis, e tomaram cerca de 1 hora de processamento cada. Isto é um progresso em relação às mais de 8 horas de processamento que o primeiro estudo exigiu, mas ainda é um tempo um tanto excessivo para uma ferramenta interativa.

Em resumo, os três estudos sobre a rede AMSP reduzida aos seus 40 CFs mais importantes permitiram as seguintes conclusões:

- o **lower-bound** fornecido pelo problema de programação linear obtido pelo relaxamento das restrições de integralidade do modelo de enfileiramento é **de má qualidade**, não permitindo que se façam muitos cortes (bounds) nos algoritmos de busca. Esta observação já era feita por **Gavish et alii (1989)**, em um problema semelhante. A sugestão feita por aqueles autores é a mesma que se faz aqui: adicionar restrições técnicas para melhorar este lower-bound. Algumas restrições técnicas foram testadas nestes estudos (limitar o número de enlaces por CF, ou mesmo o fluxo total nos hubs), obtendo-se resultados promissores;
- a **participação dos planejadores** é uma forma interessante de dirigir o processo de busca. Isto foi aplicado no segundo e no terceiro estudos, mas identificou-se que sem uma interface gráfica este tipo de participação é um tanto “tediosa”. Uma combinação interessante seria reunir interfaces gráficas mais “amigáveis” a algoritmos de geração de soluções que pudessem incorporar as sugestões dos planejadores. Algoritmos baseados em busca genéticas, semelhantes aos propostos por **Palmer & Kershenbaum (1995)** podem ser uma alternativa interessante. Seria preciso, entretanto, elaborar uma forma de tomar o subproblema de programação linear obtido a partir do modelo proposto aqui, e acrescentar-lhe, interativamente, as restrições técnicas que vão sendo propostas pelos planejadores.

Observação: Efetivamente, os estudos de redes baseadas em hubs foram praticamente “congelados” a partir de certo momento da pesquisa. Por razões tecnológicas, a estratégia da maior parte das empresas operadoras de telecomunicações atualmente é evitar - por enquanto - a introdução de cross-connects (SDXC) de grande porte. Evita-se com isto a formação de grandes concentrações de canais na rede. Alguns fabricantes sugerem, inclusive, que este tipo de solução não chegará a ocorrer, pois seria um compromisso muito arriscado em relação à confiabilidade da rede e de restauração lenta em caso de falhas.

Assim, decidiu-se efetuar estudos, como o que é descrito a seguir, em que o número de CFs selecionados é ainda mais reduzido (de 40 para 14 CFs), e onde - ao invés de 5 grandes hubs, baseou-se a rede em um backbone formado por um conjunto de anéis bidirecionais com várias conexões entre eles. Da forma como a rede é planejada a seguir, baseando-se em anéis bidirecionais, cada um dos 14 CFs escolhidos passou a ter a mesma importância relativa. Esta é uma arquitetura que traz uma maior confiabilidade à rede.

V.2. Estudo da Rede da Área Metropolitana de São Paulo: solução baseada em anéis

Recordando, dos 91 CFs da rede, 51 deles haviam sido identificados como pendentes. Neste estudo de enfeixamento, 26 dos 40 restantes serão declarados pendentes. Restarão assim apenas os 14 CFs mais importantes. Com isto, das 695 posições diferentes de zero que existiam na matriz de demandas, restará apenas uma matriz com 91 posições não nulas $((14 \times 13) / 2 = 91)$.

Sobre estes 14 CFs, os planejadores elaboraram - ao longo de duas semanas - 11 soluções baseadas em anéis e cadeias, cada uma delas capaz de atender àquela matriz de demandas. Os custos e a porcentagem de ocupação de cada uma destas soluções é apresentado na Tabela 5.2.

O custo da rede considera apenas os custos de equipamentos (NE) do tipo ADM e OLTM. Já a porcentagem de ocupação da rede é calculada dividindo-se a soma dos fluxos

de canais entre os CFs pela capacidade total de transmissão da rede. Note que redes mais caras nem sempre implicam em menores capacidades de ocupação. Isto porque a topologia da rede também tem influência direta no fluxo dos canais E1 sobre os anéis / cadeias propostos.

Como critério de planejamento, estabeleceu-se que somente anéis e cadeias a 2488 Mbps seriam considerados. Somando-se a quantidade de anéis e cadeias nas soluções propostas pelos planejadores, chega-se a um total de 65, o que implica em 65 variáveis binárias no modelo matemático de enfeixamento.

Para se obter a porcentagem de ocupação de cada uma das redes propostas, utilizou-se uma função objetivo de minimização do fluxo total de canais 2 Mbps na rede. Isto é, minimizou-se a soma dos fluxos em cada um dos arcos da rede em um problema de programação linear (LPP), em que todas as variáveis associadas aos anéis em cada solução tiveram seu valor fixado em 1. Para a geração de caminhos destes LPP utilizaram-se os algoritmos citados no Capítulo III de

Tipo de Rede	Mnemônico	Custo de NE	% Ocupação
cadeias ADM	WA	5344	57
cadeias ADM	WI	6260	59
cadeias ADM	WJ	7288	73
anéis bidir.	ZB	8208	48
anéis bidir.	ZC	7296	56
anéis bidir.	ZD	6156	65
anéis bidir.	ZE	6156	71
anéis bidir.	ZF	6156	66
anéis bidir.	ZG	5700	62
anéis bidir.	ZH	6384	62
anéis bidir.	ZK	8844	51

maneira que - para cada uma das soluções propostas - fossem gerados entre 1000 e 2000 caminhos diferentes.

Já para a obtenção da rede de custo mínimo utilizou-se a função objetivo como descrita no Capítulo IV. Porém, na geração de caminhos, experimentou-se aumentar exageradamente a quantidade de caminhos da rede. Geraram-se mais de 15000 caminhos sobre os 65 anéis candidatos!

Resumidamente, o modelo matemático para minimização de custos gerado a partir das propostas feitas pelos planejadores compreendeu:

- cerca de 300 restrições;
- 65 variáveis discretas;
- 16000 variáveis contínuas.

Em poucos minutos de processamento em uma estação de trabalho Sparc-20, diversas soluções alternativas foram obtidas. É interessante notar que as 11 soluções tomaram alguns dias de trabalho para serem feitas, e que as soluções alternativas foram geradas em pouco mais de uma manhã de trabalho, incluindo-se aí o tempo para montagem dos dados de entrada no sistema computacional.

A solução mais barata obtida - a partir dos custos estimados pelos próprios planejadores - é apresentada na Figura 5.15. As soluções propostas pelos planejadores que “contribuíram” com algum anel ou cadeia para a formação desta nova solução também estão representadas na mesma figura. Note que o número médio de ADMs em cada CF é menor na solução obtida através da metodologia descrita aqui. Na Tabela 5.2, ela entraria com valores de de \$ 5240 para o custo, e de 80% para a taxa de ocupação.

Todavia, é bom recordar que a minimização do custo não é o único objetivo em um planejamento de redes de transporte. Note como a taxa de ocupação desta rede é significativamente alta. Por este e outros motivos, não foi esta a rede-solução adotada pelos planejadores.

A rede de mínimo custo foi usada apenas como um parâmetro para avaliação das outras soluções. A que foi efetivamente escolhida pelos planejadores foi uma outra, um pouco mais cara, também obtida por esta metodologia, porém com maiores folgas nos arcos (menor taxa de ocupação). E mesmo assim, ela ainda sofreu algumas alterações na topologia dos seus anéis após ter sido analisada pelos planejadores.

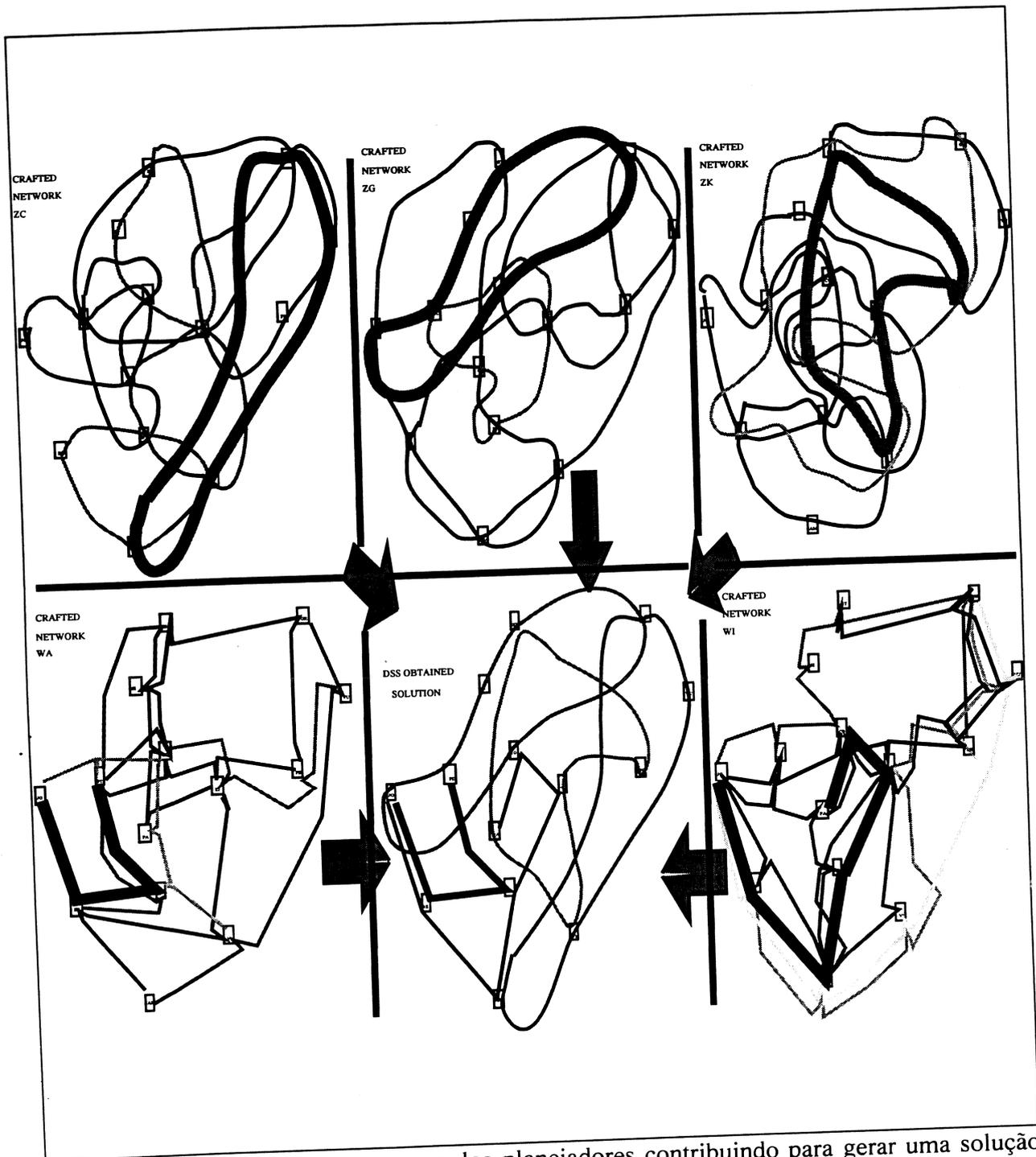


Figura 5.15: 5 soluções propostas pelos planejadores contribuindo para gerar uma solução obtida automaticamente

V.3. Estudo da Rede da Área Interurbana de São Paulo

Corresponde a 60 CFs, geradores de um volume de demanda superior a 3000 canais, distribuídos em 250.000 Km² de área, com cerca de 32 milhões de habitantes. Um pré-processamento dos dados, com atenção especial para os nós pendentes, permitiu a montagem de uma rede reduzida com “apenas” 28 CFs, descritos na tabela apresentada na Figura 5.3. Esta rede será chamada daqui por diante de IU-28.

A rede IU-28 deve escoar 170 demandas diferentes (é mais esparsa que as anteriores, o que é uma característica das redes interurbanas. Foi organizada em 14 clusters diferentes, cada um deles com um CF hub principal, além de mais 4 CFs escolhidos como super-hubs (ver Di Lascio et alii (1994)). No caso, as localidades de Bauru e Araraquara (no interior) e de Lapa e Penha (na área metropolitana)⁴.

Em um dos cenários estudados, foi proposto o seguinte problema de fluxo multiprodutos:

- 81 arcos no grafo de conexão;
- 148 variáveis binárias relacionadas a ligações ponto-a-ponto;
- 17 anéis bidirecionais, correspondendo a 19 variáveis binárias;
- 6 cadeias de ADMs, correspondendo a 11 variáveis binárias.

Foram gerados automaticamente 2196 caminhos para escoar as 170 demandas, correspondendo a 2025 variáveis do tipo “Y” no modelo matemático. Assim, formulou-se um modelo de programação linear inteira mista, com 178 variáveis binárias, mais de 2700 variáveis reais e 355 restrições.

Em cerca de 15 minutos de processamento em um estação Sparc-20, obteve-se uma série de soluções. Todavia, a maior parte delas apresentava topologias semelhantes à mostrada na Figura 5.16-a, em que o hub de Bauru apresentava diversos enlaces ligando-o a CFs da área metropolitana. A Figura 5.16-b apresenta em detalhe as conexões de Bauru (AC) com os CFs da área metropolitana (AM, PA, PD, VU), além das cidades próximas de Sorocaba (CR) e Campinas (CT). Já a Figura 5.16-c apresenta em detalhe a região da área metropolitana.

A quantidade de ligações entre Bauru e a área metropolitana foi prontamente criticada pelos planejadores, o que levou à adição de restrições adicionais em que:

- limitou-se o número de enlaces de alta hierarquia saindo dos super-hubs, a exemplo do que foi feito na área metropolitana;
- obrigou-se a que ou anéis bidirecionais ou cadeias de ADMs - soluções mais econômicas em termos de uso de fibras ópticas - fossem adotadas nas soluções, para efetuar a ligação entre o interior e a área metropolitana. Isto inibiu a “entrada” de ligações ponto-a-ponto nesta situação.

Com isto, executando-se mais um passo de otimização, chegou-se a soluções como a apresentada na Figura 5.17, que foram mais bem aceitas pelos planejadores. As Figuras 5.16 (-a, -b e -c) são análogas às Figuras 5.17 (-a, -b e -c). Compare as ligações que saem-chegam de Bauru.

⁴A escolha destes CFs como hub, a divisão em clusters, bem como qualquer resultado obtido nestes estudos são apenas testes da metodologia proposta, não significando nenhuma política de planejamento da TELESP;

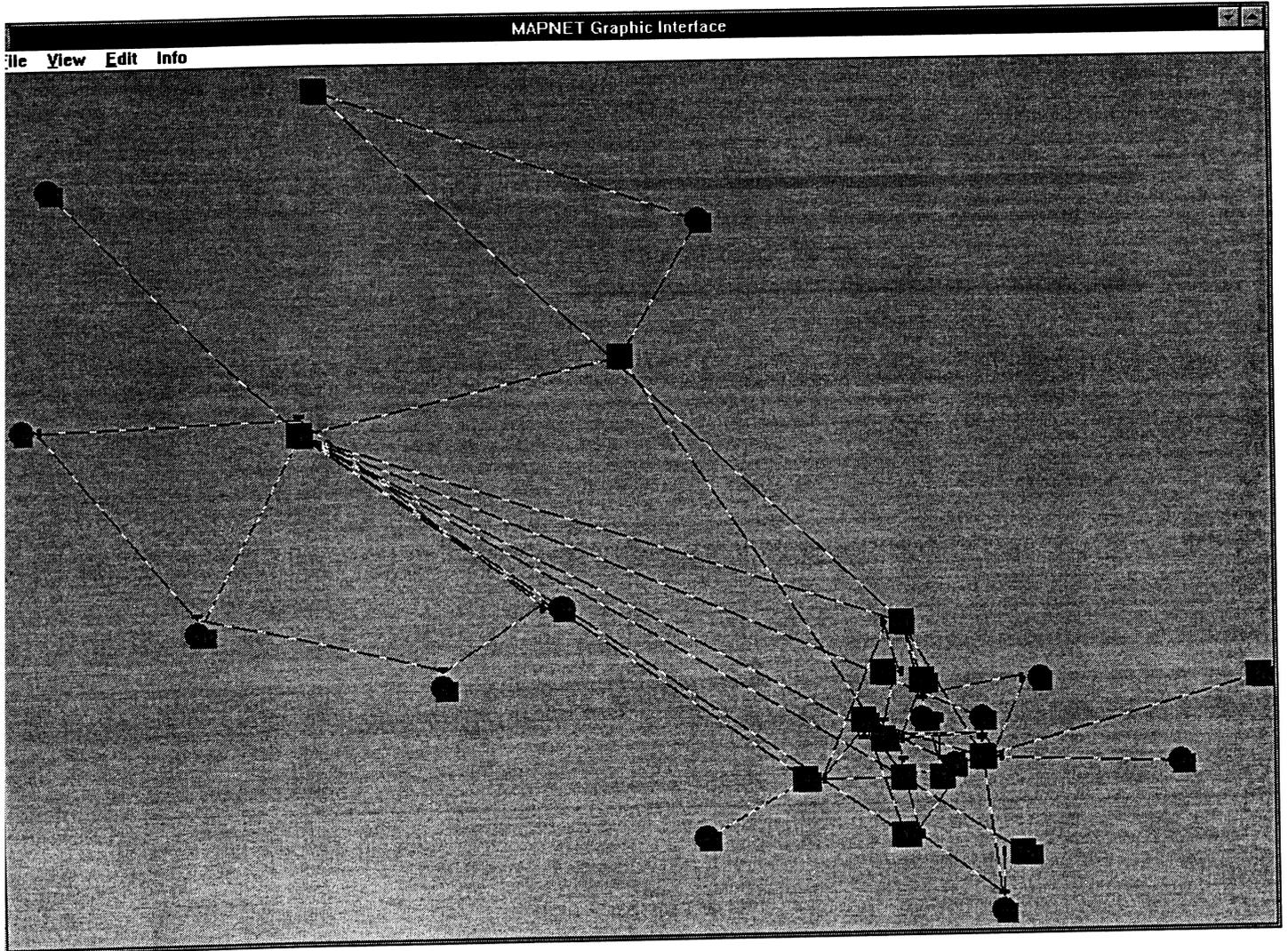


Figura 5.16-a: Rede Interurbana do Estado de São Paulo
Solução com diversos enlaces ponto-a-ponto
partindo de Bauru (AC)

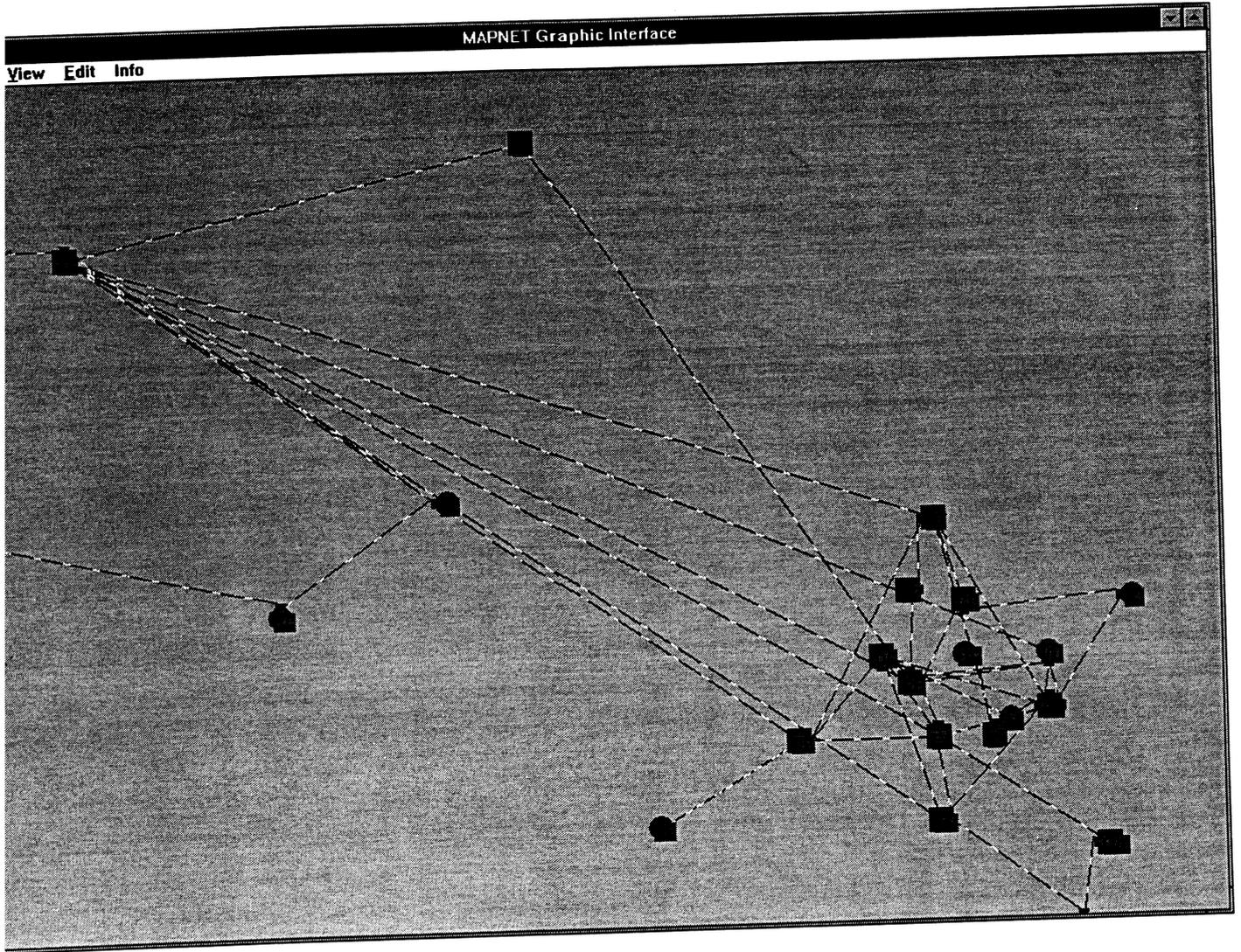


Figura 5.16-b: Rede Interurbana do Estado de São Paulo
Solução com diversos enlaces ponto-a-ponto
partindo de Bauru (AC) - zoom sobre a região
central do estado

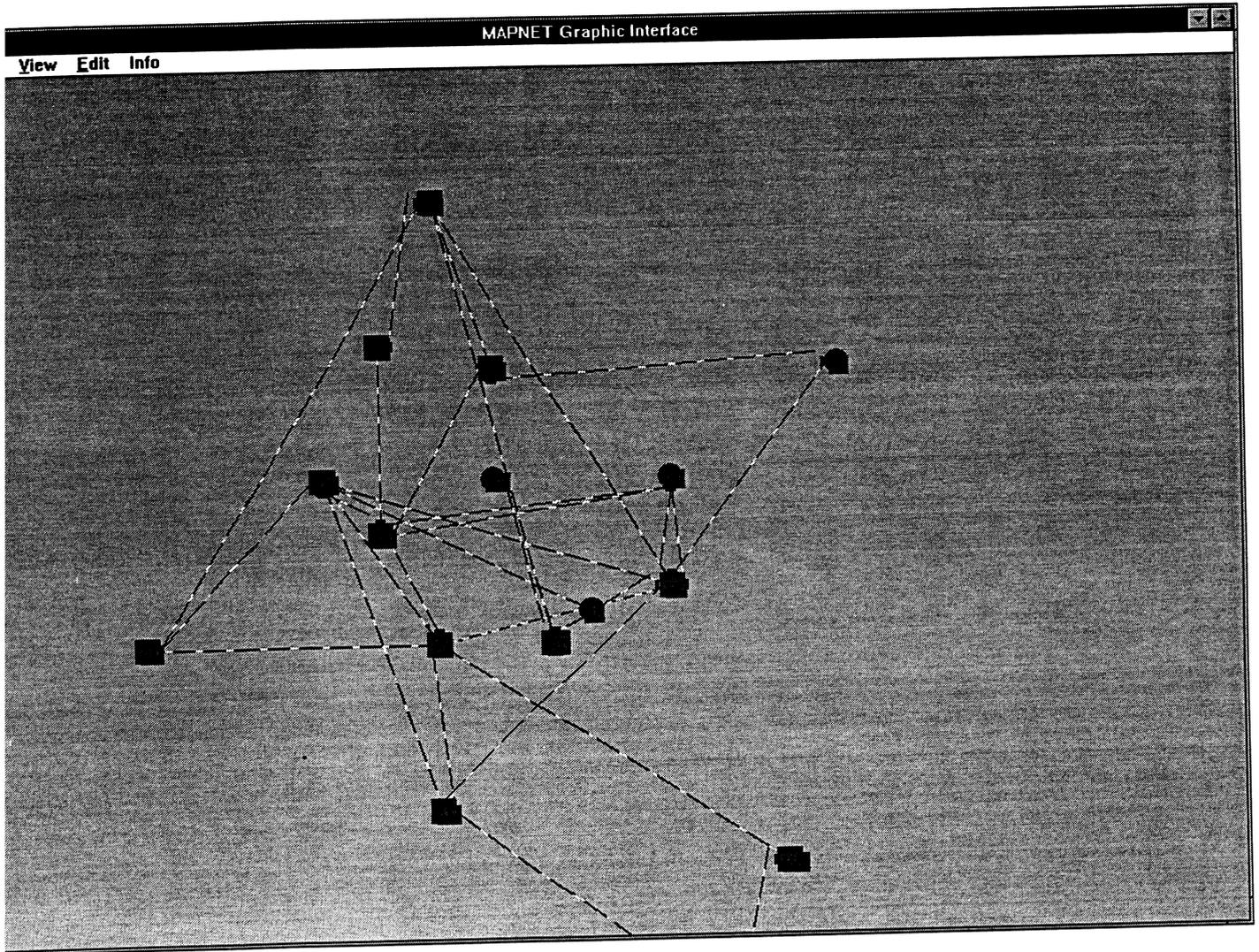


Figura 5.16-c: Rede Interurbana do Estado de São Paulo
Solução com diversos enlaces ponto-a-ponto
partindo de Bauru (AC) - zoom sobre a região
da Área Metropolitana , incluindo ainda as
cidades de Campinas, Santos, Sorocaba e
São José dos Campos

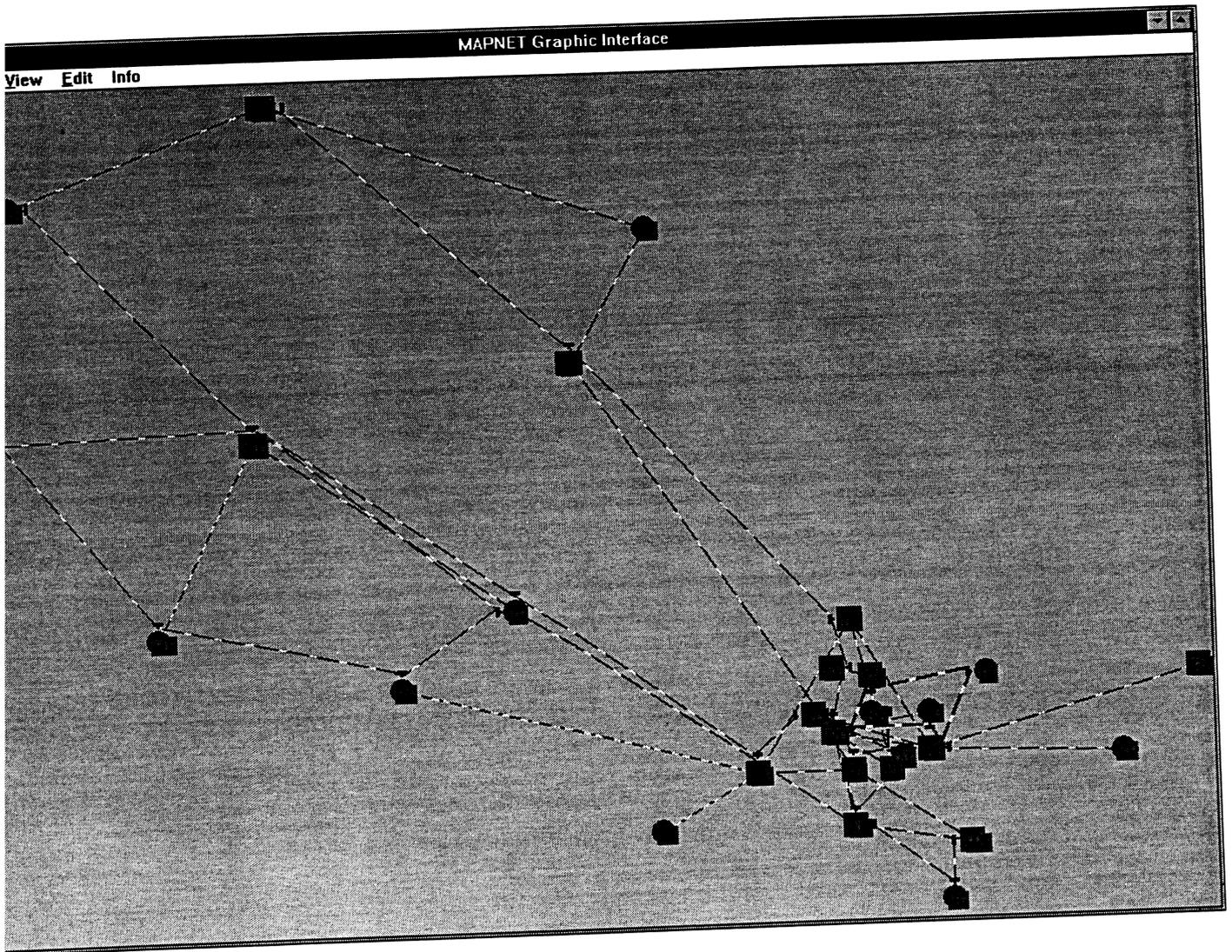


Figura 5.17-a: Rede Interurbana do Estado de São Paulo
Solução com número de enlaces saindo de
Bauru restritos a menos que dois

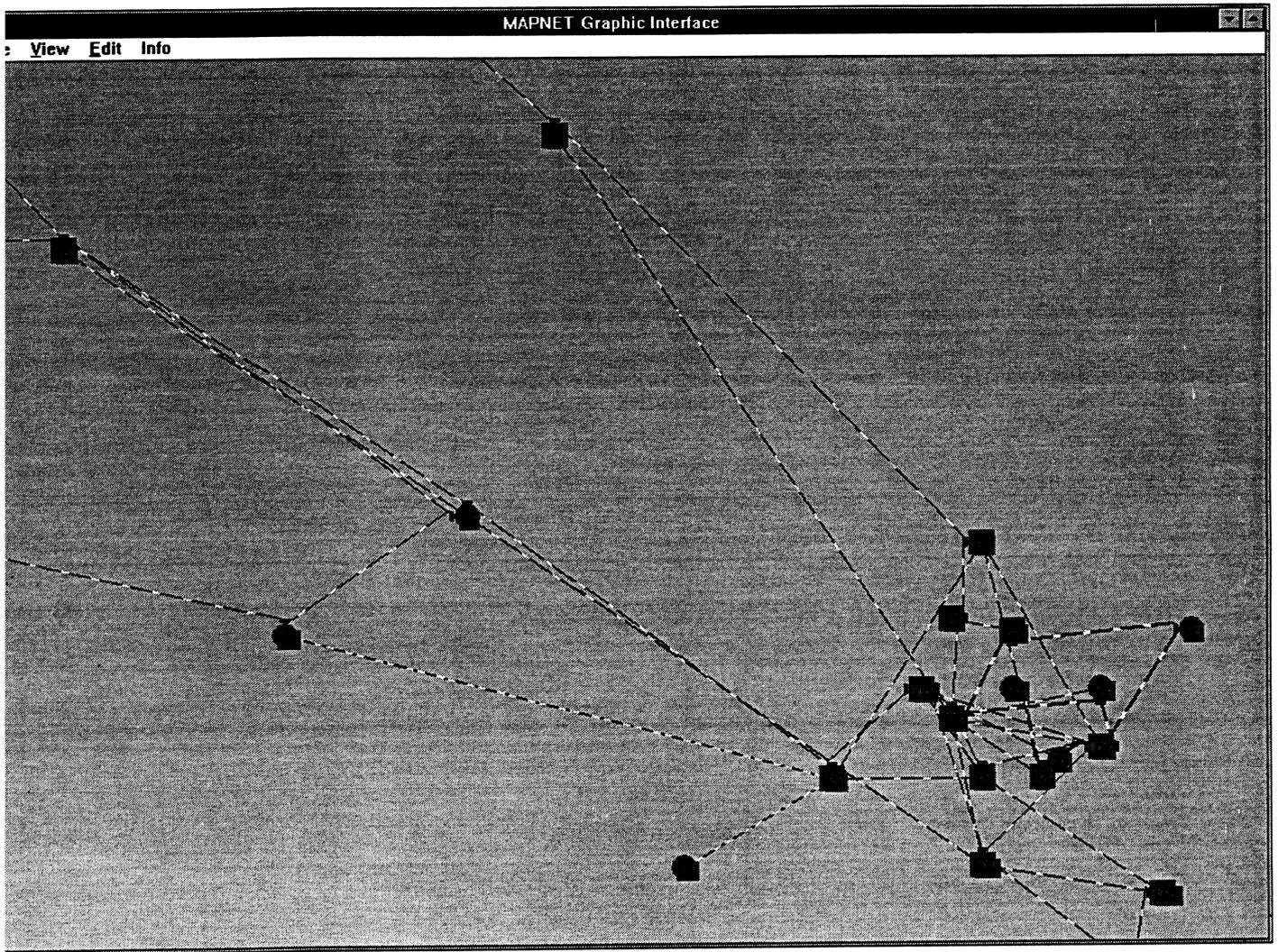


Figura 5.17 b: Rede Interurbana do Estado de São Paulo
Solução com número de enlaces saindo de
Bauru restritos a menos que dois - zoom
sobre a região central do estado

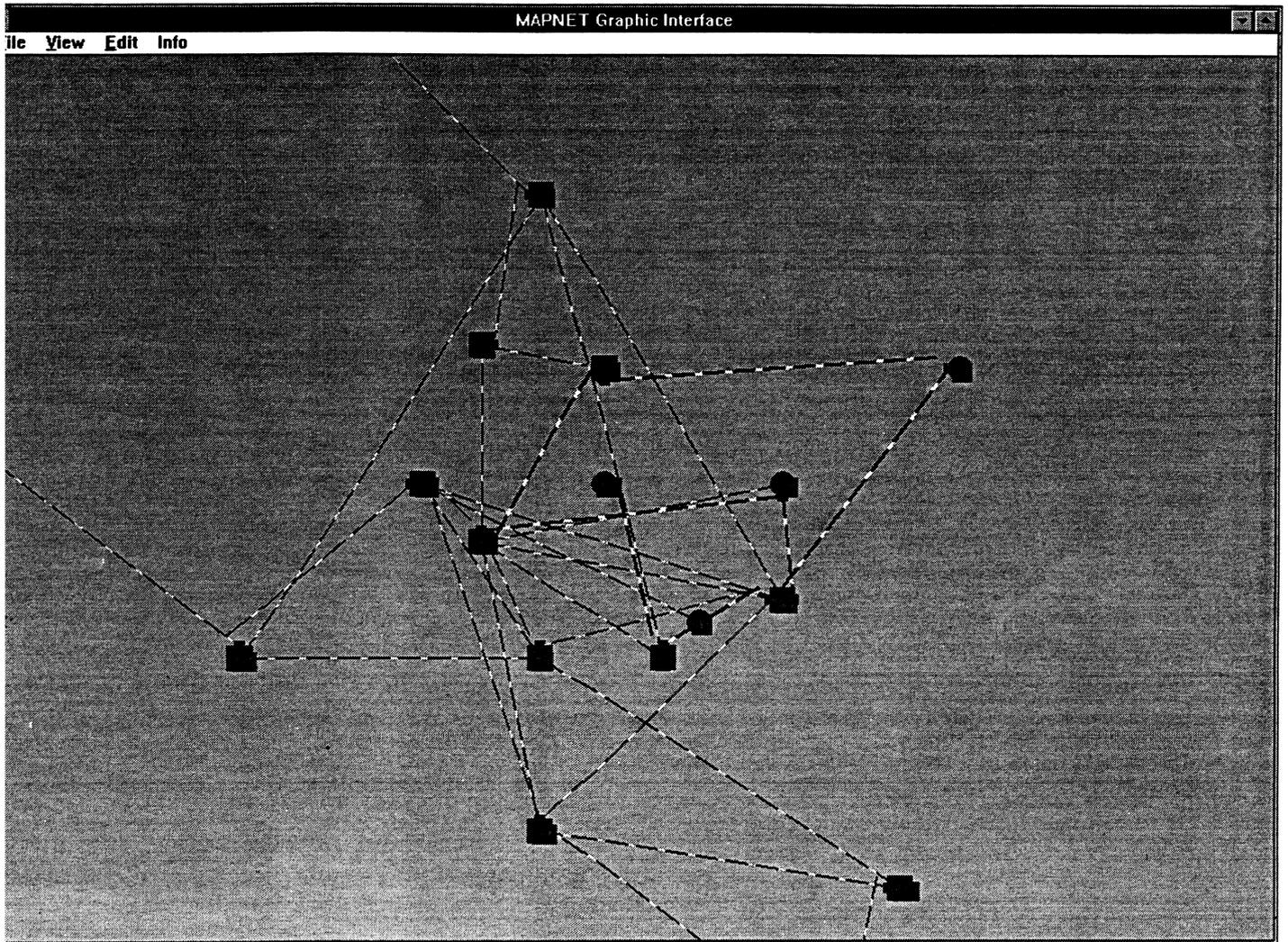


Figura 5.17.c: Rede Interurbana do Estado de São Paulo
Solução com número de enlaces saindo de Bauru restritos a menos que dois - zoom sobre a região da área metropolitana, mais as cidades de Campinas, Santos, Sorocaba e São José dos Campos

V.4. Observações sobre a Aplicação da Metodologia Proposta a Redes Reais

A metodologia de solução do problema de enfeixamento proposta aqui é aplicável a redes reais, mesmo redes de grande porte, levando à obtenção de boas soluções. Todavia, ressalte-se que algumas condicionantes devem ser observadas no seu uso:

- o uso de algoritmos de busca do tipo B&B é muito sensível ao número de variáveis inteiras incluídas no modelo. Os tempos de processamento crescem exponencialmente com o número destas variáveis;
- a formulação interativa de restrições técnicas pelo planejador, modeladas matematicamente e incluídas no modelo matemático contribui para reduzir os tempos computacionais de busca do B&B e para melhorar a qualidade das soluções obtidas, não só em termos de custos, mas principalmente quanto a aspectos de confiabilidade e operação da rede;
- a fase de geração de caminhos tem grande influência na qualidade das soluções obtidas. Mas não é a quantidade de caminhos que faz diferença; no estudo da rede AMSP baseando-se em anéis gerou-se uma quantidade muito grande de caminhos (cerca de 16 mil !), e a qualidade da solução não foi muito melhor por isto. Identificou-se que o problema era a *qualidade* dos caminhos construídos. Concluiu-se que a geração de caminhos merece um estudo mais aprofundado no futuro, no sentido de desenvolver algoritmos que gerem *bons caminhos*, e não *muitos caminhos*.
- os resultados apresentados por esta metodologia devem ser encarados como indicadores de boas soluções para o planejamento de redes, fornecendo importantes subsídios para discussão entre planejadores, e reduzindo o tempo que uma equipe de planejamento leva para propor e analisar soluções de rede. Uma ferramenta computacional baseada nesta metodologia não substitui o conhecimento especializado de uma equipe de planejadores. Permite, isto sim, aproveitar melhor o potencial daquela equipe.
- em uma ferramenta computacional que implemente esta metodologia, o uso de interfaces gráficas com o usuário é fortemente recomendado.

VI. Comentários Finais

Nesta tese, apresentou-se a proposta de uma metodologia de planejamento de redes de transporte baseadas na Hierarquia Digital Síncrona (SDH). Dentro desta metodologia, definiu-se o subproblema denominado Enfeixamento de Troncos Inter-Centrais, o qual é resolvido com o emprego de modelos de programação linear inteira mista. Resolvendo-se este subproblema determinam-se os NE-SDH (elementos de rede SDH) e as conexões em fibra óptica entre eles, a quaisquer taxas de transmissão, quando estes NE estão localizados em CFs distantes. Ao mesmo tempo em que se faz a definição destes NE, a metodologia seleciona a(s) topologia(s) que melhor servem para implementar a rede dentro de uma combinação de funções objetivo. O sub-problema do Enfeixamento de Troncos é - sem dúvida - o mais complexo dentro da metodologia proposta.

Durante a aplicação da metodologia a redes reais ratificou-se a expectativa inicial - de que a função objetivo de minimização de custos não é suficiente para o planejamento de redes. Ela é importante, mas não pode ser tomada como único parâmetro de avaliação de soluções. Também foi preciso considerar aspectos de confiabilidade de rede e a previsão de folgas para suportar crescimentos inesperados de demanda. E a metodologia e o modelo matemático propostos aqui se revelaram flexíveis o bastante para incorporar análises quanto a estes aspectos.

A seguir, apresenta-se um resumo dos resultados alcançados, outro a respeito dos pontos conclusivos deste trabalho e um terceiro sobre sequências interessantes para esta pesquisa.

● Resultados Alcançados

Um resultado importante foi uma **modelagem matemática** daquele problema capaz de adaptar-se às múltiplas possibilidades da tecnologia SDH, considerando alternativas de implementação de redes tão diversas quanto:

- ligações ponto-a-ponto entre multiplexadores;
- ligações ponto-a-ponto entre multiplexadores e cross-connects, e destes últimos entre si;
- anéis bi-direcionais a 2 e a 4 fibras;
- anéis uni-direcionais;
- cadeias de ADMs;
- taxas de transmissão de 155, 622, 2488 Mbps, podendo facilmente ser estendido para considerar taxas de 10Gbps (SDH) e as taxas intermediárias da hierarquia SONET.

Redes urbanas reais, de médio e grande porte, foram usadas para testar a aplicabilidade da metodologia. E, em todas elas, os resultados obtidos foram muito satisfatórios para os planejadores/engenheiros de empresas de telecomunicações que participaram deste trabalho. Podemos citar aqui as redes urbanas de Santos (SP) e da Área Metropolitana de

São Paulo como exemplos de testes da metodologia com dados reais, em que os **resultados obtidos foram efetivamente usados como subsídios para o projeto final levado a cabo pela empresa operadora.**

Um outro aspecto importante deste trabalho foi o desenvolvimento - em equipe - de uma **ferramenta computacional** (protótipo) que inclui facilidades gráficas para visualização dos resultados e integração com os bancos de dados da empresa operadora.

Dentro desta ferramenta computacional, a etapa de **geração automática de caminhos** foi encarada inicialmente como um problema cuja solução não apresentaria grandes complexidades. Imaginava-se - a princípio - que todas as redes SDH seriam baseadas em hubs, com equipamentos SDXC (Synchronous Cross-Connect Systems) de grande porte, que fariam a concentração / distribuição dos canais. Em redes deste tipo, a geração de caminhos realmente seria simples.

Não obstante, a realidade apresentou outro tipo de rede para ser planejada: sem grandes hubs, mas com anéis de ADMs conectados entre si em mais de um ponto. Para este tipo de redes, a geração de caminhos torna-se uma tarefa mais complicada (e computacionalmente cara), dada a quantidade de combinações possíveis. Ainda assim, elaboraram-se algoritmos para geração de caminhos neste tipo de rede, com bons resultados. Chegou-se a efetuar testes com quantidades formidáveis de caminhos em redes de grande porte - em uma experiência foram gerados mais de 15000 caminhos!

Entretanto, após analisar os resultados obtidos para redes urbanas e interurbanas, a conclusão foi que muitos dos caminhos gerados eram incompatíveis com critérios de gerência da rede, embora pudessem até fazer parte das soluções de mínimo custo. Assim, não é a quantidade de caminhos gerados que determina a qualidade da solução obtida, mas sim o uso de critérios técnicos para se gerarem - se possível - **todos** os caminhos **aceitáveis do ponto de vista do planejador**. A metodologia proposta neste trabalho apresenta uma alternativa para se modelar tais critérios (os grafos de conexão e filiação apresentados no Capítulo III), que deve ser explorada mais cuidadosamente em trabalhos futuros.

● **Pontos Conclusivos**

Tanto a modelagem matemática porposta quanto a ferramenta computacional desenvolvida e os algoritmos de geração de caminhos se mostraram flexíveis para suportar uma mudança de concepção sobre a arquitetura de rede sendo estudada (de redes baseadas em hubs para redes baseadas em anéis). Outro ponto importante é que esta última arquitetura de rede é bem mais complicada de se planejar, e que - apesar disto - a metodologia proposta apresentou resultados muito satisfatórios.

Ressalte-se que a complexidade de planejamento das redes baseadas em anéis é amplamente compensada pela confiabilidade que as mesmas conferem à rede, além de uma facilidade de operação que as redes baseadas em cross-connects ainda não

alcançaram (pelo menos ainda não está disponibilizada pelos fabricantes). Assim, pode-se apontar que **esta arquitetura deve ser considerada** sempre que se estiver efetuando um planejamento de redes de transporte.

De qualquer forma, dentro da metodologia proposta aqui, é na resolução do modelo de programação linear inteira mista que se verifica o maior custo computacional. Decidiu-se usar pacotes comerciais de programação matemática, como o CPLEX - e conseguiu-se chegar a bons resultados desta forma. Para redes de médio porte - com algumas dezenas de variáveis inteiras - chegou-se à solução ótima em poucos minutos, o que é plenamente satisfatório para um planejamento de redes que envolve centenas de milhares de dólares e é feito em base anual.

Já em redes de grande porte (com centenas de variáveis inteiras), os resultados obtidos pelas técnicas de Branch & Bound (B&B) dos pacotes comerciais foram claramente insuficientes. Após horas de processamento, não se obtinha um resultado minimamente próximo do lower-bound oferecido pelo algoritmos B&B. Assim, não ficava estabelecido quão boa era a melhor solução obtida até aquele momento. Daí, foi preciso se desenvolver formas de superar esta limitação. Este trabalho aponta **duas técnicas que levaram a bons resultados**, e que tanto podem ser usadas da forma descrita aqui, quanto podem ser combinadas em trabalhos futuros:

- buscar junto aos planejadores um conjunto de restrições técnicas que limite o espaço de busca das soluções. Por exemplo, obrigando a instalação de equipamentos de alta hierarquia em CFs importantes da rede, ou limitando a quantidade de ligações ponto-a-ponto em algum destes CFs;
- utilizar técnicas heurísticas de busca, empregando sucessivas etapas de “linearização” e “fixação” de variáveis.

Aplicações destas duas abordagens são descritas no Capítulo V desta tese.

A princípio, esta metodologia **pode ser aplicada tanto a redes urbanas quanto a redes interurbanas**. Nesta última, propõe-se inclusive uma inversão dos passos da metodologia, devido à importância que os custos de infraestrutura e compra/instalação de fibras alcançam.

Um último ponto a enfatizar é que a edição do modelo matemático é extremamente complicada, impossível mesmo de ser feita manualmente. Ao se modelarem problemas de enfeixamento em redes de médio e grande porte, obtém-se um problema de programação linear inteira mista, ou, melhor dizendo, um arquivo de texto realmente grande e complicado. Para um planejador elaborar tal arquivo manualmente, mesmo com auxílio de um bom editor de texto, levaria algumas semanas de trabalho, correndo o risco de errar inúmeras vezes. Daí a necessidade de uma ferramenta computacional que permita ao planejador abstrair-se dos detalhes de edição do modelo matemático, concentrando-se somente nos problemas de planejamento de redes propriamente ditos. A ferramenta desenvolvida aqui desempenhou com sucesso este papel.

● *Trabalhos Futuros*

Ao longo do desenvolvimento desta tese, identificaram-se diversas oportunidades de pesquisa interessantes, e algumas delas são citadas abaixo, como possibilidades de trabalhos futuros:

- a consideração de demandas com algum grau de não-determinismo, de maneira a representar o que efetivamente acontecerá com a futura RT, na evolução para serviços ATM e para a RDSI-FL (Rede Digital de Serviços Integrados de Faixa Larga);
- a consideração de técnicas de WDM e comutação óptica como possibilidades no planejamento de redes de alta velocidade;
- a aplicação de técnicas de otimização não só no planejamento, mas também no detalhamento de engenharia de rede e de sua operação. Estas técnicas poderiam - em um desenvolvimento futuro - ser integradas no ambiente da TMN (*Telecommunications Management Network*);
- a integração da metodologia e dos modelos matemáticos desenvolvidos aqui a pacotes de planejamento de redes mais bem providos de interfaces gráficas (especialmente de GIS - *Geographical Information Systems*) e de bancos de dados.

Com certeza a aplicação de técnicas de pesquisa operacional ao planejamento/dimensionamento/operação de redes de telecomunicações é uma área de investigação de grande interesse, pela importância econômica e pela atualidade do tema. Deve-se ressaltar que este trabalho foi desenvolvido com duas diretrizes em mente: atender às exigências acadêmicas de uma tese de doutorado e resolver problemas reais de grande porte em uma empresa operadora. Com isto, tornou-se uma experiência de engenharia muito enriquecedora, exigindo tanto do aspecto teórico quanto da prática de otimização e de telecomunicações.

Referências Bibliográficas

Ahuja et alii (1994)

Network Flows

Ahuja, R.K., Magnanti, T.L., Orlin, J.B.
Prentice Hall, 1993

Ash, Cardwell & Murray (1984)

Design and Optimization of Networks with Dynamic Routing

Ash, G.R., Cardwell, R.H., Murray, R.P.

The Bell System Technical Journal, Vol. 60, No. 8, October 1984, pp. 1787-1820

Aubry (1995)

A Two Step Clustering Method applied to Telecommunications Network Planning

Aubry, N.J.B., Ribeiro, R., Tavares, H.

3rd. International Conference on Communications Systems Modelling and Analysis,
March, 16-19, 1995, Nashville, TN-USA, pp. 264-272

Bellamy (1992)

Digital Telephony

Bellamy, J

John Wiley & Sons, 1982

Bergamaschi (1996)

Um Método Heurístico de Enfeixamento Aplicado a Redes de Transmissão de Grande Porte

Bergamaschi, M.A.

Tese de Mestrado, FEE-UNICAMP, Julho 1996

Bortolon (1991)

Otimização do Roteamento de Troncos Telefônicos usando Sistemas de Alta Hierarquia em Fibras Ópticas

Bortolon, S.

Tese de Mestrado, FEE-UNICAMP, Outubro 1990

Bortolon et alii (1993)

Estratégias para Definição de Topologias de Redes de Telecomunicações na Hierarquia Digital Síncrona

Bortolon, S., Aubry, N., Tavares, H., Ribeiro, R., Carneiro, M.

XXV SBPO, Campinas, 16-19 Novembro 1993, pp. 604-609

Bortolon et alii (1994)

Otimização do Enfeixamento em Redes de Troncos InterCentrais

Bortolon, S., Tavares, H., Ribeiro, R., Aubry, N., Carneiro, M.

CLAIO, Santiago, Chile, Junho de 1994

Bortolon et alii (1995-1)

A Heuristic Solution to the Bundling Problem and its Application to Large Fiber Optical Metropolitan Transmission Networks Planning

Bortolon, S., Tavares, R., Ribeiro, R.

3rd. International Conference on Communications Systems Modelling and Analysis, March , 16-19, 1995, Nashville, TN-USA

Bortolon et alii (1996-1)

SONET Planning using Optimization Tools in Large Networks: a practical case study

Bortolon, S., Tavares, H., Ribeiro, R.

4th. International Conference on Communications Systems Modelling and Analysis, March , 21-24, 1996, Nashville, TN-USA,

Bortolon (1996-2)

Planning SDH Networks using Integer Programming: a real world application

Symposium on Combinatorial Optimization (CO96)

London, 27-29 March 1996

Bortolon & Tavares (1996-3)

An Experience on Optimization Software Development for Telecommunications Network Planning

Bortolon, S. , Tavares, H.

4th Working Conference on Optimization Based Computer Aided Modelling and Design - IFIP WG7

Noisy Le Grand, France, Abril de 1996, pp. 461-464

Bortolon et alii (1996-4)

A Methodology to SDH Networks Design using Optimization Tools

Bortolon, S., Tavares, H., Ribeiro, R., Quaglia, E., Bergamaschi, M.

Paper accepted to IEEE Global Telecommunications Conference, 18-22 November, London - UK

Bortolon et alii (1996-5)

Planejamento Otimizado de Redes SDH em Telecomunicações

Bortolon, S., Tavares, H., Ribeiro, R., Quaglia, E., Bergamaschi, M.

Trabalho aceito no XI CBA, São Paulo, Setembro de 1996

Lowe et alii (1996)

An Upgrade route for core transport networks

Lowe, E., Botham, P., Hawker, I.

Paper accepted to IEEE Global Telecommunications Conference, 18-22 November, London - UK

Brackett (1995)

An all-optical Debut in San Diego

Brackett, C. A.

Bellcore Exchange, May 1996

Brazhnov & Dubrovinsky (1984)

Design of Networks with Alternative Routing Taking Noncoinciding Busy Hours into Account

Brazhnov, V.N. , Dubrovinsky, V.M.
Elektrosvyaz, no. 9, 1984, pp.22-24

Brown, Grover, Slevinsky & MacGregor (1994)

Mesh-Arc Networking: an architecture for efficient survivable self healing networks

Brown, G.N. , Grover, W.D., Slevinsky, J.B. , MacGregor, M.H.
ICC/SUPERCOMM 94, pp. 471-477

Cardwell, Monma & Wu (1989)

Computer Aided Design procedures for Survivable fiber optic networks

Cardwell, R., Monma, C.L. , Wu, T-H
IEEE-SAC, vol.7, no. 8, october 1989, pp. 1188-1197

Carneiro et alii (1995)

Arranjo e Dimensionamento da Rede de Transmissão

Carneiro, M., Silveira, P.D.B., Mello, O.D., Ribeiro, R., Tavares, H.
Relatório Técnico da Ordem de Serviço N° 11 - Contrato TELESP & UNICAMP
1560/93 (1995)

Cosares et alii (1995)

SONET Toolkit: A Decision Support System for Designing Robust and Cost-Effective Networks

Cosares, S., Deutsch, D.N., Saniee, I., Wasem, O.J.
INTERFACES, Vol.25, No.1, January-February 1995, pp. 20-40

Cox, Kuehner, Parrish & Qiu (1993)

Optimal Expansion of Fiber-Optic Telecommunication Networks in Metropolitan Areas

Cox, L.A., Kuehner, W.E., Parrish, S.H., Qiu, Y.
INTERFACES, Vol.23, No.2, March-April 1993, pp. 35-48

Current & Min (1986)

Multiobjective Design of Transportation Networks: Taxonomy and Annotation

Current, J., Min, H.
European Journal of Operational Research, Vol. 26, 1986, pp. 187-201

Dedoborschch, Il'ina & Levina (1985)

Calculation of the Number of Channels in a Toll Telephone Network with Alternative Routes Taking the Modularity of Transmission Systems into Account

Dedoborschch, L.D., Il'ina and Levina, G.B.
Elektrosvyaz, No. 3, 1985, pp. 24-29

Di Lascio et alii (1994)

Protection Strategies for SDH networks
M.Di Lascio, A. Gambaro, U.Mocci
Networks'94, pp.387-392

Doverspike (1991)

Algorithms for Multiplex Bundling in a Telecommunications Network
R.D.Doverspike
Operations Research, Vol.19, No.6, Dec. 1991, pp. 925-944

Doverspike & Jha (1993)

Comparison of Routing Methods for DCS-Switched networks
R.Doverspike, V.Jha
Interfaces, 23, March-April 1993, pp.21-34

Elsner(1977)

A Descent Algorithm for the Multihour Sizing of Traffic Networks
Elsner, W.B.
The Bell System Technical Journal, Vol. 56, No. 8, October 1977, pp. 1405-1438

Elsner (1980)

Dimensioning Trunk Groups for Digital Networks
Elsner, W.B.
The Bell System Technical Journal, Vol. 59, No. 7, September 1980, pp. 1123-1127

Garcia(1987)

Planejamento do Entroncamento em Redes Telefônicas Urbanas em Processo de Digitalização
Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica - UNICAMP, 1987

Gavish et alii (1989)

Fiber Optic Circuit Network Design under Reliability Constraints
Bezalel Gavish, Pierre Trudeau, Moshe Dror, Michel Gendreau, Lorne Mason
Working paper no. 89-08

Gillan (1989)

Advanced Networks Architectures exploiting the synchronous digital hierarchy
Robert L. Gillan
Telecomm. Journal of Australia, Vo. 39, No. 3, 1989, pp. 39-42

Jack, Kai & Shulman (1992)

Netcap - An Interactive Optimization System for GTE Telephone Network Planning
Jack, C., Kai, S.R., Shulman, A.
Interfaces, Vol.22, No. 1, January-February 1992, pp. 72-89

Johnson et alii (1994)

Distributed Restoration Strategies in Telecommunications Networks

Johnson, D., Brown G.N., Beggs, S.L., Botham,C.P., Hawker,I., Ching,R.S.K.,
Sinclair,M.C., O'Mahony,M.J.
ICC/SUPERCOMM 94, pp. 483-488

Krause (1994)

Network Survivability: one size doesn't fit all

Krause, T.D.
Telephony, January 31, 1994, pp. 22-29

Kumar (1994)

*Broadband Communications: A professional Guide to ATM, Frame Relay, SMDS,
SONET and B-ISDN*

Kumar, B.
Macgraw Hill Series on Computer Communications, 1994

Laguna (1994)

Clustering for the design of Sonet Rings in Interoffice Telecommunications

Laguna, M.
Managem.Science, Vol.40, No.11, Novemb.1994, pp. 1533-1541

Medova et alii (1996)

Design and Control of ATM/SDH Networks

Medova, E., Dempster, M.A.H., Azmoodeh, P., Key, P.B., Sargood, S.K.
4th International Conference on Telecommunication Systems Modeling and Analysis,
Nashville, TN-USA, pp. 259-269

Mello et alii (1995)

Planejamento da Rede de Galerias para Transmissão

Mello, O.D., Carneiro, M., Silveira, P.D.B.
XXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Vitória - ES, Novembro 1995

Mello et alii (1996)

Indisponibilidade em Redes de Telecomunicações

Mello, O.D., Carneiro, M., Tavares, H.
Anais do TELEMO-96 - VII Simpósio Brasileiro de Microondas e Opto-Eletrônica &
XIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações
Curitiba, Julho de 1996, Vol. I , pp.275-280

Moreno (1991)

*Planejamento da configuração otimizada da rede de transmissão: estratégia para o
desenvolvimento de um sistema informatizado de apoio à decisão*

Moreno, A.O.
Relatório Técnico, Telerj, maio de 1991

Nitchiporenko et alii (1996)

Efficient Ring Creation Procedure for Design of SDH/SONET Transmission Networks
Nitchiporenko, A., Mata-Rodriguez, A., Yanez, J.
4th International Conference on Telecommunication Systems Modeling and Analysis,
Nashville, TN-USA, pp.473-494

Palmer & Kershenbaum (1995)

An approach to a problem in network design using genetic algorithms
Charles C. Palmer, Aaron Kershenbaum
Networks, Vo. 26, 1995, pp. 151-163

Quaglia (1995)

O Enfeixamento no Planejamento da Transmissão: Um Estudo de Caso
Quaglia, E., Tavares, H., Ribeiro, R.
Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 1995, Aguas de Lindóia - SP,
pp. 458-463

Sexton & Reid (1992)

Transmission Networking: SONET and the Synchronous Digital Hierarchy
Sexton, M., Reid, A.
Artech House, Boston-London, 1992

Shi & Fonseka (1994)

Design of Hierarchical self-healing ring networks
Shi, J., Fonseka, J.P.
SUPERCOMM/ICC 94, pp. 478-482

Shinohara (1988)

Circuit Dimensioning Algorithm for optimizing Circuit-Switched networks
Shinohara, M.
Electronics and Communications in Japan, Part 1, Vol. 71, no. 7, 1988, pp 43-54

Smith & Yackle (1994)

The real capacity of Sonet Bidirectional rings
Smith, B.E., Yackle, C.
Telephony, March 7, 1994, pp. 50-54

Truitt (1954)

Traffic Engineering Techniques for Determining Trunk Requirements in Alternate Routing Trunk Networks
Truitt, C.J.
Bell System Technical Journal, Vol. 33, March 1954, pp. 277-302

Wasem (1991)

Algorithm for Designing Rings for Survivable Fiber Networks
Wasem, O.
IEEE Transactions on Reliability, Vol. 40, No. 4, October 1991, pp. 428-432

Wu & Burrowes (1990)

Feasibility Study of a High-Speed SONET Self-Healing ring architecture in future interoffice networks

Wu, T-H, Burrowes, M.

IEEE Comm. Magazine, November 1990, pp. 33-51

Wu, Kong & Lau (1992)

Economic Feasibility study for a broadband virtual path SONET/ATM Self Healing ring architecture

Wu, T-H, Kong, D.T., Lau, R.C.

IEEE SAC, Vol. 10, No. 9, december 1992, pp. 1459-1473

Wu(1992)

Fiber Network Service Survivability

Wu, T-H

Artech House, London, 1992

Zanandrea(1996)

An Heuristic Approach for SDH Transmission Network Evolution

Garcia, A.S., Zanandrea, G.,

4th. International Conference on Communications Systems Modelling and Analysis,
March , 21-24, 1996, Nashville, TN-USA

**APENDICE I : MODELO MATEMATICO DO ENFEIXAMENTO PARA
UMA CIDADE COM 9 CENTROS DE FIOS**

\ domingo
min

```

\ CUSTO EQUIPAMENTOS PONTO A PONTO - FUNCAO OBJETIVO
+ 0 INICIAL
+ 22 XWLJM1pi + 44 XWLJM1si + 60 XWLJM2pi + 120 XWLJM3pi
+ 22 XWLPP1pi + 44 XWLPP1si + 60 XWLPP2pi + 120 XWLPP3pi
+ 22 XWLT01pi + 44 XWLT01si + 60 XWLT02pi + 120 XWLT03pi
+ 22 XWLPT1pi + 44 XWLPT1si + 60 XWLPT2pi + 120 XWLPT3pi
+ 22 XWLFB1pi + 44 XWLFB1si + 60 XWLFB2pi
+ 22 XWLVC1pi + 44 XWLVC1si + 60 XWLVC2pi + 120 XWLVC3pi
+ 22 XWLAB1pi + 44 XWLAB1si + 60 XWLAB2pi + 120 XWLAB3pi
+ 22 XJMPP1pi + 44 XJMPP1si
+ 22 XJMAB1pi + 44 XJMAB1si + 60 XJMAB2pi + 120 XJMAB3pi
+ 22 XPPFB1pi + 44 XPPFB1si

\ CUSTO EQUIPAMENTOS ANEL BIDIRECIONAL - FUNCAO OBJETIVO
+ 250 Z1_2pi + 450 Z1_3pi
+ 150 Z2_2pi + 270 Z2_3pi
+ 200 Z3_2pi + 360 Z3_3pi
+ 200 Z4_2pi + 360 Z4_3pi
+ 200 Z5_2pi + 360 Z5_3pi
+ 150 Z6_2pi + 270 Z6_3pi

\ CUSTO EQUIPAMENTOS CADEIA - FUNCAO OBJETIVO
+ 160 W1_2pi + 300 W1_3pi
+ 110 W3_2pi

\ CUSTO EQUIPAMENTOS ANEL UNIDIRECIONAL - FUNCAO OBJETIVO
+ 105 U1_2pi + 195 U1_3pi
\ FINAL DA FUNCAO OBJETIVO
+ 0 FINALEQUIPO
SUBJECT TO
\ CAMINHOS DE CADA DEMANDA - EQUACOES DE DEMANDA

```

FUNCAO OBJETIVO

```

+ YWLJM + YWLJMadWLZ2JM + YWLJMaewLZ6TO + YWLJMadWLZ3VC + YWLJMadWLZ5JM
+ YWLJMaewLZ3AB + YWLJMaewLZ6PP + YWLJMadWLZ3AB + YWLJMaewLZ1JM + YWLJM_uWLJ1JM = 74
+ YWLPP + YWLPPadWLZ1JM + YWLPPaewLZ6PP + YWLPPaewLZ5PP + YWLPPaewLZ4JM
+ YWLPPaewLZ1JM = 96
+ YWLT0 + YWLT0adWLZ2PP + YWLT0adWLZ1JM + YWLT0adWLZ2JM + YWLT0aewLZ2PP
+ YWLT0aewLZ4JM + YWLT0aewLZ1JM + YWLT0_uWLJ1PP + YWLT0_uWLJ1JM = 94
+ YWLP + YWLPadWLZ4PT + YWLPadWLZ3PT + YWLPadWLZ1PT = 100
+ YWLF + YWLFadWLZ2PP + YWLFaewLZ2PP + YWLFaewLZ6PP + YWLFaewLZ5PP
+ YWLF_uWLJ1PP = 17
+ YWLVC + YWLVCadWLZ1VC + YWLVCadWLZ2JM + YWLVCadWLZ4AB + YWLVCaewLZ1VC
+ YWLVCadWLZ5JM + YWLVCaewLZ4JM + YWLVC_uWLJ1JM = 106
+ YWLAB + YWLABLh + YWLABaewLZ1AB + YWLABadWLZ3AB + YWLABadWLZ2JM +
YWLABadWLZ1AB
+ YWLABadWLZ5JM + YWLAB_uWLJ1JM = 138
+ YJMPP + YJMPPaewLZ1WL + YJMPPaewLZ5PP + YJMPPadTOZ6PP + YJMPPaewLZ6PP
+ YJMPPaewLZ3WL + YJMPPadABZ3WL + YJMPPaewLZ3WL + YJMPPadJMZ1WL = 12
+ YJTMh + YJTM0aewLZ5JM + YJTM0aewLZ2PP + YJTM0aewLZ2WL + YJTM0adJMZ2PP
+ YJTM0aewLZ3WL + YJTM0adABZ3WL + YJTM0aewLZ3WL + YJTM0adJMZ1WL +
YJTM0_uJM1WL = 13
+ YPTJh + YJMPadABZ3PT + YJMPaewLZ2WL + YJMPadTOZ6WL + YJMPadJMZ1PT
+ YJMPaewLZ3PT + YJMPadPPZ6WL + YJMPaewLZ5WL + YJMPadWLZ3PT +
YJMPaewLZ3PT
+ YJMP_uJM1WL = 8
+ YJFBh + YJFBaewLZ2PP + YJFBaewLZ2WL + YJFBadJMZ2PP + YJFBadTOZ6WL
+ YJFBaewLZ5PP + YJFBaewLZ3WL + YJFBadPPZ6WL + YJFBadTOZ6PP + YJFBaewLZ6PP
+ YJFBaewLZ5WL + YJFBadABZ3WL + YJFBaewLZ3WL + YJFBadJMZ1WL + YJFB_uJM1WL = 3
+ YJVCJh + YJVCadJMZ1VC + YJVCaewLZ3VC + YJVCaewLZ2WL + YJVCadTOZ6WL
+ YJVCadPPZ6WL + YJVCaewLZ1VC + YJVCaewLZ5WL + YJVCadABZ3VC + YJVC_uJM1WL = 4
+ YJMB + YJMBadJMZ2WL + YJMBadJMZ1AB + YJMBaewLZ2WL + YJMBaewLZ1AB
+ YJMBadWLZ3AB + YJMBadTOZ6WL + YJMBadPPZ6WL + YJMBaewLZ5WL + YJMBaewLZ3AB
+ YJMB_uJM1WL = 28
+ YJOPh + YJPTadPPZ5TO + YJPTadPPZ2JM + YJPTadWLZ1JM + YJPT0aewLZ1WL
+ YJPT0aewLZ4JM + YJPT0adJMZ4WL + YJPT0adJMZ1WL + YJPT0aewLZ1JM = 15
+ YJPPh + YJPPadPPZ6WL + YJPPadJMZ4PT + YJPPaewLZ1PT + YJPPadPPZ5WL
+ YJPPadWLZ4PT + YJPPadJMZ1PT + YJPPadWLZ3PT + YJPPadWLZ1PT = 10
+ YJFPB + YJFPBh + YJFPBPPZ6WL + YJFPBaewLZ1WL + YJFPBPPZ5WL + YJFPBadJMZ4WL
+ YJFPBadJMZ1WL = 16
+ YJPCPh + YJPCadJMZ1VC + YJPCadWLZ1VC + YJPCadPPZ2WL + YJPCadPPZ5JM
+ YJPCadJMZ4AB + YJPCadPPZ6WL + YJPCadWLZ4AB + YJPCadPPZ5WL + YJPCaewLZ1VC
+ YJPCaewLZ4JM + YJPCadJMZ4WL + YJPCaewLZ1VC = 5
+ YJABPh + YJABaewLZ2WL + YJABaewLZ2JM + YJABaewLZ1AB + YJABadPPZ2WL
+ YJABadPPZ5JM + YJABadJMZ1AB + YJABadWLZ3AB + YJABadPPZ6WL + YJABadWLZ1AB
+ YJABadPPZ5WL + YJABaewLZ1AB = 4

```

ATENDIMENTO AA DEMANDA

```

\ CAPACIDADES DE CADA ANEL BIDIRECIONAL (CAPZ)
+ 63 Z1_2pi + 252 Z1_3pi - CAPZ1 = 0
+ 63 Z2_2pi + 252 Z2_3pi - CAPZ2 = 0
+ 63 Z3_2pi + 252 Z3_3pi - CAPZ3 = 0
+ 63 Z4_2pi + 252 Z4_3pi - CAPZ4 = 0
+ 63 Z5_2pi + 252 Z5_3pi - CAPZ5 = 0
+ 63 Z6_2pi + 252 Z6_3pi - CAPZ6 = 0
\ CAPACIDADES DE CADA CADEIA (CAPW)
+ 63 W1_2pi + 252 W1_3pi - CAPW1 = 0
+ CAPW2 = 0
+ 63 W3_2pi - CAPW3 = 0
+ CAPW4 = 0

```

CAPACIDADE DE ANEIS

```

\ CAPACIDADES DO ARCO (CF-A-CF) - EQUACAO CAPACIDADE EQUIPAMENTOS
\ ANEL BIDIRECIONAL + CADEIA + PONTO A PONTO
+ 16 XWLJM1pi - 32 XWLJM1si - 63 XWLJM2pi - 252 XWLJM3pi -
+ folgaWLJMT = 0

```

CAPZ1 - CAPZ2 - CAPZ4 - CAPZ5 + WLJMT

```

- 16 XWLP1pi - 32 XWLP1si - 63 XWLP2pi - 252 XWLP3pi - CAPZ2 - CAPZ5 - CAPZ6 - CAPW3 - CAPW4 +
WLPPT + folgaWLPPT = 0
- 16 XWLT01pi - 32 XWLT01si - 63 XWLT02pi - 252 XWLT03pi - CAPZ6 + WLTOT + folgaWLTOT = 0
- 16 XWLP1pi - 32 XWLP1si - 63 XWLP2pi - 252 XWLP3pi - CAPZ1 - CAPZ3 - CAPZ4 - CAPW1 - CAPW2 +
WLPPT + folgaWLPPT = 0
- 16 XWLF1pi - 32 XWLF1si - 63 XWLF2pi + WLFBT + folgaWLFBT =
0
- 16 XWLV1pi - 32 XWLV1si - 63 XWLV2pi - 252 XWLV3pi - CAPZ3 +
WLVCT + folgaWLVCT = 0
- 16 XWLAB1pi - 32 XWLAB1si - 63 XWLAB2pi - 252 XWLAB3pi + WLABT +
folgaWLABT = 0
- 16 XJMPP1pi - 32 XJMPP1si - CAPZ2 - CAPW3 + JMPPT +
folgaJMPPT = 0
- CAPZ5 - CAPW4 + JMTOT + folgaJMTOT = 0
- CAPZ1 - CAPW2 + JMVCT + folgaJMVCT = 0
- 16 XJMAB1pi - 32 XJMAB1si - 63 XJMAB2pi - 252 XJMAB3pi - CAPZ4 -
CAPW1 + JMABT + folgaJMABT = 0
- CAPZ5 - CAPW4 + PPTOT + folgaPPTOT = 0
- 16 XPPFB1pi - 32 XPPFB1si + PPFBT + folgaPPFBT = 0
- CAPZ1 - CAPZ3 - CAPZ4 - CAPW1 - CAPW2 + PTABT +
folgaPTABT = 0
- CAPZ1 - CAPZ3 - CAPW2 + VCABT + folgaVCABT = 0
\ CAPACIDADES DE ANEL UNIDIRECIONAL - EQUACAO CAPACIDADE EQUIPAMENTOS
- 63 U1 2pi - 252 U1 3pi + U1 T + folgaU1 T = 0
\ CAMINHOS QUE PASSAM POR CADA ARCO - EQUACAO CAPACIDADE CAMINHOS

```

CALCULO DE CAPACIDADE NOS ARCOS

```

+ YWLJM + YABWlh + YTOJm + YPTJm + YFBJm + YVCJm + YWLPadWLZ1JM +
YWLPaeWLZ5PP + YWLT0adWLZ1JM + YWLT0aeWLZ2PP + YWLTadWLZ4PT + YWLTadWLZ1PT
+ YWLFbaeWLZ2PP + YWLFbaeWLZ5PP + YWLVcadWLZ1VC + YWLVcadWLZ4AB + YWLABadWLZ1AB
+ YJMPPaeJMZ1WL + YJMPPaeJMZ6PP + YJMTOadJMZ2PP + YJMPTadWLZ3PT + YJMFBadJMZ2PP
+ YJMFBadWLZ6PP + YJMVCaeJMZ1VC + YJMABadJMZ2WL + YJMBAeJMZ1AB + YJMBAadWLZ3AB
+ YPPT0adWLZ1JM + YPPT0aeJMZ1WL + YPPTaeJMZ1PT + YPPTadPPZ5WL + YPPTadWLZ4PT
+ YPPTadWLZ1PT + YPPTaeJMZ1WL + YPPTadPPZ5WL + YPPTadWLZ1VC + YPPTadWLZ2PT
+ YPVCadWLZ4AB + YPVCadPPZ5WL + YPVCaeJMZ1VC + YPVCadWLZ2JM + YPVCadPPZ2WL
+ YPVCadWLZ1AB + YPVCadPPZ5WL + YPVCaeJMZ1AB - WJMT = 0
+ YWLP + YTOPh + YPTPh + YFBPh + YVCPH + YWLMadWLZ2JM + YWLMadWLZ5JM
+ YWLT0adWLZ2PP + YWLT0adWLZ2JM + YWLFbaeWLZ2PP + YWLVcadWLZ2JM + YWLVcadWLZ5JM
+ YWLABadWLZ2JM + YWLABadWLZ5JM + YJMPPaeJMZ1WL + YJMPPadTOZ6PP + YJMPPaeVZ3WL
+ YJMPPadABZ3WL + YJMPPaeABZ3WL + YJMPPadJMZ1WL + YJMTOaeJMZ2WL + YJMTOadJMZ2PP
+ YJMPTaeJMZ2WL + YJMPTaeJMZ5WL + YJMFBadJMZ2WL + YJMFBadTOZ6PP + YJMFBadTOZ6PP
+ YJMFBaeJMZ5WL + YJMVCaeJMZ2WL + YJMVCaeJMZ5WL + YJMBAeJMZ2WL + YJMBAeJMZ5WL
+ YPPT0adWLZ1JM + YPPT0aeWLZ4JM + YPPTadWLZ4JM + YPPTadWLZ4PT + YPPTadWLZ3PT
+ YPPTadWLZ1PT + YPVCadWLZ1VC + YPVCadWLZ4AB + YPVCadWLZ1VC + YPVCaeWLZ4JM
+ YPVCadPPZ2WL + YPVCadPPZ2WL + YPVCaeWLZ1AB + YPVCadWLZ3AB + YPVCadWLZ1AB
- WLPPT = 0
+ YWLT0 + YTOJm + YTOPh + YWLMaeWLZ6TO + YWLMaeWLZ6PP + YWLPaeWLZ6PP
+ YWLFbaeWLZ6PP + YJMPPadTOZ6PP + YJMPPaeWLZ6PP + YJMTOaeJMZ2WL + YJMTOaeVZ3WL
+ YJMTOadABZ3WL + YJMTOadJMZ1WL + YJMTOadJMZ1WL + YJMPTadTOZ6WL + YJMPTadPPZ6WL
+ YJMFBadTOZ6WL + YJMFBadPPZ6WL + YJMFBadTOZ6PP + YJMFBaeWLZ6PP + YJMTOadTOZ6WL
+ YJMVCadPPZ6WL + YJMABadTOZ6WL + YJMABadPPZ6WL + YPPT0aeJMZ1WL + YPPT0adJMZ4WL
+ YPPT0adJMZ1WL + YPPTadPPZ6WL + YPPTadPPZ6WL + YPVCadPPZ6WL + YPVCadPPZ6WL
+ YJMTO uJMUIWL - WLTOT = 0
+ YWLP + YPTJm + YPTPh + YWLMaeWLZ3AB + YWLMaeWLZ1JM + YWLPaeWLZ4JM
+ YWLPaeWLZ1JM + YWLT0aeWLZ4JM + YWLT0aeWLZ1JM + YWLVcaeWLZ1VC + YWLVcaeWLZ4JM
+ YWLABaeWLZ1AB + YJMPPadABZ3WL + YJMPPadJMZ1WL + YJMTOadABZ3WL + YJMTOadJMZ1WL
+ YJMPTaeJMZ2WL + YJMPTadTOZ6WL + YJMPTaeVZ3PT + YJMPTadPPZ6WL + YJMPTaeJMZ5WL
+ YJMPTaeABZ3PT + YJMFBadABZ3WL + YJMFBadJMZ1WL + YJMVCaeJMZ1VC + YJMVCadABZ3VC
+ YJMBAeJMZ1AB + YJMBAeVZ3AB + YPPT0aeWLZ4JM + YPPT0adJMZ4WL + YPPT0adJMZ1WL
+ YPPT0aeWLZ1JM + YPPTadPPZ6WL + YPPTaeJMZ1PT + YPPTadPPZ5WL + YPPTadJMZ4WL
+ YPPTadJMZ1WL + YPVCaeWLZ1VC + YPVCaeWLZ4JM + YPVCadJMZ4WL + YPVCaeJMZ1VC
+ YPVCadWLZ1AB + YPVCadJMZ1AB + YJMPT uJMUIWL - WLPPT = 0
+ YWLF + YFBJm + YFBPh + YJMFBaeJMZ2WL + YJMFBadTOZ6WL + YJMFBaeVZ3WL
+ YJMFBadPPZ6WL + YJMFBaeJMZ5WL + YJMFBadABZ3WL + YJMFBaeABZ3WL + YJMFBadJMZ1WL
+ YPFBadPPZ6WL + YPFBadJMZ1WL + YPFBadPPZ5WL + YPFBadJMZ4WL + YPFBadJMZ1WL
+ YJMFB uJMUIWL - WLPPT = 0
+ YWLV + YVCJm + YVCPH + YWLMadWLZ3VC + YWLMadWLZ3AB + YWLTadWLZ3PT
+ YWLABadWLZ3AB + YJMPPaeVZ3WL + YJMPPaeABZ3WL + YJMTOaeVZ3WL + YJMTOadABZ3WL
+ YJMPTaeVZ3PT + YJMPTadWLZ3PT + YJMFBaeVZ3PT + YJMFBaeVZ3WL + YJMFBaeABZ3WL
+ YJMVCaeJMZ2WL + YJMVCadTOZ6WL + YJMVCadPPZ6WL + YJMVCaeJMZ5WL + YJMVCadABZ3VC
+ YJMABadWLZ3AB + YJMABadTOZ6WL + YPPTadWLZ3PT + YPVCadPPZ2WL + YPVCadPPZ6WL
+ YPVCadPPZ5WL + YPVCadJMZ4WL + YPVCadWLZ3AB + YJMVC uJMUIWL - WLVCT = 0
+ YWLAB + YJMABadJMZ2WL + YJMBAeJMZ2WL + YJMABadTOZ6WL + YJMABadPPZ6WL
+ YJMBAeJMZ5WL + YPVCadPPZ2WL + YPVCadPPZ2WL + YPVCadPPZ6WL + YPVCadPPZ5WL
+ YJMAB uJMUIWL - WLABT = 0
+ YJMPP + YABPPH + YWLMadWLZ2JM + YWLMaeWLZ6PP + YWLPadWLZ1JM + YWLPaeWLZ4JM
+ YWLPaeWLZ1JM + YWLT0adWLZ2JM + YWLT0aeWLZ2PP + YWLFbaeWLZ2PP + YWLVcadWLZ2JM
+ YWLABadWLZ2JM + YJMTOaeJMZ2PP + YJMTOaeJMZ2WL + YJMPTaeJMZ2WL + YJMPTadPPZ6WL
+ YJMFBaeJMZ2PP + YJMFBaeJMZ2WL + YJMFBadPPZ6WL + YJMVCaeJMZ2WL + YJMVCadPPZ6WL
+ YJMBAeJMZ2WL + YJMBAadPPZ6WL + YPPT0adPPZ2JM + YPPT0aeJMZ1WL + YPPT0adJMZ4WL
+ YPPT0adJMZ1WL + YPPTadJMZ4PT + YPPTaeJMZ1PT + YPPTadJMZ1PT + YPPTaeJMZ1WL
+ YPPTadJMZ4WL + YPPTadJMZ1WL + YPVCadWLZ1VC + YPVCadPPZ2WL + YPVCadJMZ4AB
+ YPVCadJMZ1AB + YPVCadWLZ1AB + YWLV uWLU1JM - JMVCT = 0
+ YABWlh + YJMAB + YABPPH + YWLMaeWLZ3AB + YWLMadWLZ3AB + YWLPaeWLZ4JM
+ YWLT0aeWLZ4JM + YWLTadWLZ4PT + YWLVcadWLZ4AB + YWLVcaeWLZ4JM + YWLABadWLZ2JM
+ YWLABadWLZ5JM + YJMPPadABZ3WL + YJMPPaeABZ3WL + YJMTOadABZ3WL + YJMTOadJMZ3WL
+ YJMPTadABZ3PT + YJMPTaeABZ3PT + YJMFBadABZ3WL + YJMFBaeABZ3WL + YJMVCaeABZ3VC
+ YJMVCadABZ3VC + YPPT0adJMZ4WL + YPPT0aeWLZ4WL + YPPTadJMZ4PT + YPPTadWLZ4PT
+ YPPTadJMZ4WL + YPVCadJMZ4AB + YPVCadWLZ4AB + YPVCaeWLZ4JM + YPVCadJMZ4WL
+ YPVCadJMZ4WL + YPVCadPPZ2JM + YPVCadPPZ5JM + YWLAB uWLU1JM - JMABT = 0
+ YWLMadWLZ5JM + YWLMaeWLZ6PP + YWLPaeWLZ6PP + YWLPaeWLZ5PP + YWLT0adWLZ2PP
+ YWLT0aeWLZ2PP + YWLFbaeWLZ5PP + YWLVcadWLZ5JM + YWLABadWLZ5JM
+ YJMPPaeJMZ5PP + YJMPPadTOZ6PP + YJMTOaeJMZ5TO + YJMPTadTOZ6WL + YJMPTaeJMZ5WL
+ YJMFBadTOZ6WL + YJMFBaeJMZ5PP + YJMFBadTOZ6PP + YJMFBaeJMZ5WL + YJMVCadTOZ6WL
+ YJMVCaeJMZ5WL + YJMBAeJMZ5WL + YPPT0adPPZ2WL + YPPT0adWLZ1JM + YPPT0adWLZ1JM
+ YPPT0aeWLZ4JM + YPPT0aeWLZ1JM + YPPTadPPZ5WL + YPPTadPPZ5WL + YPVCadPPZ5JM
+ YPVCadPPZ5WL + YPVCadPPZ5WL + YWLT0 uWLU1JM - JMTOT = 0
+ YWLMadWLZ3VC + YWLMaeWLZ1JM + YWLPaeWLZ1JM + YWLT0aeWLZ1JM + YWLTadWLZ1PT
+ YWLVcadWLZ1VC + YWLVcadWLZ2JM + YWLVcadWLZ5JM + YWLVcaeWLZ4JM + YWLABadWLZ1AB
+ YJMPPaeVZ3WL + YJMPPadJMZ1WL + YJMTOaeVZ3WL + YJMTOadJMZ1WL + YJMPTadJMZ1PT
+ YJMPTaeVZ3PT + YJMFBaeVZ3WL + YJMFBadJMZ1VC + YJMVCadJMZ1PT + YJMBAadJMZ1AB
+ YJMBAeVZ3AB + YPPT0adJMZ1WL + YPPT0aeWLZ1JM + YPPTadJMZ1PT + YPPTadWLZ1PT
+ YPPTadJMZ1WL + YPVCadWLZ1VC + YPVCadPPZ2WL + YPVCadJMZ4AB + YPVCadWLZ4JM
+ YPVCadJMZ1AB + YPVCadWLZ1AB + YWLV uWLU1JM - JMVCT = 0
+ YABWlh + YJMAB + YABPPH + YWLMaeWLZ3AB + YWLMadWLZ3AB + YWLPaeWLZ4JM
+ YWLT0aeWLZ4JM + YWLTadWLZ4PT + YWLVcadWLZ4AB + YWLVcaeWLZ4JM + YWLABadWLZ2JM
+ YWLABadWLZ5JM + YJMPPadABZ3WL + YJMPPaeABZ3WL + YJMTOadABZ3WL + YJMTOadJMZ3WL
+ YJMPTadABZ3PT + YJMPTaeABZ3PT + YJMFBadABZ3WL + YJMFBaeABZ3WL + YJMVCaeABZ3VC
+ YJMVCadABZ3VC + YPPT0adJMZ4WL + YPPT0aeWLZ4WL + YPPTadJMZ4PT + YPPTadWLZ4PT
+ YPPTadJMZ4WL + YPVCadJMZ4AB + YPVCadWLZ4AB + YPVCaeWLZ4JM + YPVCadJMZ4WL
+ YPVCadJMZ4WL + YPVCadPPZ2JM + YPVCadPPZ5JM + YWLAB uWLU1JM - JMABT = 0
+ YWLMadWLZ5JM + YWLMaeWLZ6PP + YWLPaeWLZ6PP + YWLPaeWLZ5PP + YWLT0adWLZ2PP
+ YWLT0aeWLZ2PP + YWLFbaeWLZ5PP + YWLVcadWLZ5JM + YWLABadWLZ5JM
+ YJMPPaeJMZ5PP + YJMPPadTOZ6PP + YJMTOaeJMZ5TO + YJMPTadTOZ6WL + YJMPTaeJMZ5WL

```

CALCULO DE FLUXO TOTAL NOS ARCOS

```

+ YJMPtaeJMZ5WL + YJMFbaeJMZ5PP + YJMFbadPPZ6WL + YJMFbaeWLZ6PP + YJMFbaeJMZ5WL
+ YJMVcaDPZ6WL + YJMVcaeJMZ5WL + YJMABadPPZ6WL + YJMABaeJMZ5WL + YPPToadPPZ5TO
+ YPPPTadPPZ6WL + YPPPTadPPZ5WL + YPPFbadPPZ6WL + YPPFbadPPZ5WL + YPPVcadPPZ5JM
+ YPPVcadPPZ6WL + YPPVcadPPZ5WL + YPPABadPPZ5JM + YPPABadPPZ6WL + YPPABadPPZ5WL
+ YWLT0 uWLUI1PP - PPTOT = 0
+ YPPFB + YWLFbadWLZ2PP + YWLFbaeWLZ2PP + YWLFbaeWLZ6PP + YWLFbaeWLZ5PP
+ YJMFbaeJMZ2PP + YJMFbadJMZ2PP + YJMFbaeJMZ5PP + YJMFbadTOZ6PP + YJMFbaeWLZ6PP
+ YWLFb uWLUI1PP - PPFBT = 0
+ YWLJmaeWLZ3AB + YWLJmaeWLZ1JM + YWLPPaeWLZ4JM + YWLPPaeWLZ1JM + YWLT0aeWLZ4JM
+ YWLT0aeWLZ1JM + YWLTadWLZ4PT + YWLTadWLZ3PT + YWLTadWLZ1PT + YWLVcaeWLZ1VC
+ YWLVcaeWLZ4JM + YWLABaeWLZ1AB + YJMPPadABZ3WL + YJMPPadJMZ1WL + YJMTOadABZ3WL
+ YJMTOadJMZ1WL + YJMPTadABZ3PT + YJMPTadJMZ1PT + YJMPTadWLZ3PT + YJMFbadABZ3WL
+ YJMFbadJMZ1WL + YJMVcaeJMZ1VC + YJMVcadABZ3VC + YJMABaeJMZ1AB + YJMABaeVCZ3AB
+ YPPToaeWLZ4JM + YPPToadJMZ4WL + YPPToadJMZ1WL + YPPToaeWLZ1JM + YPPPTadJMZ4PT
+ YPPPTadWLZ4PT + YPPPTadJMZ1PT + YPPPTadWLZ3PT + YPPPTadWLZ1PT + YPPFbadJMZ4WL
+ YPPFbadJMZ1WL + YPPVcaeWLZ1VC + YPPVcaeWLZ4JM + YPPVcadJMZ4WL + YPPVcaeJMZ1VC
+ YPPABaeWLZ1AB + YPPABaeJMZ1AB - PTABT = 0
+ YWLJmaeWLZ3AB + YWLJmaeWLZ1JM + YWLPPaeWLZ1JM + YWLT0aeWLZ1JM + YWLTadWLZ3PT
+ YWLTadWLZ1PT + YWLVcadWLZ4AB + YWLVcaeWLZ1VC + YWLABadWLZ3AB + YWLABadWLZ1AB
+ YJMPPaeABZ3WL + YJMPPadJMZ1WL + YJMTOaeABZ3WL + YJMTOadJMZ1WL + YJMPTadJMZ1PT
+ YJMPTadWLZ3PT + YJMPTaeABZ3PT + YJMFbaeABZ3WL + YJMFbadJMZ1WL + YJMVcaeABZ3VC
+ YJMVcaeJMZ1VC + YJMABadJMZ1AB + YJMABadWLZ3AB + YPPToadJMZ1WL + YPPToaeWLZ1JM
+ YPPPTadJMZ1PT + YPPPTadWLZ3PT + YPPPTadWLZ1PT + YPPFbadJMZ1WL + YPPVcadJMZ4AB
+ YPPVcadWLZ4AB + YPPVcaeWLZ1VC + YPPVcaeJMZ1VC + YPPABadJMZ1AB + YPPABadWLZ3AB
+ YPPABadWLZ1AB - VCABT = 0

```

```

\ CAMINHOS QUE PASSAM POR ANEL UNIDIRECIONAL - EQUACAO CAPACIDADE CAMINHOS
+ YWLJM uWLUI1JM + YWLT0 uWLUI1PP + YWLT0 uWLUI1JM + YWLFb uWLUI1PP + YWLVc uWLUI1JM
+ YWLAB uWLUI1JM + YJMTO uJMUI1WL + YJMPT uJMUI1WL + YJMFb uJMUI1WL + YJMVc uJMUI1WL
+ YJMAB uJMUI1WL - U1_T = 0

```

FINAL DAS RESTRICOES

```

FINALRESTRICOES = 1
BOUNDS
INICIAL = 1
FINALEQUIPO = 1
Z1_2pi <= 1
Z1_3pi <= 1
Z2_2pi <= 1
Z2_3pi <= 1
Z3_2pi <= 1
Z3_3pi <= 1
Z4_2pi <= 1
Z4_3pi <= 1
Z5_2pi <= 1
Z5_3pi <= 1
Z6_2pi <= 1
Z6_3pi <= 1
W1_2pi <= 1
W1_3pi <= 1
W3_2pi <= 1
U1_2pi = 1
U1_3pi <= 1
xWLJM1pi <= 1
xWLJM1si <= 1
xWLJM2pi <= 1
xWLJM3pi <= 1
xWLEP1pi <= 1
xWLEP1si <= 1
xWLPP2pi <= 1
xWLPP3pi <= 1
xWLT01pi <= 1
xWLT01si <= 1
xWLT02pi <= 1
xWLT03pi <= 1
xWLPT1pi <= 1
xWLPT1si <= 1
xWLPT2pi <= 1
xWLPT3pi <= 1
xWLFb1pi <= 1
xWLFb1si <= 1
xWLFb2pi <= 1
xWLVc1pi <= 1
xWLVc1si <= 1
xWLVc2pi <= 1
xWLVc3pi <= 1
xWLAB1pi <= 1
xWLAB1si <= 1
xWLAB2pi <= 1
xWLAB3pi <= 1
xJMPP1pi <= 1
xJMPP1si <= 1
xJMAB1pi <= 1
xJMAB1si <= 1
xJMAB2pi <= 1
xJMAB3pi <= 1
xPPFB1pi <= 1
xPPFB1si <= 1
INTEGERS
Z1_2pi
Z1_3pi
Z2_2pi
Z2_3pi
Z3_2pi
Z3_3pi
Z4_2pi
Z4_3pi
Z5_2pi
Z5_3pi
Z6_2pi
Z6_3pi
W1_2pi
W1_3pi
W3_2pi
U1_2pi
U1_3pi

```

CALCULO DE FLUXO TOTAL EM ANEL UNIDIREC.

XWLJM1pi
XWLJM1si
XWLJM2pi
XWLJM3pi
XWLP1pi
XWLP1si
XWLP2pi
XWLP3pi
XWLT01pi
XWLT01si
XWLT02pi
XWLT03pi
XWLT11pi
XWLT11si
XWLT2pi
XWLT3pi
XWLF1pi
XWLF1si
XWLF2pi
XWLV1pi
XWLV1si
XWLV2pi
XWLV3pi
XWLAB1pi
XWLAB1si
XWLAB2pi
XWLAB3pi
XJMPP1pi
XJMPP1si
XJMAB1pi
XJMAB1si
XJMAB2pi
XJMAB3pi
XPPFB1pi
XPPFB1si
END
END