

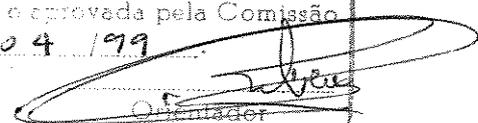
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**REDE DE TRANSMISSÃO SDH: PLANEJAMENTO
DA CAMADA LÓGICA (PCLOG)**

Joana Teixeira Machado

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – como parte dos requisitos
exigidos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ABRIL DE 1999

| |
|--|
| Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por <u>Joana T. Machado</u> e aprovada pela Comissão julgada em <u>22/04/99</u>  Orientador |
|--|

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Engenharia de Sistemas

REDE DE TRANSMISSÃO SDH: PLANEJAMENTO DA CAMADA LÓGICA (PCLOG)

Joana Teixeira Machado

BANCA

TITULARES: Raul Vinhas Ribeiro (orientador)
Takaaki Ohishi
Carlos Magnus Carlson Filho

SUPLENTE: Akebo Yamakami

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – como parte dos requisitos
exigidos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ABRIL DE 1999

99.14888



| | |
|------------|-------------------------------------|
| UNIDADE | BC |
| N.º C.M.P. | |
| | |
| | 38207 |
| | 229/99 |
| | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | R\$ 11,00 |
| DATA | 07/08/99 |
| N.º C.P.C. | |

CM-00125552-3

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

M119r Machado, Joana Teixeira
Rede de transmissão SDH: planejamento da camada
lógica (PCLOG). / Joana Teixeira Machado.--
Campinas, SP: [s.n.], 1999.

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

1. Sistemas de telecomunicações. 2. Sistemas de
transmissão de dados. I. Ribeiro, Raul Vinhas. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

À minha família

Este trabalho contou com o apoio financeiro do CNPq.

AGRADEÇO

- * ao Prof. Raul, meu orientador, pela *dedicada orientação, apoio e incentivo* durante o desenvolvimento desta tese;
- * aos Professores Raul, Hermano, Christiano, Takaaki, Akebo, Paulo França e Vinícius pelas disciplinas ministradas durante esta pós-graduação;
- * a Prof^a. Selma Arenales pela primeira orientação e *amizade*;
- * aos funcionários Márcia, Walcir, Fabiana, Luciana, Gustavo, Noêmia e Mazé;
- * a Fran pela *grande colaboração* no desenvolvimento do meu programa computacional;
- * a Alda e ao Bergamaschi por me *ensinarem* tudo sobre Telecomunicações, e em especial ao Bergamaschi por toda a *ajuda, contribuição e participação* neste trabalho;
- * a Valdeli pela *companhia* de dividir um apê comigo durante o período do mestrado;
- * aos amigos Daniel, Edilson, Marcelo e Marquinhos pela *infinita ajuda* com esse tal de word!
- * a Lú, *minha grande amiga*, pelo incentivo e bate-papos virtuais;
- * a Cris, Fran e Lúcia pela *amizade* e pelos momentos de *descontração* em nossos happy-hours!
- * a *companhia* de todos os amigos do laboratório Densis e Cose, *em especial* a Cris, Val, Fran, Luciana, Débora, Ernesto, Lúcia, Cíntia, Jeanne, Vitória, Edilson, Daniel, Marcelo, Álvaro, Arce, Marquinhos, Alexandre, Marcos, Alda, Bergamaschi, Adriano, Cláudio, Pablo, Regina;
- * aos meus amigos e amigas Flávia, Lú, Fê, Susi, Daniela, Edson, Paulinho, Paulão pela *presença* diária on-line!
- * ao Jú pelo *apoio*, pelo *carinho* e pelos *beijos!!* E também pela ajuda com as traduções;
- * aos meus pais, Machado e Janét, pelo *enorme incentivo, carinho e constata interesse* por esse trabalho, e em especial ao meu pai, pela correção gramatical;
- * aos meus irmãos, Júlia e Virgílio, pela *amizade*;
- * aos meus tios, Renato, Susi, Oswaldo, Gylce e Paulo; às minhas avós, Hilda e Armelinda e às minhas gracinhas Lucas, Helga e Natacsha pela *amizade e incentivo*;

SUMÁRIO

A nova tecnologia de equipamentos de transmissão da Hierarquia Digital Síncrona (**SDH** – *Synchronous Digital Hierarchy*) vem compor um novo cenário tecnológico no mundo das Telecomunicações, revolucionando o atendimento aos serviços atuais e futuros e dando suporte à implementação da *Rede Digital de Serviços Integrados – RDSI*.

Esta tese apresenta uma nova visão do planejamento da Rede SDH de Transmissão, baseada numa arquitetura de rede decomposta em *camadas funcionais*. A divisão em camadas funcionais possibilita o desenvolvimento de uma metodologia de planejamento para cada *camada funcional*. A decomposição proposta aqui considera quatro camadas: de **circuitos, lógica, de transmissão e física**.

Neste trabalho propomos uma metodologia de **Planejamento da Camada Lógica**, camada funcional cuja função é “arrumar” demandas de canais E1 (2Mbits/s), ou de ordem superior, em *containers* virtuais VC-4. A atividade de arrumar eficientemente tributários dentro de VC-4 é essencial, já que um VC-4 acrescido de um cabeçalho de seção (SOH – *Section OverHead*) torna-se um STM-1, sinal de transporte básico SDH.

A metodologia de planejamento da Camada Lógica tem o objetivo de minimizar o número de *containers* VC-4 e a quantidade de vezes que as demandas em 2Mbits/s são transpostas de um VC-4 para o outro ao longo de seu trajeto na rede.

ABSTRACT

Synchronous Digital Hierarchy (SDH) is a new technology in the area of transmission, and it has brought numerous advantages to the world of telecommunications. It guarantees a more flexible and efficient transmission network, capable of meeting the service needs of telecommunications, both present and future.

The present work proposes a methodology for planning an SDH transmission network based on the decomposition of the network into *functional layers*. The planning of such a transmission network is based on this decomposition, and each of the layers is considered independently, taking into consideration the information of the higher level. The architecture of the network presented in this study is a network decomposed into four functional layers: *Circuit Layer*, *Path Layer*, with high and low orders sub-layers, *Transmission Media Layer* and *Physical Layer*.

A planning algorithm for the Path Layer is proposed which will provide input for the next lower transmission media layer. The Path Layer is the layer responsible for the allocation of the 2 Mbits/s channels (E1) into *virtual containers* (VC). Groups of these virtual containers, along with the *Section Overhead* (SOH), form STM-1 modules (*Synchronous Transport Modules*), which are the basic transport signals of SDH transmission. The planning of the path layer is designed to minimize the number of containers required, as well as the number of times the 2 Mbits/s demands are transposed from one VC to another during transmission through the network.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Sistemas de Telecomunicações..... | 1 |
| 1.2. Objetivos da tese..... | 3 |
| 1.3. Composição da tese..... | 4 |
| | |
| CAPÍTULO 2 – A MODERNA REDE DE TRANSPORTE EM TELECOMUNICAÇÕES: O CONCEITO DE TRANSMISSÃO SDH..... | 6 |
| 2.1. Introdução: Novo Cenário do Setor de Telecomunicações..... | 6 |
| 2.2. A Tecnologia de Transmissão SDH..... | 7 |
| 2.3. Os Novos Equipamentos e Arquiteturas de Rede SDH..... | 10 |
| 2.4. Planejamento da Rede de Telecomunicações..... | 18 |
| | |
| CAPÍTULO 3 – UMA NOVA PROPOSTA DE PLANEJAMENTO DA REDE DE TRANSMISSÃO..... | 21 |
| 3.1. Introdução: A Nova Concepção de Divisão da Rede de Transmissão..... | 21 |
| 3.2. As Camadas Funcionais..... | 22 |
| 3.3. A Camada Lógica..... | 26 |
| | |
| CAPÍTULO 4 – A PROPOSTA DE PLANEJAMENTO DA CAMADA LÓGICA (PCLOG)..... | 29 |
| 4.1. Introdução: A importância do Planejamento da Camada Lógica..... | 29 |
| 4.2. A Metodologia de Planejamento da Camada Lógica..... | 29 |
| 4.2.1. VC-4 direto e VC-4 misto..... | 30 |
| 4.2.2. A divisão das demandas..... | 30 |
| 4.2.3. As quatro fases da metodologia de alocação..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 5 – APLICAÇÕES DO PCLOG E RESULTADOS..... | 58 |
| 5.1. Apresentação dos resultados obtidos para a rede da cidade de Belo Horizonte..... | 58 |
| 5.2. Apresentação dos resultados obtidos para a rede da Área Metropolitana de São Paulo..... | 62 |
| CAPÍTULO 6 – APLICAÇÕES DO ENFEIXAMENTO E RESULTADOS..... | 65 |
| 6.1. Rede de Belo Horizonte..... | 66 |
| 6.2. Rede da Área Metropolitana de São Paulo..... | 68 |
| CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES..... | 71 |
| ANEXO – Dados da Rede da Área Metropolitana de São Paulo..... | 73 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 77 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Sistemas de Telecomunicações

Telecomunicação é a transmissão de informações de um ponto para um ou mais pontos destinatários definidos e distantes. Um **Sistema de Telecomunicações** é constituído de um conjunto de equipamentos e meios de transmissão que tem a finalidade geral de coletar, endereçar, transportar e entregar as informações, a partir de um ponto fonte, para um ou mais pontos destinos.

O Sistema de Telecomunicações, devido a sua complexidade, é composto por diversos tipos de redes, que utilizam equipamentos e tecnologias específicas. Podemos dividir a Rede de Telecomunicações em: *Rede de Comutação*, responsável pela conexão entre os assinantes. Cada assinante está conectado a uma central de comutação, instalada em centrais telefônicas ou centros de fios (um centro de fio – CF – pode abrigar mais de uma central de comutação); *Rede Externa* que liga os assinantes aos CF's; e *Rede de Transmissão*, que interliga os CF's. No Brasil quase toda a Rede de Transmissão é óptica, ou seja, usa fibras ópticas como meio transmissor, que permite o tráfego simultâneo de enorme quantidade de sinais em altas velocidades. Esta tese estuda o uso da tecnologia SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) de transmissão de sinais de alta velocidade.

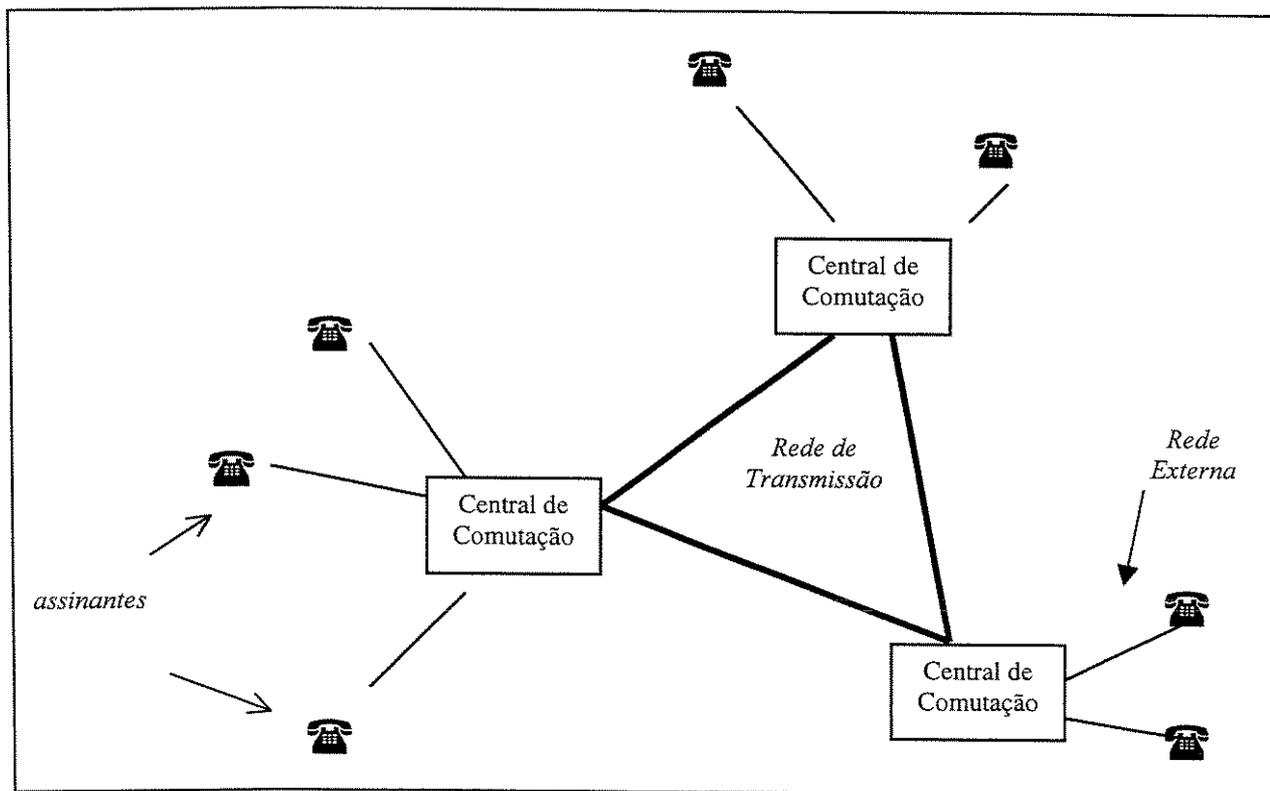


Figura 1.1. Componentes da Rede de Telecomunicações.

A Rede de Telecomunicações oferece diversos tipos de serviços. A tabela 1.1 indica os principais serviços.

| Serviços | Alguns exemplos |
|--|--|
| Telefonia | Voz |
| Transmissão de dados em baixa velocidade | Telex, Fax, Internet |
| Transmissão de dados em alta velocidade | Imagem e som: CATV (TV a cabo), VOD (Vídeo sob demanda), videoconferência, comunicação de dados em redes de computadores |

Tabela 1.1. Alguns serviços de Telecomunicações.

Nesta tese o serviço utilizado como demanda é o serviço de telefonia. Um canal telefônico – canal E1 – tem taxa de transmissão de 2 Mbits/s .

Hoje existem redes independentes para a transmissão desses serviços, como por exemplo as redes de telefonia, de telex, redes privadas para CATV, redes públicas e privadas para comunicação de dados. Essas redes tendem a constituir uma **Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI)**, capaz de prover todo o tipo de serviços de Telecomunicações disponíveis, simultaneamente, numa única rede de Telecomunicações.

1.2. Objetivos da tese

A nova tecnologia de transmissão **SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy*), juntamente com o uso da fibra óptica como meio transmissor, trouxe inúmeras vantagens para o mundo das Telecomunicações, respondendo às deficiências da tradicional **PDH** (*Plesiochronous Digital Hierarchy*). A tecnologia SDH garante uma Rede de Transmissão mais flexível e eficaz, capaz de atender ao crescimento constante de demandas de Telecomunicações atuais e futuras. Contudo, para se obter um ótimo aproveitamento dos recursos da nova tecnologia e oferecer serviços com qualidade atendendo ao cliente mais rapidamente e sob demanda, é de fundamental importância o planejamento desta rede.

O planejamento da Rede SDH de Transmissão, componente da rede mais geral de Telecomunicações, é uma etapa muito importante do ponto de vista econômico, uma vez que define o conjunto de equipamentos a ser instalado na rede, suas taxas de transmissão e a distribuição das demandas através da rede obtida, com o objetivo de minimizar custos [Bergamaschi, 1996, Bortolon, 1996b, Quaglia, 1997].

A nossa proposta descreve a Rede de Transmissão em termos funcionais, decompondo-a em quatro **camadas funcionais**, que são: camada de circuitos, lógica, de transmissão e física. A decomposição em camadas permite propormos um planejamento para cada camada. Em [Sexton e Reid, 1997] e [Bortolon, 1996a] encontram-se outras propostas de decomposição da Rede de Transmissão em camadas.

Neste estudo enfatizamos o Planejamento da Camada Lógica. A Camada Lógica é a camada responsável pela alocação e roteamento de canais E1 (2Mbits/s) em **containers virtuais**

de alta ordem –VC-4. *Containers* VC-4, acrescidos de cabeçalhos de seção, formam módulos STM-1 (*Synchronous Transport Module*), sinais básicos de transporte na rede SDH. A metodologia proposta para a otimização do Planejamento da Camada Lógica (PCLOG) é baseada em regras criteriosas que buscam alocar toda a demanda da rede utilizando o menor número possível de *containers* VC-4 e sendo submetidas ao mínimo de atividades de transconexão em pontos intermediários da rota. Transconexão é a atividade de transpor demandas de 2Mbits/s de um VC-4 para outro ao longo de seu trajeto na rede. Para isso definiremos dois tipos de *containers* VC-4: *diretos* e *mistos*. VC-4 diretos não sofrem atividades de transconexão, mas diminuir esta atividade pode implicar em aumentar o número de VC-4 diretos da rede.

O objetivo desta tese é obter números mínimos de *containers* VC-4 e de atividades de transconexão, com um compromisso de mínimo custo. O PCLOG foi aplicado nas redes da Área Metropolitana de São Paulo, a maior rede urbana do país, e da cidade de Belo Horizonte, e os resultados obtidos são apresentados nesta tese.

1.3. Composição da tese

Esta tese está dividida em 7 capítulos e 1 anexo.

O capítulo 2 descreve o novo cenário do setor de Telecomunicações, destacando os equipamentos e arquiteturas da tecnologia SDH. Também neste capítulo apresentamos uma breve discussão sobre as etapas do Planejamento da Rede de Telecomunicações.

O capítulo 3 apresenta a nova concepção de divisão em camadas funcionais da Rede de Transmissão e descreve as funcionalidades das quatro camadas, enfatizando a camada lógica.

No capítulo 4 apresentamos a proposta de planejamento da camada lógica, descrevendo uma metodologia para este planejamento.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e análises para a aplicação do algoritmo PCLOG nas redes da cidade de Belo Horizonte e da área Metropolitana de São Paulo.

No capítulo 6 destacamos uma aplicação das matrizes de *containers* VC-4 no planejamento da camada de transmissão, comparando resultados do capítulo 5 com resultados obtidos por [Bergamaschi, 1996].

O capítulo 7 é um capítulo de comentários e conclusões.

No Anexo são apresentados alguns dados da Rede Metropolitana de São Paulo, tais como o mapa geográfico indicando os centros de fios, a *clusterização* usada nesta tese, a pendência dos nós e outras informações de interesse.

CAPÍTULO 2

A MODERNA REDE DE TRANSPORTE EM TELECOMUNICAÇÕES: O CONCEITO DE TRANSMISSÃO SDH

2.1. Introdução: Novo Cenário do Setor de Telecomunicações

A nova geração de equipamentos de transmissão, a Hierarquia Digital Síncrona (**SDH** – *Synchronous Digital Hierarchy*), acompanhada da digitalização da área de comutação, compôs um novo cenário tecnológico no mundo das Telecomunicações. Os efeitos desta revolução estão atingindo usuários finais, operadores de rede e fabricantes de equipamentos.

Este novo cenário vem possibilitando um melhor atendimento dos serviços existentes de telefonia (transmissão de voz) e permitindo a implantação de novos serviços digitais, tais como a transmissão de dados, serviços de linhas privadas não comutadas (LP), sinais de TV de alta definição, sistemas CAD/CAM, videoconferências, acesso remoto de dados, transferência de informações via multimídia, entre outros. A nova tecnologia SDH oferece soluções de rede capazes de atender aos serviços atuais e futuros, dando suporte à implementação da *Rede Digital de Serviços Integrados* – **RDSI** [RNT 1997 e Barradas, 1995].

Um dos benefícios da tecnologia SDH na área de transmissão é a simplificação da rede, consequência do uso do sistema de transmissão síncrona, que leva a uma significativa redução no número de equipamentos da rede. Essa característica garante uma rede de transmissão mais flexível e eficaz. Outra grande vantagem desta tecnologia é a de permitir compatibilidade entre equipamentos de transmissão de diferentes fabricantes [Nakamura et al., 1995].

Com todas essas mudanças tecnológicas, juntamente com a explosão no tamanho da demanda, tanto para telefonia convencional como para os novos serviços digitais, é de

fundamental importância o planejamento da rede de telecomunicações, em especial o planejamento da rede de transmissão, para buscar um ótimo aproveitamento dos recursos da nova tecnologia e compatibilidades com tecnologias já existentes.

Neste capítulo descreveremos as funcionalidades dos equipamentos SDH e suas vantagens. Apresentamos também uma breve discussão sobre o Planejamento da Rede de Telecomunicações.

2.2. A Tecnologia de Transmissão SDH

O surgimento de serviços de Telecomunicações mais sofisticados, baseados na transmissão de dados e vídeo, começou a exigir uma rede de transmissão mais flexível e eficaz. Frente a essas exigências, a tradicional rede **PDH** (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) encontrou dificuldades.

A primeira grande limitação do sistema de transmissão plesiócrono diz respeito à flexibilidade da rede. A tarefa de acessar um simples canal E1 (2 Mbits/s) numa estrutura de 140 Mbits/s implica na demultiplexação total da estrutura, ou seja, exige que toda a estrutura seja desmontada. Essa quantidade de demultiplexação, além de gerar gastos altíssimos, exige uma atenção enorme no controle da rede. Tanta atividade de demultiplexação dificulta a tarefa de manter atualizados os registros de interconexão dos equipamentos, aumentando a possibilidade de erros. Outra limitação da tecnologia PDH é a falta de uma estrutura de quadro suficiente para carregar informações de gerenciamento. A estrutura de quadro para os quatro níveis PDH destina poucos bits para gerência da rede.

Já a **rede síncrona SDH** permite aumentar a capacidade de transporte para taxas de Gbits/s, mantendo suas características de flexibilidade, atendendo ao cliente mais rapidamente e sob demanda e oferecendo maior qualidade nos serviços. Os canais de gerenciamento de rede dentro da estrutura SDH de transmissão permitem que o sistema seja totalmente controlado por *software*. Além disso, cerca de 5% da capacidade dos sinais SDH são reservados para o carregamento de informações de gerência, o que simplifica uma enorme quantidade de outras funções, como o monitoramento de desempenho da rede, gerenciamento de configuração e

recursos, segurança da rede e seu planejamento, gerando inúmeras vantagens na operação do sistema [Nakamura et al., 1995].

Em contraposição à principal limitação PDH, a *Hierarquia Digital Síncrona* apresenta uma enorme facilidade de inserção e retirada de canais E1 dos sinais multiplexados a taxas superiores. Esta facilidade se dá devido ao entrelaçamento de bytes nas atividades de multiplexar e demultiplexar sinais digitais. Na tecnologia PDH, esta atividade é realizada por entrelaçamento de bits.

A nova tecnologia buscou uma padronização completa, que envolve taxas de bits, estrutura de quadro e de multiplexação, interfaces de tributários, interfaces de linha do sinal da SDH, mecanismos de proteção, funcionalidades dos equipamentos de transmissão e gerência e interfaces de gerência.

O ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*) recomendou¹ tais padrões, começando pelas taxas de bits de transmissão dentro da SDH.

O primeiro nível da SDH tem taxa de transmissão de 155.52 Mbits/s. Este sinal é denominado módulo *STM-1 (Synchronous Transport Module)* e é o sinal básico de transporte na rede SDH. Esses módulos de transporte são, então, multiplexados, formando os demais níveis hierárquicos, de taxas: 622.08 Mbits/s, denominado STM-4; 2488.32 Mbits/s, denominado STM-16 e 9953.28 Mbits/s, denominado STM-64. Cada nível tem taxa exatamente equivalente a quatro vezes a taxa do nível anterior.

Continuando sua padronização, o ITU-T definiu a estrutura de multiplexação SDH, onde um sinal STM-1 pode carregar sinais de taxas menores chamados tributários. Esses tributários são multiplexados e alocados em *containers*, e depois carregados em módulos STM-1. A esses *containers* são adicionados cabeçalhos de informação (**POH – Path OverHead**), compondo os *containers virtuais* (VC). Para indicar a posição do primeiro *byte* no sinal SDH são adicionados ponteiros aos VC's, facilitando que um VC seja derivado de um sinal SDH e inserido em outro.

Existem três tipos de *containers* virtuais: **VC-12**, **VC-3** e **VC-4**², que transportam tributários de níveis 2, 34 e 140 Mbits/s, ou uma combinação deles. Isto permite que sinais plesiócronicos sejam empacotados e transportados em redes síncronas. O VC-12 e o VC-3 são

¹ Tal recomendação é atualmente conhecida como G.70X.

² *Containers* virtuais da Hierarquia Européia, que é a adotada no Brasil.

considerados *containers* de baixa ordem (**LO VC – Lower Order VC**) e o VC-4 é considerado um *container* de alta ordem (**HO VC – Higher Order VC**). Em um VC-4 podem ser alocados 63 VC-12, 3 VC-3 ou ainda algumas combinações deles (veja Figura 2.1), além do tributário de 140 Mbits/s .

A alocação de VC-12 e VC-3 em *containers* VC-4 acontece na camada de baixa ordem SDH (*LO Layer*). Equipamentos SDH que possuem capacidade de arrumar *containers* de baixa ordem em VC-4 (atividade de “*grooming*”) são dotados da função **LPC (Lower-order Path Connection)**. Tais equipamentos recebem *containers* de alta ordem em suas entradas e podem realizar a transposição (ou transconexão) de VC-12 e VC-3 em VC-4 distintos, alterando suas cargas.

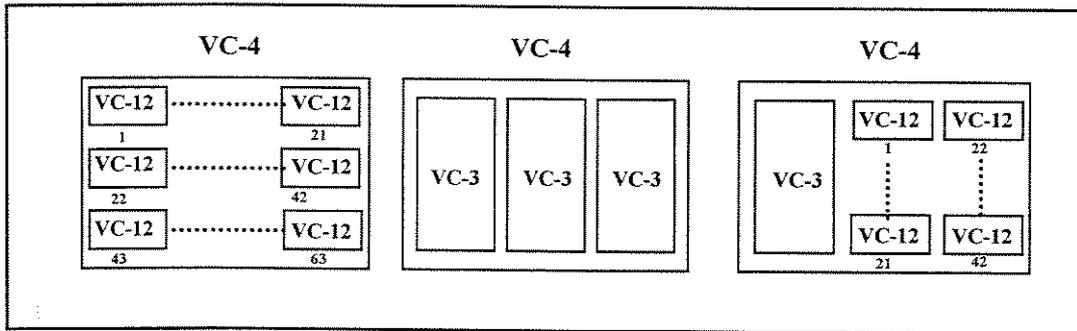


Figura 2.1: Algumas possibilidades de preenchimento de um *container* VC-4

Em SDH, um *container* VC-4 acrescido de um cabeçalho de seção **SOH³ (Section OverHead)** dá origem a um STM-1, sinal de transporte básico SDH. Por isso, para fins de transporte na rede, a atividade de “arrumar” eficientemente *containers* VC-12 e VC-3 em *containers* VC-4 é muito importante. Essa atividade é chamada “**LPC-grooming**” (*Lower-order Path Connection*), e pode ser de dois tipos: (a) alocação ou retirada de *containers* VC-12 e/ou VC-3 de VC-4, ou ainda (b) de transposição de VC-12 e/ou VC-3 de um VC-4 para outro, chamada de **atividade de transconexão**. As atividades tipo (a) são atividades que só ocorrem nas origens (alocação) e destinos (retirada) das demandas; a atividade de transconexão pode ocorrer em vários pontos intermediários da trajetória da demanda.

³ O cabeçalho SOH tem a função de prover comunicação entre equipamentos de uma seção da rede (trecho entre dois equipamentos adjacentes).

Na multiplexação de sinais STM-1 em módulos de taxas superiores (STM- n , $n = 4, 16$ e 64), cada módulo STM- n acomoda n módulos STM-1. O mapeamento de STM-1 em módulos STM- n é feito na camada de alta ordem SDH (*HO Layer*), com equipamentos munidos da função **HPC** (*Higher-order Path Connection*). Esses equipamentos recebem STM- n em suas entradas e transconectam VC-4 dentro deles. Neste caso, estamos realizando atividades de “*HPC-grooming*”.

Esta tese apresenta uma proposta de mapeamento⁴ de *containers* VC-12 em VC-4 cuja preocupação é minimizar as atividades de *LPC-grooming*, que requer mais cuidado devido à sua complexidade. Essa proposta também visa minimizar o número de *containers* VC-4 da rede (Cap.4).

2.3. Os Novos Equipamentos e Arquiteturas de Rede SDH

As características do conceito SDH, como por exemplo a de inserção/derivação de *tributários* (sinais de taxas mais baixas) em/de *agregados* (sinais de taxas superiores), concretizaram-se em equipamentos de transmissão que possibilitam a construção de novas arquiteturas de rede, mais eficazes e seguras que aquelas oferecidas pela PDH. A função básica de um equipamento SDH de transmissão é efetuar atividades de multiplexação de informações. Essas atividades podem ser divididas em duas partes: uma parte que multiplexa informações em *containers virtuais* e outra que multiplexa STM-1 em blocos de 4, 16 e 64 módulos de transporte, formando respectivamente, *STM-4*, *STM-16* e *STM-64*.

Os tipos de equipamentos básicos da tecnologia SDH são:

- **OLTM** (*Optical Line Terminal Multiplexer*) – Multiplexador de Terminal de Linha Óptico;

⁴ Para facilidade de exposição esta tese considera apenas demandas de telefonia, canais de 2Mbits/s alocados em *containers* VC-12.

- **ADM** (*Add/Drop Multiplexer*) – Multiplexador de Retirada e Inserção;
- **SDxC** (*Synchronous Digital Cross-Connect*) – Transconector Cruzado Digital Síncrono.

O **OLTM** é um equipamento de multiplexação simples em SDH. Ele tem a função de multiplexação, agregando diversos *tributários* em um *agregado* - sinal de hierarquia superior. Também realiza a conversão do sinal elétrico em óptico. Este tipo de equipamento é utilizado para transportar sinais somente entre dois Centros de Fios (CF's). A Figura 2.2 mostra 3 configurações possíveis de equipamentos *OLTM*s, que diferem quanto aos tipos de tributários.

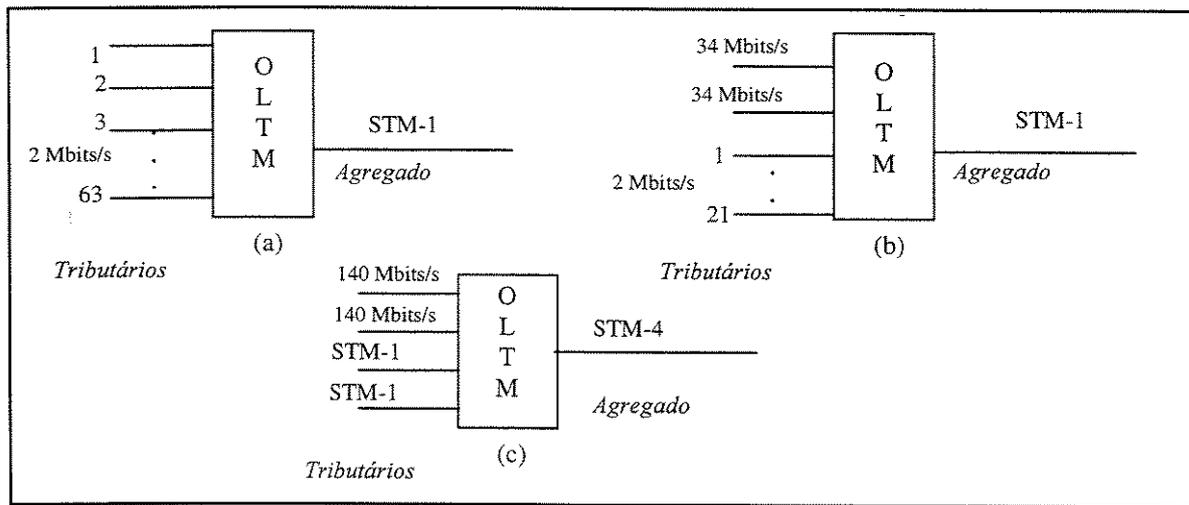


Figura 2.2: Algumas configurações de equipamentos OLTM

O equipamento **ADM**, além de realizar a operação de multiplexação, apresenta uma funcionalidade que lhe permite inserir e retirar tributários de um agregado. Esta facilidade dispensa complicações como a necessidade de uma cadeia de equipamentos de multiplexação de sinais, graças ao sincronismo e a estrutura de quadro do sinal agregado.

Existem duas categorias de **ADM**. Um tipo que permite somente a inserção e retirada de VC-4 ou 155 Mb/s de agregados de ordem superior, que chamaremos de **ADM tipo 1**, e outro

tipo que realiza a operação de inserção e retirada também de *containers* de ordem inferior, o *ADM tipo 2*. Em geral, *ADMs* do tipo 1 são utilizados no núcleo da rede, operando na hierarquia 16 (2.48 Gbits/s) ou superior. *ADMs* do tipo 2 aparecem com mais frequência na periferia da rede, onde devem ser realizadas as operações de arrumação de *containers*. A Figura 2.3 mostra um exemplo de equipamento *ADM*.

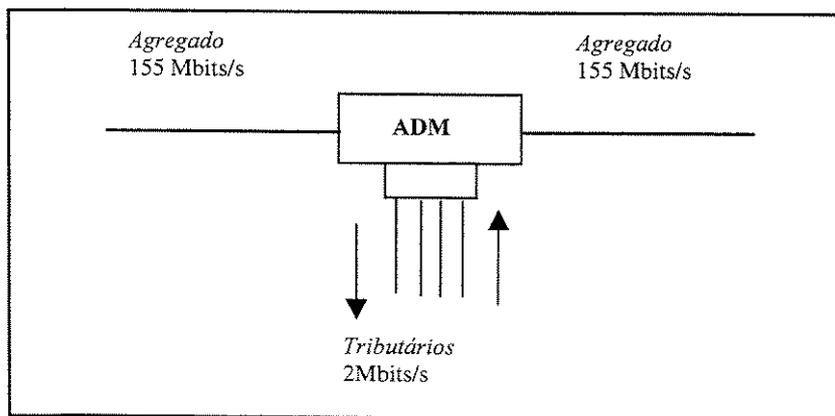


Figura 2.3: Equipamento ADM

Um equipamento do tipo *SDxC* possui funcionalidade de *transconexão*, permitindo a conexão de *containers* virtuais entre suas várias portas de sinais agregados e tributários. Esta funcionalidade se torna possível devido a duas *matrizes de comutação* diferentes, uma de baixa ordem e outra de alta ordem.

A matriz de baixa ordem comuta VC-12 ou VC-3 e é denominada matriz **LPC**. A matriz de comutação de alta ordem, matriz **HPC**, comuta VC-4.

Os equipamentos *SDxC* podem ser classificados de acordo com sua capacidade de comutação. Um *SDxC* que só comuta *containers* VC-4 entre sinais agregados de ordem superior é chamado **SDxC 4/4**. É, em geral, usado para substituir *ADMs* de alta hierarquia (622 ou 2488 mbits/s), e está localizado principalmente na área central da rede. Se o *SDxC* pode comutar *containers* VC-12, VC-3, ou ambos, temos o **SDxC 4/1**, **SDxC 4/3** ou **SDxC 4/3/1**, respectivamente. As Figuras 2.4a e 2.4b ilustram, respectivamente, os *SDxC 4/4* e *4/1*.

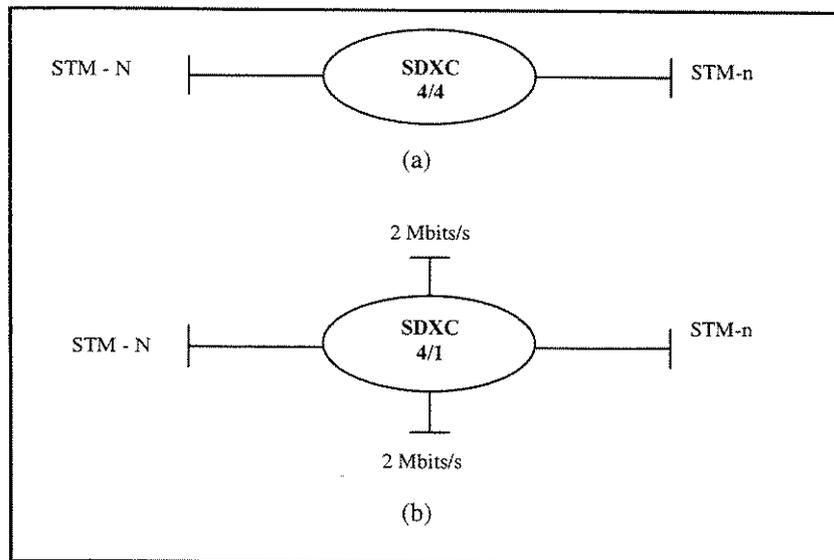


Figura 2.4: Tipos de SDxC

Esta funcionalidade de comutação do equipamento SDxC facilita a operação de *grooming* e de roteamento do sinal da rede SDH. Mas, um equipamento SDxC é muito caro. Tem-se a opção mais econômica de se fazer a distribuição desta funcionalidade através dos outros tipos de equipamentos SDH.

Uma das funcionalidades de um SDxC é a chamada **TSI** (*Time Slot Interchange*) - Intercâmbio Temporal de Quadros. Ela altera a posição relativa de um VC-4 em uma seqüência temporal de quadros STM-n (*HPC-grooming*). Altera também a posição de *containers* virtuais de baixa ordem dentro de um mesmo quadro ou entre diferentes quadros (*LPC-grooming*). Um ADM com funcionalidade TSI é o mais simples dos SDxCs. Veremos mais a frente um exemplo de utilização desta funcionalidade.

Esta nova geração de equipamentos SDH permite a introdução de novas configurações de redes, além da tradicional arquitetura de *enlaces ponto-a-ponto*. Temos agora disponibilidade para compor redes estruturadas em *anel* ou *cadeia*.

Um enlace **ponto-a-ponto** é construído com um equipamento OLTM em cada extremidade do enlace. A Figura 2.5 mostra a interligação entre três nós, realizada através de seis equipamentos OLTM. Note que, na ocorrência do rompimento de qualquer par de fibras, a comunicação entre os dois nós envolvidos estará desfeita. Logo, a proteção contra falhas para enlaces *ponto-a-ponto* é feita através de redundância de meios de transmissão.

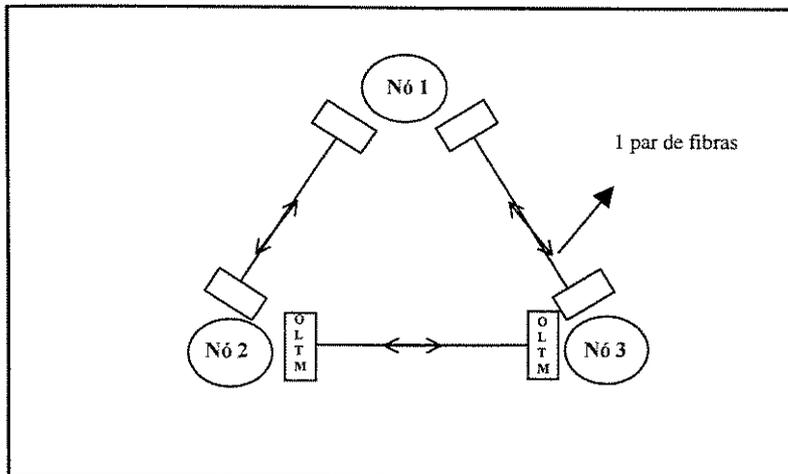


Figura 2.5: Ligações ponto-a-ponto

Os nós de um **anel** são os ADMs e os arcos são constituídos por fibras ópticas. Em um *anel* há sempre dois caminhos entre dois nós quaisquer. Se ocorrer uma falha de rompimento de fibra, ou ocorrer problemas num nó, o *anel* reencaminha a informação automaticamente, em tempo da ordem de milisegundos, pelo caminho alternativo. Daí o nome de *anel auto-regenerativo SHR (Self-Healing Ring)* [Slevinsky, 1993].

O anel pode ser de dois tipos:

- Anel Unidirecional (**UPSHR - Unidirectional Path Switched SHR**)
- Anel Bidirecional (**BLSHR - Bidirectional Line Switched SHR**)

Em um **Anel Unidirecional**, as informações são transmitidas em apenas um sentido. O outro sentido fica como reserva, em caso de falhas. Na Figura 2.6, a informação de A para C é transmitida através dos arcos AB e BC, e a informação de C para A utiliza os arcos CD e DA, no mesmo sentido. O fluxo total circulando dentro deste anel é igual à soma das demandas entre os nós.

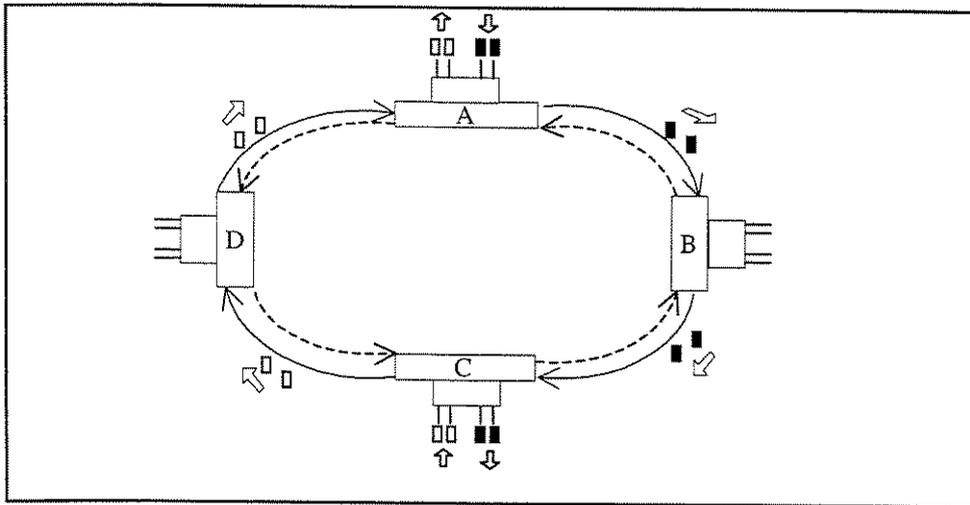


Figura 2.6: Anel unidirecional a 2 fibras

Já no **Anel Bidirecional**, as informações podem trafegar em dois sentidos, horário e anti-horário. Aqui, a informação circula, em geral, pelo caminho mais curto do anel. No anel da Figura 2.7, o sinal de A para C é transmitido através dos arcos AD e DC nos dois sentidos do anel.

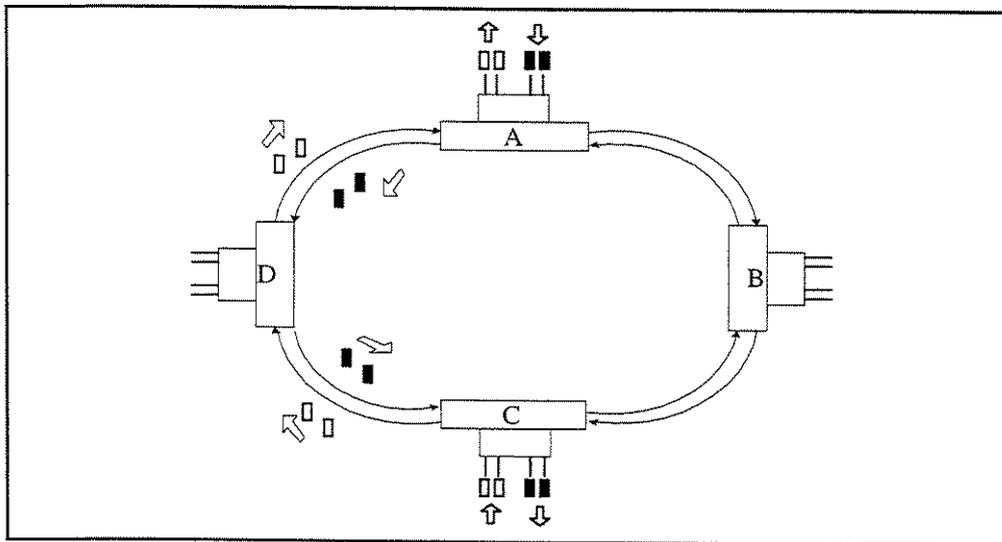


Figura 2.7: Anel bidirecional a 2 fibras

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

A Figura 2.8 ilustra um exemplo de aplicação da funcionalidade TSI num anel bidirecional.

Se a demanda **A-D** percorre o trajeto A-B-C-D e a demanda **B-E** percorre B-A-F-E, a demanda **C-F** tem que ser transportada pelo caminho C-D-E-F, pois no caminho inverso algum arco já está carregado. Do nó E para F, a demanda é remanejada de lugar dentro do quadro (TSI).

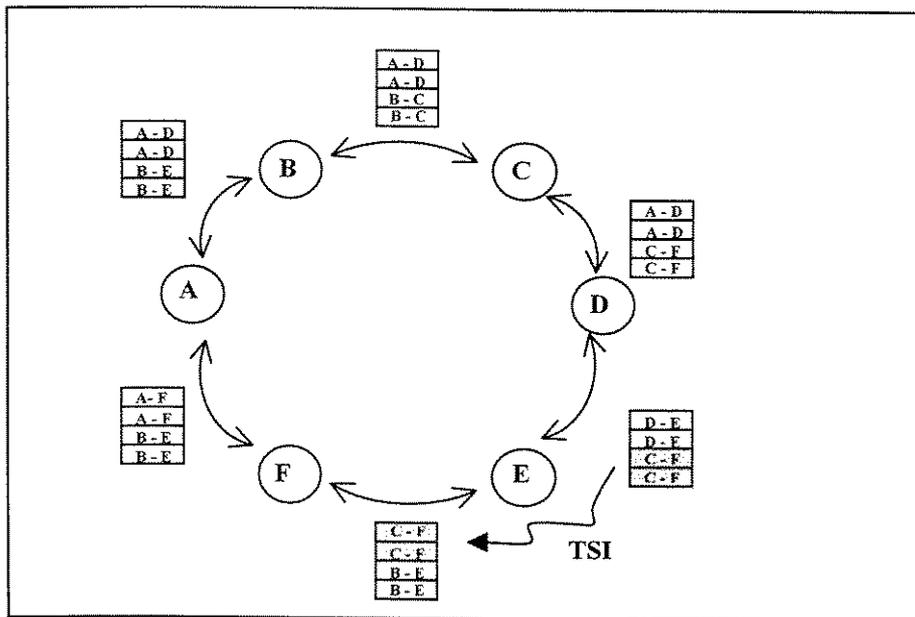


Figura 2.8. Exemplo da funcionalidade TSI

Uma estrutura em **cadeia** é obtida retirando-se um arco de um anel bidirecional, e substituindo os ADMs das pontas por OLTMs. Esta configuração de rede é bastante utilizada em situações onde só se tem um único caminho de dutos para a disponibilização de fibras. A Figura 2.9 mostra um exemplo de cadeia.

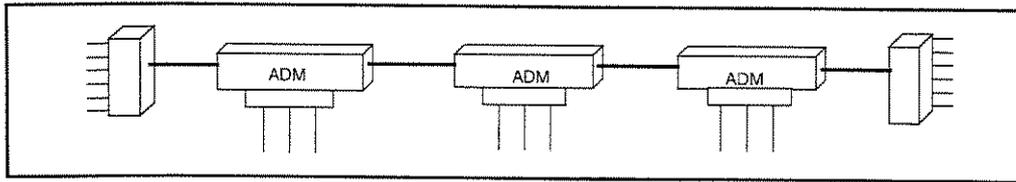


Figura 2.9: Exemplo de uma cadeia de ADMs

A tecnologia SDH, juntamente com as funcionalidades de seus equipamentos descritos acima, possibilita a construção de uma rede com características de *confiabilidade* e *sobrevivenciabilidade* muito maiores do que aquelas possíveis com a PDH [Nakamura et al., 1992]. A confiabilidade de uma rede está relacionada à chance de haver falhas na rede. Quanto menor for o número de falhas de transmissão e em componentes da rede, mais confiável será a rede. A capacidade desta rede absorver ou recuperar-se dessas falhas mede a sua sobrevivenciabilidade.

Para configurações do tipo enlace *ponto-a-ponto* e *cadeia*, uma alternativa para evitar falhas decorrentes de cortes nos cabos de fibra óptica é a proteção por duplicação de par de fibras, roteados por caminhos disjuntos.

No caso de anéis, a reconfiguração de falhas é automática, devido ao processo de auto-regeneração (*self-healing*). A proteção contra falhas é obtida, para anéis unidirecionais, através de um percurso adicional no sentido inverso do primeiro (Figura 2.6, sentido em tracejado).

Para anéis bidirecionais a duas fibras deve-se manter uma capacidade ociosa ou de reserva de 50% em cada arco. Assim, em caso de falhas, os dois nós adjacentes ao defeito comutam para o par alternativo, utilizando a capacidade de reserva. Os anéis bidirecionais a quatro fibras apresentam um par de fibras de trabalho e outro de proteção. Deste modo, cada par de trabalho, em cada arco, pode usar todo o fluxo agregado para transporte de informação. Maiores informações sobre equipamentos SDH e suas características podem ser encontradas em [Belamy, 1991, Wu, 1992, Wu, 1995, Nakamura et al., 1995, Ferrari, 1991 e Sexton e Reid, 1997].

2.4. Planejamento da Rede de Telecomunicações

Neste item, veremos como os benefícios da nova tecnologia SDH vistos até aqui contribuem para se obter uma *Rede de Telecomunicações* mais confiável. Veremos agora as implicações destes conceitos no planejamento da rede.

Uma Rede de Telecomunicações, devido à sua complexidade, pode ser dividida em três partes:

- *Rede Externa;*
- *Rede de Comutação;*
- *Rede de Transmissão.*

Com esta partição, o Planejamento também pode ser efetuado por partes, sem a perda da sua integridade. Desta forma, teremos **Planejamento da Rede Externa**, **Planejamento da Rede de Comutação** e **Planejamento da Rede de Transmissão**.

A *Rede Externa* é responsável pela interligação entre os assinantes e os Centros de Fios. O *Planejamento da Rede Externa* define a localização dos Centros de Fios –CF’s (prédios que abrigam equipamentos de comutação e transmissão), a área atendida por eles e o cronograma de instalação de equipamentos de comutação. Para tanto utiliza a distribuição geográfica dos assinantes como dados de entrada.

Na fase de *Planejamento da Rede de Comutação* são definidas as capacidades das centrais de comutação em relação ao tráfego de telecomunicações (devemos considerar aqui a demanda por canais telefônicos e outros serviços prestados pela rede). Além disso, nesta fase define-se o número de circuitos necessários para a interligação dessas centrais, dados representados por matrizes de circuitos comutados.

O *Planejamento da Rede de Transmissão* é responsável pelo dimensionamento do número de equipamentos de transmissão que interligarão os CF’s e suas respectivas taxas de transmissão. Também define o meio de transmissão e a rede de galerias a serem utilizados pela rede.

Uma metodologia de Planejamento da Rede de Transmissão, usando a estratégia de “*dividir para conquistar*”, subdivide o planejamento em quatro etapas⁵:

⁵ Divisão inspirada nos estudos de [Wu, 1992].

- **Clusterização** ou agrupamento: fase em que se procura organizar os CF's em grupos ou *clusters* segundo interesses de demandas ou proximidades geográficas. Dentro destes grupos, escolhe-se o nó mais importante, seguindo critérios geográficos ou de maior demanda, que chamaremos *hub* [Aubry et al., 1995]. Cada *hub* se liga a todos os nós do seu *cluster* e também a todos os outros *hubs* da rede, de forma a alcançar os nós dos outros *clusters*. Eventualmente um *hub* pode se ligar a um nó de outro *cluster* se houver demanda entre eles que justifique tal ligação (figura 2.10);

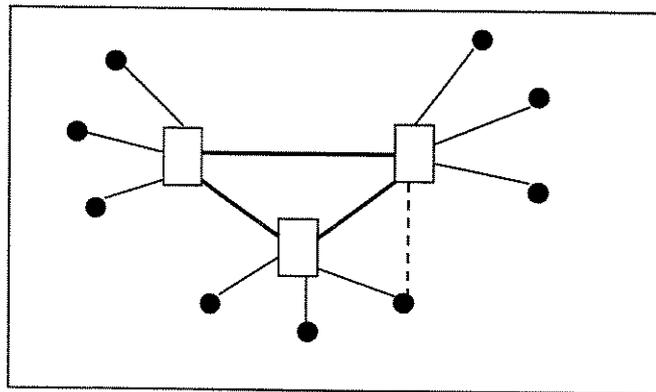


Figura 2.10. Ligação entre *hubs* e centros de fios (nós)

- **Bundling** ou **Enfeixamento**: fase em que se definem os tipos e as taxas de transmissão dos equipamentos que serão instalados na rede. Tais equipamentos devem ser capazes de não só atender a matriz de demanda, dada em número de canais de 2 Mbits/s, mas também a demanda por circuitos privados;
- **Planejamento da Rede de Galerias/Roteamento de Cabos de Fibras Ópticas**: aqui, deve-se garantir a conexão por meio de cabos de fibras ópticas entre os CF's. Também é nesta fase que se define a disposição dos cabos de fibras ópticas pela rede de galerias;
- **Evolução**: nesta fase considera-se não só o planejamento da rede atual, como também se discute um cronograma de instalação (ou atualização) de equipamentos ao longo dos vários períodos de planejamento. O aumento das demandas e alguns critérios de

otimização, como custos dos investimentos, taxas de retorno, confiabilidade, folga na operação dos equipamentos, etc, devem ser levados em consideração.

O modelo matemático para otimizar a fase de enfeixamento, etapa que define os equipamentos da rede, a mais importante em termos de custo e confiabilidade, e que será utilizada por nós no capítulo 6, encontra-se descrito em [Bergamaschi, 1996]. Maiores detalhes sobre o Planejamento da Rede de Transmissão e o Enfeixamento encontram-se em [Quaglia, 1997], [Pereira et al., 1995] e [Bortolon, 1996c]

Esta tese apresenta uma nova proposta de planejamento da Rede SDH de Transmissão, baseada numa estrutura de rede decomposta em *camadas funcionais*, que é o assunto dos capítulos 3 e 4.

CAPÍTULO 3

UMA NOVA PROPOSTA DE PLANEJAMENTO DA REDE DE TRANSMISSÃO

3.1. Introdução: A Nova Concepção de Divisão da Rede de Transmissão

Uma nova visão do Planejamento da Rede SDH de Transmissão (ou Rede de Transporte) se baseia na estrutura da rede dividida em *camadas funcionais*. A utilização da decomposição da Rede de Transmissão em *camadas* facilita o desenvolvimento de uma nova metodologia, uma vez que podemos propor um planejamento para cada camada .

A estrutura em camadas contribui também para o gerenciamento de tráfego da rede, que ocorre em cada uma das camadas, e para diferentes níveis de tráfego, alta ordem (LO VC's) e baixa ordem (HO VC's). Além disso, essa estrutura viabiliza um detalhamento maior da Rede de Transmissão, tornando mais aparente, por exemplo, o transporte de “pacotes” de informações (*containers virtuais* – VC's) através da rede SDH.

As camadas funcionais realizam funções específicas dentro da Rede de Transmissão e a relação entre elas acontece através de pontos de entrada e saída de serviços, que são interfaces capazes de transmitir informações de forma transparente ao longo da rede, provendo um alto grau de flexibilidade à operação da rede [Sexton e Reid, 1997].

As camadas são estruturadas de forma hierárquica, cada uma utilizando as funções e serviços (informações) oferecidos pelas camadas de níveis superiores. Cada camada funcional é vista como alimentadora da outra. A figura 3.1 ilustra esse processo.

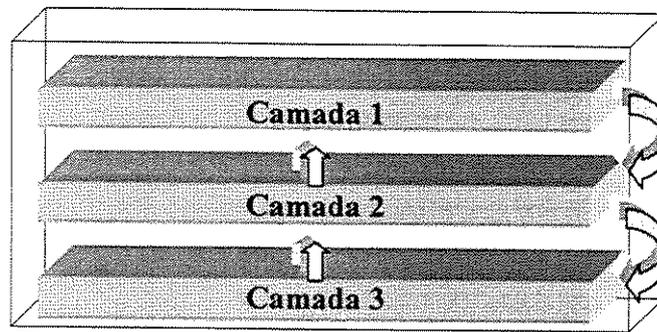


Figura 3.1: Alimentação de informações entre as camadas.

No planejamento das camadas funcionais também há alimentação de informações, ou seja, de maneira hierárquica o resultado de cada planejamento serve como entrada para o planejamento daquela camada imediatamente inferior, podendo haver realimentação de informações entre cada um desses planejamentos.

3.2. As Camadas Funcionais

A arquitetura de rede adotada nesta tese é uma rede decomposta em quatro *camadas funcionais*:

- **camada de circuitos** (*circuit layer*);
- **camada de caminhos ou lógica** (*path layer*), dividida em duas subcamadas, uma de baixa ordem e outra de alta ordem;
- **camada de transmissão ou de equipamentos** (*transmission media layer*);
- **camada física** (*physical layer*).

A tabela 3.1 mostra a arquitetura de rede adotada, suas *camadas* e as informações transportadas por cada uma delas.

| <i>Camadas Funcionais</i> | <i>"Cargas" Transportadas</i> |
|------------------------------|-----------------------------------|
| Camada de Circuitos | Canais de 2, 34, 140,....,Mbits/s |
| Camada de caminhos ou Lógica | |
| De baixa ordem | VC-12, VC-3, VC-4 |
| De alta ordem | VC-4 |
| Camada de Transmissão | STM-1, STM-4, STM-16, STM-64 |
| Camada Física | Sinais ópticos |

Tabela 3.1 – camadas funcionais.

Existem outras arquiteturas de decomposição da Rede de Transmissão, como por exemplo a arquitetura sugerida pelo **ITU-T**, que decompõe a rede em três camadas: *camada de circuitos*, *camada de caminhos* (também subdividida em baixa e alta ordens), e *camada de transmissão* (dividida em subcamadas de seção e física); e uma arquitetura que considera cinco camadas: camada de serviços, camada de caminho (subdividida em camadas de ordens superior e inferior), camada de linha/seção, camada de fotônica e camada de cabos de fibra óptica [Kumar, 1994].

A seguir, descrevemos as funções realizadas por cada uma das quatro camadas funcionais (divisão adotada nesta tese), as redes que as executam e os objetivos de seus planejamentos.

A **Camada de Circuitos** oferece serviços de telecomunicações para usuários finais. As informações transportadas através desta camada são circuitos de 64Kbits/s provenientes da comutação telefônica, multiplexados em módulos de 2Mbits/s, circuitos privados de 2Mbits/s e circuitos de TV de 34Mbits/s, entre outros.

Esta camada corresponde à *Rede de Circuitos*, cujos nós são Centros de Fios, e os arcos representam a necessidade de circuitos entre tais nós, para cada serviço e taxa de transmissão. Nesta rede, os circuitos necessários à interligação das centrais de comutação são representados por matrizes de circuitos comutados. Essas matrizes são transformadas em **matrizes de demandas** de canais E1 (2 Mbits/s), de canais de 34 Mbits/s, ou outras hierarquias. O **Planejamento da Rede de Circuitos** fornece as *matrizes de demandas*, que “alimentarão” a próxima camada.

A camada seguinte é a **Camada de Caminhos** ou **Lógica**. Na *Camada Lógica*, a interface de entrada é a matriz de demandas, proveniente da Camada de Circuitos. A função desta camada é “empacotar” todo o fluxo de informações da matriz de demandas em *containers virtuais* (VC’s), obtendo uma matriz de demandas dada em termos de VC’s.

A rede correspondente a esta camada, *Rede Lógica*, contém os mesmos nós da rede anterior, mas um arco aqui representa a existência de *containers* virtuais a serem roteados entre um par de CF’s. Este roteamento será realizado pela Camada de Transmissão.

No **Planejamento da Rede Lógica** interessa definir os números e tipos de VC’s entre cada par de Centro de Fios e como os LO VC’s (VC-12 e VC-3) serão mapeados ou arrumados em HO VC’s (VC-4) para fins de transporte na rede. Este planejamento é o assunto desta tese e será abordado detalhadamente mais à frente.

A **Camada de Transmissão** tem a função de transportar HO VC’s, através da Rede de Transporte, entre equipamentos adjacentes. Nesta camada, em cada nó que abriga equipamentos, os *containers* virtuais de alta ordem, VC-4, são acrescidos de cabeçalhos **SOH** (*Section OverHead*), formando os módulos STM-1 (*Synchronous Transport Module*), sinais básicos de transporte na rede SDH. O cabeçalho de seção SOH fornece, de maneira padronizada, mecanismos de monitoramento de erros, proteção contra falhas, palavras de alinhamento e informações adicionais necessárias ao gerenciamento no nível da Camada de Transmissão e à adaptação desta à Camada Lógica.

Os módulos STM-1 são multiplexados em módulos STM-*n* nas taxas de 155.52, 622.08, 2488.32 e 9953.28 Mbits/s¹, obtendo-se os módulos STM-1, STM-4, STM-16 e STM-64, respectivamente. Os módulos STM carregam informações (que foram alocadas em VC’s na Camada Lógica) e as transportam entre os nós da *Rede de Transmissão*, correspondente à camada de transmissão.

Na Rede de Transmissão os nós também são centros de fios e os arcos representam as interligações de fibras ópticas entre os equipamentos de transmissão. No planejamento desta rede, o objetivo é definir o número e a hierarquia – taxas de transmissão – dos equipamentos em cada nó e as estruturas que elas compõem. Os objetivos do **Planejamento da Rede de Transmissão** correspondem aos objetivos da fase de enfeixamento do Planejamento da Rede de Transporte, apresentados no capítulo anterior [Bergamaschi, 1996].

¹ Padrões SDH de multiplexação.

Por fim, temos a **Camada Física** que, a partir das estruturas que os equipamentos de transmissão compõem, determina as características das interfaces físicas.

Na *Rede Física*, os arcos são dutos nos quais são colocados cabos de fibra óptica. Os nós são pontos de cruzamento de lances de dutos, com algumas edificações para guarda de equipamentos. Tais edificações podem ser simples, como caixas que abrigam pequenos equipamentos, ou mais importantes, como Centro de Fios que abrigam equipamentos mais sofisticados: centrais telefônicas e equipamentos de transmissão OLTMs, ADMs ou SDxCs. Nesta rede interessa rotear os cabos de fibras pelos dutos e considerar a necessidade de regeneradores em alguns pontos.

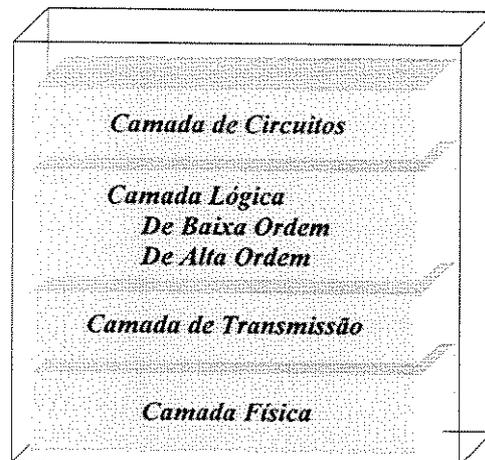


Figura 3.2: As Camadas Funcionais.

O foco de estudo desta tese é a **Camada Lógica** e o objetivo é desenvolver uma metodologia de planejamento para esta camada. O capítulo 4 apresenta uma proposta de metodologia do **Planejamento da Camada Lógica**, a partir da matriz de demandas advinda do Planejamento da Camada de Circuitos.

3.3. A Camada Lógica

A **Camada Lógica** tem a função de mapear toda a informação que trafega através da rede em *containers* virtuais, obtendo uma matriz de demandas em VC's. Esta camada também tem a função de rotear esses VC's entre os pontos onde eles serão montados e desmontados, ou seja, entre os pontos onde informações serão alocadas e retiradas dos *containers* virtuais. A Camada Lógica é, portanto, responsável pela *montagem* e pelo *roteamento lógico* desses *containers* virtuais entre CF's, além da responsabilidade do *gerenciamento* dos VC's. Os processos de mapeamento e roteamento lógico acontecem recursivamente, dentro de 2 subcamadas lógicas:

- Camada de Caminho de baixa ordem – **LOP Layer (Lower Order Path)**, que roteia **LO** VC's (VC-12 e VC-3)² e VC-4, quando este é montado/desmontado em sua trajetória;
- Camada de Caminho de alta ordem – **HOP Layer (Higher Order Path)**, que roteia **HO** VC's (VC-4)³.

Containers LO (de baixa ordem) são mapeados em *containers* HO (de alta ordem) e roteados na *Camada de Baixa Ordem* – LOP. Esta camada realiza as atividades de *LPC-grooming*, ou seja, *containers* de baixa ordem são alocados, retirados ou transconectados de *containers* de alta ordem – HO VC's (Figura 3.3).

Em seguida, *containers* virtuais HO são mapeados em módulos STM e roteados na *Camada de Alta Ordem* – HOP. Esta camada realiza as atividades de *HPC-grooming*, ou seja, *containers* virtuais HO são alocados, retirados ou transconectados de módulos de transporte STM. Esses módulos são, então, transportados através da *Camada de Transmissão* SDH.

A gerência do roteamento lógico é feita no próprio *container* virtual, em seu cabeçalho **POH (Path OverHead)**. Esse cabeçalho é acrescentado ao VC no seu ponto de montagem (origem), e indica o tipo de informação carregada por ele (*payload*) e qual seu ponto de desmontagem (destino).

² VC's que transportam tributários de níveis 2 e 34 Mbits/s, respectivamente.

³ VC's que transportam tributários de 140 Mbits/s, ou mapeiam VC-12 e VC-3 dentro deles.

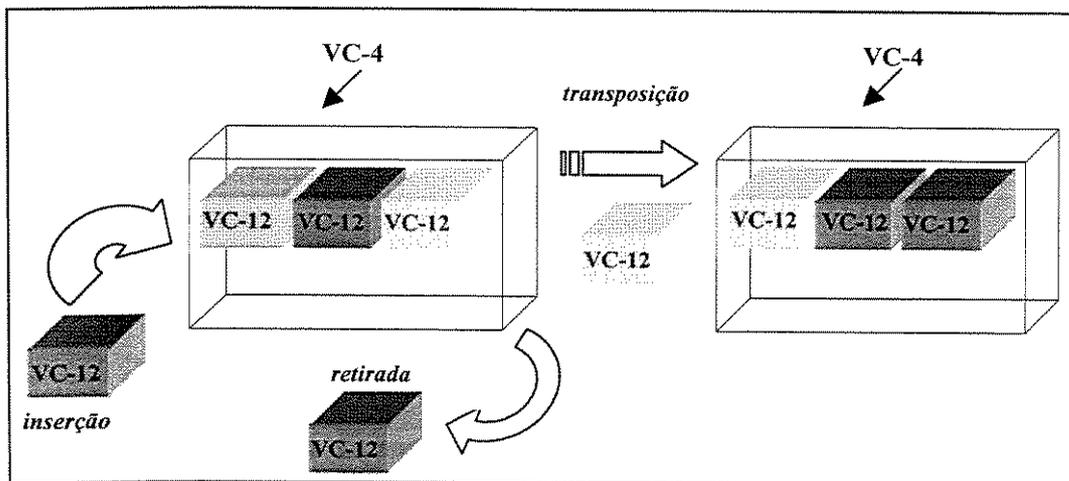


Figura 3.3: Alocação, retirada e transposição de LO *containers* (VC-12) em HO *containers* (VC-4).

Os nós da Rede Lógica que efetuam atividades de *grooming* são centros de fios (CF's) que abrigam equipamentos de transmissão OLTMs, ADMs e/ou SDxCs munidos de funções LPC, que realizam *LPC-grooming*, e HPC, que realizam *HPC-grooming*, ou ambas.

Para ilustrar o grau de complexidade de cada tipo de *grooming* – alocação, retirada e transconexão, fazemos uma analogia das atividades de *grooming* no transporte de informações da rede com o transporte de cargas numa estação ferroviária.

Vamos supor que um módulo STM- n representa um trem com n vagões. Cada vagão desse trem representa um módulo STM-1 (*container* VC-4 acrescido de cabeçalho SOH), e dentro de cada um desses vagões existem outros *containers* menores (LO VC's). Vamos supor que o trem transporta cargas para diferentes cidades, **A**, **B** e **C**. As estações podem **alocar** novos vagões ao trem, **retirar** alguns (ou todos) vagões do trem, **transpor** vagões já existentes para outros trens, ou abrir tais vagões e alocar, retirar ou transpor cada *container* menor contido neles.

Numa primeira parada, no terminal ferroviário **A**, um vagão pode ser retirado deste trem e outro vagão ser inserido. Esses terminais lêem o cabeçalho do vagão (SOH), o qual indica sua origem e destino, e o inserem em trens de mesmo percurso. Nenhum dos vagões teve sua carga alterada. Quando o terminal aloca, retira ou transpõe vagões inteiros, fechados, sem abri-los, está realizando *HPC-grooming*.

Chegando ao terminal **B**, um vagão originado em **A** é retirado do trem (atividade de *HPC-grooming* de retirada). Alguns pequenos *containers* com destino final em **B** são retirados do interior do vagão, e outros, originados neste terminal, são inseridos (atividades *LPC-grooming* de retirada e alocação, respectivamente). Outros *containers* originados em **A** e destinados a **C** são retirados de um vagão e inseridos em outro com destino ao terminal **C**, sofrendo atividades *LPC-grooming* de transconexão. Este vagão é então inserido no trem (*HPC-grooming*) com destino à cidade **C**. Os vagões tiveram suas cargas alteradas.

A atividade de *LPC-grooming* de transconexão é uma atividade de complexidade maior e pode ocorrer em diversos pontos intermediários na trajetória da demanda. Uma vez que atividades *LPC* de alocação e retirada acontecem em geral na origem e destino das demandas, atividades de transconexão devem ser evitadas.

As demandas consideradas neste estudo, para facilidade de exposição, são demandas de redes de tráfego telefônico, transportando apenas sinais de voz, circuitos de canais E1 (2 Mbits/s). As matrizes de demandas são dadas em função de *containers* VC-12 – sinais E1 acrescidos de cabeçalhos POH. Além disso, estamos supondo a hierarquia adotada no Brasil para a rede de transmissão. Uma adaptação deste estudo para outras hierarquias, americana, européia ou japonesa, ou outros tipos de demandas, é direta.

CAPÍTULO 4

A PROPOSTA DE PLANEJAMENTO DA CAMADA LÓGICA (PCLOG)

4.1. Introdução: A importância do Planejamento da Camada Lógica

A definição de *containers* com capacidades menores para a transferência de informações numa rede foi fortemente influenciada pela necessidade de prover a transição entre as tecnologias PDH e SDH [Sexton e Reid, 1997]. Esses pequenos *containers* – LO VC's – devem ser alocados em módulos STM-1, para que possam ser transportados através da rede SDH.

As atividades de *LPC-grooming*, principalmente as **atividades de transconexão**, onde *containers* menores são retirados de um *container* maior e alocados em outro para alcançar seu destino final, são atividades complexas, e portanto caras. Por isso, uma metodologia de **Planejamento da Rede Lógica** objetiva mapear *containers* menores – LO VC's – em *containers* maiores – HO VC's – de maneira a reduzir tanto a quantidade de HO VC's quanto as atividades de transconexão, evitando a complexidade de tal atividade e buscando minimizar o custo total da rede. Outra metodologia de alocação de *containers* LO em HO VC's é descrita em [Pereira et al., 1998].

4.2. A Metodologia de Planejamento da Camada Lógica

A metodologia de planejamento da Camada Lógica proposta nesta tese é baseada em regras criteriosas que buscam alocar toda a demanda de canais E1¹, ou VC-12, da rede utilizando o menor número possível de *containers* virtuais VC-4. Além disso, essas regras se preocupam em minimizar atividades de transconexão, evitando que *containers* de baixa ordem sejam submetidos

¹ Demandas de redes de tráfego telefônico.

a tal atividade em pontos intermediários da rota entre sua origem e seu destino. O algoritmo aqui proposto será denominado **PCLOG**.

Para atingir tais objetivos, a metodologia propõe a criação de 2 tipos de *containers* VC-4: *diretos* e *mistos*, com diferentes procedimentos de alocação de VC-12 em cada um deles.

4.2.1. VC-4 direto e VC-4 misto

O *container* VC-4 direto deve alocar demandas cujos volumes estão acima de um limiar mínimo de formação de VC-4 direto, limiar **L-direto**. O *container* VC-4 direto **não** é submetido a atividades de transconexão em pontos intermediários, sendo montado e desmontado somente nas origens e destinos das demandas que carrega. Além disso, esse *container* é gerenciado diretamente no nível **HOP** (*Higher Order Path*), o que torna a gerência da rede menos complexa. O *container* VC-4 direto pode também alocar demandas abaixo do limiar **L-direto**, demandas que justifiquem a necessidade de não serem submetidas a atividades de transconexão.

O *container* VC-4 misto transporta demandas de diferentes origens para diferentes destinos, demandas cujos volumes não justificam um VC-4 direto por estarem abaixo do limiar **L-direto**, mas que estão acima de um limiar mínimo de formação de VC-4 misto, limiar **L-misto**. O VC-4 misto sofre atividades de transconexão em pontos intermediários e, portanto, é gerenciado no nível **LOP** (*Lower Order Path*). Demandas abaixo do limiar L-misto serão alocadas em folgas de VC-4 mistos quando possível, ou em VC-4 diretos.

4.2.2. A divisão das demandas

Para a alocação das demandas nos dois tipos de *containers* VC-4, diretos e mistos, a idéia é dividir toda a demanda em quatro grupos. Esses grupos são: **grupo 1**, de demandas cujos volumes são maiores ou iguais ao limiar L-direto; **grupo 2**, de demandas de volumes entre o L-direto e o L-misto, que considera apenas demandas originadas em nós não-*hubs*; e **grupo 3**, de demandas menores que o L-misto. Temos ainda um **grupo 4**, com demandas *interhubs*, ou seja, demandas originadas e destinadas a nós *hubs*.

Demandas que fazem parte do grupo 1 serão alocadas em VC-4 diretos. Como o VC-4 direto é um *container* que não sofre atividades de transconexão, é conveniente alocar o maior

número possível de VC-12 em *containers* VC-4 deste tipo. Isso está relacionado à escolha do limiar L-direto. No capítulo 5 apresentamos resultados da aplicação da metodologia em redes reais para diversos valores deste parâmetro. As regras de alocação das demandas do grupo 1 estão descritas na fase 1 da metodologia.

Demandas pertencentes ao grupo 2 compartilharão VC-4 *mistos*. O VC-4 misto é um *container* que pode transportar demandas de várias origens e vários destinos, ou seja, ao longo do seu caminho, sinais VC-12 serão alocados e retirados (transconectados) mais de uma vez de VC-4 mistos em nós da rede com equipamentos de funcionalidade de transconexão. As regras da alocação em VC-4 mistos estão descritas na fase 2 da metodologia.

As demandas do grupo 3 serão alocadas em folgas dos VC-4 mistos; as regras estão descritas na fase 3 da metodologia. A fase 4 descreve a alocação das demandas *interhubs* em VC-4 diretos. O fluxograma da figura 4.1 ilustra parcialmente a alocação de demandas em VC-4 diretos e mistos.

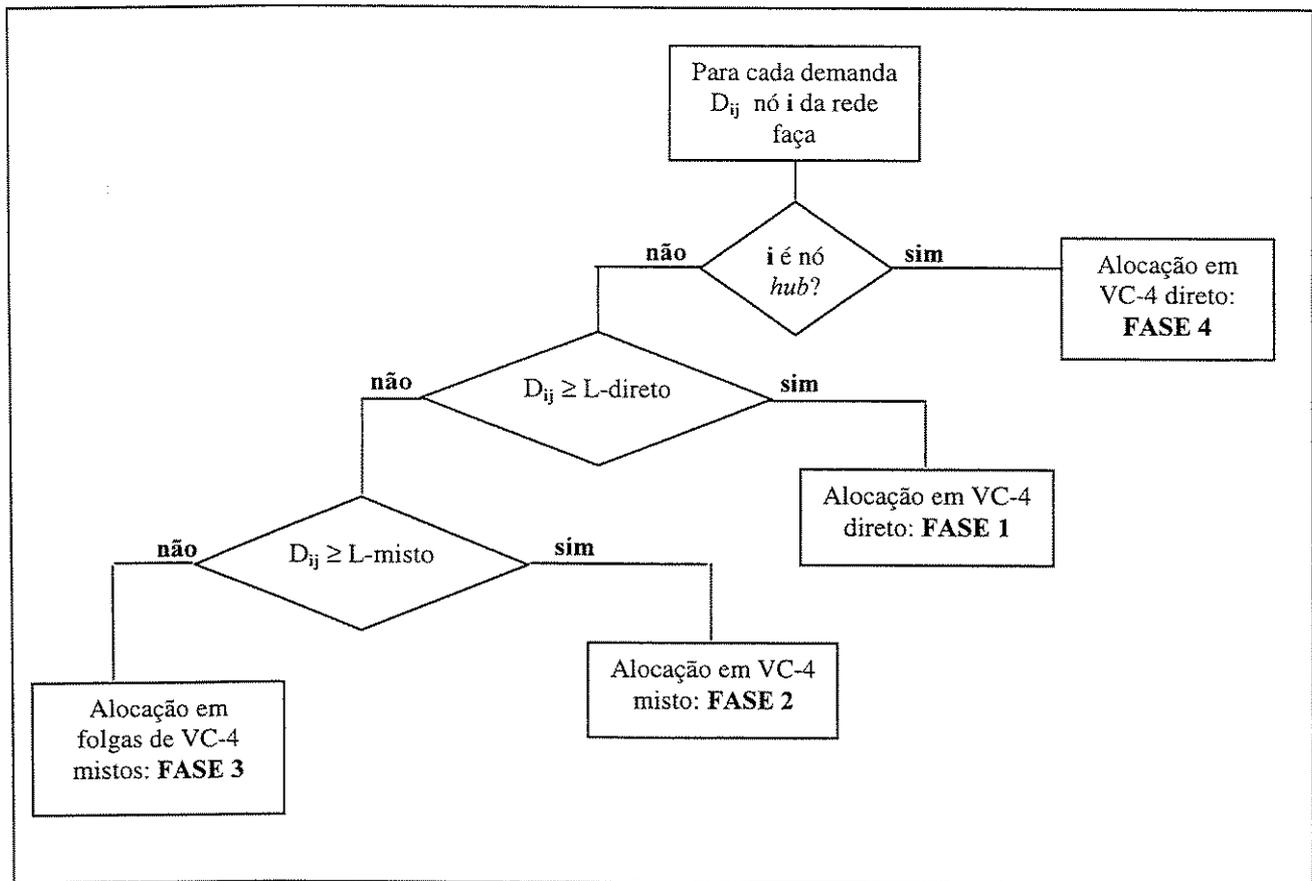


Figura 4.1: Fluxograma de Alocação em VC-4.

Das fases 1 e 4 resultará uma matriz de VC-4 diretos, e das fases 2 e 3 uma matriz de VC-4 mistos. A soma dessas matrizes é a **matriz total de demandas** em VC-4 da rede, a ser utilizada como dado de entrada para o Planejamento da Camada de Transmissão [Bergamaschi, 1996, Bortolon 1996a e Quaglia, 1997].

4.2.3. As quatro fases da metodologia de alocação

Para facilitar o entendimento da metodologia proposta nesta tese, ilustraremos com um exemplo o processo de alocação de VC-12 em *containers* VC-4. Para isso, consideramos os dados de uma rede telefônica apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2.

| | |
|--------------------------------------|-----------------|
| Número de nós da rede | 8 |
| Número de <i>clusters</i> da rede | 3 |
| Demanda total da rede (em 2Mbits/s) | 1.210 |
| Nós pertencentes ao <i>cluster</i> 1 | Nós 1 e 4 |
| Nós pertencentes ao <i>cluster</i> 2 | Nós 2, 5, 6 e 7 |
| Nós pertencentes ao <i>cluster</i> 3 | Nós 3 e 8 |
| Nós " <i>hubs</i> " | Nós 1, 2 e 3 |

Tabela 4.1. Dados da rede.

| Matriz de demandas em 2Mbits/s | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----|------------|----|----|----|-----|----|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| - | 176 | 152 | 76 | 40 | 12 | 73 | 33 | 1 |
| | - | 240 | 26 | 34 | 11 | 104 | 40 | 2 |
| | | - | 13 | 16 | 12 | 24 | 40 | 3 |
| | | | - | 7 | 4 | 8 | 11 | 4 |
| | | | | - | 12 | 19 | - | 5 |
| | | | | | - | 16 | 5 | 6 |
| | | | | | | - | 6 | 7 |
| | | | | | | | - | 8 |

Tabela 4.2. Matriz de demandas da rede. Em negrito destacam-se as demandas *interhubs*

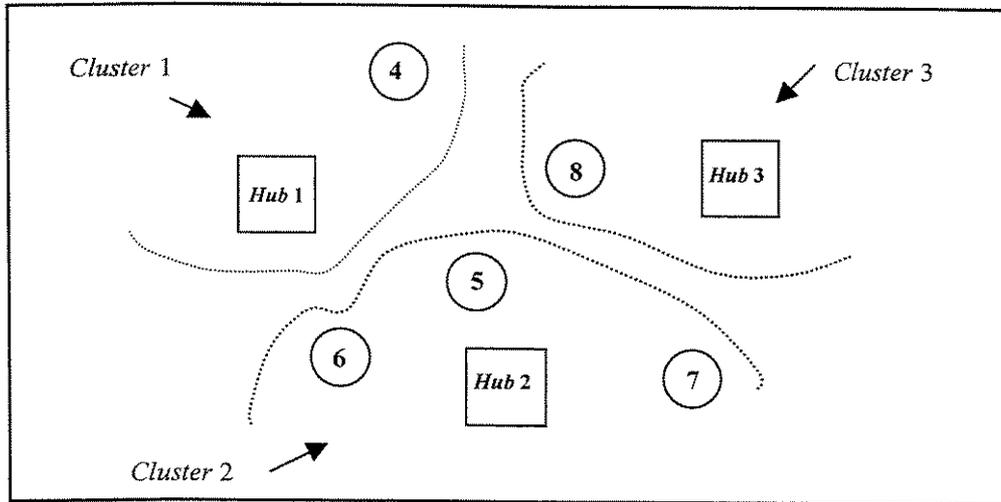


Figura 4.2 Desenho da rede, destacando seus clusters.

Fase 1

Na fase 1, que deve alocar toda a demanda do grupo 1 em VC-4 diretos, a regra é dividir cada elemento deste grupo pelo valor da capacidade máxima do VC-4, que é igual a 63. A parte inteira desta divisão representa o número de VC-4 diretos entre o respectivo par de CF's. Se o resto da divisão for maior ou igual ao limiar L-direto, a demanda é alocada em mais um VC-4 direto; em caso contrário, a parte fracionária representa a demanda que poderia levar a um VC-4 direto bastante ocioso e cuja criação é assim não justificável. Neste caso, esse resto será somado às demandas dos grupos 2, 3 ou 4. Obviamente, o planejador pode intervir para alocar em VC-4 diretos demandas com valores menores que o limiar mínimo, caso assim julgar conveniente.

Para o exemplo, adotaremos os limiares L-direto igual a 40 e L-misto igual a 10. A tabela 4.3 mostra a matriz de VC-4 diretos, resultado das divisões descritas na fase 1, e a matriz de restos.

| Matriz de demandas em VC-4 diretos | | | | | | | | | Matriz de demandas de restos em 2Mbits/s | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|--|---|----|----|----|----|----|----|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| - | 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | - | 0 | 26 | 13 | 0 | 12 | 10 | 33 | 1 |
| | - | 4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | | - | 0 | 26 | 34 | 11 | 0 | 0 | 2 |
| | | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | | | - | 13 | 16 | 12 | 24 | 0 | 3 |
| | | | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | | | | - | 7 | 4 | 8 | 11 | 4 |
| | | | | - | 0 | 0 | 0 | 5 | | | | | - | 12 | 19 | 0 | 5 |
| | | | | | - | 0 | 0 | 6 | | | | | | - | 16 | 5 | 6 |
| | | | | | | - | 0 | 7 | | | | | | | - | 6 | 7 |
| | | | | | | | - | 8 | | | | | | | | - | 8 |

Tabela 4.3. Matrizes de VC-4 diretos e restos em 2Mbits/s.

Fase 2

Para a fase 2 vamos pressupor que os nós da rede são apresentados em grupos ou *clusters*, de acordo com critérios que podem ser geográficos, relacionados às características de demandas ou outros. Em cada *cluster*, um dos nós denominado *hub* é definido como aquele que possui a funcionalidade **LPC**, ou seja, o nó onde as cargas de VC-4 mistos são arrumadas e rearrumadas.

A fase 2 é uma fase complexa, uma vez que deve agrupar e alocar toda a demanda do grupo 2 em *containers* VC-4 mistos, e rotear esses VC-4 mistos entre seus nós de origem e *hubs*.

Para o roteamento de *containers* VC-4 na rede, uma das regras é não permitir que demandas sejam transpostas de um VC-4 misto para outro mais de três vezes, ou seja, que demandas não sejam submetidas a atividades de transconexão mais de duas vezes. A figura 4.3 ilustra essa idéia. Note que uma demanda pode ser transportada entre A e B utilizando um VC-4 direto, ou dois ou três VC-4 mistos, ou seja, ocupando um, dois ou até três *containers*; efetuando uma operação de transbordo no *hub* 1 ou 2, no segundo caso, ou duas operações de transbordo nos *hubs* 1 e 2 no terceiro caso.

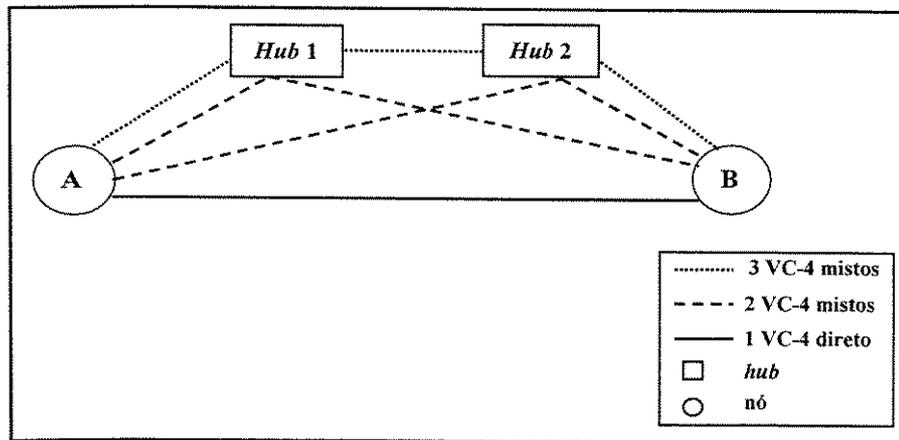


Figura 4.3 – Possibilidades de rotas das demandas em VC-4 mistos e diretos entre os nós A e B.

Para cumprir a tarefa de agrupamento da fase 2, uma estratégia é agrupar demandas que tenham entre si algum ponto em comum, por exemplo, demandas originadas em um mesmo nó para vários destinos, ou demandas originadas em vários nós para o mesmo destino. **Demandas relacionadas sofrem um número menor de atividades de transconexão.** Definimos como *demandas intraclusters* aquelas demandas de um nó destinadas a nós pertencentes ao mesmo *cluster*; e *demandas extracusters* aquelas de um nó destinadas a nós de outros *clusters*.

Para agrupar demandas relacionadas, são definidas algumas somas para cada nó da rede². O algoritmo aloca as demandas cujas somas tiverem melhores condições para atingir os objetivos da metodologia – minimizar os números de VC-4 e de atividades de transconexão. Demandas *interhubs* não são consideradas (essas demandas serão alocadas na fase 4), e portanto, não há somas de demandas originadas em nós *hubs*.

As somas são:

- Soma SC_{ir} – soma das demandas *extracusters* do nó *i* para o *cluster r*;
- Soma SI_i – soma das demandas *intraclusters* do nó *i* para nós pertencentes a seu *cluster*;
- Soma $SS_{ir} = SC_{ir} + SI_i$ - soma das demandas *extracusters* do nó *i* para o *cluster r* e das

demandas *intraclusters* do nó *i*;

² Note que, para demandas telefônicas, a demanda AB é igual à demanda BA, portanto deve ser somada tanto à soma do nó A quanto à soma do nó B.

- Soma $ST_i = \sum_r SC_{ir} + SI_i$ - soma das demandas do nó i para todos os nós da rede.

A soma SC_{ir} deve ser listada em ordem decrescente na Lista SC. É a partir desta lista que se organizará também uma *Lista de nós* (o nó i de maior SC_{ir} será o primeiro desta lista). A cada iteração do algoritmo de alocação, todas as somas e ordens de listas são atualizados.

A *Lista de nós*, a partir da Lista SC, é a responsável pela ordem de alocação das demandas dos nós i. Além da atualização efetuada logo após cada iteração do algoritmo, a *Lista de nós* e a Lista SC têm suas ordens alteradas quando algum nó passa por uma avaliação, que chamaremos de *avaliação de nós*. Nessa avaliação, quando algum nó não atinge um determinado pré-requisito, ele vai para o fim da *Lista de nós* e suas respectivas somas SC vão para o fim da Lista SC.

Voltando ao exemplo, a tabela 4.4 mostra as demandas que serão alocadas pela fase 2, demandas maiores ou iguais ao limiar $L\text{-misto}=10$.

| Matriz de demandas em 2Mbits/s | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|---|----|----|----|----|----|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| - | - | - | 13 | - | 12 | 10 | 33 | 1 |
| | - | - | 26 | 34 | 11 | - | - | 2 |
| | | - | 13 | 16 | 12 | 24 | - | 3 |
| | | | - | - | - | - | 11 | 4 |
| | | | | - | 12 | 19 | - | 5 |
| | | | | | - | 16 | - | 6 |
| | | | | | | - | - | 7 |
| | | | | | | | - | 8 |

Tabela 4.4. Demandas que serão alocadas pela fase 2.

A tabela 4.5 mostra as somas dos nós i , SC e SS, para os três *clusters* r , e as somas SI e ST, das demandas do exemplo.

| Nós i | SC_{i_1} | SC_{i_2} | SC_{i_3} | SI_i | SS_{i_1} | SS_{i_2} | SS_{i_3} | ST_i |
|---------|------------|------------|------------|---------------|------------|------------|------------|--------|
| 4 | - | 26 | $13+11=24$ | 13 | - | 39 | 37 | 63 |
| 5 | 0 | - | 16 | $34+12+19=65$ | 65 | - | 81 | 81 |
| 6 | 12 | - | 12 | $11+12+16=39$ | 51 | - | 51 | 63 |
| 7 | 10 | - | 24 | $19+16=35$ | 45 | - | 59 | 69 |
| 8 | $33+11=44$ | 0 | - | 0 | 44 | 0 | - | 44 |

Tabela 4.5.Somas SC, SI, SS e ST.

| Nós i | Lista SC | Lista de nós |
|---------|----------|--------------|
| 4 | 26 24 | 8 |
| 5 | 16 0 | 4 |
| 6 | 12 12 | 7 |
| 7 | 24 10 | 5 |
| 8 | 44 0 | 6 |

Tabela 4.6. Relação das listas SC e de nós. O nó 8 é o que possui o maior valor SC, logo encabeça a Lista de nós.

Para a alocação de demandas em VC-4 mistos, a fase 2 propõe quatro tipos de alocação, que diferem entre si pelo tipo de demanda – *intracluster* e *extracluster* – alocadas no *container* VC-4 misto. A partir da *Lista de nós*, a metodologia de alocação segue o fluxograma da figura 4.4.

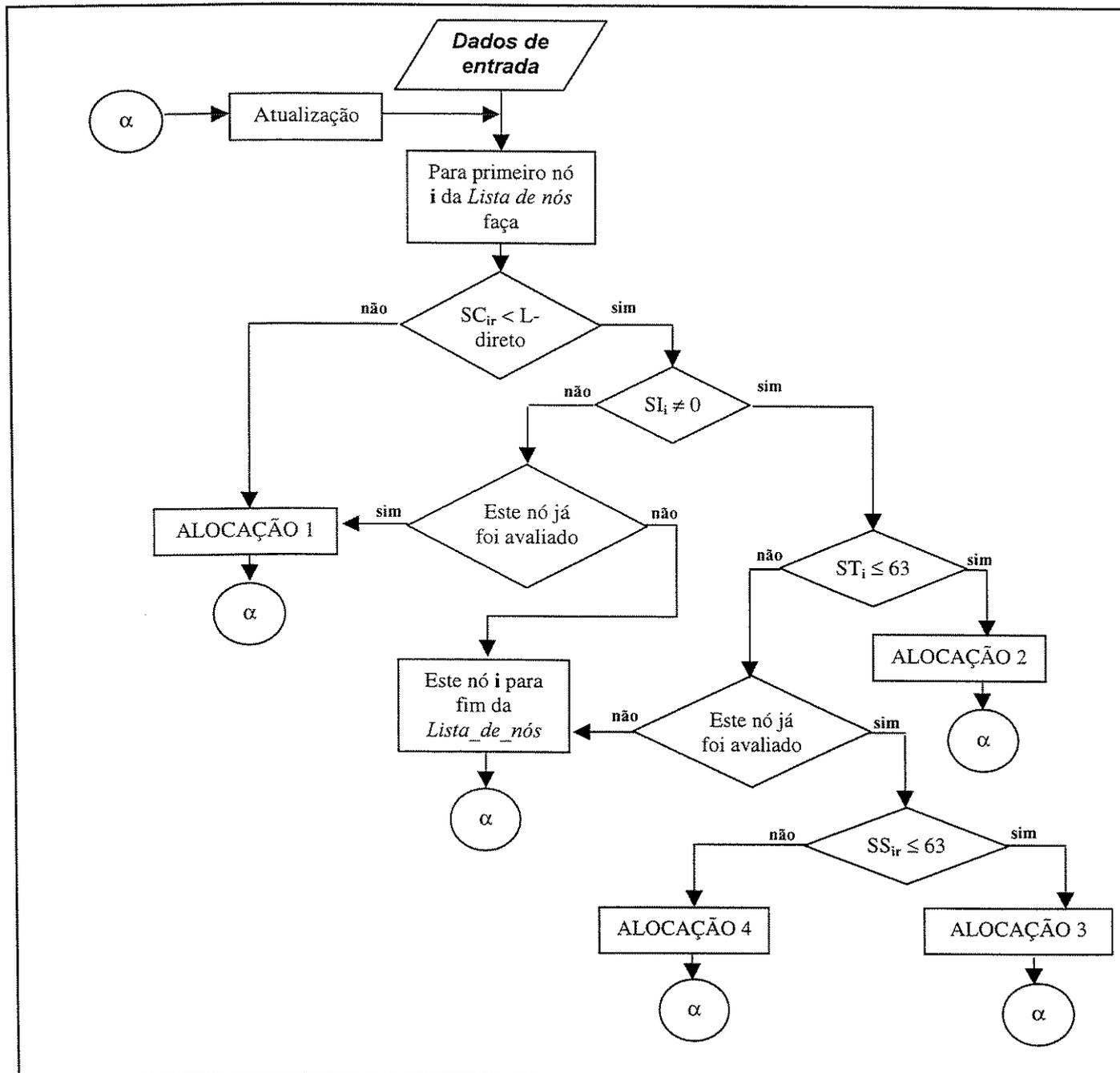


Figura 4.4. Fluxograma de alocação para a fase 2. Soma SC_{ir} : demanda do nó i para $cluster r$.

Segue-se a descrição dos quatro tipos de alocação:

ALOCAÇÃO TIPO 1 → Nesta alocação estão envolvidas somente demandas *extracusters* do nó *i* para nós *j* do *cluster r* (*cluster* do nó *r*), ou seja, demandas da soma SC_{ir} .

O **procedimento de alocação 1** aloca as demandas da soma SC_{ir} até preencher **um** *container VC-4* misto (Figura 4.5).

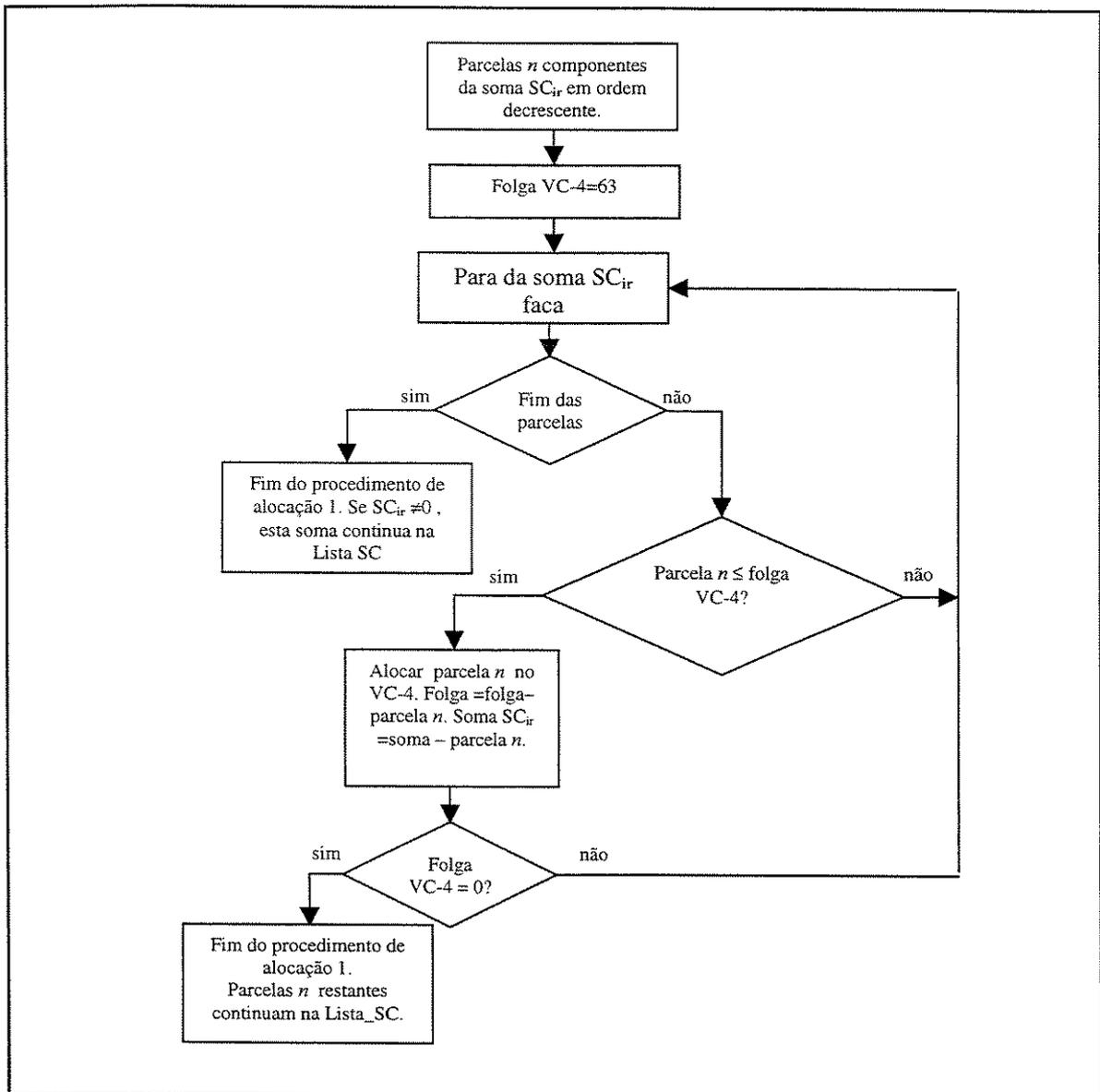


Figura 4.5: Procedimento de alocação 1.

Nesta alocação, o VC-4 misto sai do nó i e tem como destino o nó *hub* do *cluster* r . As demandas alocadas neste VC-4 sofrem atividades de transconexão neste nó *hub* final, sendo transbordadas para outro VC-4 misto que as transporte do nó *hub* do *cluster* r para destino final j .

Com isso, as demandas devem ser subtraídas das somas e listas envolvidas no trajeto já percorrido e atualizadas nas somas e listas dos nós referentes à parte restante do trajeto. O **procedimento de atualização 1** segue os seguintes critérios: retira a demanda $i \rightarrow j$ das somas dos nós i e j e acrescenta a nova demanda *hub* do *cluster* $r \rightarrow j$ nas somas do nó j (a demanda $i \rightarrow j$ que antes era *extracluster*, agora torna-se demanda *hub* do *cluster* $r \rightarrow j$, *intracluster*). O acréscimo desta nova demanda gera um aumento de volume na demanda original $j \rightarrow \text{hub}$ do *cluster* r , e portanto a demanda pode se tornar maior que o limiar L-direto. Por isso, no procedimento de alocação 1, no caso de uma das demandas da Lista SC_{ir} ser maior ou igual ao limiar L-direto, a estratégia é a mesma adotada na fase 1: a demanda é alocada em VC-4 diretos.

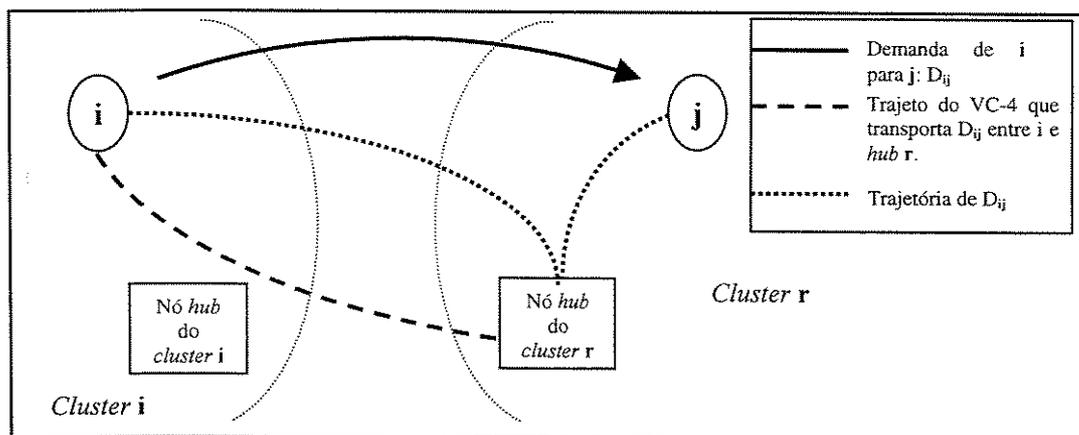


Figura 4.6: Trajeto das demandas originais e do *container* VC-4 na alocação 1.

ALOCAÇÃO TIPO 2 → A alocação tipo 2 aloca demandas da soma ST_i , que são demandas *intraclusters* originadas no nó i e destinadas aos nós k do próprio *cluster* do nó i e demandas *extraclusters* do nó i para nós j dos demais *clusters* r da rede.

Esta alocação considera a soma $ST_i \leq 63$ e, portanto, no **procedimento de alocação 2** todas as demandas pertencentes a esta soma são alocadas em **um** único VC-4 misto, que sai do nó i e vai para o *hub* do *cluster* do nó i (*cluster* do nó i).

Tanto as demandas *intraclusters* quanto as *extraclusters* sofrem atividades de transconexão no nó *hub* do *cluster i* quando são transbordadas para outros VC-4 mistos com o objetivo de alcançarem seus destinos finais. As demandas *extraclusters*, para percorrerem o trajeto restante nó *hub* do *cluster i*→*j*, podem ser transportadas por dois VC-4 (*i*→nó *hub* do *cluster i* e nó *hub* do *cluster i*→*j*) ou pelo número máximo de três *containers* VC-4 (*i*→nó *hub* do *cluster i*, nó *hub* do *cluster i*→nó *hub* do *cluster r* e nó *hub* do *cluster r*→*j*). Se forem transportadas por três VC-4, ainda sofrem atividade de transconexão no nó *hub* do *cluster r*.

O **procedimento de atualização 2** para as demandas *intraclusters* que precisam percorrer ainda o trajeto nó *hub* do *cluster i*→*k*, retira a demanda *i*→*k* das somas dos nós *i* e *k* e acrescenta a nova demanda *hub* do *cluster i*→*k* nas somas do nó *k*. Para as demandas *extraclusters*, o procedimento é retirar a demanda *i*→*j* das somas dos nós *i* e *j* e, se o nó *j* for *hub*, acrescentar a demanda nó *hub* do *cluster i*→*j* nas demandas *interhubs* nó *hub* *i*→nó *hub* *j*; caso contrário, acrescentar a demanda nó *hub* do *cluster i*→*j* nas somas do nó *j*.

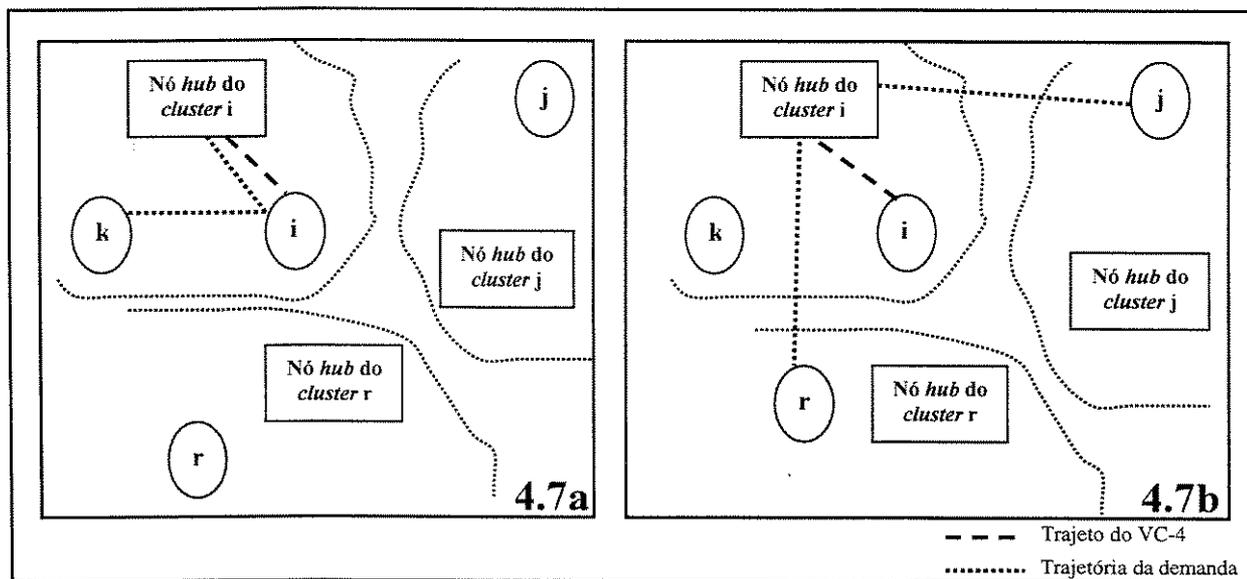


Figura 4.7: Alocação tipo 2.

ALOCAÇÃO TIPO 3 → Na alocação tipo 3 são alocadas as demandas *intraclusters* e *extraclusters* para o *cluster r*, demandas da soma SS_{ir} .

O **procedimento de alocação 3** aloca demandas da soma $SS_{ir} \leq 63$ em um único *container* VC-4 misto, que sai do nó *i* e chega no *hub* do *cluster i*.

Aqui, assim como na alocação 2, as demandas *intraclusters* $i \rightarrow k$ e as demandas *extraclusters*, são submetidas a atividades de transconexão no nó *hub* do *cluster* *i*. As demandas *extraclusters* podem ainda sofrer atividades de transconexão no nó *hub* do *cluster* *r*.

O **procedimento de atualização 3** é idêntico ao procedimento de atualização 2, mas aqui só há um *cluster* *r* (Figura 4.8).

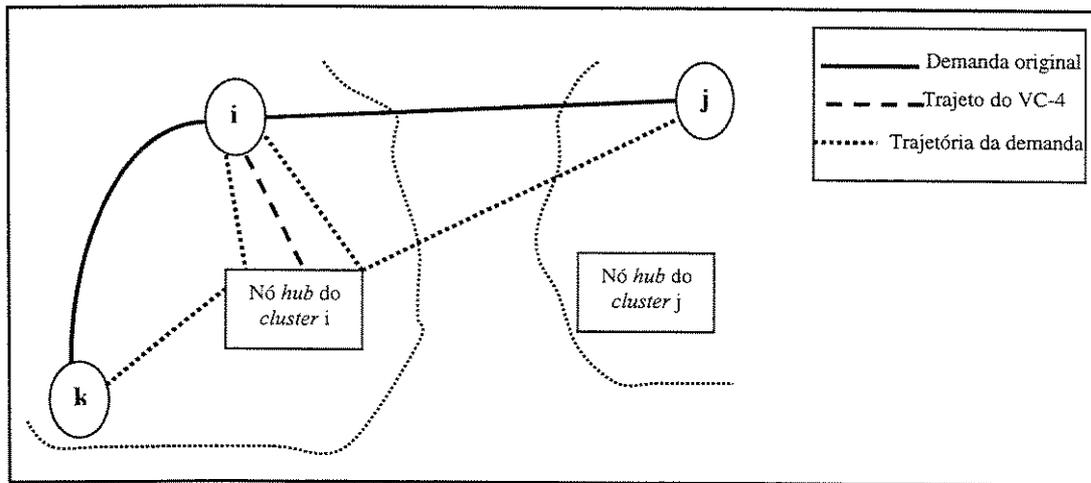


Figura 4.8. Alocação tipo 3.

ALOCAÇÃO TIPO 4 → Nesta alocação só demandas da soma SI_i , demandas *intraclusters*, estão envolvidas. O nó *i* continua na *Lista de nós*, e as demandas *extraclusters* deste nó continuam na *Lista SC*, para que sejam alocadas numa próxima iteração.

No **procedimento de alocação 4**, toda a demanda da soma *SI* do nó *i* deve ser alocada, ocupando **mais de um** VC-4 se necessário. Os *containers* VC-4 mistos da alocação 4 saem do nó *i* e chegam ao *hub* do *cluster* *i*. Caso alguma demanda da soma for maior ou igual ao limiar *L*-direto, devido às somas de outras demandas, adota-se o procedimento de alocação em VC-4 direto da fase 1 (Figura 4.9).

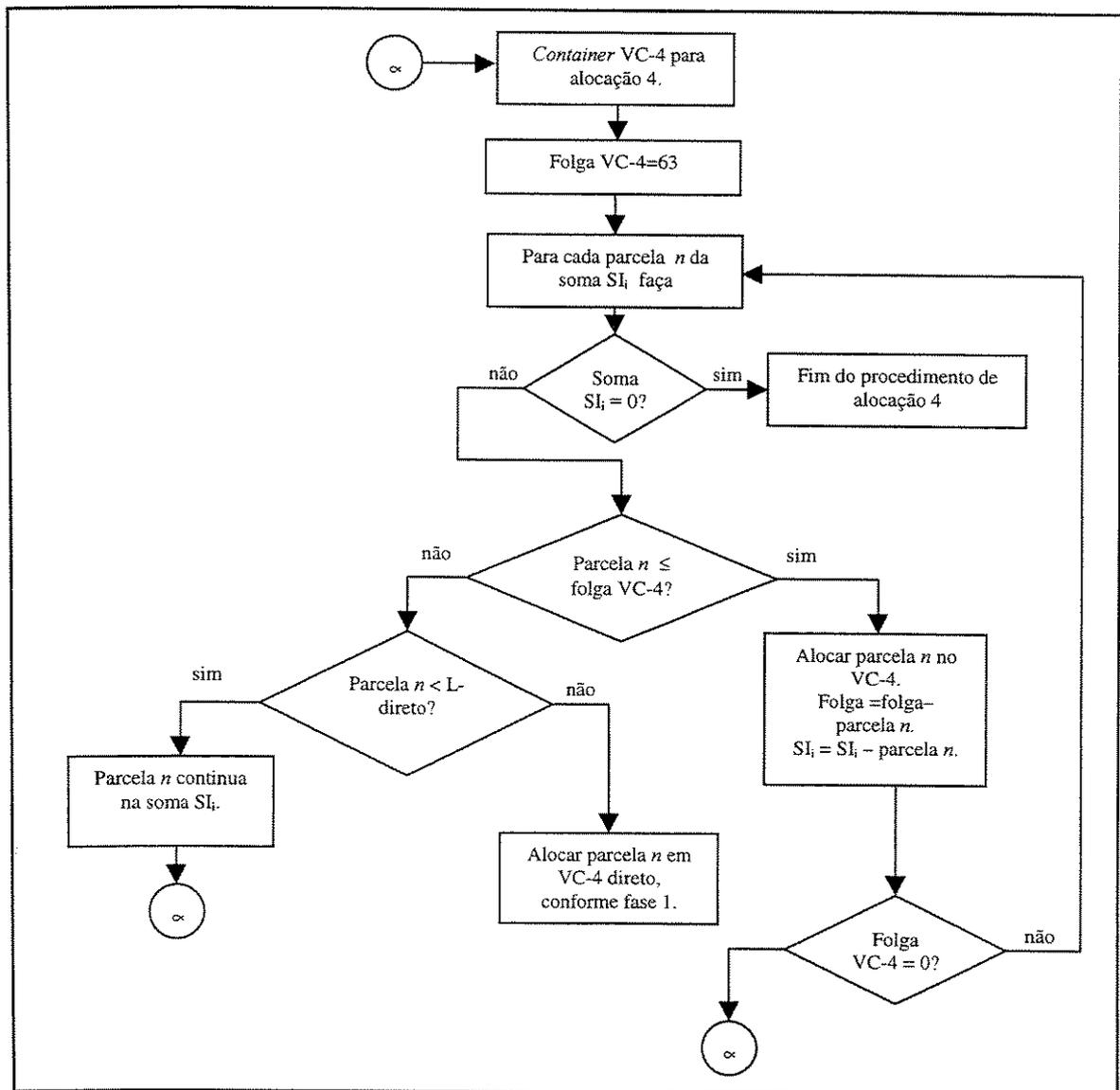


Figura 4.9: Procedimento de alocação 4.

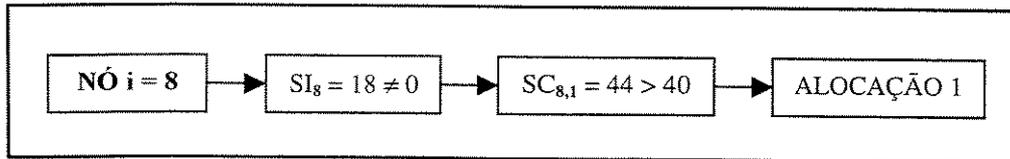
Na alocação 4, as demandas *intraclusters* $i \rightarrow k$ sofrem atividades de transconexão apenas no nó *hub* do *cluster* i , destino final do VC-4 misto, e devem ainda ser transportadas até o nó k por outro VC-4 misto $k \rightarrow$ nó *hub* do *cluster* i . O **procedimento de atualização 4** retira a demanda *intracluster* das somas dos nós i e k e acrescenta a nova demanda nó *hub* do *cluster* $i \rightarrow k$ nas somas do nó k (Figura 4.7 (a)).

OBS:

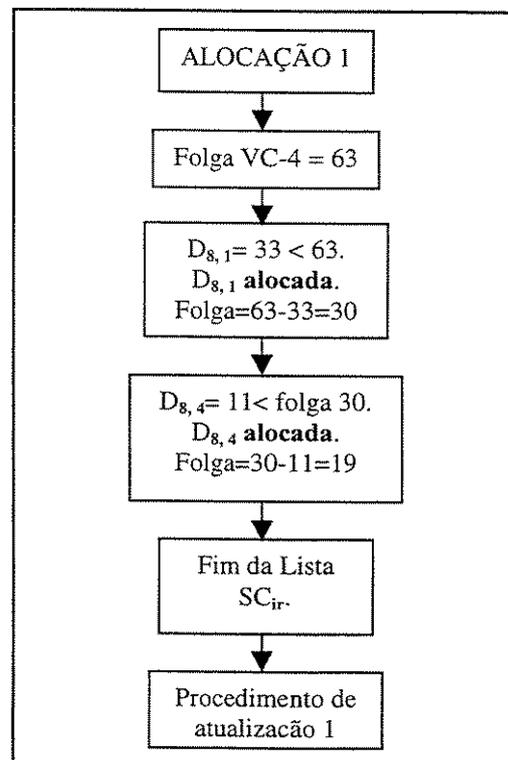
- 1) Em todas as alocações, se algum nó, por meio da *avaliação de nós*, foi para o fim da *Lista de nós*, o processo de atualização não o tira de lá, mesmo se seus valores forem melhores que de outros nós.
- 2) Com exceção da alocação 4, todos os outros três tipos de alocações preenchem um único VC-4 misto de cada vez.

A seguir descreveremos os passos da fase 2 para o exemplo.

Iteração 1: O nó 8 é o primeiro nó da *Lista de nós*, logo será o primeiro a ter suas demandas alocadas em *containers* VC-4. Acompanhando o fluxograma de alocação (Figura 4.4) temos:



O procedimento de alocação 1:



| | | |
|----------------------|------------------------|------------|
| VC-4 misto número | Origem/destino VC-4 | Folga VC-4 |
| n° 1 | nó 8 → nó <i>hub</i> 1 | 19 |

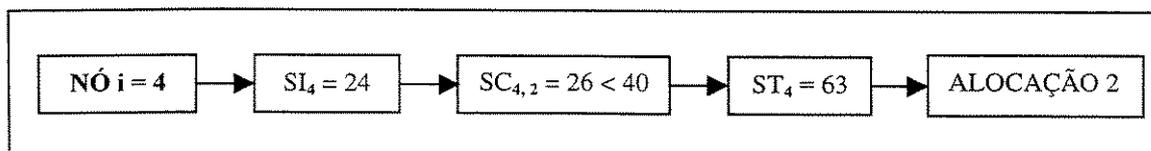
As demandas *extracusters* envolvidas na Alocação 1, alocadas no VC-4 do nó 8 para nó *hub* 1, são: $D_{8,1}$ e $D_{8,4}$. A $D_{8,1} = 33$ percorre todo o seu trajeto e, portanto, só deve ser retirada das somas do nó 8. A $D_{8,4} = 11$ é retirada das somas dos nós 8 e 4, e é acrescida à soma $D_{4,1} = 13 + 11 = 24$, para completar o seu trajeto. Repare que a demanda $D_{8,4} = 11$ será alocada em outro VC-4 para alcançar seu destino, logo sofrerá **atividade de transconexão** no nó *hub* 1.

| Atividades de Transconexão | |
|----------------------------|----|
| Nó <i>hub</i> 1 | 11 |

Como toda a demanda do nó 8 já foi alocada, este nó é retirado da *Lista de nós*.

| Nós i | $SC_{i,1}$ | $SC_{i,2}$ | $SC_{i,3}$ | SI_i | $SS_{i,1}$ | $SS_{i,2}$ | $SS_{i,3}$ | ST_i |
|---------|------------|------------|------------|---------------------|------------|------------|------------|--------|
| 4 | - | 26 | 13 | 24 | - | 50 | 37 | 63 |
| 5 | 0 | - | 16 | $34 + 12 + 19 = 65$ | 65 | - | 81 | 81 |
| 6 | 12 | - | 12 | $11 + 12 + 16 = 39$ | 51 | - | 51 | 63 |
| 7 | 10 | - | 24 | $19 + 16 = 45$ | 45 | - | 59 | 69 |

Iteração 2: O próximo nó da *Lista de nós* é o nó 4 (Tabela 4.6).



| | | |
|----------------------|------------------------|------------|
| VC-4 misto número | Origem/destino VC-4 | Folga VC-4 |
| n° 2 | nó 4 → nó <i>hub</i> 1 | 0 |

Como a soma total de demandas do nó 4 $ST_4 = 63$ é igual que a capacidade do VC-4, todas as demandas (*intraclusters* e *extraclusters*) são alocadas em um único VC-4, do nó 4 para o nó *hub* 1. As demandas envolvidas são: $D_{4,2} = 26$, $D_{4,3} = 13$ e $D_{4,1} = 24$.

A demanda $D_{4,2} = 26$ sai das somas do nó 4 e é somada à demanda *interhub* $DI_{1,2}$. A demanda $D_{4,3} = 13$ também sai das somas do nó 4 e é somada à demanda *interhub* $DI_{1,3}$. A $D_{4,1} = 24$ deve apenas ser retirada das somas do nó 4. O nó 4 sai da *Lista de nós*.

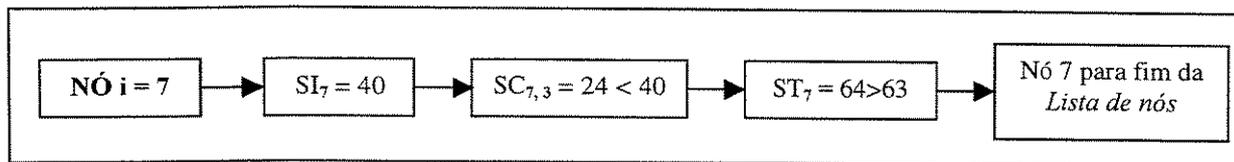
| Atividades de Transconexão | |
|----------------------------|----------|
| Nó <i>hub</i> 1 | 11+26+13 |

| Nós <i>i</i> | SC_{i1} | SC_{i2} | SC_{i3} | SI_i | SS_{i1} | SS_{i2} | SS_{i3} | ST_i |
|--------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 5 | 0 | - | 16 | $34+12+19=65$ | 65 | - | 81 | 81 |
| 6 | 12 | - | 12 | $11+12+16=39$ | 51 | - | 51 | 63 |
| 7 | 10 | - | 24 | $19+16=35$ | 45 | - | 59 | 69 |

Lista de nós atualizada:

| <i>Lista de nós</i> |
|---------------------|
| 7 |
| 5 |
| 6 |

Iteração 3: O nó 7 é o próximo nó da *Lista de nós* a ter suas demandas alocadas.



Iteração 4: Como $ST_5 = 81 > 63$, o nó 5 também passa pela Avaliação e vai para fim da *Lista de nós*.

| <i>Lista de nós</i> |
|---------------------|
| 6 |
| 7 |
| 5 |

Iteração 5: Nó 6 é o próximo da *Lista de nós*. Como $ST_6 = 63$, as demandas *intra* e *extraclusters* do nó serão alocadas em um único VC-4 segundo as regras da ALOCAÇÃO 2.

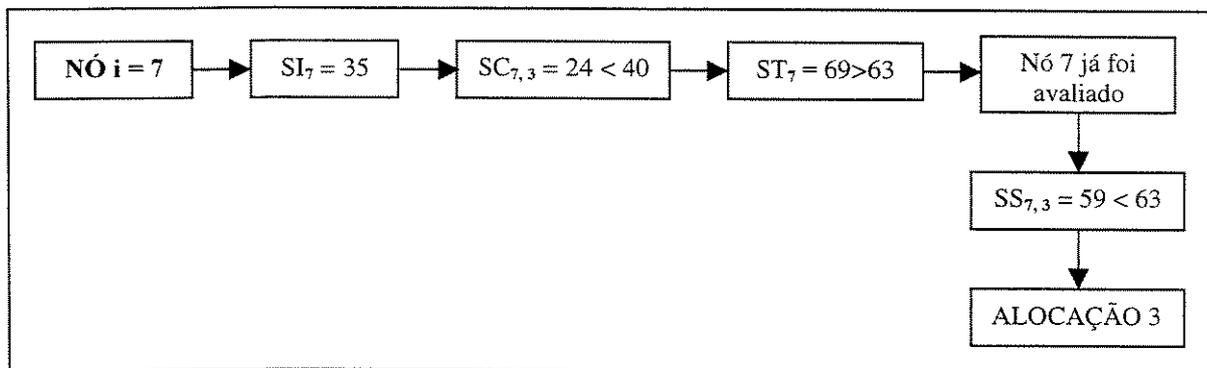
As demandas envolvidas são:

- a demanda *extracluster* do nó 6 para o *cluster* 1: $D_{6,1} = 12$, que será somada à $DI_{1,2}$;
- a demanda *extracluster* do nó 6 para o *cluster* 3: $D_{6,3} = 12$, que será somada à $DI_{2,3}$;
- as demandas *intraclusters* do nó 6 para nó *hub* 2: $D_{6,2} = 11$, $D_{6,5} = 12$ e $D_{6,7} = 16$. As demandas $D_{6,5}$ e $D_{6,7}$ são retiradas das respectivas somas e acrescentadas às demandas $D_{5,2} = 34 + 12 = 46$ e $D_{7,2} = 0 + 16$, respectivamente.

| Atividades de Transconexão | |
|----------------------------|-------------|
| Nó <i>hub</i> 2 | 12+12+12+16 |

| Nós i | $SC_{i,1}$ | $SC_{i,2}$ | $SC_{i,3}$ | SI_i | $SS_{i,1}$ | $SS_{i,2}$ | $SS_{i,3}$ | ST_i |
|---------|------------|------------|------------|----------------|------------|------------|------------|--------|
| 5 | 0 | - | 16 | $46+19=$ 65 | 65 | - | 81 | 81 |
| 7 | 10 | - | 24 | $19+16=$ 35 | 45 | - | 59 | 69 |

Iteração 6: O nó 7 é novamente o primeiro nó da *Lista de nós*.



| VC-4 misto número | Origem/destino VC-4 | Folga VC-4 |
|-------------------|---------------------|------------|
| nº 4 | nó 7 → nó hub 2 | 4 |

Na alocação 3, as demandas *intraclusters*, $SI_7 = 35 < 63$, e as demandas *extraclusters* para o *cluster* 3, $SC_{7,3} = 24$, são alocadas num único VC-4 com destino ao nó *hub* 2. As demandas para o *cluster* 1 continuam nas respectivas somas para serem alocadas numa outra iteração.

A demanda $D_{7,2} = 16$ percorre todo o seu trajeto. As atualizações a serem feitas nas outras demandas são:

$D_{7,5} = 19$ sai das somas do nó 7 e 5, e é somada à $D_{5,2} = 46+19= 65$;

$D_{7,3} = 24$ sai das somas do nó 7 e é somada à $DI_{2,3}$.

| Atividades de Transconexão | |
|----------------------------|-----------------------|
| Nó <i>hub</i> 1 | 11+26+13 |
| Nó <i>hub</i> 2 | 12+12+12+16+19 +24 |

| Nós <i>i</i> | SC_{i1} | SC_{i2} | SC_{i3} | SI_i | SS_{i1} | SS_{i2} | SS_{i3} | ST_i |
|--------------|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 5 | 0 | - | 16 | 65 | 65 | - | 81 | 81 |
| 7 | 10 | - | 0 | 0 | 10 | - | 0 | 10 |

Iteração 7: As demandas *intraclusters* do nó 5 serão alocadas pela ALOCAÇÃO 4. Como a $D_{5,2} = 65 > 63$, a demanda é alocada em um VC-4 direto e o resto = 2 é alocado em um VC-4 misto.

| VC-4 misto número | Origem/destino VC-4 | Folga VC-4 |
|-------------------|----------------------|------------|
| nº 5 | nó 5→nó <i>hub</i> 2 | 61 |

| Nós i | SC_{i1} | SC_{i2} | SC_{i3} | SI_i | SS_{i1} | SS_{i2} | SS_{i3} | ST_i |
|---------|-----------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 5 | 0 | - | 16 | 0 | 0 | - | 0 | 16 |
| 7 | 10 | - | 0 | 0 | 10 | - | 0 | 10 |

Iteração 8: O nó 5, por ter a maior soma $SC_{5,3}$, ainda é o primeiro da *Lista de nós*. Demanda da SC_{53} será alocada em um VC-4 misto de 5 para nó *hub* 3, segundo a ALOCAÇÃO 1. A demanda $D_{5,3} = 16$ é alocada num VC-4 que a transporta até seu destino final.

Iteração 9: O nó 7 é o único da *Lista de nós*. A demanda $D_{7,1} = 10$ é alocada por ALOCAÇÃO 1, em um VC-4 misto de 7 para nó *hub* 1.

| VC-4 misto número | Origem/destino VC-4 | Folga VC-4 |
|-------------------|------------------------|------------|
| n° 6 | nó 5 → nó <i>hub</i> 3 | 47 |
| n° 7 | nó 7 → nó <i>hub</i> 1 | 53 |

Todas as demandas entre o limiar L-direto e o L-misto já foram alocadas, em 7 VC-4 mistos e 1 VC-4 direto.

As atividades de *grooming* do tipo **Transconexão** estão na tabela abaixo:

| Atividades de Transconexão | |
|----------------------------|-----------------------|
| Nó <i>hub</i> 1 | 11+26+13 |
| Nó <i>hub</i> 2 | 12+12+12+16+19 +24 |
| Nó <i>hub</i> 3 | 0 |

A matriz de VC-4 mistos, obtida da fase 2 é:

| Matriz de demandas em <i>containers</i> VC-4 mistos | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| | - | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| | | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| | | | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| | | | | - | 0 | 0 | 0 | 5 |
| | | | | | - | 0 | 0 | 6 |
| | | | | | | - | 0 | 7 |
| | | | | | | | - | 8 |

Tabela 4.7. Demandas em VC-4 mistos.

Fase 3

A fase 3, assim como a fase 2, aloca demandas originadas em nós *não-hubs* e destinadas à nós *hubs* e *não-hubs*. As demandas, cujos volumes estão abaixo do limiar L-misto, são alocadas nas folgas³ dos VC-4 mistos já definidos pela fase 2.

³ A folga de um VC é sua capacidade, 63, menos o volume de demandas alocadas.

Para demandas $i \rightarrow j$ destinadas a nós j não-*hubs*, o procedimento de alocação da fase 3 está descrito no fluxograma a seguir.

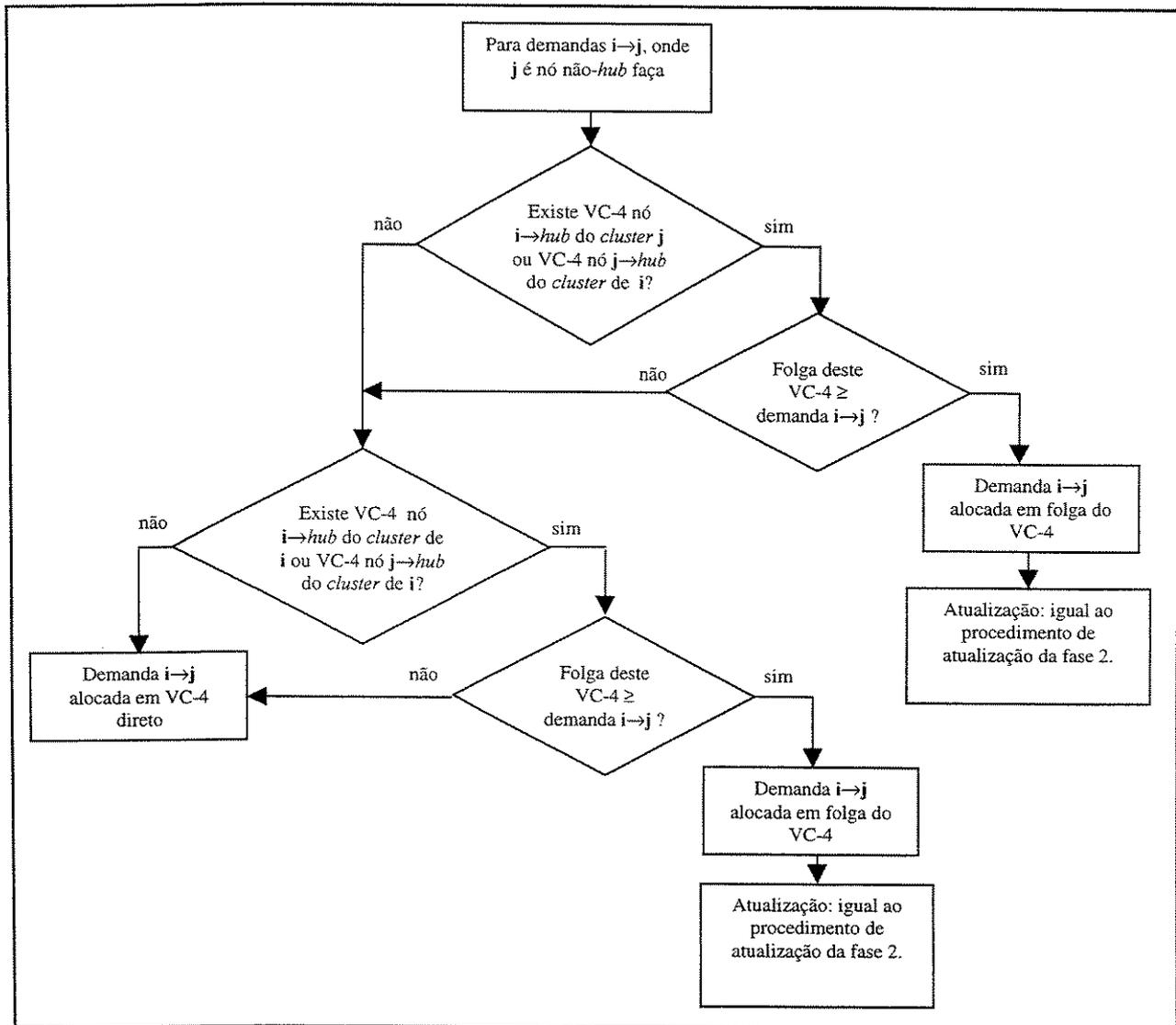


Figura 4.10 (a): Procedimento de alocação fase 3. $K =$ clusters diferentes de cluster do nó j .

Para demandas $i \rightarrow j$ com destino a nós j hubs, o procedimento é:

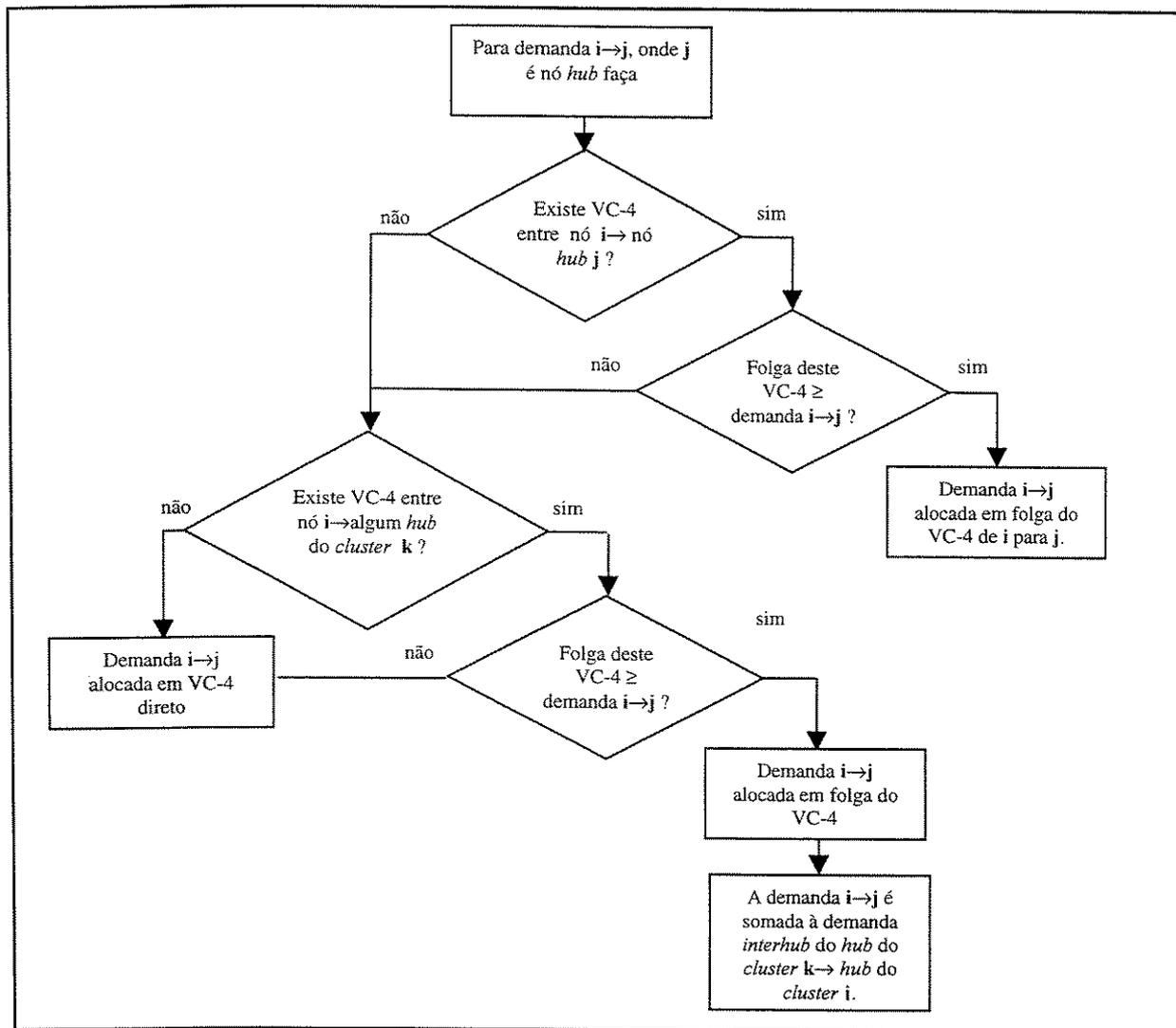


Figura 4.10 (b): Procedimento de alocação fase 3.

Em todos os casos em que se consegue aproveitar as folgas nos *containers* VC-4 mistos, as demandas só são submetidas a atividades de transconexão uma única vez.

No exemplo, as demandas abaixo do limiar L-misto que serão alocadas nas folgas dos VC-4 mistos já definidos são:

| Matriz de demandas em 2Mbits/s | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| | | | - | 7 | 4 | 8 | 0 | 4 |
| | | | | - | 0 | 0 | 0 | 5 |
| | | | | | - | | 5 | 6 |
| | | | | | | - | 6 | 7 |
| | | | | | | | - | 8 |

Tabela 4.8: matriz de demandas em 2Mbits/s menores que L-misto que serão alocadas em folgas.

| Nº de VC-4 | Origem/destino | folgas |
|------------|----------------------|--------|
| 1 | nó 8→nó <i>hub</i> 1 | 19 |
| 2 | nó 4→nó <i>hub</i> 1 | 0 |
| 3 | nó 6→nó <i>hub</i> 2 | 0 |
| 4 | nó 7→nó <i>hub</i> 2 | 4 |
| 5 | nó 5→nó <i>hub</i> 2 | 61 |
| 6 | nó 5→nó <i>hub</i> 3 | 47 |
| 7 | nó 7→nó <i>hub</i> 1 | 53 |

As demandas da tabela 4.8 serão alocadas em:

- $D_{4,5} = 7$ será alocada no VC-4 n° 5 e seu valor é somado à demanda $D_{4,2}$: $D_{4,2} = 0+7=7$;
- $D_{4,6} = 4$, como não cabe em nenhum VC-4 misto, segundo o esquema da figura 4.10 (a) será alocada num VC-4 direto;
- $D_{4,7} = 8$ será alocada no VC-4 n° 7, e seu valor será somado à $D_{4,1} = 0+8=8$;
- $D_{6,8} = 5$ será alocada em um VC-4 direto;
- $D_{7,8} = 6$ será alocada em um VC-4 direto;
- $D_{4,2} = 7$ será alocada num VC-4 direto;
- $D_{4,1} = 8$ será alocada num VC-4 direto.

| Atividades de Transconexão | |
|----------------------------|-------------------------|
| Nó <i>hub</i> 1 | 11+26+13+8 |
| Nó <i>hub</i> 2 | 12+12+12+16+19 +24+7 |
| Nó <i>hub</i> 3 | 0 |

Assim todas as demandas da rede do exemplo, abaixo do limiar $L\text{-misto}=10$, foram alocadas em folgas dos *containers* VC-4 mistos conforme metodologia da fase 3.

Fase 4

A fase 4 é responsável pela alocação de demandas *interhubs*. Ela é a última a ser realizada pois ao longo das fases 2 e 3 algumas “partes” de demandas $i \rightarrow j$ são somadas às demandas *interhubs* originais.

As demandas *interhubs* serão alocadas em quantos VC-4 diretos forem necessários e não

sofrem atividades de transconexão.

| Demandas <i>Interhubs</i> | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Hub 1</i> | <i>Hub 2</i> | <i>Hub 3</i> | |
| - | 38 | 13 | <i>Hub 1</i> |
| | - | 36 | <i>Hub 2</i> |
| | | - | <i>Hub 3</i> |

Devem ser criados 3 *containers* VC-4 diretos para alocar e transportar a demanda *interhub*, um VC-4 nó *hub 1*→nó *hub 2*, nó *hub 1*→nó *hub 3* e outro nó *hub 2*→nó *hub 3*.

Com o fim das fases 1, 2, 3 e 4, temos uma matriz de demandas alocadas em VC-4 mistos (fases 2 e 3) e uma matriz de demandas alocadas em VC-4 diretos (fases 1 e 4). A soma dessas matrizes resulta numa **matriz de demandas da rede alocadas em *containers* VC-4**. Com isso, a demanda da rede já pode ser transportada através da rede SDH, cujo planejamento é função da camada de transmissão.

Para o exemplo, a *matriz total de demandas em containers VC-4* (diretos e mistos) é a soma da matriz de demandas em VC-4 diretos (tabela 4.9), incluindo os *containers* VC-4 diretos obtidos nas fases 3 e 4, e da matriz de demandas em VC-4 mistos (tabela 4.10).

| Matriz de demandas em VC-4 diretos | | | | | | | | |
|------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| - | 4 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | - | 5 | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 |
| | | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| | | | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 |
| | | | | | - | 0 | 1 | 6 |
| | | | | | | - | 1 | 7 |
| | | | | | | | - | 8 |

Tabela 4.9. VC-4 diretos.

| Matriz de demandas em VC-4 mistos | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| - | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| | - | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| | | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| | | | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| | | | | - | 0 | 0 | 0 | 5 |
| | | | | | - | 0 | 0 | 6 |
| | | | | | | - | 0 | 7 |
| | | | | | | | - | 8 |

Tabela 4.10. VC-4 mistos.

A matriz total de *containers* VC-4 é apresentada na tabela 4.11, e o número total de atividades de transconexão é apresentado na tabela 4.12.

| Matriz de demandas em <i>containers</i> VC-4 | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|---|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| - | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 |
| | - | 5 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| | | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| | | | - | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| | | | | - | 0 | 0 | 0 | 5 |
| | | | | | - | 0 | 1 | 6 |
| | | | | | | - | 1 | 7 |
| | | | | | | | - | 8 |

Tabela 4.11. Demanda total da rede em VC-4.

| Atividades de Transconexão em número de VC-12 | |
|---|-----|
| Nó <i>hub</i> 1 | 58 |
| Nó <i>hub</i> 2 | 103 |
| Nó <i>hub</i> 3 | 0 |

Tabela 4.12. Número de atividades de transconexão

CAPÍTULO 5

APLICAÇÕES DO PCLOG E RESULTADOS

O **PCLOG**, a metodologia de alocação de *containers* VC-12 em VC-4, foi implementado computacionalmente em linguagem C e aplicado às redes telefônicas das cidades brasileiras de Belo Horizonte, área de médio porte, e da Área Metropolitana de São Paulo, área de grande porte. O tempo computacional para a aplicação na rede de Belo Horizonte foi da ordem de segundos. Para a rede da Área Metropolitana de São Paulo o tempo computacional foi de aproximadamente 3 minutos para cada teste. Neste capítulo apresentaremos os resultados e análises desses testes.

5.1. Apresentação dos Resultados Obtidos para a Rede da Cidade de Belo Horizonte

A tabela 5.1 apresenta alguns dados iniciais da rede telefônica da cidade de Belo Horizonte. A tabela 5.2 mostra a matriz de demandas em 2Mbits/s desta rede, dado de entrada para o PCLOG, e a figura 5.1 ilustra a disposição dos nós e *clusters* da rede de Belo Horizonte.

| Belo Horizonte – área de médio porte | |
|--|-------|
| Número de nós | 9 |
| Número de <i>clusters</i> | 2 |
| Soma total de demandas da rede (em 2Mbits/s) | 1.721 |

Tabela 5.1 – Dados da rede telefônica da cidade de Belo Horizonte.

| Matriz de demandas em 2Mbits/s | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|-----|-----|----|----|----|-----|----|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| - | 190 | 140 | 130 | 90 | 95 | 70 | 100 | 90 | 1 |
| | - | 130 | 80 | 70 | 70 | 80 | 15 | 10 | 2 |
| | | - | 60 | 30 | 20 | 35 | 10 | 5 | 3 |
| | | | - | 32 | 28 | 30 | 10 | 10 | 4 |
| | | | | - | 32 | 18 | 8 | 5 | 5 |
| | | | | | - | 16 | 12 | - | 6 |
| | | | | | | - | - | - | 7 |
| | | | | | | | - | - | 8 |
| | | | | | | | | - | 9 |

Tabela 5.2. Matriz de demandas da rede. Valor em negrito representa demandas entre *hubs*.

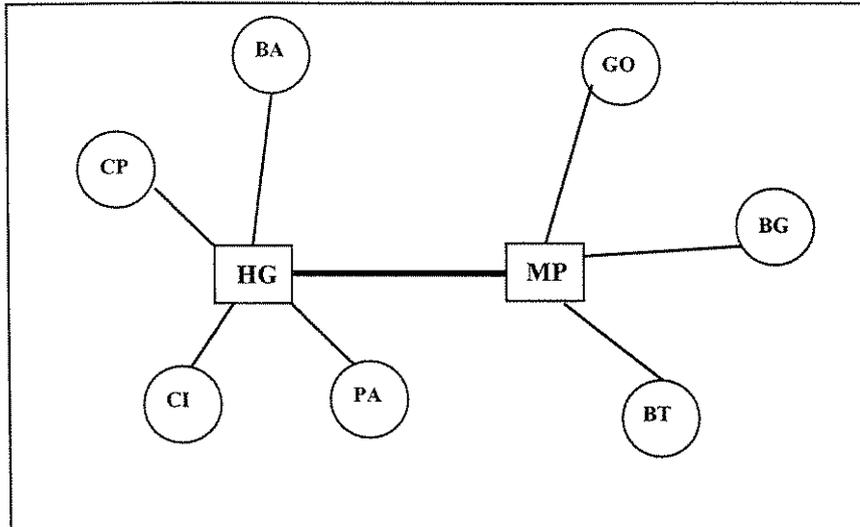


Figura 5.1. Rede de Belo Horizonte.

Para a rede de Belo Horizonte, o algoritmo para alocação de *containers* VC-12 em VC-4 foi testado diversas vezes, variando-se os limiares mínimos de formação de VC-4 diretos e



mistos. Esses testes indicaram quais limiares dos parâmetros **L-direto** e **L-misto** permitem valores mínimos de *containers* VC-4 e de atividades de transconexão para esta rede. A tabela 5.3 mostra a matriz de demandas em VC-4 para o teste de número mínimo de *containers* VC-4 e de atividades de transconexão.

| Matriz de demandas em <i>containers</i> VC-4 | | | | | | | | | |
|--|----------|---|---|---|---|---|---|---|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| - | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| | | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| | | | 1 | - | - | - | - | - | 3 |
| | | | | - | - | - | - | - | 4 |
| | | | | | - | - | 1 | - | 5 |
| | | | | | | - | 1 | - | 6 |
| | | | | | | | - | - | 7 |
| | | | | | | | | - | 8 |
| | | | | | | | | - | 9 |

Tabela 5.3. Matriz de demandas em VC-4 da rede da cidade de Belo Horizonte.

A tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos em números de VC-4 (diretos, mistos e suas somas) e em números de atividades de transconexão¹. Apresenta também a capacidade ociosa dos VC-4 para a rede. A capacidade ociosa foi calculada multiplicando-se o número total de *containers* VC-4 por 63 (capacidade máxima do VC-4) menos a parte ocupada pelas demandas. Note que uma demanda pode ocupar até três VC-4 (Cap. 3, pág. 31). Em negrito na tabela, destaca-se os valores mínimos de *containers* virtuais e de atividades de transconexão.

¹ Esta atividade é medida pelo número de canais E1 que sofrem transconexão entre VC's.

| Teste | L-direto | L-misto | N. de <i>containers</i> VC-4 diretos | N. de <i>containers</i> VC-4 mistos | N. total de <i>containers</i> VC-4 | N. de atividades de transconexão | Capacidade ociosa dos VC-4 em % |
|-------|----------|---------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 63 | 0 | 20 | 21 | 41 | 403 | 17.77 |
| 2 | | 7 | 20 | 20 | 40 | 449 | 13.93 |
| 3 | | 14 | 24 | 16 | 40 | 331 | 13.73 |
| 4 | | 21 | 22 | 14 | 36 | 331 | 10.32 |
| 5 | 56 | 0 | 21 | 19 | 40 | 343 | 18.09 |
| 6 | | 7 | 22 | 17 | 39 | 389 | 14.16 |
| 7 | | 14 | 25 | 14 | 39 | 331 | 13.96 |
| 8 | | 21 | 23 | 12 | 35 | 299 | 10.48 |
| 9 | 49 | 0 | 22 | 18 | 40 | 343 | 18.09 |
| 10 | | 7 | 22 | 17 | 39 | 389 | 14.16 |
| 11 | | 14 | 25 | 14 | 39 | 331 | 13.96 |
| 12 | | 21 | 23 | 12 | 35 | 299 | 10.48 |
| 13 | 42 | 0 | 23 | 17 | 40 | 343 | 18.09 |
| 14 | | 7 | 24 | 15 | 39 | 389 | 14.16 |
| 13 | | 14 | 26 | 13 | 39 | 331 | 13.96 |
| 16 | | 21 | 23 | 12 | 35 | 299 | 10.48 |

Tabela 5.4: Resultados das aplicações do algoritmo na rede de médio porte.

Para a rede de médio porte, Belo Horizonte, os números mínimos de *containers* VC-4 e de atividades de transconexão ocorreram para os mesmos limiares **L-diretos** e **L-mistos**: 56/21, 49/21 e 42/21. Nestes três testes o número de VC-4 direto não foi o mínimo, o que justifica o número mínimo de transconexão, ou seja, mais demandas foram transportadas por VC-4 diretos, não sofrendo atividades de transconexão.

Uma análise percentual foi feita entre os maiores e menores valores e também entre os dois últimos valores de cada aspecto (VC-4 misto, direto, número total de VC-4 e número de atividades de transconexão). (Tabela 5.5)

| | <i>Containers</i> VC-4 direto | <i>Containers</i> VC-4 misto | <i>Containers</i> totais VC-4 | Atividade de transconexão |
|--|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Diferença percentual entre maiores e menores valores | 30% | 75% | 17.14% | 50.17% |
| Diferença percentual entre os dois menores valores | 5% | 8.3% | 2.86% | 10.70% |

Tabela 5.5: Análise percentual.

5.2. Apresentação dos Resultados Obtidos para a Rede da Área Metropolitana de São Paulo

A Área Metropolitana de São Paulo (AMSP) engloba, além da cidade de São Paulo, algumas cidades da Grande São Paulo (Guarulhos e Osasco, por exemplo), somando uma população em torno de 17 milhões de habitantes e cerca de 2,5 milhões de terminais telefônicos, conectados, através da Rede Externa, a 91 Centros de Fios². Alguns dos CF's da rede de 91 nós contêm centrais que podem ser decompostas em centrais-mães e centrais-filhas. As centrais-filhas contêm partes da matriz de comutação ou dos terminais de linhas da estação-mãe, e suas demandas são somadas às demandas de outros nós, reduzindo o número de nós a serem estudados. Assim, a rede básica tem 58 nós, e neste estudo, para análise da metodologia, a rede foi reduzida a 40 Centros de Fios, diminuindo-se também nós pendentes que não contêm necessariamente centrais-filhas. No anexo desta tese encontram-se as tabelas com os nomes de cada nó da rede básica de 58 nós, a pendência de nós para a redução da rede para 40 CF's, a *clusterização* em 5 regiões e um mapa com a localização geográfica dos nós da AMSP .

A Tabela 5.6 apresenta alguns dados da rede de grande porte da AMSP.

| Área Metropolitana de São Paulo – área de grande porte | |
|--|--------|
| Número de nós | 40 |
| Número de <i>clusters</i> | 5 |
| Soma total de demandas da rede (em 2Mbits/s) | 18.590 |

Tabela 5.6: Dados da AMSP.

² Dados arbitrados em conjunto com a Telesp, em 1994.

A variação de parâmetros para os limiares **L-direto** e **L-misto** em testes do algoritmo na rede da AMSP, mostrada na tabela 5.7, indicaram os valores mínimos do número de *containers* VC-4 e de atividades de transconexão.

| Teste | L-direto | L-misto | N. de <i>containers</i> VC-4 diretos | N. de <i>containers</i> VC-4 mistos | N. total de <i>containers</i> VC-4 | N. de atividades de transconexão | Capacidade ociosa dos VC-4 em % |
|-------|----------|---------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 63 | 0 | 224 | 243 | 467 | 7.167 | 13.45 |
| 2 | | 7 | 236 | 225 | 461 | 7.453 | 12.81 |
| 3 | | 14 | 346 | 195 | 541 | 6.161 | 32.16 |
| 4 | | 21 | 616 | 157 | 773 | 5.021 | 34.06 |
| 5 | 56 | 0 | 234 | 228 | 462 | 6.943 | 13.63 |
| 6 | | 7 | 248 | 206 | 454 | 7.209 | 12.58 |
| 7 | | 14 | 424 | 181 | 605 | 5.903 | 28.83 |
| 8 | | 21 | 617 | 148 | 767 | 4.897 | 34.18 |
| 9 | 49 | 0 | 243 | 215 | 458 | 6.402 | 14.97 |
| 10 | | 7 | 270 | 191 | 461 | 6.890 | 15.72 |
| 11 | | 14 | 442 | 156 | 598 | 5.620 | 28.91 |
| 12 | | 21 | 644 | 125 | 769 | 4.282 | 35.38 |
| 13 | 42 | 0 | 261 | 196 | 457 | 6.151 | 16.71 |
| 14 | | 7 | 294 | 175 | 469 | 5.964 | 18.82 |
| 15 | | 14 | 453 | 141 | 594 | 4.815 | 30.72 |
| 16 | | 21 | 604 | 99 | 703 | 3.550 | 40.19 |

Tabela 5.7: Resultados das aplicações do algoritmo na rede de grande porte.

Nos testes feitos para a rede de grande porte da AMSP, podemos observar que, na tentativa de minimizar o número de demandas que sofrem transconexão, um número grande de demandas são alocadas em VC-4 diretos, aumentando consideravelmente o número deste tipo de VC-4 e aumentando também a capacidade ociosa do total de *containers*. No teste 16, onde ocorre o número mínimo de atividades de transconexão, 3.550, tem-se 604 *containers* VC-4 diretos, valor quase três vezes maior que o número mínimo de VC-4 diretos do teste 1. Em contrapartida, o menor número de VC-4, que é igual a 454, ocorreu no teste 6, que tem 7.209 demandas sofrendo transconexão, valor 103% maior que o mínimo de transconexão, ocorrido no teste 16.

Se utilizarmos como teste de referência o de número 15, verificamos que ele apresenta:

1. um número menor de *containers* VC-4 que os testes 4, 7, 8, 11 e 12, e um número menor de atividade de transconexão que os testes 4, 7, 8 e 11;
2. um número de *containers* VC-4 da ordem de 28% maior que os testes 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13 e 14 e 9% maior que o teste 3. Contudo, estes testes têm um número de atividades de transconexão no mínimo 23% maior que o teste 15;
3. um número de atividades de transconexão 26% maior que o teste 16 que, por sua vez tem um número de VC-4 18,3% maior que o teste 15.

Por estes resultados, podemos a *priori* descartar os testes do item 1 por não serem competitivos com o teste 15. Embora não possamos ser tão categóricos com os testes mencionados no item 2 por não termos dados de custos da atividade de transconexão, é possível avaliar que eles também não são interessantes. Pelas informações que recebemos informalmente das operadoras, o custo da transconexão é muito alto. Portanto, os dois cenários com alta chance de poderem ser utilizados são os dois descritos pelos testes 15 e 16.

Estes testes, e mais o teste 6, por apresentar um número mínimo de *containers* VC-4, serão utilizados no próximo capítulo, para comparação, no planejamento da Rede de Transmissão.

CAPÍTULO 6

APLICAÇÕES DO ENFEIXAMENTO E RESULTADOS

Aplicamos os resultados da camada lógica, a matriz de demandas da rede em termos de *containers* VC-4, no **Planejamento da Camada de Transmissão**, camada responsável por definir quais equipamentos de transmissão serão instalados na rede, suas hierarquias e as topologias que tais equipamentos compõem. Utilizamos para este planejamento o programa ENFEIXAMENTO descrito em três teses, uma de doutorado [Bortolon, 1996a] e duas de mestrado [Bergamaschi, 1996 e Quaglia, 1997].

Utilizamos as matrizes em *containers* VC-4 das redes de Belo Horizonte e da Área Metropolitana de São Paulo como dados de entrada do programa ENFEIXAMENTO para definir os equipamentos SDH e as topologias das redes, com o objetivo de minimizar custos. A relação de custos (em US\$) por capacidade dos equipamentos de transmissão SDH são apresentadas na tabela 6.1.

| Equipamentos | 155 Mbits/s | 622 Mbits/s | 2.5 Gbits/s |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| OLTM | 60.000 | 120.000 | 270.000 |
| ADM-Bidirecional | 50.000 | 90.000 | 210.000 |
| ADM-Unidirecional | 35.000 | 65.000 | 150.000 |

Tabela 6.1: Custos em US\$ dos equipamentos SDH.

6.1. Rede de Belo Horizonte

O programa de Enfeixamento, utilizando como dado de entrada a matriz de demandas em 2 Mbits/s da rede de Belo Horizonte, foi rodado por [Quaglia, 1997], levando aos resultados apresentados na primeira linha da tabela 6.2. Utilizando os resultados do capítulo anterior, um dos testes 8, 12 ou 16, que produzem a mesma solução, para a rede de Belo Horizonte, obtivemos os resultados apresentados na segunda linha da tabela 6.2. As Figuras 6.1 e 6.2 mostram as soluções de rede para os dois casos.

| | Função objetivo | Arcos | Enlace ponto-a-ponto 622M | Enlace ponto-a-ponto 155M | ADM 622M | N. de anéis | Cap. total | N. de transconexões ¹ |
|-------------------------|-----------------|-------|---------------------------|---------------------------|----------|-------------|------------|----------------------------------|
| Para matriz em 2Mbits/s | 1.200 | 12 | 5 | 1 | 6 | 2 | 2.835 | 392 |
| Para matriz em VC-4 | 1.320 | 14 | 5 | 3 | 6 | 2 | 2.961 | 299 |

Tabela 6.2. Resultado da aplicação do enfeixamento para a rede da cidade de Belo Horizonte².

¹ Para os resultados de [Quaglia, 1997] o cálculo do número de transconexões para a rede de Belo Horizonte foi manual.

² Os anéis, para as duas rodadas do enfeixamento da rede de Belo Horizonte, são os mesmos.

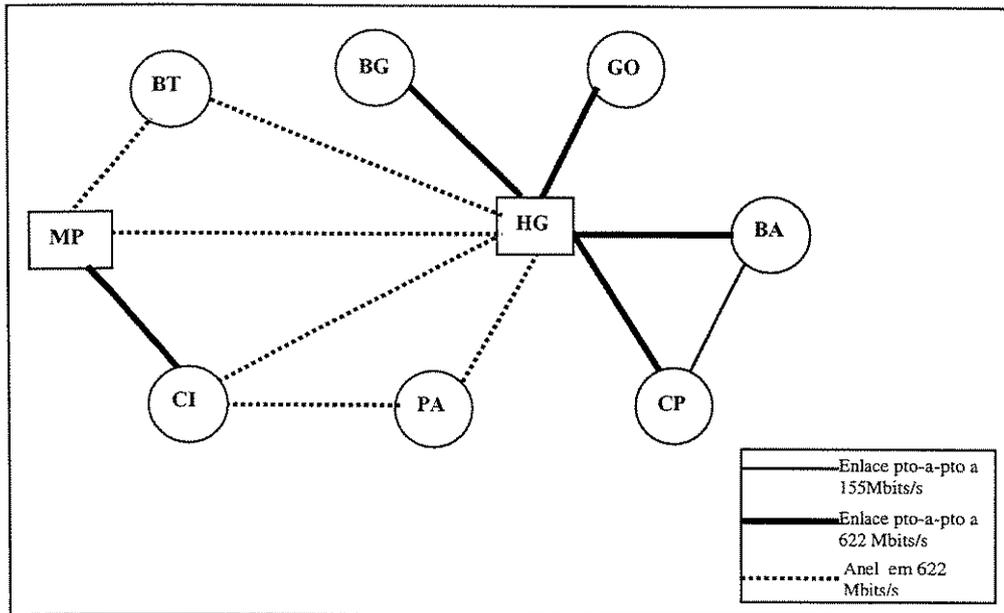


Figura 6.1. Solução de rede rodada com matriz de 2Mbits/s

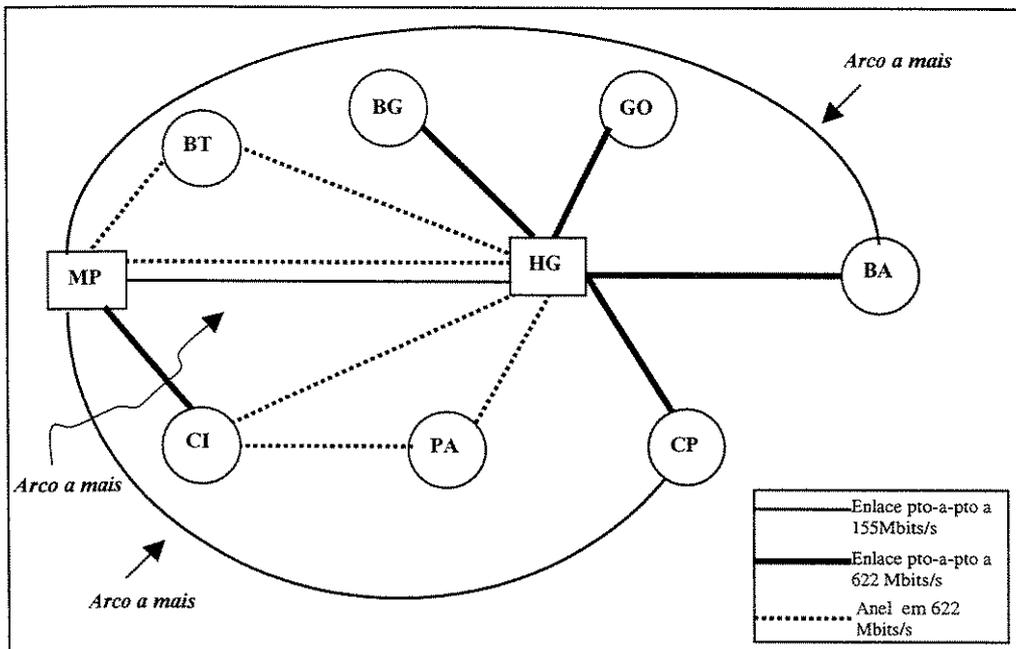


Figura 6.2. Solução de rede rodada com matriz de VC-4.

O custo obtido para a rede da cidade de Belo Horizonte rodada com a matriz de VC-4 foi 10% maior que para a rede rodada com a matriz de canais 2Mbits/s. Esse acréscimo no custo se dá porque a solução obtida pelo programa Enfeixamento apresentou dois enlaces ponto-a-ponto de 155 Mbits/s a mais para a rede em VC-4. Por outro lado, notamos que o número de atividades de transconexão para a rede da matriz em 2Mbits/s é 31% maior que para a rede de matriz em VC-4. Obviamente, para escolher a rede de mínimo custo seria necessário conhecer os custos de transconexão. Tendo-se estes custos, a ferramenta ENFEIXAMENTO fornece ao planejador opções de escolha de boa qualidade.

6.2. Rede da Área Metropolitana de São Paulo

Para a rede da AMSP, rodamos o algoritmo do Enfeixamento para três casos:

1. Matriz de demandas do teste 6 (capítulo 5), de número mínimo de *containers* VC-4;
2. Matriz de demandas do teste 15, com valores intermediários de VC-4 e de atividades de transconexão;
3. Matriz de demandas do teste 16, de número mínimo de atividades de transconexão;

As Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam os resultados da aplicação para os três casos. Além disso apresentam na primeira linha os resultados de [Bergamaschi, 1996], utilizando como dado de entrada a matriz de 2Mbits/s.

| | Função objetivo | Enlace pto-a-ptto 2.5G | Enlace pto-a-ptto 622M | Enlace pto-a-ptto 155M | ADM 2.5G | ADM 622M | N. de transconexões ³ |
|-------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|----------|----------------------------------|
| Para matriz em 2Mbits/s | 13.750 | 31 | 27 | 2 | 9 | 1 | - |
| Para matriz em VC-4: teste 6 | 14.310 | 31 | 20 | - | 16 | 2 | 7.209 |
| Para matriz em VC-4: teste 15 | 14.700 | 39 | 11 | - | 13 | 7 | 4.815 |
| Para matriz em VC-4: teste 16 | 23.690 | 57 | 3 | - | 14 | - | 3.550 |

Tabela 6.3: Tabela comparativa entre resultados obtidos a partir de matrizes em 2Mbits/s e em *containers* VC-4.

| | N. de anéis em 622Mbits/s | N. de anéis em 2,5Gbits/s | N. de cadeia | Cap. Total da rede (em 2Mbits/s) |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|----------------------------------|
| Para matriz em 2Mbits/s | 2 | 0 | 0 | 47.456 |
| Para matriz em VC-4: teste 6 | 0 | 4 | 6 | 52.920 |
| Para matriz em VC-4: teste 15 | 2 | 3 | 5 | 56.952 |
| Para matriz em VC-4: teste 16 | 0 | 1 | 11 | 129.780 |

Tabela 6.4. Topologias e número de atividades de transconexão para as redes de matrizes em 2Mbits/s e VC-4.

Para a rede da AMSP o custo também foi maior para os casos das matrizes de VC-4. O custo da rede do teste 6 foi 4% maior que o custo da rede da matriz em 2Mbits/s, enquanto que a

³ Não foi possível calcular manualmente o número de atividades de transconexão para a rede em 2Mbits/s. O programa Enfeixamento não faz este cálculo.

rede do teste 15 foi 7% maior. A rede do teste 16 apresentou um custo 72,3% maior que a rede de 2Mbits/s, pois com um mínimo de atividades de transconexão, o número de VC-4 transportados pela rede aumenta bastante, elevando o custo com equipamentos.

Analisando a relação custo – número de atividades de transconexão para as redes dos testes 6 e 15, este servindo como referência, vemos que a diferença percentual para o número de atividades de transconexão foi 49.72% e, mesmo com um aumento de 18.3% no número de *containers* VC-4, o custo foi apenas 2,7% maior.

Para o teste da primeira linha da tabela, embora não se pudesse obter o número de atividades de transconexão, é possível estimar que seja muito alto, muito superior até ao caso da segunda linha. Os VC-12 não são colocados de forma planejada nos VC-4, tornando a rede bastante desordenada neste aspecto. Além disso, as duas redes rodadas com matrizes em VC-4, testes 6 e 15, apresentam um número de anéis superior à rede em 2Mbits/s, tornando-a mais segura.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Fazer o Planejamento da Rede de Transmissão utilizando como dados de entrada demandas em 2Mbits/s pode gerar um número muito grande de trajetórias, dificultando a gerência desta rede e elevando muito o número de atividades de transconexão. A tarefa de arrumar estas demandas dentro de *containers* virtuais VC-4 é muito importante devido à fatores como *facilidades de gerência, diminuição do número de trajetórias da rede e do volume de atividades de transconexão*, levando a *menores custos*. Uma rede cujos VC-4 são organizados de forma sistemática também torna mais aparente o *transporte* das demandas através dela, explicitando em quais VC's a demanda está alocada, por quais pontos estes VC's passam e onde as demandas sofrem atividades de transconexão.

Um outro objetivo a se obter na rede de transporte é de um compromisso de menor custo entre número de VC-4 e o volume de atividades de transconexão. Em geral, quando o número de atividades de transconexão é pequeno, o número de VC-4 pode ser muito alto, exigindo mais equipamentos para fazer a transmissão e tornando mais caro o custo da rede (como é o caso do teste16). Isto acontece porque, na tentativa de diminuir o volume de atividades de transconexão, um número muito grande de demandas são alocadas em VC-4 do tipo direto, elevando o número total de VC-4 da rede. O oposto ocorre quando tentamos diminuir o número de *containers* VC-4.

O PCLOG permite a obtenção de redes mais organizadas e portanto mais gerenciáveis. Mostra ser também uma ferramenta útil na produção de cenários alternativos, permitindo ao planejador rapidamente testar opções diferenciadas mais interessantes na procura de soluções.

Um tema para futura pesquisa é desenvolver uma metodologia de planejamento da Camada Lógica considerando a transmissão de outros tipos de serviços (dados, sinais de TV, canais privados de telefonia, ...) na Rede Digital de Serviços Integrados (RDSI). Nesta rede um VC-4 aloca *containers* de baixa ordem (LO VC's), VC-12 e VC-3, simultaneamente, e o objetivo

ainda é minimizar o número de *containers* VC-4 e o número de atividades de transconexão, que agora é a atividade de transpor VC-12 e VC-3 de um VC-4 para o outro ao longo de suas trajetórias.

Outro tema para pesquisa futura é utilizar o resultado do Planejamento da Camada Lógica como dado de entrada para uma ferramenta de proposição de anéis de transmissão. Uma ferramenta deste tipo é proposta na tese de mestrado de [Oliveira, 1998]. Aqui, se utiliza da demanda em 2Mbits/s como dado de entrada. Possivelmente seja mais eficiente trabalhar com matrizes de demandas em VC-4, resultando em anéis mais interessantes que aqueles sugeridos pelo ENFEIXAMENTO (Cap. 6).

ANEXOS

1 – Estações-mães e nós pendentes.

| Centros de Fios da AMSP | | | | | |
|-------------------------|-------------|-----------------------|-----|-------------|-----------|
| Nós | Estação-mãe | Pendentes | Nós | Estação-mãe | Pendentes |
| 1 | AM | - | 21 | BG | - |
| 2 | PD | - | 22 | CO | - |
| 3 | PA | - | 23 | IH | - |
| 4 | LI | - | 24 | JD | - |
| 5 | VU | SM, EM, GZ, IT, VE | 25 | SI | - |
| 6 | CB | - | 26 | VM | - |
| 7 | SA | GP | 27 | IB | - |
| 8 | PR | - | 28 | IM | - |
| 9 | BE | - | 29 | JB | AC |
| 10 | MH | - | 30 | NA | - |
| 11 | AT | CL | 31 | BC | - |
| 12 | MB | - | 32 | BR | - |
| 13 | OS | RO | 33 | IP | VP |
| 14 | LP | AG | 34 | PE | - |
| 15 | CV | NC | 35 | DT | - |
| 16 | FO | JR | 36 | ST | VG, TR |
| 17 | LH | - | 37 | CC | BO |
| 18 | PI | - | 38 | GR | MQ |
| 19 | PL | - | 39 | GU | SS |
| 20 | JG | - | 40 | PH | - |

2 - Clusterização da rede da AMSP.

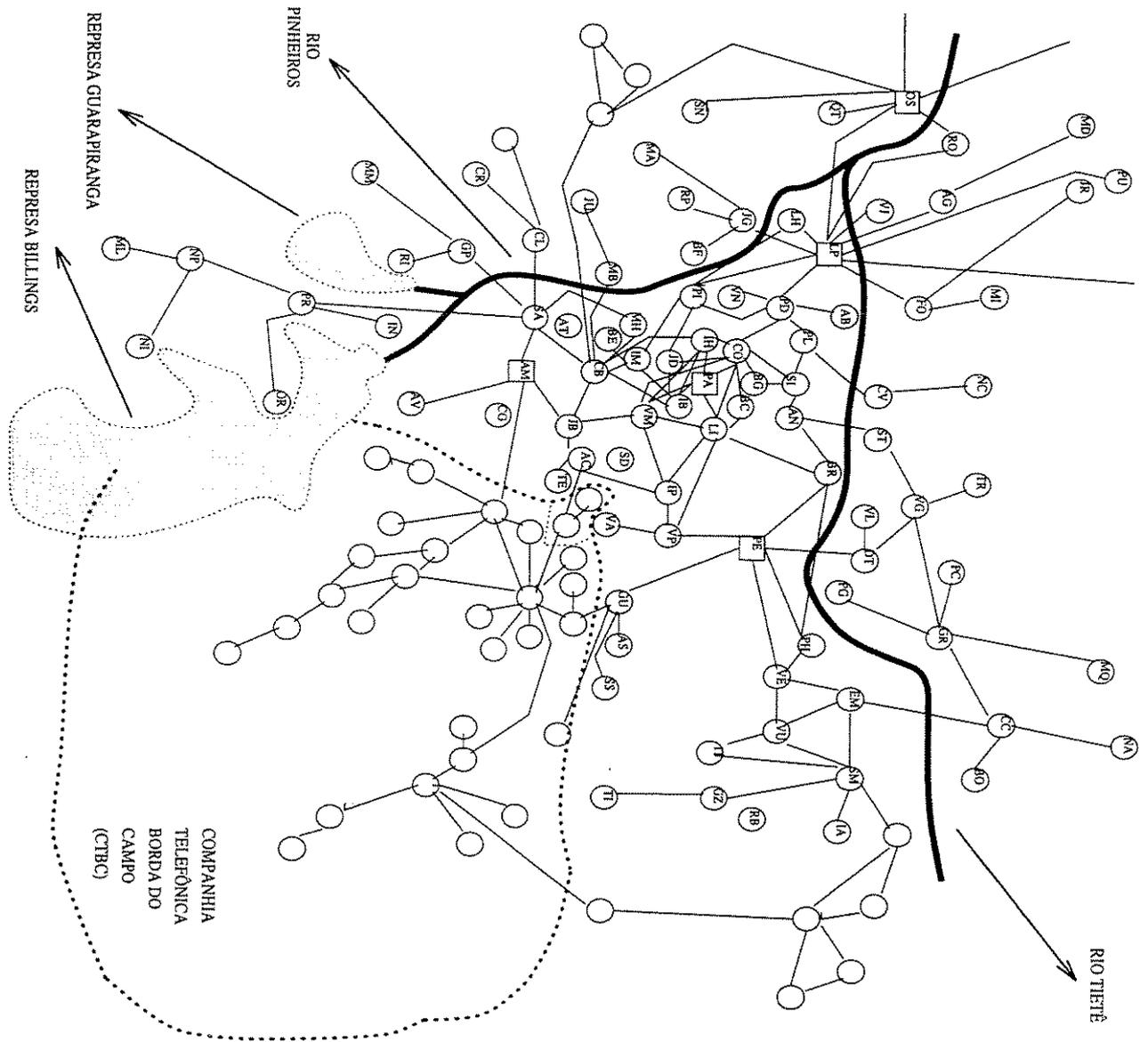
| <i>Cluster</i> | <i>Hub</i> | Nós pendentos |
|----------------|------------|---|
| 1 | AM | AM, CB, AS, PR, BE, MH, AT, MB, CL, JP |
| 2 | PD | PD, OS, LP, CV, FO, LH, PI, PL, JG, AG, JR, RO, NC |
| 3 | PA | PA, BG, CO, IH, JD, SI, VM, IB, IM |
| 4 | LI | LI, JB, NA, BC, BR, IP, AC, VP |
| 5 | VU | VU, PE, DT, ST, CC, GR, GU, PH, BO, SM, VG, MQ, EM, GZ, IT, SS, TR, VE |

3 – Nome dos Centros de Fios

| | |
|----|-----------------------------|
| 1 | GRS BO Bomsucesso |
| 2 | GRS CC Cumbica |
| 3 | GRS GR Centro |
| 4 | SPO NA Anhangabaú |
| 5 | SPO BG Benjamin Constant |
| 6 | SPO BG Basílio da Gama |
| 7 | SPO BR Brás |
| 8 | SPO CB Campo Belo |
| 9 | SPO CO Consolação |
| 10 | SPO DT Dutra |
| 11 | SPO IH Ingleses (Interurb.) |
| 12 | SPO IP Ipiranga |
| 13 | SPO JD Jardim |
| 14 | SPO LI Liberdade |
| 15 | SPO PA Paraíso |
| 16 | SPO PD Perdizes |
| 17 | SPO PE Penha |
| 18 | SPO PI Pinheiros |
| 19 | SPO PL Palmeiras |
| 20 | SPO SA Santo Amaro |
| 21 | SPO SI Santa Ifigênia |
| 22 | SPO SM São Miguel |
| 23 | SPO ST Santana |
| 24 | SPO VG Vila Gustavo |
| 25 | SPO VM Vila Mariana |
| 26 | GRS MQ Mesquita |
| 27 | OCO OS Osasco |
| 28 | SPO AC Anchieta |
| 29 | SPO AG Anhanguera |

| | |
|----|----------------------------|
| 30 | SPO AM Americanópolis |
| 31 | SPO CV Casa Verde |
| 32 | SPO EM Ermelino Matarazzo |
| 33 | SPO FO Freguesia do Ó |
| 34 | SPO GU Guarani |
| 35 | SPO GZ Guaianazes |
| 36 | SPO IB Ibirapuera |
| 37 | SPO IM Itaim Bibi |
| 38 | SPO IT Itaquera |
| 39 | SPO JB Jabaquara |
| 40 | SPO JR Jaraguá |
| 41 | SPO LP Lapa |
| 42 | SPO MB Morumbi |
| 43 | SPO PH Penha (Interurb.) |
| 44 | SPO PR Parelheiros |
| 45 | SPO SS São Mateus |
| 46 | SPO TR Tremembé |
| 47 | SPO VE Vila Esperança |
| 48 | SPO VU Vila União |
| 49 | OCO RO Rochdale |
| 50 | SPO BE Berrini |
| 51 | SPO JG Jaguaré |
| 52 | SPO VP Vila Prudente |
| 53 | SPO CL Campo Limpo |
| 54 | SPO GP Guarapiranga |
| 55 | SPO LH Lapa (Interurb.) |
| 56 | SPO NC Nova Cachoeirinha |
| 57 | SPO MH Morumbi (Interurb.) |
| 58 | SPO AT Chacará S. Antonio |

4 – Localização Geográfica dos Centros de Fios da AMSP



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aubry, N., R. Ribeiro e H. Tavares** (1995). A Two-Step Clustering Method Applied to Telecommunications Network Planning. *Annals of 3rd. International Conference on Telecommunications Systems Modelling and Analysis, Nashville, TN, EUA*, pp.264-272.
- Barradas, O.** (1995). *Você e as Telecomunicações*. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro.
- Belamy, J.** (1991). *Digital Telephony*. John Wiley & Sons.
- Bergamaschi, M. A.** (1996). *Um Método Heurístico de Enfeixamento aplicado a Rede de Transmissão de Grande Porte*. Tese de Mestrado, FEE – UNICAMP.
- Bortolon, S.** (1996a). *Planejamento Otimizado de Redes de Transporte na Hierarquia Digital Síncrona*. Tese de Doutorado, FEE – UNICAMP.
- Bortolon, S., R. Ribeiro, H. Tavares, M. A. Bergamaschi, e E. Quaglia** (1996b). A Methodology to SDH Networks Design Using Optimization Tools", *IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1867-1871, London - UK.
- Bortolon, S., R. Ribeiro, H. Tavares, M. A. Bergamaschi e E. Quaglia** (1996c). Planejamento Otimizado de Redes SDH em Telecomunicações. *XI Simpósio Brasileiro de Automática*, São Paulo/SP.
- Ferrari, A.** (1991). *Telecomunicações: Evolução e Revolução*. Ed. Érica, São Paulo/SP.
- Kumar, B.** (1994). *Broadband Communications: A professional Guide to ATM, Frame Relay, SMDS, SONET and B-ISDN*. Macgraw Hill Series on Computer Communications.
- Nakamura, R., J. L. Mendes e A. Souza Filho** (1992). Anéis Tolerantes a Falhas na Hierarquia Digital Síncrona. *XI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp. 470-475, Natal/RN.
- Nakamura, R., J. L. Mendes e A. Souza Filho** (1995). Hierarquia Digital Síncrona (SDH): A Evolução das Redes de Transporte. *XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp. 470-475, Águas de Lindóia/SP.
- Oliveira, A. M. P.** (1998). *Uma Metodologia de Proposição de Anéis Bidirecionais para o Planejamento da Rede de Transporte em Telecomunicações*. Tese de Mestrado, FEE – UNICAMP.

- Pereira, J., S. Bortolon, A. S. Garcia, R. Pignaton e S. Guerra** (1998). Optimizing the Routing/Allocation of E1 over VC-4 in SDH Networks. *First International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks*, Belgium, pp. 1-8.
- Pereira, J., S. Bortolon, A. S. Garcia, R. Pignaton, E. Quaglia, H. Tavares e R. Ribeiro** (1995). O Enfeixamento no Planejamento de Transmissão: um Estudo de Caso. *XIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp.458-463, Águas de Lindóia/SP.
- Quaglia, E.** (1997). *Planejamento da Rede de Transmissão em Telecomunicações: O Problema do Enfeixamento*. Tese de Mestrado, FEE – UNICAMP.
- RNT** – Revista Nacional de Telecomunicações; “*Telesp compra SDH*”, Número 211, março/1997.
- Sexton, M. e A. Reid** (1997). *Broadband Networking: ATM, SDH and SONET*. Artech House. Boston-London.
- Slevinsky, J. B., W. D. Grover e M. H. MacGregor** (1993). An Algorithm for Survivable Design Employing Multiple Self-Healing Rings. *Globecom'93*, pp. 1568-1573.
- Wu, T.** (1992). *Fiber Network Service Survivability*. Artech-House.
- Wu, T.** (1995). Emerging Technologies for Fiber Network Survivability. *IEEE Communications magazine*, vol. 33, n. 2, pp. 58-74.