

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

*Este exemplar corresponde a Redação  
Final da Tese defendida por BERILHES  
BORGES GARCIA e aprovada pela Comissão  
Julgadora em 02/10/92.*

*Anilton Salles Garcia*

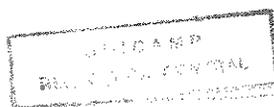
**Escolha de Estratégias Ótimas para  
a Evolução de Nós de Comutação**

**Por: Berilhes Borges Garcia**

**Orientador: Prof. Dr. Anilton Salles Garcia**

**Tese apresentada à Faculdade de  
Engenharia Elétrica, da Universidade  
Estadual de Campinas - UNICAMP -  
como parte dos requisitos para obten-  
ção do título de Mestre em Engenha-  
ria Elétrica.**

**Outubro 1992**



A meus pais.

## **Agradecimentos**

Meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador, Prof. Anilton Salles Garcia, cuja contribuição foi essencial à evolução e conclusão deste trabalho, e cuja amizade tudo farei para preservar.

Ao Prof. Hermano M. F. Tavares pelas suas valiosas e também fundamentais contribuições.

A Marina Vallin pelo carinho e apoio constante, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

Aos amigos e professores da UNICAMP pelo ambiente de amizade e solidariedade no decorrer deste trabalho.

Aos profissionais da Standard Telecom pelo apoio.

A todos os meus amigos, fieis companheiros, pela inestimável convivência.

A todas as demais pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho.

## **RESUMO**

A evolução de redes locais de telefonia é um problema complexo de grandes dimensões. Para torná-lo tratável, este é normalmente dividido em três partes: comutação, entroncamento e transmissão. A evolução da rede de comutação consiste em definir, para cada nó (estação, centro de fios), a melhor estratégia de ampliação em termos dos equipamentos a serem instalados. Neste problema, uma das principais dificuldades é determinar a filiação ótima para as Unidades Remotas (centrais remotas, estágio de linha remoto) de modo a considerar: unicidade de filiação, custo de comutação de tráfego, custo de transmissão e capacidade dos equipamentos de comutação (número de assinantes e tráfego comutado). A obtenção da política de filiação de custo mínimo é, por natureza, um problema de Programação Quadrática zero-um. Neste trabalho, o modelo quadrático resultante é tratado utilizando-se uma formulação linear zero-um equivalente, que é resolvida combinando-se técnicas exatas, do tipo "Branch and Bound", com heurísticas especializadas. Também é apresentada a aplicação da abordagem proposta para uma rede real de médio porte.

## **ABSTRACT**

Evolution strategy of telephone local network is a very complex problem that is generally solved in three phases: Switching, Trunking and Transmission. The first phase consist obtain the optimal evolution polices for each switching center considering the capacity of existing equipments and the introduction of new equipments. The optimal allocation of Remotes Digital Units that consider: unicity of allocation, traffic switching cost, transmission cost and the switching equipment capacity is the more difficult step in this process. It is a zero-one quadratic problem. In this paper we present a equivalent zero-one linear formulation that is solved by the combination on exact techniques (Branch and bound) and specialized heuristics. The application of the proposed approach to real network is presented.

## Tabela de Conteúdo

<b>CAPÍTULO I - Introdução</b> .....	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO II - Evolução Individual de Nós de Comutação</b> .....	<b>7</b>
II.1 Introdução .....	7
II.2 Descrição do Problema .....	7
II.3 Proposta LNES/LNEO .....	10
II.3.1 Introdução .....	10
II.3.2 Descrição do Modelo .....	10
II.3.3 Visão Geral do Sistema .....	12
II.3.4 Transições de Estado .....	13
II.3.5 Processo de Otimização .....	15
II.3.6 Conclusões Sobre a Proposta LNEO/LNES .....	20
II.4. Sistema EVOL .....	22
II.4.1 Introdução .....	22
II.4.2 Estrutura Modular .....	22
II.4.3 Definições dos Componentes do Modelo .....	25
II.4.4 Distribuição dos Assinantes dos Nós de Comutação .....	32
II.4.5 Modelos de Custos e de Dimensionamento .....	36
<b>CAPÍTULO III - Filiação de Unidades Remotas</b> .....	<b>42</b>
III.1 Introdução .....	42
III.2 Definição do Problema .....	42
III.3 Modelagem Quadrática .....	45
III.3.1 Estudo sobre a Natureza do Problema .....	45
III.3.2 Elementos de Custo .....	50
III.3.3 Formulação do Modelo .....	53
III.4 Filiação no LNEO .....	54
III.5 Modelagem Não Linear com Variáveis Inteiras .....	58
III.6 Modelo EVOL .....	60
III.7 Modelo de Programação Linear Inteira .....	63

III.7.1 Terminologia .....	63
III.7.2 Notação .....	65
III.7.3 Formulação .....	66
III.7.4 Considerações Sobre o Modelo .....	70
III.8 Conclusões .....	72
<b>CAPÍTULO IV - Implementação Computacional .....</b>	<b>73</b>
IV.1 Introdução .....	73
IV.2 Visão Geral do Sistema Computacional .....	73
IV.3 Fase I: Evolução Individual .....	76
IV.3.1 Algoritmo .....	79
IV.5 Fase II: Filiação de Unidades Remotas .....	84
IV.6 Heurística de Filiação .....	87
IV.5.1 Sub-fase Prospectiva .....	87
IV.5.1.1 Procedimento Mãe .....	88
IV.5.1.2 Procedimento Filha .....	88
IV.5.1.3 Procedimento Factibilidade .....	88
IV.5.1.4 Passos da Sub-Fase Prospectiva .....	89
IV.5.2 Sub-Fase Decisória .....	90
<b>CAPÍTULO V - Um Estudo de Caso .....</b>	<b>91</b>
V.1 Introdução .....	91
V.2 Rede de Estudo .....	92
V.3 Resultados da Evolução Individual .....	99
V.3.1 Cenário Conservador .....	100
V.3.2. Cenário Digitalizador .....	108
V.4 Resultados da Fase de Filiação de Unidades Remotas .....	110
V.4.1 O Efeito da Demanda Tráfego Entre Unidades Remotas .....	113
<b>CAPÍTULO VI - Conclusões e Sugestões de Melhoramentos .....</b>	<b>116</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>118</b>

---

# CAPÍTULO I

## Introdução

---

O planejamento de redes locais de telefonia é uma tarefa muito difícil e complexa devido ao grande número de variáveis envolvidas e a interdependência existente entre estas. O rápido crescimento da demanda por serviços de telefonia (incluindo serviços não convencionais), juntamente com a possibilidade de instalação em certos pontos da rede de concentradores remotos e/ou sistemas multiplexadores aumenta ainda mais a complexidade do problema.

Por esta razão o problema de planejamento é geralmente desagregado em uma série de problemas "mais simples" hierarquicamente interligados, os quais são resolvidos de uma maneira interativa até que um planejamento satisfatório seja obtido. Este é normalmente dividido em três partes:

- *Comutação*
- *Entroncamento*
- *Transmissão*

Deve-se também realizar uma decomposição temporal a fim de permitir o estagiamento das decisões dentro de um período de planejamento escolhido para o estudo de longo e médio prazo.

A metodologia clássica de planejamento de Redes Locais de Telefonia compreende subdividir as etapas anteriores em um conjunto de subproblemas, objetivando determinar:

- O número e localização de Centros de Fios no ano horizonte [1];
- O cronograma de ampliação/implantação para os centros de fios ao longo do período de planejamento [2];

- A evolução dinâmica dos cortes de área (zonas de filiação) para cada centro de fios e unidades remotas [3];
- O cálculo do entroncamento (necessidade de circuitos de comunicação) [4];
- A estrutura ótima para o roteamento dos circuitos [5].

A figura I.1 representa a relação hierárquica existente entre os subproblemas.

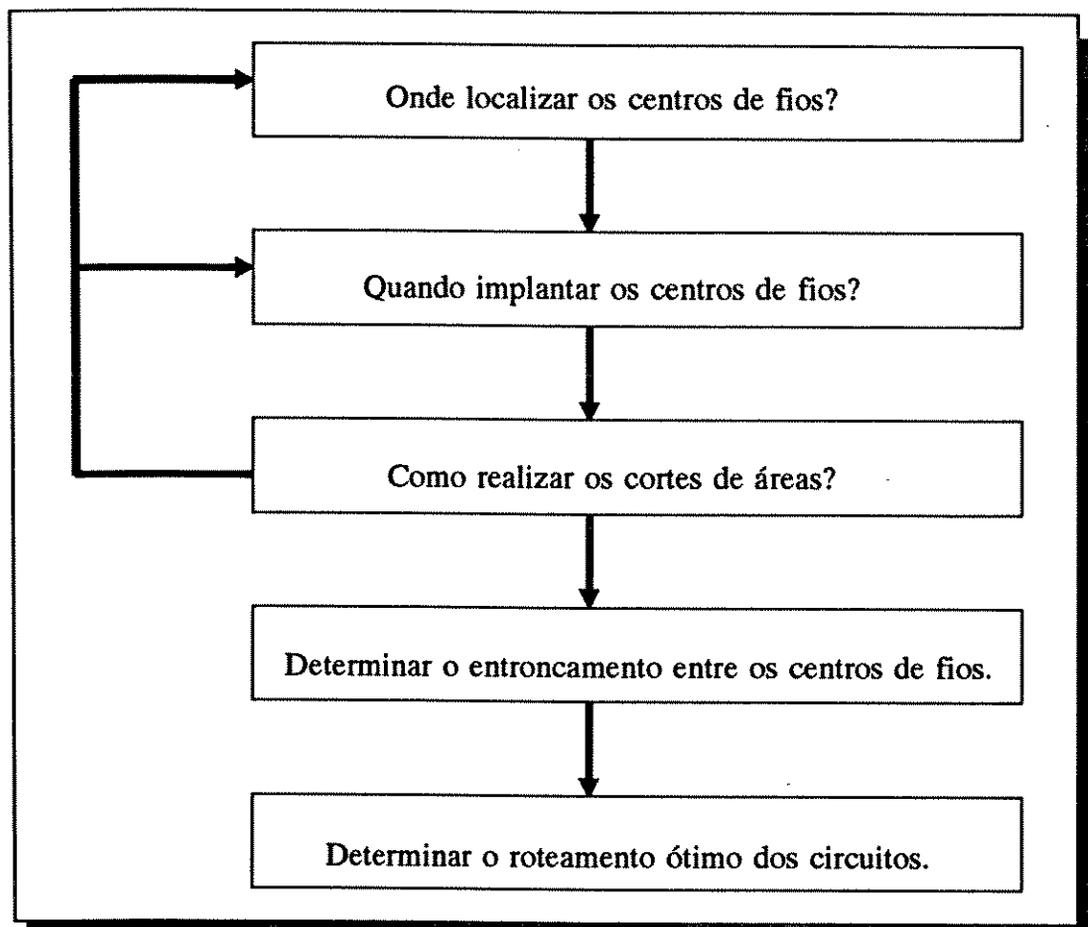


Figura I.1

As três primeiras etapas constituem o que se denomina de Plano Fundamental da Rede.

Em linhas gerais, o objetivo de uma metodologia de planejamento de redes de telefonia é determinar a evolução mais econômica da rede que satisfaça os requisitos de demanda (tráfego e terminais de assinantes) e as restrições de qualidade de serviço durante todo o período de planejamento.

Uma abordagem convencional consiste em se determinar uma rede ótima no ano horizonte, que será encarada como um meta a ser alcançada. A seguir determina-se a seqüência de expansões de capacidade que seja capaz de alcançar as metas previstas para o ano horizonte, a partir da rede existente no ano base, buscando-se otimizar a alocação dos recursos necessários à sua efetivação.

As etapas que constituem o Plano Fundamental trabalham a nível de Centros de Fios. Na prática, contudo, os nós de comutação são ampliados através da expansão das capacidades (Terminais e Tráfego) dos equipamentos neles existentes e da implantação de novos equipamentos.

Isto requer o desenvolvimento de uma Metodologia Computacional que aborde o problema de evolução dos nós de comutação sob o prisma dos equipamentos de comutação que suportam a expansão da rede. Tal metodologia deve contemplar a possibilidade de se expandir um nó de comutação com: Centrais Autônomas, Centrais Satélites (comuta o tráfego interno, mas não tem autonomia de encaminhamento para o tráfego externo) e Unidades Remotas (não apresentam capacidade de comutação de tráfego).

A utilização de Unidades Remotas (UR's) requer a determinação de uma Central Servidora (SV), através da qual o tráfego será atendido, enquanto a utilização de Centrais Satélites (CS's) necessita uma Central Servidora para atendimento do tráfego externo.

Em linhas gerais, o referido subproblema consiste em determinar a melhor estratégia de evolução dos nós de comutação (centros de fios) minimizando os custos envolvidos ao longo do período de planejamento e satisfazendo as condições impostas à qualidade do serviço prestado.

Porém, devido a elevada complexidade do Subproblema de Evolução de Nós de Comutação este tem sido normalmente decomposto em outros dois subproblemas menores:

- ***Evolução Individual de Nós de Comutação***: Onde se estuda a evolução individual de cada centro de fios.

- ***Filiação de Unidades Remotas*** : Onde se define uma estratégia ótima para a atribuição de cada unidade remota a uma central servidora.

Neste trabalho é apresentado um aperfeiçoamento das abordagens anteriores [6] [7], no que se refere ao problema de evolução de nós comutação, assim como é proposta uma modelagem matemática mais rigorosa para o problema de filiação de Unidades Remotas. Também é apresentada uma eficiente metodologia computacional, baseada no modelo proposto em [8], que combina técnicas exatas do tipo "Branch and Bound" com heurísticas especializadas, possibilitando ao usuário interagir com o sistema na busca de soluções alternativas e realizar uma análise de engenharia de rede das soluções propostas.

No capítulo II é apresentada uma breve revisão das metodologias desenvolvidas para o problema de evolução individual de nós de comutação, onde são destacadas as principais características e limitações de cada uma. É também descrito o modelo básico apresentado em [8], bem como as melhorias de modelagem e computacionais por nós desenvolvidas para este problema.

As abordagens anteriormente propostas para o problema de Filiação de Unidades Remotas, assim como uma nova formulação matemática mais rigorosa para este problema são apresentadas no capítulo III.

No capítulo IV são apresentados os procedimentos utilizados na construção do sistema computacional, enquanto um exemplo de aplicação deste sistema a uma rede fictícia baseada na cidade de João Pessoa é apresentado no capítulo V.

Finalmente, no capítulo VI são apresentadas as principais conclusões a respeito da metodologia desenvolvida, bem como sugestões para futuros aperfeiçoamentos.

---

# CAPÍTULO II

## Evolução Individual de Nós de Comutação

---

### II.1 Introdução

Este capítulo dedica-se ao problema de evolução ótima da estrutura de comutação em uma rede local de telefonia. Trata-se de um problema do tipo *expansão de capacidade* e consiste em determinar a melhor estratégia de ampliação, em termos dos equipamentos a serem instalados em cada um dos nós (estação, centros de fios) da rede durante um período de planejamento, enquanto satisfaz as demandas e minimiza os custos. Esta otimização deve ser realizada em um contexto de múltiplos tipos de equipamentos, bem como restrições de natureza tecnológica.

Neste capítulo é feita uma breve revisão das metodologias desenvolvidas para o problema de evolução individual de nós de comutação, onde são destacadas as suas principais características e limitações.

### II.2 Descrição do Problema

Redes de telecomunicações tem duas funções principais: transmissão e comutação de sinais. Otimização da evolução de redes de telecomunicações deveria, portanto, preocupar-se com a evolução tanto da comutação quanto da transmissão. No entanto, no caso de redes de

---

telefonia que apresenta uma hierarquia digital plesiocrona estes dois elementos não apresentam o mesmo peso com relação ao seu impacto econômico. Combot e Epstein [6] demonstraram que a transmissão (entroncamento e interfaces) representam um montante de 10 a 15% do custo de evolução total da rede. Este fato reflete o claro domínio dos custos dos equipamentos de comutação em relação aos custos de transmissão.

Uma vez que a consideração do entroncamento junto com a comutação aumenta consideravelmente a complexidade do problema, muitos modeladores têm se concentrado na comutação, independentemente da transmissão, trabalhando com a suposição de que as decisões de comutação e transmissão são relativamente independentes entre si.

Mesmo quando as decisões de evolução da comutação são consideradas independentes da transmissão, observa-se que o problema de evolução da rede telefonia, sob o aspecto comutação, apresenta uma natureza extremamente complexa devido ao acoplamento espacial e temporal inerente a este. Os métodos de abordagem deste problema utilizam, em geral, uma dentre as estratégias:

- omitir o acoplamento espacial entre os nós e se concentrar nas decisões temporais;
- considerar o acoplamento espacial da rede ignorando o acoplamento temporal.

A filosofia a ser seguida neste trabalho consiste em uma abordagem híbrida que tenta manter um certo grau de acoplamento temporal e espacial. A evolução ótima da rede é obtida estudando-se individualmente cada centro de fios, concentrando-se pois nas decisões temporais. Em seguida verifica-se a factibilidade de tal evolução, o que corresponde a realizar o acoplamento espacial das decisões temporais.

O problema de expansão de capacidade em redes de telefonia normalmente é considerado sob um prisma do atendimento da demanda de terminais de assinantes, sem fazer referência aos equipamentos que suportam esta expansão (Centrais digitais, Analógicas e Unidades Remotas). Com esta abordagem, o problema pode ser modelado como um processo de decisão contínuo e, por conseguinte, formulado como um Programa Linear. Esta forma de abordagem desconsidera alguns aspectos importantes como, por exemplo:

- A dependência que existe entre a capacidade de comutação de tráfego de um centro de fios e os equipamentos que estão presentes neste nó.
- O impacto que a implantação de Unidades Remotas representa sobre a topologia da rede.
- Restrições tecnológicas dos equipamentos.
- As capacidades disponíveis das facilidades já instaladas nos centros de fios.

Estes aspectos somente podem ser abordados se as decisões quanto aos tipos de equipamentos a serem instalados forem consideradas de uma forma explícita. Estes fatos nos conduzem a um modelo de programação inteira. Optou-se, então, por manter a formulação de programação inteira do problema de forma que a definição de uma política de evolução seja tão aderente à realidade quanto possível.

O problema que se deseja resolver pode ser entendido como sendo o de encontrar uma estratégia de evolução dos nós de comutação (centros de fios) que minimize, ao longo do período de planejamento, o custo total de evolução enquanto satisfaz todas as demandas (tráfego comutado e terminais de assinantes). Tal estratégia é definida pelo(a):

1) Tipo e número de equipamentos instalados em cada nó como uma função do tempo.

Observação: Na prática, os nós de comutação são ampliados através da expansão das capacidades (Terminais e Tráfego) neles existentes, pela implantação de novos equipamentos ou pela conversão "upgrading" de equipamentos.

A implantação de novas facilidades pode ocorrer de duas formas: através da sobreposição ou pela substituição de equipamentos; este último caso é ditado por exaustão da vida útil ou por obsolescência prematura (avanço inesperado de uma nova tecnologia).

2) Política de Filiação de Unidades Remotas (isto é, pela definição da atribuição de cada Unidade Remota a uma Central Servidora<sup>1</sup>), em cada um dos estágios de planejamento.

---

<sup>1</sup> O problema de Filiação de Unidades Remotas é minuciosamente tratado no Capítulo III.

A definição de uma estratégia de evolução deve considerar aspectos como:

- O estado inicial da rede.
- Os parâmetros financeiros e de custo.
- A topologia da rede.
- Algumas restrições de natureza tecnológica.
- O horizonte de estudo.

O custo de evolução reflete o compromisso que existe entre retardar ou antecipar investimentos, de forma a atingir as metas de planejamento; pode ser computado usando como indicador econômico o Valor Presente dos Encargos Anuais.

## **II.3 Proposta LNES/LNEO**

### **II.3.1 Introdução**

A primeira proposta de abordagem para o problema de evolução de nós de comutação foi apresentada por Combot, e resultou em dois sistemas computacionais: **LNES** - Local Network Evolution Simulator [6] e **LNEO** - Local Network Evolution Optimizer [7]. Estes sistemas visam determinar uma política de evolução ótima factível para a rede. Tal política é definida pelo *tipo de equipamento*, sua localização, momento de implantação e o modo pelo qual este é implantado. Deve-se ressaltar que estes sistemas admitem uma única transição de estado por nó durante todo o horizonte de planejamento.

### **II.3.2 Descrição do Modelo**

O modelo leva em conta a topologia da rede, o horizonte de planejamento, as demandas (tráfego e linhas de assinantes) e os parâmetros financeiros e de custos. A avaliação de uma determinada política de evolução é feita em uma base econômica utilizando como indicador o Valor Presente dos Encargos Anuais (PWAC) .

A descrição do estado inicial da rede inclui a definição dos equipamentos e o número de linhas de assinantes instaladas em cada um dos nós de comutação. As informações de custos são agrupadas em diferentes classes de despesas de capital e de despesas operacionais. Despesas de capital estão relacionadas à aquisição de um bem, enquanto que despesas operacionais estão relacionadas a manutenção e operação deste bem.

O modelo também leva em conta custos de implantação, grau de reaproveitamento, custo de remoção, custos de modernização, valor de retorno ("salvage cost"), mas não considera custos de infra-estrutura.

### II.3.2.1 Horizonte de Planejamento

O horizonte de planejamento é discretizado em uma escala de tomada de decisão (T).

$$T = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_h\}$$

$$t_0 = \text{ano base e } t_h = \text{ano horizonte}$$

### II.3.2.2 Topologia da Rede

A topologia da rede N é caracterizada por um conjunto I de nós de comutação completamente conectados e por uma matriz de distância D:

$$N = \{I, D\}$$

onde:

$$I = \{1, 2, 3, \dots, n\}$$

$$D = [d_{ij}]_{n \times n}$$

e  $d_{ij}$  é a distância mínima entre  $i$  e  $j \in I$ .

Esta topologia é estacionária.

### II.3.2.3 Demandas

As demandas são especificadas para cada nó da rede, são caracterizadas pelo número de linhas requeridas ou pelo tráfego inter e intra centro de fios, para cada estágio de planejamento. As demandas dos centros de fios ao longo do horizonte de planejamento podem ser estabelecidas para cada estágio ou podem ser previstas a partir das demandas existentes no ano base.

### II.3.2.4 Fornecimento de Equipamentos

O fornecimento de equipamentos ocorre no início de cada ano para todo o tipo de equipamento. A quantidade a ser fornecida é determinada pela demanda (tráfego e assinantes), enquanto o tipo é determinado pela política de evolução.

## II.3.3 Visão Geral do Sistema

Uma visão global do sistema é apresentada na Figura II.1. O módulo LNEO é responsável pela determinação da melhor política de evolução, enquanto que o módulo LNES calcula o custo de uma determinada política de evolução.

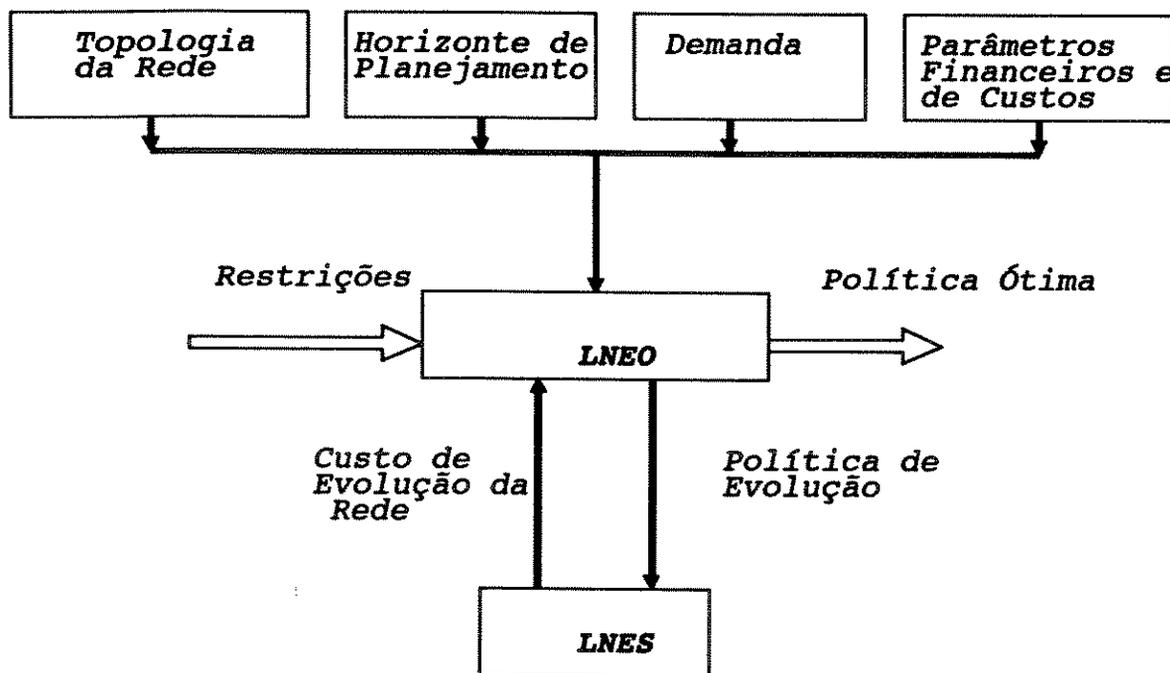


Figura II.1

### II.3.4 Transições de Estado

O estado de um nó de comutação é definido:

● pelo tipo de tecnologia de comutação nele instalado, que pode ser:

• Comutação Digital, podendo ser do tipo D1 ou do tipo D2. Contudo somente um tipo de comutação digital poderá existir em um determinado nó (D1 ou D2).

• Comutação Analógica.

• Concentradores Remotos.

● pelo modo segundo o qual a tecnologia é utilizada:

• Em sobreposição, onde comutação analógica ocorre conjuntamente com a digital ou conjuntamente com a utilização de concentradores remotos (Unidades Remotas).

• Em substituição, onde comutação analógica é substituída pela digital ou por concentradores remotos.

As transições de estado factíveis são ditadas pela irreversibilidade tecnológica.

Adotando-se a seguinte caracterização: A - equipamento analógico; U - Unidade Remota; D1 - equipamento digital do tipo 1; D2 - equipamento digital do tipo 2 (a capacidade de linhas de D1 é assumida ser menor que a de D2), obtém-se, por exemplo, o diagrama de transições de estado da Figura II.2.

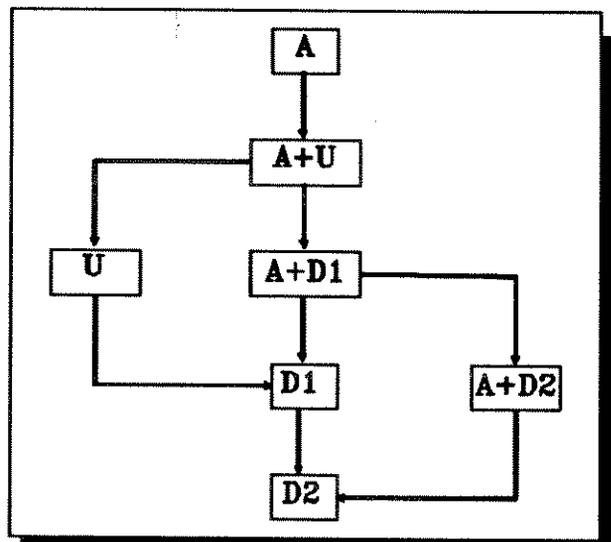


Figura II.2 - Diagrama de Transições

As transições de estado admissíveis são dadas pelo fechamento transitivo do grafo representado anteriormente. Sendo assim, se existir um caminho ligando um nó origem  $k$  a um determinado nó destino  $m$ , a transição de estado de  $k$  para  $m$  será tecnologicamente factível.

Se um determinado centro de fios possuir comutação do tipo analógica em um certo estágio de planejamento  $i$  e supondo que a demanda deste nó seja crescente, os estados possíveis de serem alcançados, por este nó, no próximo estágio de planejamento  $(i+1)$  são os seguintes:

**1) Analógico;** o que significa ampliar a central analógica de forma a atender a demanda crescente.

**2) Analógico mais Unidade Remota;** onde todo o acréscimo de demanda será atendido por uma Unidade Remota.

**3) Analógico mais Digital D1;** onde todo o acréscimo de demanda será atendido por uma Central Digital do tipo D1.

**4) Analógico mais Digital D2;** todo o acréscimo de demanda é atendido pela Central Digital do tipo D2.

**5) Unidade Remota;** a central analógica é substituída por um Estágio de Linha Remoto (Unidade Remota), que será responsável por atender toda a demanda (linhas de assinantes) no estágio  $i+1$ .

**6) Digital D1;** a central analógica é substituída por uma Central Digital de tecnologia D1.

**7) Digital D2;** a central analógica é substituída por uma Central Digital D2.

Cabe ressaltar que os estados 2,3 e 4 correspondem a utilização de tecnologia digital e de concentradores remotos no modo sobreposição; enquanto que os estados 5,6 e 7 correspondem ao modo substituição.

Vamos supor, agora, que o mesmo centro de fios possua comutação analógica sobreposta a comutação digital do tipo D1 no estágio  $i$ , os seguintes estados podem ser alcançados no próximo estágio de planejamento:

**1) Analógico mais Digital D1;** o que significa manter a comutação analógica e ampliar

a Central Digital D1 de forma a atender a demanda crescente.

**2) Analógico mais Digital D2;** mantém-se a comutação analógica e substitui-se a Central Digital do tipo D1 por uma Central Digital D2, que atenderá todo o tráfego que originalmente estava destinado a Central Digital D1 além de atender a todo o acréscimo de tráfego.

**3) Digital D1;** corresponde a desativar-se a Central Analógica e manter-se a central Digital D1, que será responsável por atender a toda a demanda.

**4) Digital D2;** equivale a substituir a Central Analógica e a Central Digital D1 por uma Central Digital de tecnologia D2.

### **II.3.5 Processo de Otimização**

O processo de otimização é uma combinação de técnicas heurísticas e algoritmos exatos (Problemas de Transporte e de Mochila) em um procedimento de enumeração parcial. O algoritmo utiliza o fato de que a dependência do custo de entroncamento em relação às decisões de comutação é pequena. O processo de otimização pressupõe que as decisões de sobreposição ou substituição são feitas localmente, isto é, levando-se em consideração as informações de custos nodais. A geração de custos nodais, por sua vez, leva em conta as seguintes informações:

**i) Tipo de equipamento.**

**ii) Quantidade de equipamento necessária para suprir a demanda de terminais de assinantes.**

O algoritmo começa gerando os custos de evolução nodal para cada nó isoladamente do resto da rede, para toda transição de estado factível, em cada estágio de planejamento.

O algoritmo encontra, deste modo, as localizações potenciais para comutação digital e concentradores remotos, através da resolução de um problema de transporte. Em seguida, o algoritmo atribui os concentradores remotos às centrais servidoras potenciais através da

resolução de uma série de problemas de mochila<sup>2</sup>.

A Figura II.3 representa o diagrama de blocos seguido pelo processo de otimização.

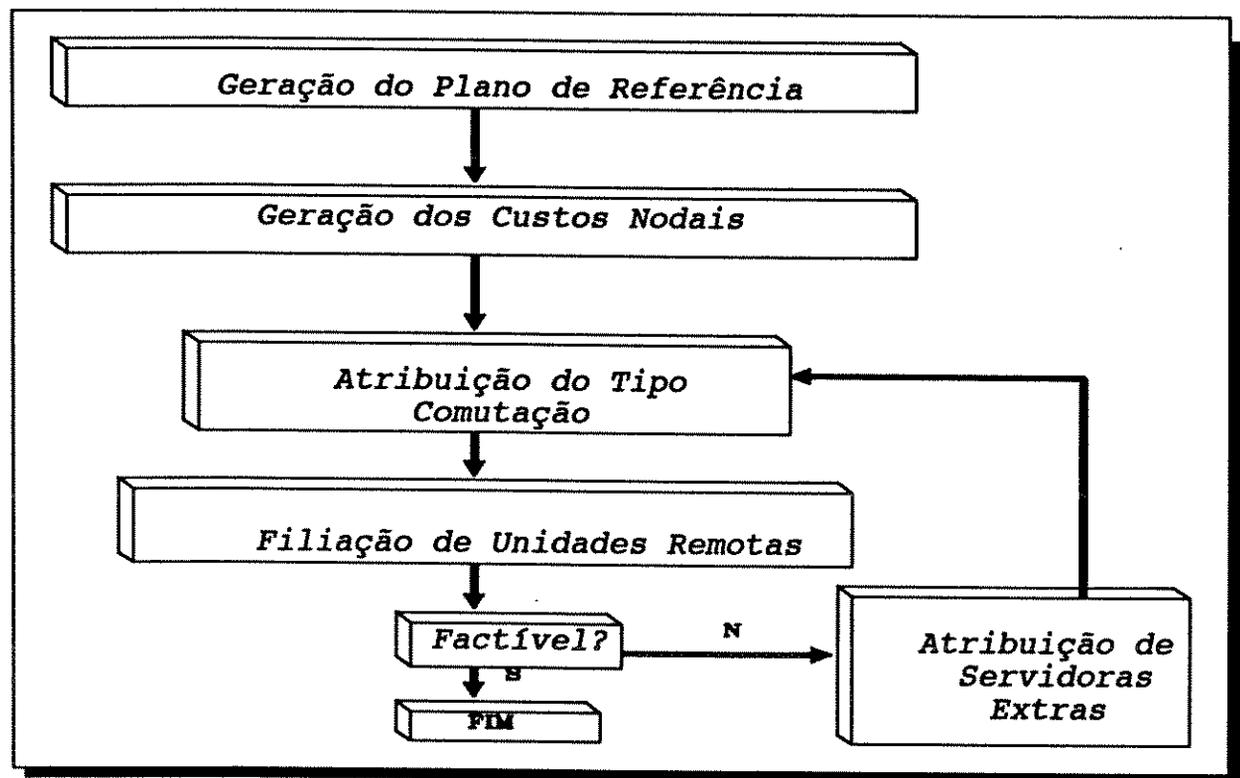


Figura II.3

<sup>2</sup> O Problema de Filiação de Unidades Remotas no sistema LNES/ LNEO é detalhadamente tratado na seção III.4.

### II.3.5.1 Detalhamento dos Passos Seguidos pelo Algoritmo de Otimização

•Geração do Plano de Referência: Assume-se que a evolução da rede ocorre mantendo-se a configuração existente no ano base, exceto quando existirem restrições nodais. Este plano de evolução será denominado de *Plano de Referência*.

•Geração de Custos Nodais: O custo calculado neste passo corresponde à evolução de cada nó tomado isoladamente do resto da rede. Custos de entroncamento não são considerados, exceto para concentradores remotos; neste caso existirá um custo associado com cada unidade de comprimento do cordão umbilical (cabo PCM responsável pela ligação da unidade remota à central servidora). Os custos nodais são definidos a seguir:

$A_i$	Custo de evolução analógica.
$C_i'(t)$	Custo de evolução do nó $i$ se comutação analógica é substituída por comutação digital no instante $t$ .
$C_i^o(t)$	Custo de evolução do nó $i$ se comutação analógica é sobreposta com comutação digital no instante $t$ .
$D_i'(t)$	Custo de evolução do nó $i$ se comutação analógica é substituída por concentradores remotos no instante $t$ .
$D_i^o(t)$	Custo de evolução do nó $i$ se comutação analógica é sobreposta com concentradores remotos no instante $t$ .
$U_i'(t)$	Custo por unidade de comprimento do cordão umbilical correspondendo ao custo $D_i'(t)$ .

$U_i^o(t)$	Custo por unidade de comprimento do cordão umbilical correspondendo ao custo $D_i^o(t)$ .
$N_i^o(t)$	Número de linhas digitais instaladas ao final do horizonte de planejamento correspondendo ao modo sobreposição no instante t.
$N_i^r$	Número de linhas digitais instaladas ao final o horizonte de planejamento correspondendo ao modo substituição.

O número de custos nodais calculados em uma rede de N nós será igual a :  $N(1+4h)$ , onde h é o número de estágios de planejamento.

As decisões são tomadas localmente, isto é:

$$C_i(t) = \min [C_i^o(t), C_i^r(t)]$$

$$D_i(t) = \min [D_i^o(t), D_i^r(t)]$$

$$U_i(t) = \begin{cases} U_i^o(t) & \text{se } D_i(t) = D_i^o(t) \\ U_i^r(t) & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$N_i(t) = \begin{cases} N_i^o(t) & \text{se } C_i(t) = C_i^o(t) \\ N_i^r & \text{se } C_i(t) = C_i^r(t) \end{cases}$$

**Atribuição do Tipo de Comutação:** Uma vez que os custos nodais tenham sido gerados, o próximo passo a ser executado consiste em determinar as localizações potenciais de comutação digital e de concentradores remotos, de forma a minimizar o custo total da rede, enquanto satisfaz as restrições de disponibilidade de equipamentos. Este problema pode ser formulado como um problema de transporte:

$$\mathbf{Min} \left\{ \sum_{i \in I} \left[ \sum_{t \in T} C_i(t) z_{it} + D_i(t) x_{it} + A_i y_i \right] \right\} \quad (2.1)$$

Sa:

$$\sum_{t \in T} (z_{it} + x_{it}) + y_i = 1, \quad \forall i \in I \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in I} z_{it} \leq M(t), \quad \forall t \in T \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it} \leq R(t), \quad \forall t \in T \quad (2.4)$$

$$z_{it}, x_{it}, y_i = 0, 1$$

Onde:

$$x_{it} = \begin{cases} 1 & \text{se concentradores remotos são atribuídos ao nó } i \\ & \text{no instante } t. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{se nó } i \text{ continua com comutação analógica.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$z_{it} = \begin{cases} 1 & \text{se comutação digital é atribuída ao nó } i \text{ no} \\ & \text{instante } t. \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$M(t)$  = disponibilidade de centrais digitais no estágio de planejamento  $t$ .

$R(t)$  = disponibilidade de unidades remotas no estágio de planejamneto  $t$ .

As restrições (2.2) estabelecem que somente uma transição de estado é permitida para cada centro de fios. As restrições (2.3) e (2.4) expressam o fato de que o número de centrais digitais e de unidades remotas instaladas em um determinado estágio de planejamento não deve exceder a disponibilidade de equipamentos para aquele estágio. O valor da função objetivo (2.1) corresponde ao custo de evolução ótima da rede.

A partir da solução do problema acima, os seguintes conjuntos são formados:

$$I_A = \{i \in I : y_i^* = 1\}$$

$$I_R = \left\{ i \in I : \sum_{t \in T} x_{it} = 1 \right\}$$

$$I_D = \left\{ i \in I : \sum_{t \in T} z_{it} = 1 \right\}$$

Onde  $t^*$  é o momento de transição ótima,  $I_A$  é o conjunto de centros de fios que possuem comutação analógica,  $I_R$  é o conjunto das remotas e  $I_D$  é o conjunto dos nós de comutação digitalizados.

### II.3.6 Conclusões Sobre a Proposta LNEO/LNES

Algumas contribuições importantes introduzidas pelo sistema LNEO/LNES foram:

- a caracterização de **ESTADO** do nó de comutação em função da tecnologia dos equipamentos nele existentes.
- a utilização dos **DIAGRAMAS DE TRANSIÇÃO DE ESTADO**, associados a cada nó de um período para outro.

Deste modo, pode-se construir uma **REDE DE TRANSIÇÕES** para cada nó de comutação individual, indicando como o mesmo pode evoluir do Ano Base até o Ano

Horizonte de Planejamento. A caracterização dos custos associados a cada Transição permite determinar as Trajetórias Ótimas para cada nó.

Não obstante estes significativos avanços, constatou-se a existência de algumas deficiências:

**•1) Considera apenas uma transição de estado para cada centro de fios durante todo o horizonte de planejamento.**

A consideração de apenas uma transição de estado para cada centro de fios durante todo o horizonte de planejamento constitui um fator restritivo, uma vez que as estratégias de evolução comumente adotadas na prática contemplam mais que uma transição de estado para cada nó.

**•2) Não permite a individualização dos equipamentos que estão instalados nos centros de fios em cada estágio de planejamento.**

**•3) Não considera a possibilidade de definição de trajetórias.**

Não admite que o planejador fixe, a priori, a trajetória de estados para um certo nó.

**•4) Não considera as desativações modulares.**

Não permite ao planejador definir um cronograma de desativações parciais dos equipamentos.

**•5) O problema de filiação de Unidades Remotas não é abordado de uma forma adequada.**

A abordagem proposta por Combot não leva em consideração uma série de aspectos que, a nosso ver, são consideravelmente importantes tais como:

• Interesse de tráfego entre os centros de fios.

• Limitações de capacidade de comutação nas centrais servidoras.

## **II.4. Sistema EVOL**

### **II.4.1 Introdução**

Utilizando-se a abordagem via Diagrama de Transições de Estado, Nakagawa e outros [8], desenvolveram uma metodologia computacional apresentando alguns avanços em relação aos trabalhos de Combot, que ficou conhecida como EVOL.

Dentre os principais avanços cabe destacar:

- a caracterização de ESTADO é obtida pelo número e tipo de equipamento de comutação existente no nó.
- permite a utilização de até 3 equipamentos em cada nó de comutação.
- admite tantas transições de estado quantos são os estágios de planejamento.
- trabalha com a Matriz de Tráfego entre Zonas de Filiação, o que permite obter uma estimativa mais realista dos custos de instalação.
- utiliza um algoritmo de enumeração implícita para a determinação das Trajetórias Ótimas entre o Estado Inicial do nó e cada um dos Estados Finais no Ano Horizonte de planejamento.
- promove uma distribuição dos terminais de assinantes e do tráfego comutado entre os equipamentos existentes no nó, respeitando-se as respectivas capacidades dos equipamentos e maximizando a utilização dos recursos já instalados.

Apresenta também uma proposta de modelagem para o problema de filiação de UR's, sem a correspondente implementação computacional.

### **II.4.2 Estrutura Modular**

A concepção inicial do EVOL [8] propõe a existência de 3 fases acopladas logicamente conforme o diagrama da Figura II.4.

Dados da evolução, ao longo do período de planejamento, do número de assinantes e do volume de tráfego (originado, terminado, interno e interurbano) de cada centro de fios (CF) são necessários para a execução do EVOL; por isto ele é precedido por programas do tipo "Plano Fundamental" : LOCEST, CROEST e PEOR em que se definem a criação de novos CF's e a delimitação de suas áreas de influência.

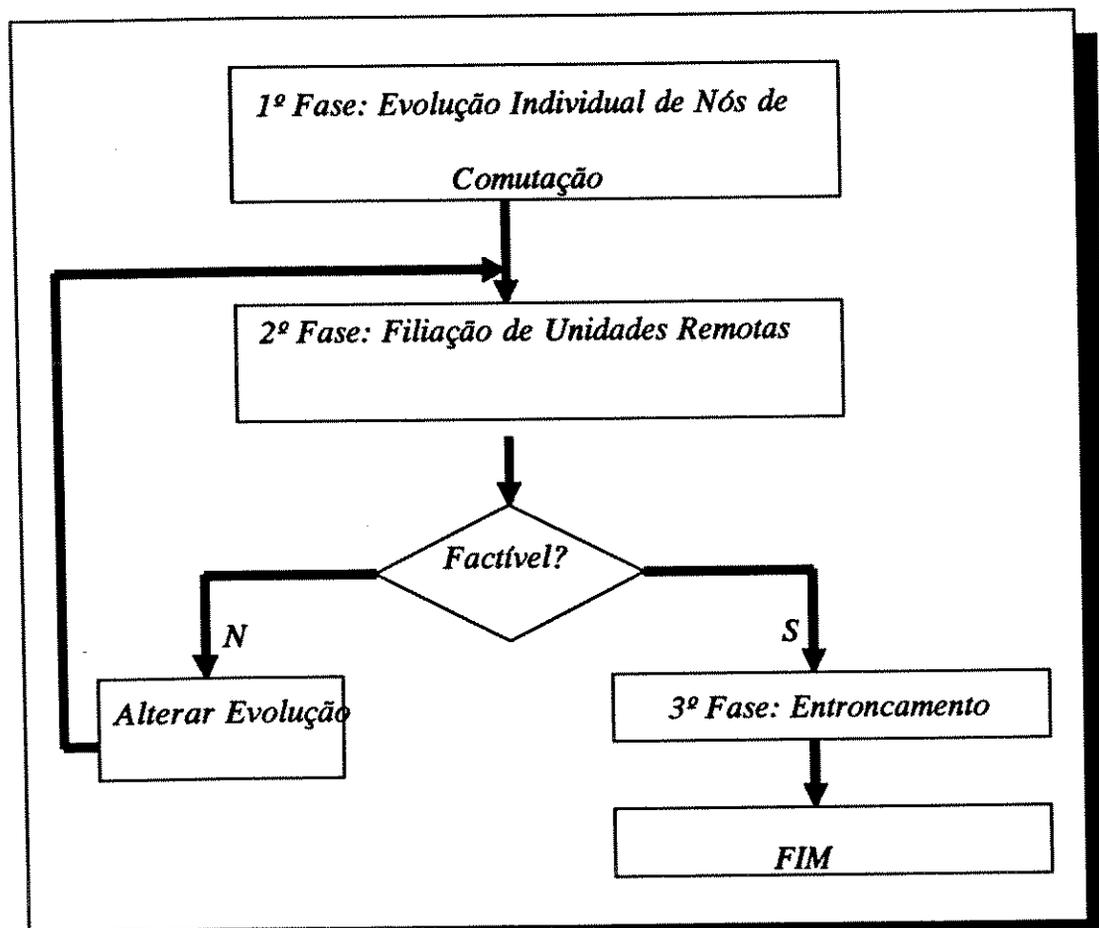


Figura II.4

O EVOL decide pela transição mais econômica, segundo um critério otimizador, usando técnica de enumeração implícita. Em sua primeira fase trata cada nó isoladamente, levando em conta:

- I) Custos do equipamento: implantação, placas de assinantes, comutação, juntores e manutenção.
- II) Capacidades dos equipamentos em termos de terminais de assinantes, juntores e tráfego.

III)Indisponibilidade do equipamento (ano a partir do qual ele não estará mais disponível para implantação).

IV)Disponibilidade do equipamento (ano a partir do qual o ele estará disponível para implantação).

### **Evolução Individual dos Nós de Comutação**

Nesta etapa, a evolução é estudada para cada nó individualmente levando-se em conta detalhes a nível de equipamentos no nó de referência e considerando os demais a nível de centros de fios.De forma a simplificar o problema e torná-lo tratável, foram assumidas duas hipóteses:

- O número máximo de equipamentos instalados em cada centro de fios é três.
- A cada transição apenas um equipamento novo pode ser introduzido.

### **Filiação de Unidades Remotas**

Esta fase visa determinar uma estratégia ótima para a filiação de unidades remotas em cada estágio de planejamento<sup>3</sup>.

### **Alterar Evolução**

Pode ocorrer que as políticas de evolução definidas pela fase **Evolução Individual dos Nós de Comutação** sejam ineficazes em algum estágio de planejamento para a rede como um todo, uma vez que não foi possível encontrar uma solução para o problema de Filiação de Unidades Remotas, neste caso deve-se alterar a evolução de um ou mais centros de fios.

---

<sup>3</sup> A abordagem proposta por Nakagawa para o problema de Filiação de Unidades Remotas é apresentada na seção III.6 .

## **Entroncamento**

Esta fase tem por objetivo calcular a demanda de troncos e meios de transmissão.

**Obs:** Como originalmente concebida, a 3ª Fase da abordagem proposta por Nakagawa deveria promover o dimensionamento dos troncos entre Centrais Mães. Tendo em vista que o quadro tecnológico mudou bastante, em função principalmente do(a):

- intenso barateamento das fibras ópticas.
- existência de centrais comutadoras de alta capacidade com a possibilidade de uso (quase) irrestrito de centrais remotas.
- advento de equipamentos roteadores (ADM, DxC, etc...) de alta velocidade.

Optou-se por não abordar o problema de entroncamento.

### **II.4.3 Definições dos Componentes do Modelo**

A seguir são definidos formalmente os principais elementos do modelo e introduzida a terminologia e notação que será utilizada ao longo do restante deste trabalho.

**Estágio:** A semelhança do modelo proposto por Combot, o horizonte de planejamento é finito e sofre um processo de escalamento, onde cada ponto representa um estágio de decisão.

**Estado:** Um nó de comutação é caracterizado pelo número e tipos de equipamentos instalados em um determinado estágio de planejamento.

**Transição de Estado:** A irreversibilidade da modernização tecnológica e outros fatores econômicos determinam as transições de estados admissíveis do estágio  $t$  para o estágio  $t+1$ .

A Tabela II.1 apresenta os tipos possíveis de transições de estado para o atendimento de uma demanda crescente.

Tabela II.1

Caso	Estado Origem	Estado Destino	Significado
1	-	-	<i>Ausência de demanda</i>
2	X	X	<i>Ampliação com mesmo equipamento</i>
3	X	X + Y	<i>Ampliação com um outro equipamento<sup>4</sup></i>
4	X	Y	<i>Substituição do equipamento por um novo equipamento.</i>
5	X + Y	X + Y	<i>Ampliação do centro de fios com os equipamentos já existentes.</i>
6	X + Y	Y	<i>Desativação de um dos equipamentos, o equipamento restante é responsável por atender a toda a demanda.</i>
7	X + Y	Y + Z	<i>Substituição de um dos dois equipamentos por um terceiro<sup>5</sup>.</i>
8	X + Y	Z	<i>Substituição de todos os equipamentos.</i>
9	-	X	<i>Implantação de um equipamento em um centro de fios novo.</i>
10	X + Y	X + Y + Z	<i>Instalação de um terceiro equipamento, afim de suprir uma demanda crescente</i>
11	X + Y + Z	X + Y + Z	<i>Ampliação dos equipamentos já existentes.</i>
12	X + Y + Z	Y + Z	<i>Desativação de um dos equipamentos<sup>6</sup></i>
13	X + Y + Z	Z	<i>Desativação de dois equipamentos.</i>
14	X + Y + Z	Y + Z + W	<i>Substituição de um dos equipamentos, esta substituição pode ser feita com tipos de equipamentos já existentes no nó.</i>
15	X + Y + Z	Z + W	<i>Substituição de dois equipamentos.</i>
16	X + Y + Z	W	<i>Substituição de todos os equipamentos.</i>

X,Y, Z e W representam equipamentos (centrais e concentradores remotos).

<sup>4</sup> O novo equipamento pode possuir a mesma tecnologia do equipamento já existente, já que há uma individualização destes.

<sup>5</sup> Deve-se ressaltar que o equipamento Z pode ser do mesmo tipo que o equipamento Y.

<sup>6</sup> A retirada de equipamento é ditada por exaustão da vida útil ou por obsolescência prematura.

**Concentradores Remotos:** Há dois tipos de Concentradores Remotos:

- **Unidade Remota (UR) ou Estágio de Linha Remota (ELR)** - não comuta nenhum tráfego, requer pois a determinação de uma central digital através da qual todo o tráfego será atendido.

- **Central Satélite** - comuta o tráfego interno, mas não tem autonomia de encaminhamento para o tráfego externo; necessita, portanto, de uma central digital para atender o tráfego externo.

**Centrais Autônomas** - centrais com autonomia de encaminhamento.

**Centrais Servidoras** - centrais autônomas candidatas a filiar unidades remotas.

A topologia da rede pode ser caracterizada por um conjunto de nós e por uma matriz de distâncias que é suposta estacionária.

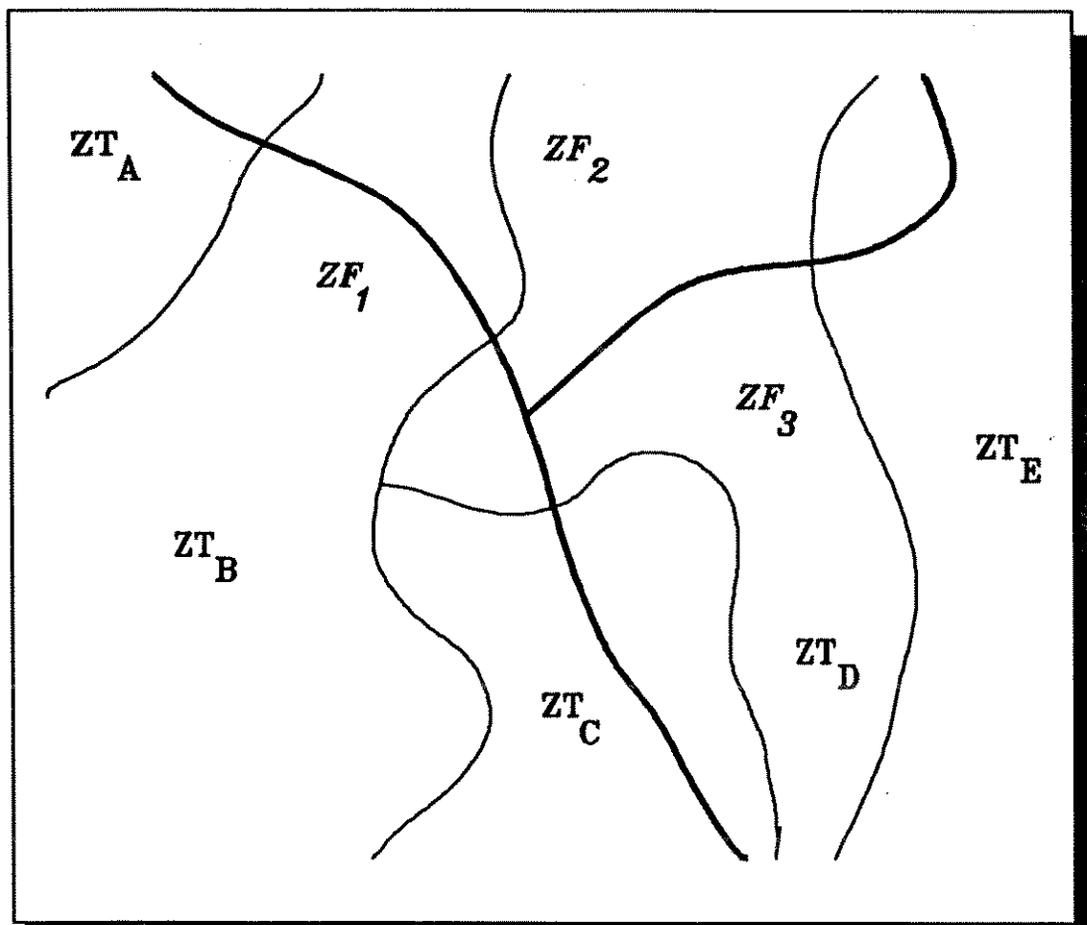
### **Demandas de Tráfego e de Terminais de Assinantes**

As demandas de tráfego e de terminais de assinantes dos centros de fios para cada estágio de planejamento são obtidas a partir de informações que estão relacionadas às definições de zonas de tráfego e zonas de filiação.

**Zonas de Tráfego:** Representam a divisão geográfica da rede, e se caracterizam por apresentar um perfil de tráfego homogêneo para os assinantes que pertencem a uma determinada região.

**Zonas de Filiação:** Representam as áreas de influência de cada um dos centros de fios, de forma que todos os assinantes que pertençam à região geográfica delimitada por uma zona de filiação estejam filiados ao mesmo nó de comutação.

A Figura II.5 representa um exemplo de uma rede constituída por cinco zonas de tráfego e três zonas de filiação.



**Figura II.5**

ZT<sub>i</sub> = Zona de Tráfego i

ZF<sub>i</sub> = Zona de Filiação i

A partir das definições de zonas de tráfego e zonas de filiação pode-se construir uma série de matrizes que serão utilizadas para determinar o interesse de tráfego entre os centros de fios. Estas matrizes, bem como a relação existente entre elas, são apresentadas a seguir.

#### **Matriz de Assinantes das Zonas de Tráfego nas Zonas de Filiação no Estágio t**

$$(M_{TF}(t))$$

É uma matriz retangular, onde o número de linhas é igual ao número de zonas de tráfego e o número de colunas é igual ao número de zonas de filiação, cujo valor contido na linha i e coluna j representa o número de assinantes da zona de tráfego i que estão atribuídos ao centro de fios j (zona de filiação j) no estágio de planejamento t. A Tabela II.2 representa a matriz de assinantes das zonas de tráfego nas zonas de filiação para a rede exemplo da

Figura II.5.

Cabe notar que existe uma Matriz de Assinantes das Zonas de Filiação nas Zonas de Tráfego para cada estágio de planejamento.

Tabela II.2

$$M_{TF}(t)$$

$Z_T$ $Z_F$	1	2	3
A	$N_{A1}(t)$	$N_{A2}(t)$	$N_{A3}(t)$
B	$N_{B1}(t)$	$N_{B2}(t)$	$N_{B3}(t)$
C	$N_{C1}(t)$	$N_{C2}(t)$	$N_{C3}(t)$
D	$N_{D1}(t)$	$N_{D2}(t)$	$N_{D3}(t)$
E	$N_{E1}(t)$	$N_{E2}(t)$	$N_{E3}(t)$

### Matriz de Interesse de Tráfego entre Zonas de Tráfego ( $M_{TT}$ )

É uma matriz quadrada, onde cada elemento da matriz representa o interesse médio de tráfego entre os assinantes de cada uma das zonas de tráfego.

A unidade dos elementos desta matriz é erlang por assinante ao quadrado (erl / ass.<sup>2</sup>).

A matriz  $M_{TT}$  para a nossa rede exemplo é apresentada na Tabela II.3:

Tabela II.3

$M_{TT}$

$Z_T$ $Z_T$	A	B	C	D	E
A	$T_{AA}$	$T_{AB}$	$T_{AC}$	$T_{AD}$	$T_{AE}$
B	$T_{BA}$	$T_{BB}$	$T_{BC}$	$T_{BC}$	$T_{BE}$
C	$T_{CA}$	$T_{CB}$	$T_{CC}$	$T_{CD}$	$T_{CE}$
D	$T_{DA}$	$T_{DB}$	$T_{DC}$	$T_{DD}$	$T_{DE}$
E	$T_{EA}$	$T_{EB}$	$T_{EC}$	$T_{ED}$	$T_{EE}$

**Matriz de Demanda de Tráfego entre Zonas de Filiação no Estágio (t) ( $M_{FF}(t)$ )**

É uma matriz quadrada, onde cada elemento representa o interesse de tráfego existente entre um par de centros de fios em um determinado estágio de planejamento t.

A matriz  $M_{FF}(t)$  é determinada realizando-se o seguinte produto de matrizes:

$$M_{FF}(t) = M_{TF}'(t) \cdot M_{TT} \cdot M_{TF}(t)$$

A Tabela II.4 representa a matriz  $M_{FF}(t)$  para a nossa rede exemplo:

Tabela II.4

$M_{FF}(t)$

$Z_F$ $Z_F$	1	2	3
1	$T_{11}(t)$	$T_{12}(t)$	$T_{13}(t)$
2	$T_{21}(t)$	$T_{22}(t)$	$T_{23}(t)$
3	$T_{31}(t)$	$T_{32}(t)$	$T_{33}(t)$

$T_{ij}(t)$  = demanda de tráfego da zona de filiação  $i$  para a zona de filiação  $j$  no estágio de planejamento  $t$ .

$$\text{Tráfego de saída do nó } i \text{ no estágio } t \text{ (TS}_i(t)) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ij}(t)$$

$$\text{Tráfego de entrada do nó } i \text{ no estágio } t \text{ (TE}_i(t)) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N T_{ji}(t)$$

$$\text{Tráfego Interno do nó } i \text{ no estágio } t \text{ (TI}_i(t)) = TI_{ii}(t)$$

$N$  = número de centros de fios

### Matriz Interesse de Tráfego das Zonas de Tráfego com a Rede Externa ( $M_{TX}$ )

Esta matriz representa o interesse de tráfego médio dos assinantes de cada zona de tráfego com a rede externa.

A unidade dos elementos desta matriz é Erlang por assinante.

$M_{TX}$

ZT	A	B	C	D	E
SAÍDA	$E_{AX}$	$E_{BX}$	$E_{CX}$	$E_{DX}$	$E_{EX}$
ENTRADA	$E_{XA}$	$E_{XB}$	$E_{XC}$	$E_{XD}$	$E_{XE}$

### Matriz de Tráfego das Zonas de Filiação com a Rede Externa para o Estágio (t)

( $M_{FX(t)}$ )

De posse das matrizes  $M_{TF}$  e  $M_{TX}$  determina-se a matriz de tráfego das zonas de filiação com a rede externa da seguinte forma:

$$M_{FX}(t) = M_{TX} \cdot M_{TF}(t)$$

Como se pode observar, há uma matriz de tráfego das zonas de filiação com a rede externa para cada estágio de planeamento.

$M_{FX}(t)$

ZF	1	2	3
SAÍDA	$T_{1X}(t)$	$T_{2X}(t)$	$T_{3X}(t)$
ENTRADA	$T_{X1}(t)$	$T_{X2}(t)$	$T_{X3}(t)$

#### II.4.4 Distribuição dos Assinantes dos Nós de Comutação

Um dos problemas relacionados com a definição da trajetória ótima de evolução é a distribuição dos assinantes de um dado nó de comutação pelos equipamentos nele instalados. Esta distribuição deve ser feita de forma a respeitar as capacidades de assinantes e de comutação de tráfego de cada um dos equipamentos e, em uma visão conservadora, maximizar a utilização dos recursos já instalados.

De forma a exemplificar como o problema de distribuição é atacado, suponha que um determinado nó de comutação possua três equipamentos (centrais) em um certo estágio de planeamento.

Tomando:

$P_i$  = proporção dos assinantes do nó de comutação atribuídos ao equipamento  $i$ .

$N$  = número de assinantes do nó de comutação.

Pode-se escrever:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = N (P_1 + P_2 + P_3)$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1$$

Este procedimento não discrimina as zonas de tráfego as quais os assinantes pertencem.

Os tráfegos de saída, e de entrada associados a cada um dos três equipamentos pode ser estabelecido da seguinte forma:

Equipamento	Tráfego de Saída
1	$TS_1 = TS \cdot P_1$
2	$TS_2 = TS \cdot P_2$
3	$TS_3 = TS \cdot P_3$

Equipamento	1	2	3
Tráfego de Entrada	$TE_1 = TE \cdot P_1$	$TE_2 = TE \cdot P_2$	$TE_3 = TE \cdot P_3$

enquanto o tráfego interno de cada um dos equipamentos é:

Equipamento	1	2	3
1	$TI_{11}$	$TI_{12}$	$TI_{13}$
2	$TI_{21}$	$TI_{22}$	$TI_{23}$
3	$TI_{31}$	$TI_{32}$	$TI_{33}$

Seja:

$\alpha = TI/N^2$  o interesse de tráfego interno médio por assinante ao quadrado.

$$TI = \alpha \cdot N^2 = \alpha \cdot (N_1 + N_2 + N_3)^2 = \alpha \cdot N^2 \cdot (P_1 + P_2 + P_3)^2$$

$$TI = TI \cdot (P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + 2 \cdot P_1 \cdot P_2 + 2 \cdot P_1 \cdot P_3 + 2 \cdot P_2 \cdot P_3)$$

Supondo que  $TI_{ij} = TI_{ji}$ ,  $i \neq j$ , pode-se determinar a distribuição do tráfego interno.

$$TI_{ii} = TI.P_i^2$$

$$TI_{ij} = TI.P_i.P_j$$

Os tráfegos associados aos equipamentos são dados por:

$$Tf_1 = (TI.P_1^2 + 2.TI.P_1.P_2 + 2.TI.P_1.P_3) + TE.P_1 + TS.P_1$$

$$Tf_2 = (TI.P_2^2 + 2.TI.P_1.P_2 + 2.TI.P_1.P_3) + TE.P_2 + TS.P_2$$

$$Tf_3 = (TI.P_3^2 + 2.TI.P_1.P_3 + 2.TI.P_2.P_3) + TE.P_3 + TS.P_3$$

Em cada expressão acima, a primeira parcela corresponde ao tráfego interno, a segunda, ao tráfego de entrada e a terceira ao tráfego de saída.

### **Tráfego com a Rede Externa**

Definindo:

TSX = tráfego que vai do centro de fios para a rede externa.

TEX = tráfego da rede externa para o centro de fios.

Os tráfegos correspondentes a cada um dos equipamentos devido a rede externa são dados por:

$$Tx_1 = (TSX + TEX).P_1$$

$$Tx_2 = (TSX + TEX).P_2$$

$$Tx_3 = (TSX + TEX).P_3$$

Logo o tráfego total associado a cada equipamento é:

$$Tt_1 = Tf_1 + Tx_1$$

$$Tt_2 = Tf_2 + Tx_2$$

$$Tt_3 = Tf_3 + Tx_3$$

É possível, agora, formular o problema de distribuição dos assinantes da seguinte

forma:

Determinar os valores de  $P_1, P_2, P_3$  de modo a respeitar as capacidades de comutação de tráfego e de terminais de assinantes de cada um dos equipamentos, ou seja, encontrar uma solução para o sistema não linear:

$$Tt_1 \leq CPT_1$$

$$Tt_2 \leq CPT_2$$

$$Tt_3 \leq CPT_3$$

$$N.P_1 \leq CPN_1$$

$$N.P_2 \leq CPN_2$$

$$N.P_3 \leq CPN_3$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 1$$

$$P_1, P_2, P_3 \geq 0$$

Onde:

$CPT_i$  = capacidade de tráfego do equipamento  $i$ .

$CPN_i$  = capacidade de assinantes do equipamento  $i$ .

Utilizando uma visão conservadora, que tenta maximizar a utilização dos recursos já instalados, e supondo que o equipamento 3 corresponde ao que está sendo implantado, é necessário resolver o seguinte problema de otimização:

Minimizar  $P_3$

Sa:

$$Tt_i \leq CPT_i$$

$$N.P_i \leq CPN_i$$

$$\sum P_i = 1$$

$$P_i \geq 0; i \in \{1,2,3\}$$

O problema acima possui restrições não lineares que dificultam a sua resolução. Para contornar esta dificuldade, Nakagawa propõe uma forma alternativa de abordagem através de aproximações sucessivas<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> O algoritmo proposto por Nakagawa é apresentado na seção IV.3.

## II.4.5 Modelos de Custos e de Dimensionamento

O dimensionamento dos equipamentos utilizados em um centro de fios é feito com base nas capacidades de terminais de assinantes, tráfego comutado e juntores.

A implantação/ampliação de equipamentos é suposta ocorrer no início de cada estágio de planejamento.

Todos os custos são calculados em valor presente utilizando uma taxa anual de juros:  
valor presente = valor / (1 + taxa de juros)<sup>anos</sup>

Onde;

taxa de juros > 0

anos = número de anos

### II.4.5.1 Custo de Central

#### 1)Custo de Instalação (CI)

Este custo envolve os módulos de OMS (Operação, Manutenção e Supervisão), periféricos, energia, etc.

#### 2)Custo de Comutação (CC)

Representa os custos dos módulos de comutação, sinalização, auxiliares (processamento de chamada), etc.

O número de módulos de comutação utilizados é uma função direta da capacidade de tráfego do equipamento que está sendo considerado e do volume total de tráfego a ser comutado.

Dimensionamento:

$$\text{número de módulos} = \left\lceil \frac{\text{Tráfego comutado}}{\text{cap. tráf. por mod.}} \right\rceil$$

custo = custo por mód. \* número de módulos

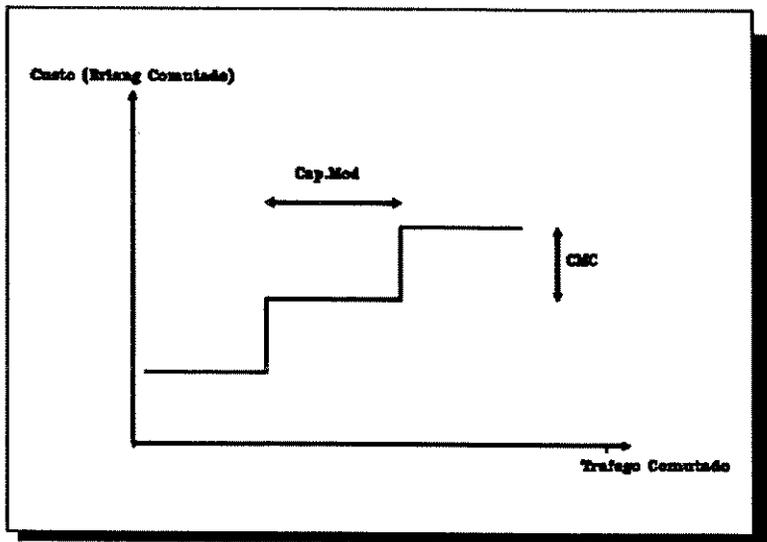


Figura II.6

- CMC é custo fixo do módulo de tráfego.
- Cap.Mod. é a capacidade do módulo de comutação de tráfego, expresso em Erlangs.

### 3) Custo de Terminais de Assinantes

Representa o custo por terminal de assinantes (custo linearizado do módulo de assinantes).

$$\text{Custo} = \text{núm. de assinantes} * \text{custo por assinante}$$

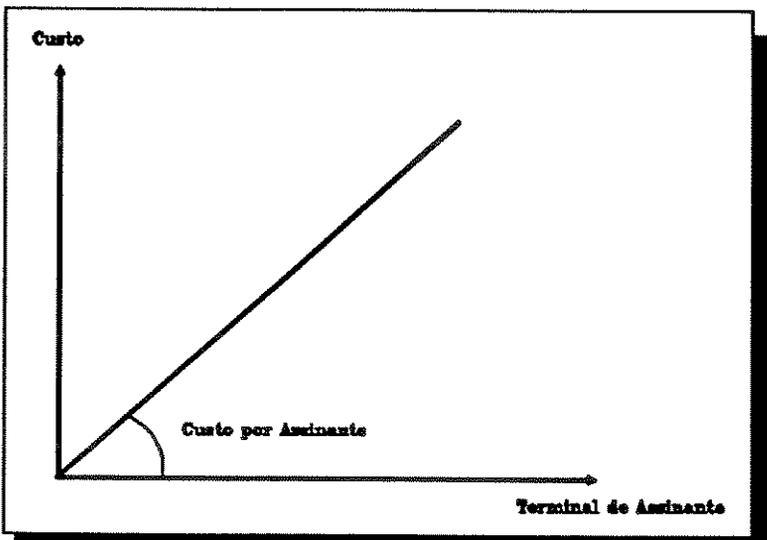


Figura II.7

#### 4) Custo de Juntores

Esta parcela representa o custo de instalação de facilidades para escoamento de um Erlang de tráfego externo. Correspondem à instalação de módulos de juntores e equipamentos auxiliares (enviadores e receptores). O tipo de juntor considerado é o digital de 30 canais por módulo.

A função de custo é linearizada por baixo, como mostra a Figura III.8.

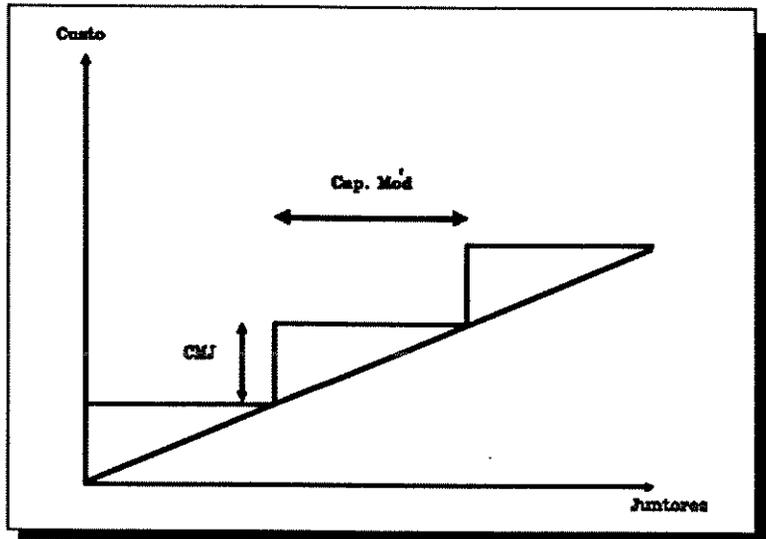


Figura II.8

Onde: CMJ é o custo de módulo de juntores (já incluída a parcela referente aos equipamentos auxiliares).

$$\text{custo por junt.} = \frac{CMJ}{\text{cap. tráf. por mód. juntores}}$$

custo = núm. de junt. \* custo por junt.

O número de juntores de entrada e saída necessários para escoar todo o tráfego externo é determinado utilizando-se a Fórmula B de Erlang.

Na fase de evolução individual não se dispõe da configuração de estados de todos os nós da rede ao mesmo tempo. Para estimar o número de juntores de cada equipamento no estudo da evolução de um nó será suposto que os demais são atendidos por um único equipamento. O dimensionamento do número de juntores utiliza a suposição que todo o tráfego externo é escoado através de uma tandem fictícia.

## 5) Custo de Manutenção

O modelo utilizado estima o custo de manutenção dos equipamentos instalados em uma base anual, esta estimativa será uma função linear do número de assinantes e do número de juntores, e também será função da idade do equipamento.

### II.4.5.2 Custo dos Concentradores Remotos (Unidades Remotas ou Centrais Satélites)

Apesar de não se conhecer a política de filiação das unidades remotas, pode-se estimar o custo adicional de sua instalação, uma vez que se sabe "a priori" o tipo de central servidora candidata a servir de mãe para esta.

O custo de um concentrador remoto envolve:

#### 1)Custo de Implantação

Este custo envolve os bastidores, fonte de alimentação, etc.

#### 2)Custo de Comutação

Embora os concentradores remotos não possuam módulos de comutação, deve-se estimar o custo adicional na central servidora.

O tráfego comutado no caso de unidades remotas é a soma do tráfego intra, de saída e de entrada, já no caso de centrais satélites é a soma do tráfego de entrada e de saída.

Dimensionamento:

$$\text{número de módulos} = \left\lceil \frac{\text{Tráfego comutado}}{\text{cap. tráf. por mod.}} \right\rceil$$

custo = custo por mód. \* número de módulos

#### 3) Custo de Terminais de Assinantes

Esta parcela é idêntica à utilizada no cálculo do custo de terminais de assinantes nas centrais digitais.

#### **4) Custo de Juntores**

Serve para estimar, na fase de evolução individual, o custo adicional de juntores que os assinantes dos concentradores remotos irão acarretar na central servidora. É a mesma função adotada na centrais autônomas (digitais).

O tráfego adotado para dimensionar o número de juntores é a soma dos tráfegos de saída e de entrada no caso de centrais satélites, no caso de unidades remotas deve-se adicionar o tráfego interno.

#### **5) Custo de Ponta na Interligação Concentrador Remoto - Servidora**

Este custo representa os recursos de ponta exigidos na interligação do concentrador remoto a centrais servidoras. É função do número de canais exigidos para escoar o tráfego do concentrador remoto para a central servidora. O tráfego escoado será a soma dos tráfegos intra (duas vezes), de entrada e de saída quando o concentrador remoto for uma unidade remota (UR); no caso de ser uma central satélite, o tráfego a ser escoado será a soma dos tráfegos de entrada e de saída.

O dimensionamento do número de canais é feito utilizando-se a Fórmula B de Erlang. O custo será calculado como uma função linear do número de canais necessários.

$$\text{custo} = \text{núm. de canais} * \text{custo por canal}$$

#### **6) Custo de Manutenção**

O custo de manutenção de um concentrador remoto é uma função linear do número de assinantes e do número de canais de interligação com a central servidora. Também é uma função do tempo de utilização.

#### **II.4.5.3 Custo de Infra-estrutura**

O custo de infra-estrutura de um nó de comutação é composto por uma parcela fixa que envolve gastos com terreno, terraplanagem, edificação, etc... e uma outra modular que engloba custos da estrutura predial/cabine, ar condicionado, etc.

A parcela fixa é desembolsada por ocasião da ativação do nó, sendo posteriormente incrementada pelo custo dos módulos de infra-estrutura.

A capacidade do módulo de infra-estrutura é expressa em terminais de assinantes.

### II.4.5.3 Valor Residual

Quando um equipamento é substituído por outro, duas situações podem ocorrer:

- O equipamento desativado é parcialmente ou totalmente convertido no equipamento substituinte.
- O equipamento desativado não é convertido no equipamento substituinte.

Na primeira hipótese, a medida de reaproveitamento é dada através de um percentual denominado taxa de conversão. Na determinação do custo de transição deve-se subtrair: valor residual x taxa de conversão, do custo do equipamento novo.

Na segunda hipótese, deve-se levar em consideração o valor do equipamento a ser desativado, e subtraí-lo do custo da transição em questão. Este valor de venda corresponde a um certo percentual do valor residual do equipamento.

O modelo também permite ao planejador definir um cronograma de desativações parciais dos equipamentos.

Em trabalho recente, Trindade [9] apresentou uma abordagem para o problema de evolução de nós de comutação baseada em uma versão simplificada do modelo proposto por Nakagawa. Esta abordagem permite que apenas dois equipamentos estejam presentes em um determinado centro de fios em qualquer estágio de planejamento, não aborda o problema de distribuição dos assinantes pelos equipamentos, utiliza Programação Dinâmica na determinação da melhor trajetória de evolução para cada nó e apresenta um módulo gráfico que permite uma interface amigável com o usuário. Também não aborda o problema de Filiação de Unidades Remotas.

---

# ***CAPÍTULO III***

## ***Filiação de Unidades Remotas***

---

### **III.1 Introdução**

Neste capítulo é abordado o problema de Filiação de Unidades Remotas.

Para melhor compreensão é feita uma revisão das abordagens anteriormente propostas para o problema, onde fica evidenciada a sua natureza quadrática.

Também é apresentado um modelo de Programação Quadrática Zero-Um que, após algumas simplificações, é transformado em um modelo de Programação Linear Zero-Um equivalente.

O modelo linear obtido é, então, utilizado como ponto de partida para a construção de um algoritmo de otimização.

As formulações apresentadas nas seções III.3, III.5, III.6 e III.7, bem como as demais análises contidas neste capítulo foram inteiramente desenvolvidas neste trabalho.

### **III.2 Definição do Problema**

A utilização de Unidades Remotas (UR's) requer a determinação de uma Central Servidora (SV), através da qual todo o seu tráfego será atendido, enquanto a utilização de Centrais Satélites (CS's) necessita uma Central Servidora para o atendimento do tráfego externo.

Após evoluir individualmente cada centro de fios, obtém-se as políticas de evolução ótimas para cada nó de comutação. A utilização de UR's e CS's em alguns nós de comutação, requer a existência de SV's para o escoamento dos tráfegos gerados. Levando-se em conta:

a) unicidade de filiação (cada UR deve ser filiada a uma única SV (mãe));

b) capacidade de terminais de assinantes e de comutação de tráfego das mães;

a política de evolução individual dos nós de comutação pode tornar-se inactível.

A coleção de todos os elos de filiação para todas as Unidades Remotas presentes em cada um dos estágios de planeamento, constitui-se o que se denomina Política de Filiação.

Sendo assim, a definição de uma estratégia de evolução ótima para a rede só estará completa após a obtenção de uma política de filiação das UR's e CS's que seja factível para a rede como um todo, em cada um dos estágios de planeamento.

A definição de uma Política de Filiação factível conduz a uma topologia de rede que se caracteriza por ser formada por um conjunto de grupos ("clusters"); cada grupo contém uma central servidora de grande capacidade e famílias de Unidades Remotas radialmente ligadas a esta.

A Figura III.1 descreve uma solução factível para o Problema de Filiação de Unidades com três "clusters" (grupos):

**Cluster 1** formado pela Central Servidora A e pelas Unidades Remotas 1, 2, 3 e 9.

**Cluster 2** formado pela Central Servidora B e pelas Unidades remotas 4 e 5.

**Cluster 3** formado pela Central Servidora C e pelas Unidades Remotas 6,7 e 8.

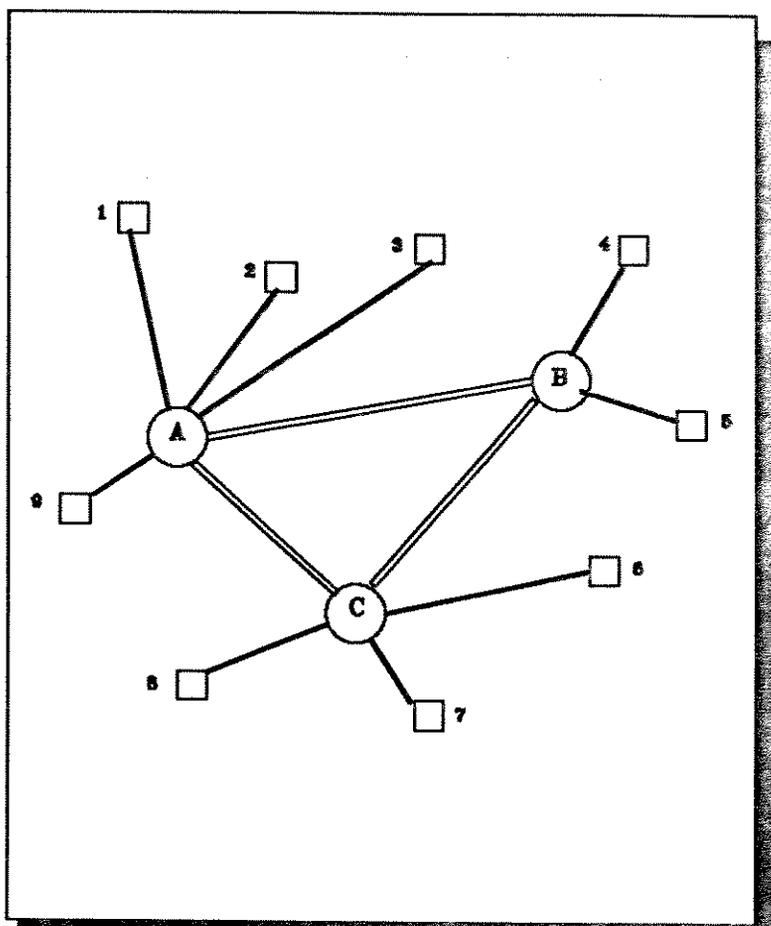


Figura III.1

*O problema de filiação de UR's pode ser entendido como sendo o de determinar uma política de atribuição das UR's às centrais servidoras que respeite as restrições anteriormente mencionadas e que minimize o custo total de filiação.* É suposto que os seguintes dados são conhecidos:

- A localização de cada nó, candidato a servir de central servidora.
- A localização de cada Unidade Remota.
- A demanda por serviço de cada par de nós.
- Os parâmetros de custo.

A busca de uma solução para o problema levou ao desenvolvimento de algumas propostas de abordagem [6] [7] [8], que serão resumidamente apresentadas neste capítulo.

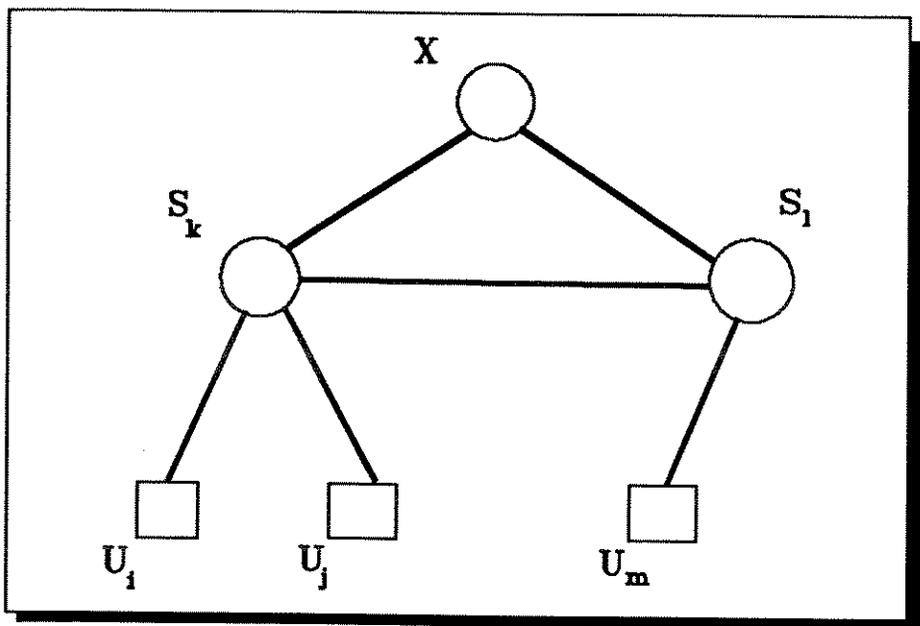
### III.3 Modelagem Quadrática

#### III.3.1 Estudo sobre a Natureza do Problema

Uma rede de telecomunicações apresenta duas importantes características que influenciam seu projeto topológico:

- i) A demanda por serviços de comunicação ocorre entre cada par de nós da rede.
- ii) A demanda por serviços não é uniforme. Por exemplo, o tráfego projetado entre dois centros de fios que atendem regiões densamente povoadas é maior do que o tráfego projetado entre dois centros de fios que atendem regiões pouco habitadas.

Com o objetivo de compreender como a consideração destas características afetam o problema de Filiação de Unidades Remotas, imagine como exemplo um esquema de filiação representado pela Figura III.2. A rede é constituída de duas Centrais Servidoras, três Unidades Remotas e uma Central Trânsito responsável por escoar todo tráfego externo à rede.



X = central trânsito  
S<sub>i</sub> = central servidora i  
U<sub>i</sub> = unidade remota i

Figura III.2

Sejam:

$R$  = o conjunto das unidades remotas.

$S$  = o conjunto das servidoras potenciais.

$S_i$  = central servidora  $i$ .

$T_{ij}$  = o tráfego que vai do nó  $i$  para o nó  $j$ .

$T'_i$  = o tráfego total do centro de fios  $i$  ( soma dos tráfegos de entrada, tráfegos de saída e do tráfego interno).

$$T'_i = \sum_{\substack{j \in SUR \\ j \neq i}} [T_{ij} + T_{ji}] + T_{ii}$$

$Na_i$  = número de terminais de assinantes do nó  $i$ .

O número de assinantes atendidos pelas Servidoras no nosso exemplo é:

$$(S_k) \quad Na_k + Na_l + Na_j$$

$$(S_l) \quad Na_l + Na_m$$

O tráfego comutado pelas centrais servidoras e o tráfego roteado entre as centrais servidoras e destas para a central trânsito são uma consequência direta da política de filiação das unidades remotas. Podem ser expresso em função do tráfego existente entre cada par de centros de fios da rede ( $T_{ij}$ ).

**Tráfego Comutado pelas Servidoras:**

$$(S_k) \quad T_{kj} + T_{jk} + T_{ij} + T_{ii} + T_{ij} + T_{ji} + T_{ki} + \\ T_{ik} + T_{im} + T_{mi} + T_{jm} + T_{mj} + T_{mk} + T_{km} + \\ T_{il} + T_{li} + T_{jl} + T_{lj} + T_{ix} + T_{xi} + T_{jx} + \\ T_{xj} + T_{kl} + T_{lk} + T_{kx} + T_{xk} + T_{kk}$$

$$(S_l) \quad T_{mm} + T_{ml} + T_{im} + T_{mk} + T_{km} + T_{im} + T_{il} + \\ T_{mi} + T_{mj} + T_{jm} + T_{il} + T_{li} + T_{jl} + T_{lj} + \\ T_{xm} + T_{mx} + T_{lk} + T_{kl} + T_{lx} + T_{xl}$$

### Tráfegos na Interligação entre k e l:

$$\text{Traf}_{kl} = T_{ki} + T_{il} + T_{jl} + T_{km} + T_{im} + T_{jm}$$

$$\text{Traf}_{lk} = T_{lk} + T_{lj} + T_{li} + T_{mk} + T_{mi} + T_{mj}$$

### Tráfegos nas Interligações entre Servidoras e a Rede Externa:

$$\text{Traf}_{kx} = T_{kx} + T_{ix} + T_{jx}$$

$$\text{Traf}_{xk} = T_{xk} + T_{xi} + T_{xj}$$

$$\text{Traf}_{lx} = T_{lx} + T_{mx}$$

$$\text{Traf}_{xl} = T_{xl} + T_{xm}$$

Pode-se observar que a rede apresentada na Figura III.2 possui dois clusters: cluster k, que contém a central servidora k e as unidades remotas i e j; e o cluster l que contém a central servidora l e a unidade remota m.

Conclui-se que qualquer solução factível divide o tráfego da rede em três componentes:

- *Tráfego intra clusters*
- *Tráfego entre clusters*
- *Tráfego entre clusters e a rede externa*

Tráfego entre pares de nós pertencentes ao mesmo cluster, como os nós i e j na Figura III.2, constituem o tráfego intra cluster que requer a utilização de comutação local.

O tráfego entre pares de nós que não pertencem ao mesmo cluster, tais como o nó i e o nó m na Figura III.2, geram o tráfego entre clusters. Neste caso, o tráfego  $T_{im}$  recebe o seguinte tratamento:

- roteado até a central servidora k;
- comutado na central k;
- roteado da central k para a central servidora l;
- comutado na central l;
- roteado até a unidade remota m.

Considere agora a rede da Figura III.1. Suponha que ao analisar os tráfegos originados/terminados na unidade remota 3 verifica-se:

- um grande interesse de tráfego com as unidades remotas 1,2,9 e com a central servidora A;
- um pequeno interesse de tráfego com as unidades remotas 4,5 e com a central servidora B.

Estas características podem induzir a filiação da unidade remota 3 à central servidora A, mesmo que a central servidora B seja mais próxima. A atribuição das UR's às SV's deve levar em conta também o grau de interação que existe entre os nós de comutação, não deve, portanto, se basear exclusivamente no critério de distância.

Pode-se observar, pelo exposto, que o problema de Filiação de Unidades Remotas constitui uma variante do problema p-hub<sup>8</sup> [10], [11] e [12], em que a localização dos p-hub está definida "a priori". Um modelo genérico para a escolha da localização de hubs e a determinação das atribuições que são feitas a estes, foi primeiro formulado como um programa inteiro quadrático por O'Kelly [10]; esta mesma abordagem foi seguida por Helme [11] e por Klincewicz [12].

Este problema apresenta, originalmente, uma modelagem quadrática com variáveis inteiras do tipo zero-um (0/1), que é apresentada a seguir. São admitidas as seguintes suposições:

- *Cada Unidade Remota se filia a uma única central servidora.*
- *As centrais servidoras são completamente interconectadas através de rotas diretas.*
- *Toda central autônoma pode ser utilizada como central servidora.*

Estas suposições implicam que todo "cluster" tem uma configuração lógica estrela, formada pela central servidora e pelas unidades remotas a esta filiada.

---

<sup>8</sup> *Hub é um tipo especial de facilidade que atua como ponto de comutação para fluxos internodais.*

A utilização de rotas diretas entre as centrais autônomas e destas com a central trânsito, faz com que os encaminhamentos das demandas de tráfego correspondentes não sejam otimizantes, sendo portanto retirados da formulação do problema.

Pode-se agora expressar os tráfegos em função das variáveis de decisão  $x_{ik}$ ; onde:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se a unidade remota } i \text{ se filia à central servidora } k \\ \emptyset & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O tráfego a ser comutado por uma central servidora  $k$ , devido as unidades remotas, pode ser expresso como:

$$\sum_{i \in R} \left[ T'_i x_{ik} - \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq i}} [T'_j x_{ik} x_{jk}] + (T_{ik} + T_{ki})(1 - x_{ik}) \right] \quad (3.1)$$

De forma a esclarecer a expressão 3.1, considere novamente a rede da figura III.2.O tráfego total a ser comutado pela central servidora  $k$ , devido as unidades remotas, é:

$$\begin{aligned} \text{Tráf.comut. } k = & T_{ij} + T_{kj} + T_{jk} + T_{ij} + T_{ji} + T_{jm} + T_{mj} + \\ & + T_{jl} + T_{lj} + T_{jx} + T_{xj} + T_{ii} + T_{ki} + T_{ik} + \\ & + T_{im} + T_{mi} + T_{il} + T_{li} + T_{ix} + T_{xi} + T_{mk} + T_{km} \end{aligned}$$

reescrevendo a expressão acima como uma função de  $T'_j$  e de  $T'_i$  obtêm-se :

$$\text{Tráf.comut. } k = T'_j + T'_i - T_{ij} - T_{ji} + T_{mk} + T_{km}$$

Onde :

$$\begin{aligned} T'_j = & T_{ij} + T_{kj} + T_{jk} + T_{ij} + T_{ji} + T_{jm} + T_{mj} + \\ & + T_{jl} + T_{lj} + T_{jx} + T_{xj} \\ T'_i = & T_{ii} + T_{ki} + T_{ik} + T_{ij} + T_{ji} + T_{im} + T_{mi} + \\ & + T_{il} + T_{li} + T_{ix} + T_{xi} \end{aligned}$$

Deste modo, os termos presentes na equação 3.1 correspondem a:

- i) Soma dos tráfegos totais das unidades remotas filiadas a k (1º termo).
- ii) Tráfego entre unidades remotas filiadas a k (2º termo).
- iii) Tráfego entre a central servidora k e as unidades remotas não filiadas a ela (3º termo).

O tráfego total a ser transmitido entre a central servidora k e a central servidora l, ou seja, entre o cluster k e o cluster l é dado por:

$$\sum_{l \in R} \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq k}} T_{jl} x_{jk} x_{jl} + \sum_{l \in R} [T_{ll} + T_{kl}] x_{lk} \quad (3.2)$$

O tráfego a ser transmitido entre a central servidora k e a central trânsito z, através da qual todo o tráfego externo a rede é escoado, é igual a:

$$\sum_{l \in R} T_{zl} x_{lk} \quad (3.3)$$

O tráfego transmitido entre a central trânsito e a central servidora k é dado por:

$$\sum_{l \in R} T_{zl} x_{lk} \quad (3.4)$$

### III.3.2 Elementos de Custo

As parcelas de custos considerados em uma solução factível referem-se a:

- Custo de ligação das Unidades Remotas às Centrais Servidoras.
- Custo de comutação de tráfego nas Centrais Servidoras.
- Custo de transmissão de tráfego entre as Centrais Servidoras.
- Custo de transmissão de tráfego nas interligações entre Centrais Servidoras e a Central Trânsito.

•O custo de ligação das unidades remotas às centrais servidoras é formulado como:

$$\sum_{i \in R} \sum_{k \in S} Cr_{ik} x_{ik} \quad (3.5)$$

Onde  $Cr_{ik}$  é o custo de ligação da unidade remota  $i$  à central servidora  $k$ , calculado como uma função do tráfego e da distância, e corresponde ao custo do cordão umbilical.

$$Cr_{ik} = \sigma(T'_i, d_{ik}) \quad (3.6)$$

•O custo de comutação em cada central servidora é formulado como uma função linear do tráfego. Constitui-se de duas parcelas: uma decorrente das demandas de tráfego entre as unidades remotas e outra decorrente das demandas de tráfego das unidades remotas para as centrais servidoras e para a rede externa. A segunda parcela inclui também o tráfego interno das unidades remotas. É expresso como:

$$\sum_{k \in S} \sum_{i \in R} \left[ T'_i x_{ik} - \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq i}} (T_{ij} x_{ik} x_{jk}) + (T_{ik} + T_{kl})(1 - x_{ik}) \right] c_{ck} \quad (3.7)$$

$c_{ck}$  = o custo de comutar um Erlang de tráfego na central servidora  $k$ .

•O custo de transmissão entre as centrais servidoras é formulado como uma função linear do tráfego. É suposto que os interesses de tráfego entre as centrais servidoras sejam suficientemente grandes para justificar o uso desta linearização. Consiste de duas parcelas:

i) uma decorrente das demandas de tráfego entre as unidades remotas.

$$\sum_{k \in S} \sum_{l \in S} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R} T_{ij} Ct_{kl} x_{ik} x_{jl} \quad (3.8)$$

ii) outra decorrente das demandas de tráfego das unidades remotas para as centrais servidoras.

$$\sum_{k \in S} \sum_{l \in S} \sum_{i \in R} \left[ T_{il} Ct_{kl} + T_{ik} Ct_{lk} \right] x_{ik} \quad (3.9)$$

$Ct_{kl}$  = o custo de transmissão da central servidora  $k$  para a central servidora  $l$ .

•O custo de transmissão de tráfego entre as centrais servidoras e a central trânsito também é formulado como uma função linear do tráfego.

$$\sum_{k \in S} \sum_{i \in R} [T_{ik} C_{t_{kz}} + T_{zi} C_{t_{zk}}] x_{ik} \quad (3.10)$$

$C_{t_{kz}}$  = o custo de transmissão da central servidora k para a central trânsito.

$C_{t_{zk}}$  = o custo de transmissão da central trânsito para a central servidora k.

Uma observação adicional a ser feita é que as parcelas de custos anteriormente apresentadas supõem que o custo de transmissão entre duas centrais servidoras é uma função da distância entre elas. Posteriormente, é suposto que o custo de transmissão seja independente da distância. Isto se justifica devido a utilização de fibras ópticas monomodo como meio de transmissão, dispensando pois o emprego de regeneradores de sinal.

### III.3.3 Formulação do Modelo

Utilizando-se a estrutura de custos anteriormente apresentada e o fato de que uma Unidade Remota de tecnologia y só pode ser umbilicalmente ligada a uma central servidora que também seja compatível com a tecnologia y, pode-se formular o problema da seguinte maneira :

$$\begin{aligned}
 \text{Min } & \sum_{i \in R} \sum_{k \in S} Cr_{ik} x_{ik} + \sum_{k \in S} \sum_{i \in R} \left[ T'_i x_{ik} - \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq i}} (T_y x_{ik} x_{jk}) + (T_{ik} + T_{kl})(1 - x_{kl}) \right] c_{ck} + \\
 & \sum_{k \in S} \sum_{l \in S} \sum_{i \in R} \sum_{j \in R} T_y Ct_{kl} x_{ik} x_{jl} + \sum_{k \in S} \sum_{l \in S} \sum_{i \in R} \left[ T_{il} Ct_{kl} + T_{il} Ct_{lk} \right] x_{ik} + \\
 & \sum_{k \in S} \sum_{i \in R} \left[ T_{iz} Ct_{kz} + T_{zi} Ct_{zk} \right] x_{ik}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Sa:

$$\sum_{k \in S} x_{ik} = 1, \quad \forall i \in R \tag{3.12}$$

$$\sum_{i \in R} Na_i x_{ik} \leq CA_k \quad \forall k \in S \tag{3.13}$$

$$\sum_{i \in R} \left[ T'_i x_{ik} - \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq i}} T_y x_{ik} x_{jk} \right] \leq CT_k \quad \forall k \in S \tag{3.14}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \tag{3.15}$$

Onde:

$CA_k$  = a capacidade de terminais de assinantes da central servidora k.

$CT_k$  = capacidade de tráfego da central servidora k.

Na função objetivo (3.11) o primeiro termo corresponde ao custo do cordão umbilical; o segundo, terceiro e quarto termos correspondem ao custo de comutação de tráfego nas centrais servidoras; o quinto, sexto e sétimo termos correspondem ao custo de transmissão

entre as centrais servidoras e por fim o oitavo e nono termos ao custo de transmissão entre as servidoras e a central trânsito.

A restrição (3.12) indica que cada UR se filie a exatamente uma servidora. A restrição (3.13) requer que a capacidade de terminais de assinantes de servidora não seja excedida, enquanto que a restrição (3.14) garante que a capacidade de comutação de tráfego da central servidora também não será ultrapassada.

Pode-se notar que esta modelagem quadrática inteira apresenta uma função objetivo que não é nem côncava nem convexa, e que também possui restrições não lineares (3.14).

### III.4 Filiação no LNEO

Combot [7] aborda o problema de Filiação de Unidades Remotas através de um processo iterativo, em que a solução é obtida por meio da resolução de uma série de problemas de mochila 0-1.

Deve-se ressaltar, contudo, que a formulação adotada por Combot não leva em consideração aspectos relevantes como:

- Interesse de tráfego entre os centros de fios.
- Limitações de capacidade de comutação nas centrais servidoras.
- Refiliação, ou seja, o modelo não permite a alteração de uma decisão de atribuição.

**O processo de atribuição de Unidades Remotas segue os seguintes passos:**

#### ■ Passo 1) Inicialização

Inicialmente determina-se o conjunto de servidoras potenciais  $I_s^o$  e de remotas potenciais  $I_r^o$ .

## ■Passo 2) Conjunto de Remotas Factíveis

Define-se, então, o conjunto de Unidades Remotas candidatas a se filiarem à Central Servidora  $i$  como sendo:

$$R_i = \begin{cases} R_i^c \cap F_i & i \in I_s^0 \\ \emptyset & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.16)$$

Onde:

$R_i^c$  é uma restrição externa, que limita o conjunto de Unidades Remotas que podem se filiar à central servidora  $i$ , e pode expressar as preferências do planejador.

$F_i$  é conjunto das unidades remotas factíveis para a central servidora  $i$ , e é dado por:

$$F_i = \{j: t_j^* \geq t_i^*; i \in I_s^0, j \in I_r^0\} \quad (3.17)$$

$t_i^*$  o momento de transição ótima para comutação digital no nó  $i$ .

$t_j^*$  o momento de transição ótima para concentradores remotos no nó  $j$ .

## ■Passo 3) Escolha de Central Servidora

•Tomando  $I_s^m$  como o conjunto de centrais Servidoras Potenciais na iteração  $m$ ; se  $I_s^m = \emptyset$ , então vá para o passo 8; caso contrário escolha uma central servidora pertencente ao conjunto  $I_s^m$  e que ainda não tenha sido testada.

•Se todas as centrais servidoras pertencentes à  $I_s^m$  já tenham sido testadas então vá para o passo 5; caso contrário vá para o passo 4.

#### ■Passo 4) Problema da Mochila

•Resolva o seguinte problema da mochila:

$$\text{Max} \left\{ \sum_{\sigma \in P_\beta} \gamma_{\beta\sigma} \xi_{\beta\sigma} \right\}$$

Sa:

$$\sum_{\sigma \in P_\beta} N_\sigma \xi_{\beta\sigma} \leq L_\beta$$

$$\xi_{\beta\sigma} = 0,1$$

onde:

$$\xi_{\beta\sigma} = \begin{cases} 1 & \text{se } \sigma \text{ é servida por } \beta \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$\gamma_{\beta\sigma}$  é a economia correspondente a se filiar a Unidade Remota  $\sigma$  à Central Servidora  $\beta$  sob o custo de se manter comutação analógica no nó  $\sigma$ .

$P_\beta$  é o conjunto de Unidades Remotas que podem se filiar à Central Servidora  $\beta$  na iteração  $m$ , e é definido por:

$$P_\beta = R_\beta \cap I_r^m$$

$I_r^m$  é o conjunto de Unidades Remotas na iteração  $m$ .

$L_\beta$  é a capacidade de terminais de assinantes da central servidora  $\beta$ .

$N_\sigma$  é o número de assinantes da Unidade Remota  $\sigma$ .

•Vá para o passo 3.

#### Observações:

1) A solução do problema acima produz o conjunto ótimo de remotas  $\{\delta_\beta\}$  para a central servidora  $\beta$ .

2) O custo de evolução da rede  $\Phi(\beta)$  é obtido atribuindo-se cada Unidade Remota em  $\{\delta_\beta\}$  à central servidora  $\beta$ ; as demais Unidades Remotas seguem o padrão de filiação definido na iteração anterior.

### ■Passo 5) Escolha da Filiação

A escolha da política de filiação desta iteração é determinada escolhendo-se a central servidora  $\beta$  que apresenta o menor custo de evolução da rede  $\Phi(\beta)$  e atribuindo-lhe cada Unidade Remota em  $\{\delta_\beta\}$ ; as demais Unidades Remotas seguem o padrão de filiação definido na iteração anterior.

### ■Passo 6) Atualização dos Conjuntos de Servidoras e Unidades Remotas

Os conjuntos de Servidoras e de Unidades Remotas potenciais são atualizados como mostrado abaixo:

$$I_s^{m+1} = I_s^m - \{\beta^m\}$$

e

$$I_r^{m+1} = I_r^m - \{\delta^m\}$$

Onde  $\beta_m$  é a Central Servidora escolhida na iteração  $m$ , e  $\{\delta^m\} = \{\delta_\beta\}$ , e representa o conjunto de Unidades Remotas cuja filiação foi definida nesta iteração.

•Se o conjunto  $I_r^{m+1}$  está vazio vá para o passo 7; caso contrário vá para o passo 3.

### ■Passo 7) FIM

### ■Passo 8) Atribuição de Servidoras Extras

•Escolha um nó de comutação que seja Analógico ou Unidade Remota em um determinado estágio de planejamento  $m$ ; atribua a este uma capacidade de comutação digital e inclua-o no conjunto de Centrais Servidoras potenciais deste estágio (isto é, inclui-lo em  $I_s^m$ ). A escolha deste nó é feita através da resolução de um problema semelhante ao apresentado na seção II.3.5.1, de forma a minimizar o acréscimo no custo total de evolução da rede.

•Vá para o passo 3.

## III.5 Modelagem Não Linear com Variáveis Inteiras

Como foi ressaltado na seção III.3 a consideração das demandas de tráfego entre os nós de comutação conduz naturalmente a uma modelagem quadrática que, devido as suas características, revela-se de difícil solução.

As dificuldades provenientes da não linearidade da função objetivo da modelagem quadrática podem ser contornadas, através da introdução de uma variável  $w_{kl}^i$ , que representa a parcela de tráfego da unidade remota  $i$  que vai da central servidora  $k$  para a central servidora  $l$  devido ao tráfego entre remotas, sendo esta variável definida como:

$$w_{kl}^i = \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq i}} T_{ij} x_{ik} x_{jl} \quad (3.25)$$

De modo a exemplificar considere a rede da Figura III.2. Suponha que a unidade remota  $j$  está filiada a central servidora  $k$  e a unidade remota  $m$  está filiada a central servidora  $l$ . Supondo que a filiação de  $i$  ainda não está determinada, dois casos podem ocorrer:

● Caso i) A unidade remota  $i$  é filiada à central servidora  $k$ . Neste caso a parcela de tráfego da unidade remota  $i$  que vai da central servidora  $k$  para a central servidora  $l$  devido ao tráfego entre remotas ( $w_{kl}^i$ ) é igual a  $T_{im}$ , o que corresponde ao valor determinado pela equação 3.25, uma vez que  $x_{ik} = 1$  e  $x_{ml} = 1$ .

● Caso ii) A unidade remota  $i$  é filiada à central servidora  $l$ . Neste caso a parcela de tráfego da unidade remota  $i$  que vai da central servidora  $k$  para a central servidora  $l$  devido ao tráfego entre remotas ( $w_{kl}^i$ ) é igual a zero, o que corresponde ao valor determinado pela equação 3.25, uma vez que  $x_{ik} = 0$ .

Sendo assim, a modelagem quadrática pode ser transformada na seguinte modelagem não linear utilizando variáveis inteiras:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in R} \sum_{k \in S} C r_{ik} x_{ik} + \sum_{k \in S} \left[ \sum_{i \in R} [T'_i x_{ik} - W_{kk}^i + (T_{ik} + T_{ki})(1 - x_{ik})] \right] c_{ck} + \sum_{k \in S} \sum_{l \in S} \sum_{i \in R} W_{kl}^i C t_{kl} \\ & \sum_{k \in S} \sum_{l \in S} \sum_{i \in R} [T_{il} C t_{kl} + T_{li} C t_{lk}] x_{ik} + \sum_{k \in S} \sum_{l \in R} [T_{lk} C t_{lk} + T_{zl} C t_{zk}] x_{ik} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Sa:

$$\sum_{k \in S} x_{ik} = 1, \quad \forall i \in R \quad (3.27)$$

$$\sum_{i \in R} N a_i x_{ik} \leq C A_k, \quad \forall k \in S \quad (3.28)$$

$$\sum_{i \in R} T'_i x_{ik} - W_{kk}^i \leq C T_k, \quad \forall k \in S \quad (3.29)$$

$$W_{kl}^i = \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq i}} T_{ij} x_{ik} x_{jl}, \quad \begin{array}{l} \forall k \in S \\ \forall l \in S \end{array} \quad (3.30)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad (3.31)$$

Nesta formulação o primeiro termo da função objetivo corresponde ao custo do cordão umbilical; o segundo, terceiro e quarto termos correspondem ao custo de comutação de tráfego nas centrais servidoras; quinto e sexto termos correspondem ao custo de transmissão entre as centrais servidoras e por fim o sétimo e oitavo termos ao custo de transmissão entre as servidoras e a central trânsito.

A restrição (3.27) requer que cada UR filie-se a exatamente uma servidora. A restrição (3.28) requer que a capacidade de terminais de assinantes da servidora não seja excedida, enquanto que a restrição (3.29) garante que a capacidade de comutação de tráfego da central servidora também não será ultrapassada. A restrição (3.30) define o fluxo de tráfego que vai da central servidora  $k$  para a central servidora  $l$ , da parcela originada pela unidade remota  $i$ .

A principal dificuldade presente nesta modelagem reside no fato que as variáveis  $w_{kl}^i$  são não lineares com relação às variáveis de decisão.

### III.6 Modelo EVOL

Nakagawa [8], mesmo não explicitando a natureza quadrática do Problema de Filiação de Unidades Remotas, propôs uma abordagem para o problema que consiste em uma linearização do modelo quadrático, baseada em um modelo de fluxo em redes multiproduto, onde cada produto representa as demandas de tráfego originadas por uma UR. Para tal, utilizou-se a mesma variável  $w_{kl}^i$  que representa o parcela de tráfego da remota  $i$  que vai da central servidora  $k$  para a servidora  $l$ .

A Figura III.3 evidencia as variáveis  $w_{kl}^i$ , tomando-se como referência a unidade remota 1, onde a rede é constituída de  $M$  centrais servidoras e  $N$  unidades remotas.

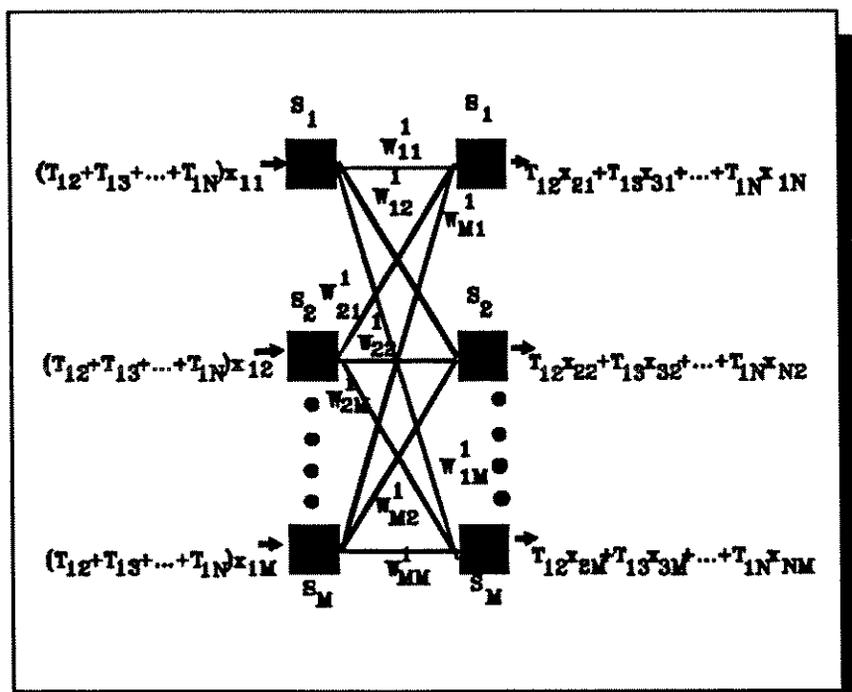


Figura III.3

Deve-se ressaltar que existe um grafo para cada unidade remota presente na rede em cada estágio de planejamento.

Note que os encaminhamentos das demandas de tráfego da unidade remota com a rede externa e com as centrais servidoras só dependem da filiação da própria unidade remota, ou seja, não dependem da filiação das demais unidades remotas. Por esta razão a rede de interligação acima não os considera. Outra demanda que também não é considerada é o tráfego interno da unidade remota.

Devido a unicidade de filiação apenas um dos nós do lado esquerdo da Figura III.3 possuirá fluxo de tráfego entrante maior que zero. Sendo assim, apenas uma das variáveis  $w_{kl}^1$  que se destina a um nó do lado direito terá fluxo (tráfego) maior que zero. Logo, a aplicação da lei das malhas a cada um dos grafos, que representa a filiação de uma determinada unidade remota, nos conduzirá aos mesmos resultados que são obtidos pela equação número 3.25. Sendo assim, as equações 3.32 e 3.33 podem ser utilizadas para substituir a equação 3.25.

$$\sum_{l \in S} W_{kl}^i = \left[ \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq l}} T_{ij} \right] x_{ik} \quad (3.32)$$

$$\sum_{k \in S} W_{kl}^i = \sum_{j \in R} T_{ij} x_{ik} \quad (3.33)$$

Logo, a formulação com variáveis inteiras pode ser transformada no seguinte modelo de programação inteira linear, que é equivalente ao modelo de Nakagawa [8].

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in R} \sum_{k \in S} C_{T_{ik}} x_{ik} + \sum_{k \in S} \left[ \sum_{i \in R} [T'_{iik} - W_{kk}^i + (T_{ik} + T_{ki})(1 - x_{ik})] c_{ck} + \sum_{l \in S} \sum_{i \in R} W_{kl}^i c_{t_{il}} + \right. \\ & \left. \sum_{k \in S} \sum_{l \in S} \sum_{i \in R} [T_{il} c_{t_{il}} + T_{li} c_{t_{li}}] x_{ik} + \sum_{k \in S} \sum_{i \in R} [T_{ik} c_{t_{ik}} + T_{ki} c_{t_{ki}}] x_{ik} \right] \end{aligned} \quad (3.34)$$

Sa:

$$\sum_{k \in S} x_{ik} = 1, \quad \forall i \in R \quad (3.35)$$

$$\sum_{i \in R} N a_i x_{ik} \leq C A_k, \quad \forall k \in S \quad (3.36)$$

$$\sum_{i \in R} T'_{iik} - W_{kk}^i \leq C T_k, \quad \forall k \in S \quad (3.37)$$

$$\sum_{k \in S} W_{kl}^i = \left[ \sum_{\substack{j \in R \\ j \neq l}} T_{ij} \right] x_{ik}, \quad \forall k \in S \quad \forall i \in S \quad (3.38)$$

$$\sum_{k \in S} W_{kl}^i = \sum_{j \in R} T_{ij} x_{ik} \quad (3.39)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad (3.40)$$

## III.7 Modelo de Programação Linear Inteira

Utilizando-se duas simplificações adicionais pode-se transformar o modelo quadrático, anteriormente apresentado, em um modelo de programação linear inteira. Estas simplificações são:

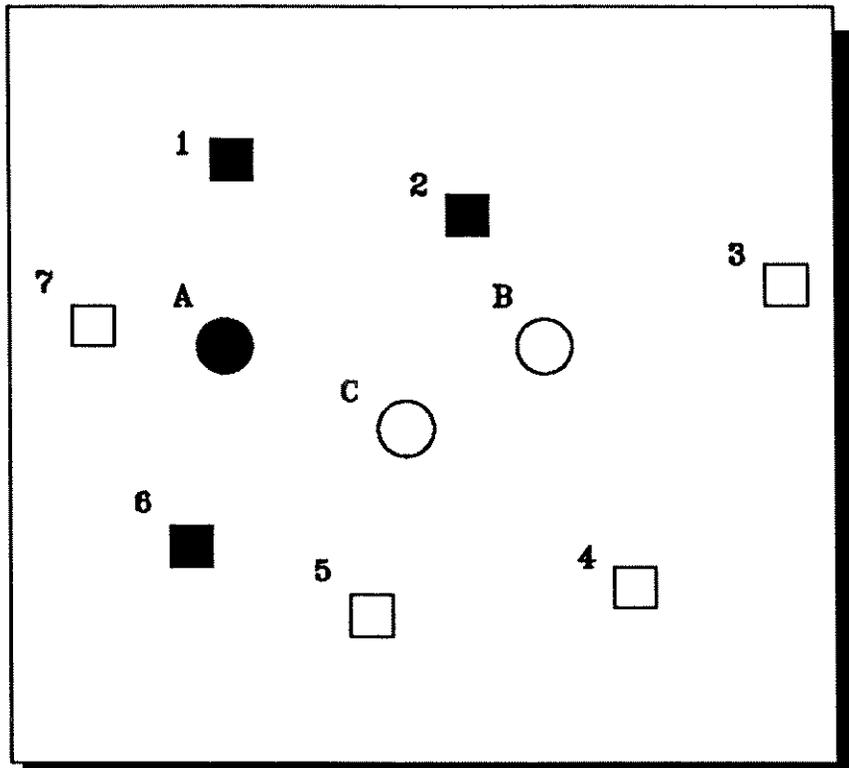
- O custo de transmissão entre as servidoras independe da distância.
- As restrições com respeito a capacidade de comutação de tráfego das servidoras serão linearizadas, utilizando-se para tal fim uma média do tráfego por assinante.

### III.7.1 Terminologia

Para melhor compreensão da formulação, é introduzido o conceito de família. Uma família é formada por todas as unidades remotas de mesma tecnologia.

Cada família só poderá ser filiada a um sub-conjunto das centrais servidoras; cabe notar que estes sub-conjuntos são disjuntos.

De modo a exemplificar, considere a rede apresentada na Figura III.4.



- Central Servidora de tecnologia  $y_1$
- Central Servidora de tecnologia  $y_2$
- Unidade Remota de tecnologia  $y_1$
- Unidade Remota de tecnologia  $y_2$

**Figura III.4**

Esta rede é constituída por duas famílias:

- Família 1, formada pelas unidades remota 1,2 e 6 e pela central servidora A.
- Família 2, formada pelas unidades remotas 3,4,5 e 7 e pelas centrais servidoras B e C.

Deve-se notar que o custo de comutação de tráfego em cada um dos sub-conjuntos de centrais servidoras é uma constante, uma vez que estas centrais possuem uma mesma tecnologia.

### III.7.2 Notação

**R** = conjunto das unidades remotas.

**S** = conjunto das centrais servidoras.

**F<sub>i</sub>** = é uma família de unidades remotas.

**N** = número de famílias.

$$\sum_{i=1}^N F_i = R$$

**S<sub>s</sub>** = sub-conjunto das centrais servidoras a qual a família s pode ser filiada.

**S<sub>s</sub> ∩ S<sub>u</sub> = ∅** para s ≠ u

$$\sum_{i=1}^N S_i \subseteq S$$

**b** = custo de transmissão entre as centrais servidoras, independente da distância.

**a<sub>s</sub>** = custo de comutação de tráfego nas servidoras da família s.

**T<sub>i</sub>** = tráfego total entre as unidades remotas que pertencem a uma mesma família e entre estas unidades remotas e as centrais servidoras candidatas a servirem de mães.

**T<sub>z</sub>** = Tráfego total entre as unidades remotas pertencentes a uma determinada família e a central trânsito e entre a central trânsito e estas unidades remotas.

Considere a rede da Figura III.2 (p. 45), suponha que as unidades remotas i, j e m pertençam a mesma família, e que as centrais servidoras k e l sejam centrais candidatas a mães para estas unidades remotas. Sendo assim, o tráfego total T<sub>i</sub> é igual a:

$$\begin{aligned} T_i = & T_{ii} + T_{ik} + T_{ki} + T_{ij} + T_{ji} + T_{im} + T_{mi} + \\ & T_{ij} + T_{ji} + T_{jk} + T_{kj} + T_{jl} + T_{lj} + T_{jm} + \\ & T_{mj} + T_{jj} + T_{mi} + T_{im} + T_{mk} + T_{km} + T_{mm} \end{aligned}$$

A variável **x<sub>ik</sub>** é definida como:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{se a unidade remota i se filia a central servidora k} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

### III.7.3 Formulação

Como o custo de transmissão entre as centrais servidoras é independente da distância pode-se dividir o problema de determinação da política de filiação ótima em uma série de sub-problemas menores e disjuntos. Cada sub-problema consiste em determinar a política de filiação ótima para uma determinada família de Unidades Remotas. A solução ótima do problema de filiação será igual a união das soluções ótimas de cada um dos sub-problemas, e o custo de filiação será a somatória dos custos das soluções ótimas de cada sub-problema.

O tráfego total entre "clusters" (que corresponde ao tráfego entre centrais servidoras) de uma determinada família  $s$  é:

$$T_t + T_z - \left[ \sum_{k \in S_s} \sum_{i \in F_s} \sum_{j \in F_s} T_{ij} x_{ik} x_{jk} + \sum_{k \in S_s} \sum_{i \in F_s} (T_{ik} + T_{ki}) x_{ik} \right] \quad (3.41)$$

A primeira parcela corresponde ao tráfego total das Unidades Remotas da família  $s$ , a segunda parcela corresponde ao tráfego total das Unidades Remotas da família  $s$  para a central trânsito, a terceira representa o tráfego interno dos "clusters" devido as Unidades Remotas e a quarta parcela expressa o fato de que se uma Unidade Remota  $i$  é filiada a Central Servidora  $k$  o tráfego de  $i$  para  $k$  e de  $k$  para  $i$  não será transmitido, uma vez que estes são comutados internamente.

O tráfego total a ser comutado pelas centrais servidoras de uma determinada família é:

$$T_z + 2T_t - \left[ \sum_{k \in S_s} \sum_{i \in S_s} \sum_{j \in F_s} T_{ij} x_{ik} x_{jk} + \sum_{k \in S_s} \sum_{i \in F_s} (T_{ik} + T_{ki}) x_{ik} \right] \quad (3.42)$$

Considere novamente a rede da Figura III.2, o tráfego total que é comutado pelas centrais servidoras desta família devido as unidades remotas é:

$$\begin{aligned} \text{Tráf.comut} = & \mathbf{T_{kj}} + \mathbf{T_{jk}} + \mathbf{T_{ji}} + \mathbf{T_{ij}} + \mathbf{T_{ij}} + \mathbf{T_{ji}} + \mathbf{T_{ki}} + \\ & \mathbf{T_{ik}} + \mathbf{T_{im}} + \mathbf{T_{mi}} + \mathbf{T_{jm}} + \mathbf{T_{mj}} + \mathbf{T_{mk}} + \mathbf{T_{km}} + \\ & \mathbf{T_{il}} + \mathbf{T_{li}} + \mathbf{T_{jl}} + \mathbf{T_{lj}} + \mathbf{T_{ix}} + \mathbf{T_{xi}} + \mathbf{T_{jx}} + \\ & \mathbf{T_{xj}} + \mathbf{T_{mm}} + \mathbf{T_{ml}} + \mathbf{T_{lm}} + \mathbf{T_{mk}} + \mathbf{T_{km}} + \mathbf{T_{im}} + \\ & \mathbf{T_{mi}} + \mathbf{T_{mj}} + \mathbf{T_{jm}} + \mathbf{T_{il}} + \mathbf{T_{li}} + \mathbf{T_{jl}} + \mathbf{T_{lj}} + \\ & \mathbf{T_{xm}} + \mathbf{T_{mx}} \end{aligned} \quad (3.43)$$

onde os termos em negrito são tráfegos comutados na central servidora  $l$ .

Da expressão 3.42 obtem-se o seguinte valor para o tráfego total comutado:

$$2 T_t + T_z - T_{ij} - T_{ji} - T_{ik} - T_{ki} - T_{jk} - T_{kj} - \\ + T_{ml} - T_{lm} - T_{ii} - T_{jj} - T_{mm}$$

que corresponde exatamente ao valor determinado pela expressão 3.43.

A idéia subjacente à construção da expressão 3.42 é que todo o tráfego da rede será comutado duas vezes, as únicas exceções são os tráfegos entre clusters e a rede externa e o tráfego intra cluster.

Definindo-se as variáveis zero-um  $w_{ij}$  como sendo:

$$w_{ij} = \sum_{k \in S_s} x_{ik} x_{jk} \quad (3.44)$$

Para todo  $i \in F_s$ ,  $j \in F_s$  e  $j \neq i$ .

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se as unidades remotas } i \text{ e } j \text{ estão filiadas a mesma central servidora.} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Pode-se agora expressar as equações 3.41 e 3.42 em termos das variáveis  $w_{ij}$ :

$$T_t + T_z - \left[ \sum_{i \in F_s} \sum_{j \in F_s} T_{ij} w_{ij} + \sum_{k \in S_s} \sum_{i \in F_s} (T_{ik} + T_{ki}) x_{ik} \right] \quad (3.45)$$

$$T_z + 2T_t - \left[ \sum_{i \in F_s} \sum_{j \in F_s} T_{ij} w_{ij} + \sum_{k \in S_s} \sum_{i \in F_s} (T_{ik} + T_{ki}) x_{ik} \right] \quad (3.46)$$

A formulação do problema pode então ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in F_s} \sum_{k \in S_s} C r_{ik} x_{ik} - b \sum_{i \in F_s} \sum_{k \in S_s} (T_{ik} + T_{ki}) x_{ik} - (a_s + b) \sum_{i \in F_s} \sum_{j \in F_s} T_{ij} w_{ij} + \\ & + (2a_s + b)T_i + (a_s + b)T_z \end{aligned} \quad (3.47)$$

Sa:

$$\sum_{k \in S_s} x_{ik} = 1, \quad \forall i \in F_s \quad (3.48)$$

$$\sum_{i \in F_s} N a_i \gamma_i x_{ik} \leq C T_k, \quad \forall k \in S_s \quad (3.49)$$

$$w_{ij} = \sum_{k \in S_s} x_{ik} x_{jk}, \quad \begin{array}{l} \forall i \in F_s \quad (3.50) \\ \forall j \in F_s \\ j \neq i \end{array}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad e \quad w_{ij} \in \{0,1\} \quad (3.51)$$

Devido a unicidade de filiação a expressão 3.44 pode ser escrita da seguinte forma:

$$w_{ij} = 1 - \max_{k \in S_s} \{|x_{ik} - x_{jk}|\} \quad (3.52)$$

Alternativamente a expressão 3.52 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} w_{ij} & \leq 1 + x_{ik} - x_{jk} & (a) \quad \forall i \text{ e } j \in F_s, j \neq i \\ w_{ij} & \leq 1 - x_{ik} + x_{jk} & (b) \quad k \in S_s \end{aligned} \quad (3.53)$$

Como  $a_s$  e  $b$  são positivos, os coeficientes da função objetivo de todos os  $w_{ij}$  são negativos, de modo que cada  $w_{ij}$  estará em seu valor máximo possível na otimalidade.

É importante notar que existe um conjunto de desigualdades do tipo 3.53 para cada  $k \in S_s$ .

No que se refere à filiação das UR's i e j, dois casos podem ocorrer:

●Caso i) A unidade remota i e a unidade remota j estão filiadas a mesma central servidora k. Neste caso, a equação 3.44 determina que o valor correto de  $w_{ij}$  é um, enquanto a expressão 3.53 requer que  $w_{ij} \leq 1$ . Sendo assim o valor que será assumido por  $w_{ij}$  é um, o que corresponde ao seu valor esperado.

●Caso ii) A unidade remota i está filiada a central servidora k e a unidade remota j está filiada a servidora m. Neste caso a equação 3.44 determina que o valor correto de  $w_{ij}$  é 0. Como  $x_{ik}$  é um e  $x_{jk}$  é zero a desigualdade 3.53(a) requer que  $w_{ij} \leq 0$ . Logo o seu valor máximo é zero. O que corresponde ao seu valor verdadeiro.

A Tabela III.1 compara os valores verdadeiros com os valores determinados pelas desigualdades definidas pela expressão 3.53.

Tabela III.1

	Variáveis x				Resultado do lado direito das restrições (3.53)		$w_{ij}$ resultante	$w_{ij}$ verdadeiro
	$x_{ik}$	$x_{jk}$	$x_{im}$	$x_{jm}$	(3.53-a)	(3.53-b)		
Caso i	1	1	0	0	$\leq 1$	$\leq 1$	1	1
Caso ii	1	0	0	1	$\leq 2$	$\leq 0$	0	0

Cabe observar que não existe a necessidade de exigir que as variáveis  $w_{ij}$  sejam inteiras; devem portanto satisfazer a condição:

$$0 \leq w_{ij} \leq 1$$

O problema pode, então, ser formulado como o seguinte programa linear inteiro misto zero-um:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in F_s} \sum_{k \in S_s} C r_{ik} x_{ik} - b \sum_{i \in F_s} \sum_{k \in S_s} (T_{ik} + T_{ki}) x_{ik} - (a_s + b) \sum_{i \in F_s} \sum_{j \in F_s} T_{ij} w_{ij} + \\ & + (2a_s + b)T_i + (a_s + b)T_z \end{aligned} \quad (3.54)$$

Sa:

$$\sum_{k \in S_s} x_{ik} = 1, \quad \forall k \in F_s \quad (3.55)$$

$$\sum_{i \in F_s} N a_i \gamma_i x_{ik} \leq C T_k, \quad \forall k \in S_s \quad (3.56)$$

$$\sum_{i \in F_s} N a_i x_{ik} \leq C A_k, \quad \forall k \in S_s \quad (3.57)$$

$$w_{ij} - x_{ik} + x_{jk} \leq 1, \quad \begin{array}{l} \forall i \in F_s \quad (3.58) \\ \forall j \in F_s \\ j \neq i \end{array}$$

$$w_{ij} + x_{ik} - x_{jk} \leq 1, \quad \begin{array}{l} \forall i \in F_s \quad (3.59) \\ \forall j \in F_s \\ j \neq i \end{array}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad e \quad 0 \leq w_{ij} \leq 1 \quad (3.60)$$

### III.7.4 Considerações Sobre o Modelo

Este modelo é utilizado como ponto de partida para a construção de um algoritmo de resolução baseado em técnicas de "Branch and Bound"<sup>9</sup>, onde o limitante inferior de cada vértice da árvore de enumeração é obtido através da relaxação dos requisitos de integralidade do modelo de programação linear inteira, cuja solução é consideravelmente simples, uma vez que as restrições 3.58 e 3.59 são restrições triviais.

---

<sup>9</sup> Este algoritmo é apresentado em detalhes no Capítulo IV.

A linearização utilizada na construção do modelo de programação linear aumenta o número de variáveis contínuas em cerca de  $A_{N_s}^2 + N_s = N_s (N_s - 1) + N_s$ , e o número de restrições em cerca de  $N_s (N_s - 1) Q_s$ , onde  $N_s$  é o número de Unidades remotas da família  $s$  e  $Q_s$  é o número de centrais servidoras da família  $s$ .

Para problemas de grandes dimensões pode se tornar impraticável a introdução das variáveis  $w_{ij}$  e das restrições 3.58 e 3.59, inviabilizando pois a utilização da modelagem anteriormente apresentada. Contudo, uma abordagem alternativa pode ser obtida substituindo-se as variáveis  $w_{ij}$  pelos seguintes termos:

$$1 - \max_{k \in S_s} \{ |x_{ik} - x_{jk}| \} \quad (3.61)$$

na função objetivo. Devemos notar que a função objetivo resultante é uma função linear por partes, uma vez que o termo  $|x_{ik} - x_{jk}|$  é linear por partes como uma função das variáveis de decisão e o máximo de um número finito de funções convexas lineares por partes é linear por partes e convexa. Logo para problemas de grandes dimensões pode-se utilizar a seguinte formulação de programação linear por partes inteira, que não implica na adição de nenhuma variável ou restrição :

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{i \in F_s} \sum_{k \in S_s} C r_{ik} x_{ik} - b \sum_{i \in F_s} \sum_{k \in S_s} (T_{ik} + T_{ki}) x_{ik} - (a_s + b) \sum_{i \in F_s} \sum_{j \in F_s} T_{ij} \left( 1 - \max_{k \in S_s} \{ |x_{ik} - x_{jk}| \} \right) + \\ & + (2a_s + b)T_i + (a_s + b)T_z \end{aligned} \quad (3.62)$$

Sa:

$$\sum_{k \in S_s} x_{ik} = 1, \quad \forall i \in F_s \quad (3.63)$$

$$\sum_{i \in F_s} N a_i \gamma_i x_{ik} \leq C T_k, \quad \forall k \in S_s \quad (3.64)$$

$$\sum_{i \in F_s} N a_i x_{ik} \leq C A_k, \quad \forall k \in S_s \quad (3.65)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad (3.66)$$

Pode-se, portanto, calcular o limitante inferior do modelo de programação linear inteira zero-um utilizando-se uma implementação de programação linear por partes [13].

### III.8 Conclusões

Pelo que foi anteriormente exposto, o Problema de Filiação de Unidades Remotas é por natureza um problema de programação quadrática zero-um quando se considera as demandas de tráfego entre os centros de fios. Constitui, pois, um problema NP-completo [14], cuja obtenção da solução exata pode ser alcançada através da transformação do modelo quadrático em um modelo de programação linear inteira zero-um equivalente. Duas propostas de linearizações completas são apresentadas:

- Modelo EVOL

- Modelo de programação linear inteira [originalmente proposto neste trabalho].

Estes modelos tentam agrupar as unidades remotas com alto interesse de tráfego entre si, em clusters (grupos), de forma a atender critérios conflitantes:

- minimizar o custo de transmissão.

- minimizar o custo de comutação de tráfego.

e satisfazer os requisitos de unicidade de filiação, capacidade de terminais de assinantes e de comutação de tráfego em cada uma das centrais servidoras.

---

# **CAPÍTULO IV**

## ***Implementação Computacional***

---

### **IV.1 Introdução**

Neste capítulo é apresentada a implementação computacional do sistema desenvolvido para determinação da *Política Ótima de Evolução de Nós de Comutação* em uma rede multi-central. Tal política é obtida, avaliando-se explicitamente o impacto econômico das decisões de ampliação.

O sistema emula o processo de tomada de decisão de um engenheiro de planejamento, combinando técnicas exatas do tipo "Branch and Bound" com heurísticas especializadas. Permite a análise de vários cenários de evoluções diferentes

O procedimento computacional desenvolvido trata o problema de obtenção da política ótima de evolução em dois níveis:

- Evolução Individual dos Nós de Comutação.
- Filiação de Unidades Remotas.

É também apresentada uma estratégia heurística de resolução do problema de Filiação.

### **IV.2 Visão Geral do Sistema Computacional**

O sistema computacional compreende um modelo matemático cuja implementação foi desenvolvida em computadores pessoais compatíveis com IBM-PC. Determina a melhor política de evolução dos centros de fios, de forma a minimizar o custo de evolução, visando satisfazer:

- Os requisitos de demanda (tráfego e assinantes);

- As restrições de qualidade de serviço;
- As restrições de disponibilidade e indisponibilidade de equipamentos;
- As preferências do planejador.

O sistema apresenta uma estrutura altamente modular, tendo sido implementado na linguagem C. Compreende duas fases hierarquicamente interligadas (Figura IV.1):

- Fase 1 : Evolução Individual dos nós de comutação.
- Fase 2 : Filiação de Unidades Remotas

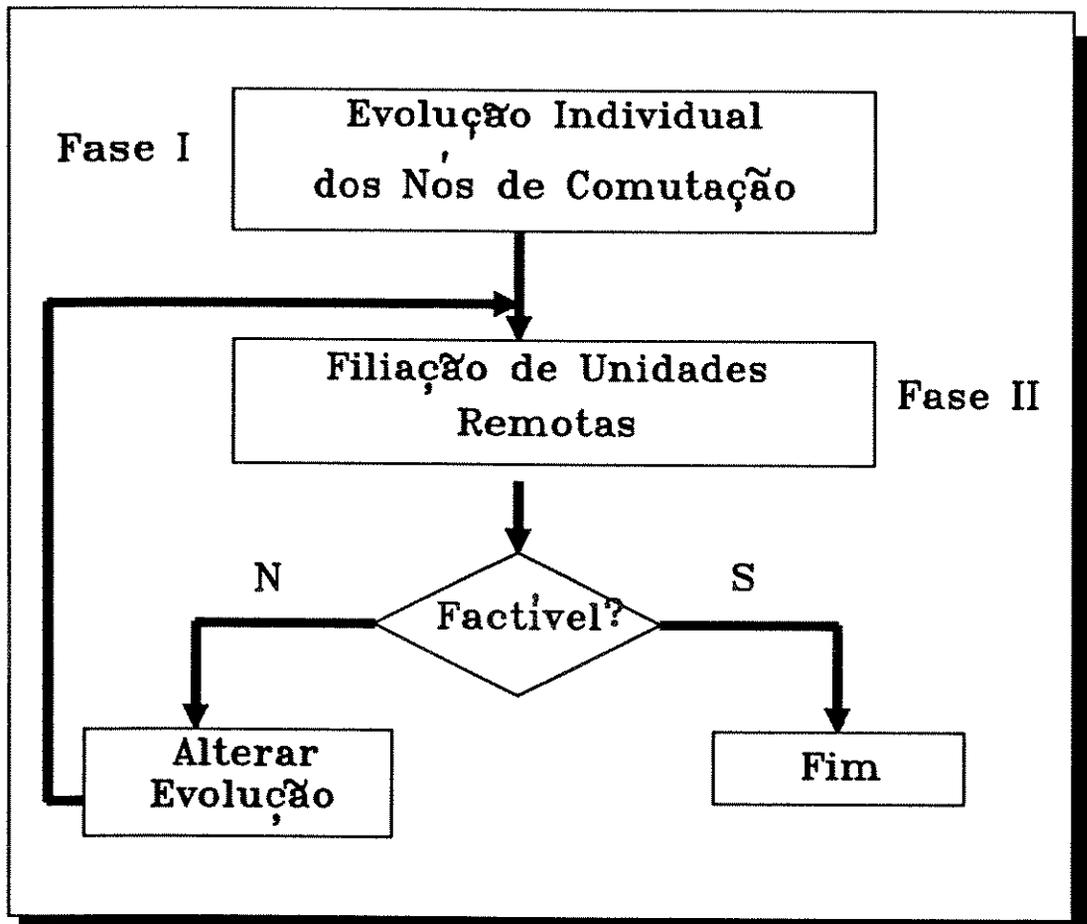


Figura IV.1

A Fase 1 constitui um processo otimizador, utilizando como núcleo básico um método de enumeração implícita, em que cada nó é considerado individualmente. Esta fase fornece como saída as políticas de evolução ótimas para cada centro de fios, em função da quantidade e tipos de equipamentos instalados e/ou a instalar.

A Fase 2, por sua vez, também constitui um processo otimizador, utilizando técnicas exatas do tipo "Branch and Bound", e tem por objetivos verificar a factibilidade das políticas de evolução e definir a estratégia ótima de filiação das Unidades Remotas.

A alteração da evolução só será executada se o problema de Filiação de Unidades Remotas for infactível, e constitui um processo iterativo com o usuário, onde este intervém alterando a política de evolução de um ou mais centros de fios de forma a factibilizar o problema de Filiação.

O modelo utilizado na construção da Fase de Evolução Individual (Fase I) foi originalmente proposto em [8]. Foram feitas alterações e correções neste modelo básico visando transformar o sistema computacional em um instrumento de maior eficácia e de uso mais amigável. A seguir são enumeradas algumas alterações realizadas:

- 1) Definição de Trajetórias
- 2) Desativações Modulares
- 3) Valor de Retorno
- 4) Centrais Satélites

A Fase II utiliza o modelo de programação linear inteira apresentado na seção III.7 como ponto de partida para a construção de um algoritmo de resolução do subproblema de filiação de unidades remotas. O procedimento computacional, bem como o modelo matemático utilizados nesta fase, e na fase de alteração de evolução (Fase III) foram inteiramente desenvolvidos neste trabalho.

### **IV.3 Fase I: Evolução Individual**

O subproblema associado à fase 1 visa determinar qual o plano ótimo de expansão para cada centro de fios ao longo do período de planejamento. Fornece como saída a definição do tipo e número de equipamentos existentes nos centros de fios.

Nesta fase os centros de fios são tratados individualmente. Sendo assim, há um subproblema de evolução individual para cada centro de fios existente na rede. O critério que orienta as decisões é o de minimizar os investimentos em capital necessários à ampliação da rede.

Optou-se por abordar este subproblema através de um método de enumeração implícita, onde a estratégia adotada consiste em realizar inicialmente uma busca em profundidade. Cada vértice da árvore de enumeração representa um estado e cada ramo, por sua vez, uma transição de estado. O número de níveis da árvore é igual ao número de estágios de planejamento. Uma seqüência factível de ramificações ("branches") sucessivas é definida como sendo um caminho. Um caminho ligando o vértice raiz a um vértice terminal (vértice "folha") corresponde a uma política de evolução completa; caso contrário define uma política de evolução parcial. O custo de um caminho é calculado de acordo com a estrutura apresentada na seção II.4.5, e compreende as seguintes parcelas: custo de instalação dos equipamentos, custo de comutação, custo de terminais de assinantes, custo de juntores, equipamento de ponta, custo de infra-estrutura, manutenção, conversão, valor de retorno.

A figura IV.2 representa a árvore de evolução para um centro de fios que possui comutação analógica no ano base, durante três estágios de planejamento, utilizando-se o diagrama de transições de estado mostrado na figura IV.3.

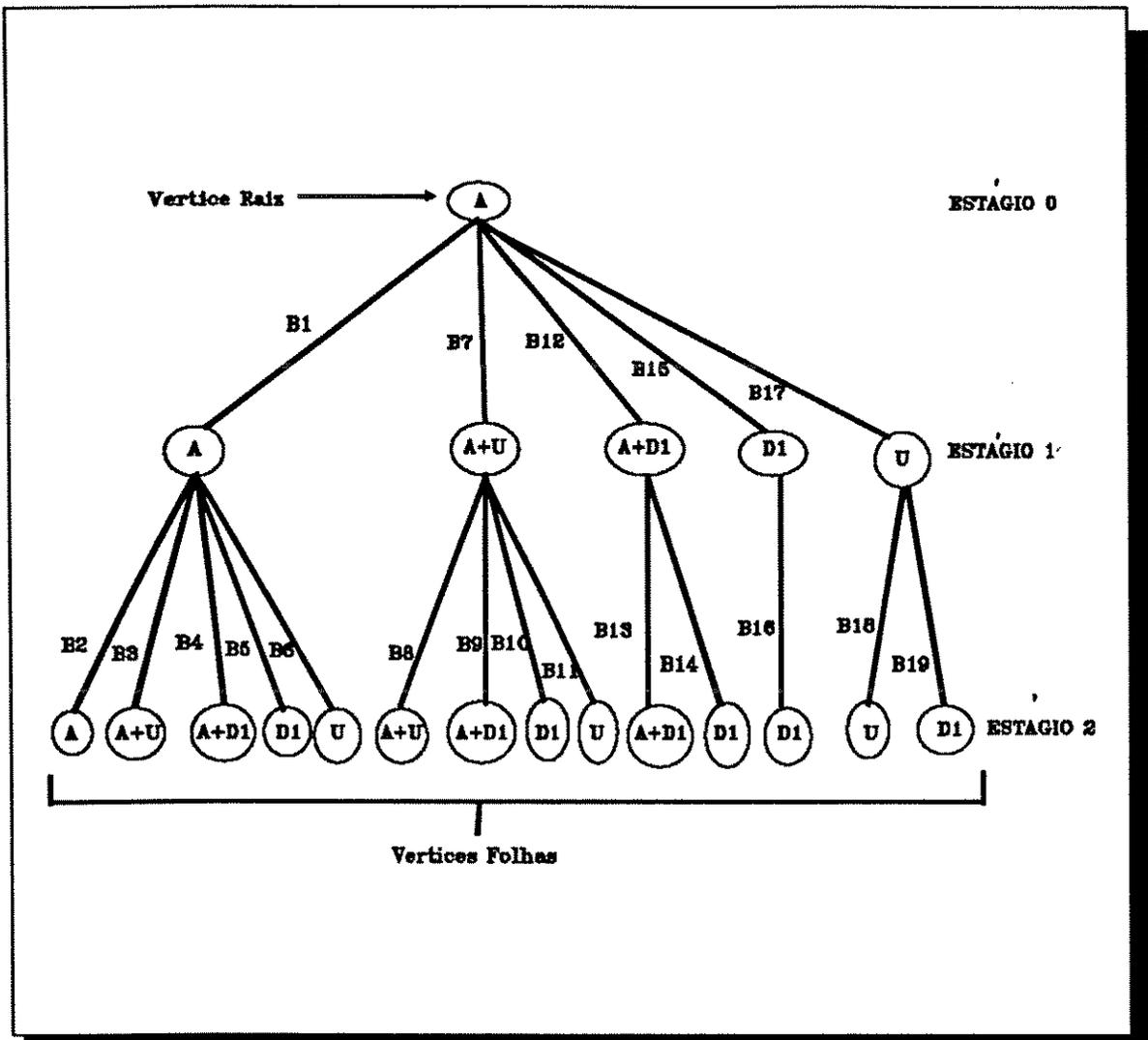


Figura IV.2 Árvore de Evolução

A - representa uma Central Analógica.  
 D1 - uma Central Digital  
 U - uma Unidade Remota

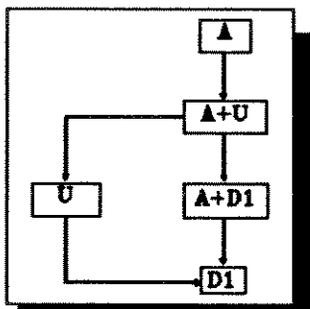


Figura IV.3

A árvore de evolução gerada mostra todas as possibilidades de evolução do nó do ano base até o ano horizonte de planejamento. Associado a cada possibilidade, são feitos testes de factibilidade e são calculados os custos de políticas de evolução em termos de valor presente. O "branch" que liga um estado  $i$  (vértice origem) a um outro no estágio  $i+1$  (vértice destino), representa o custo de transição de estado, sendo assim o "branch 7" descreve o custo de se realizar a seguinte transição de estado  $A \rightarrow A+U$ .

Caberá ao planejador fornecer um elenco de transições de estado factíveis, de modo que soluções alternativas possam ser geradas.

### IV.3.1 Algoritmo

É apresentado a seguir um diagrama de blocos do procedimento computacional utilizado na resolução do subproblema associado a fase 1.

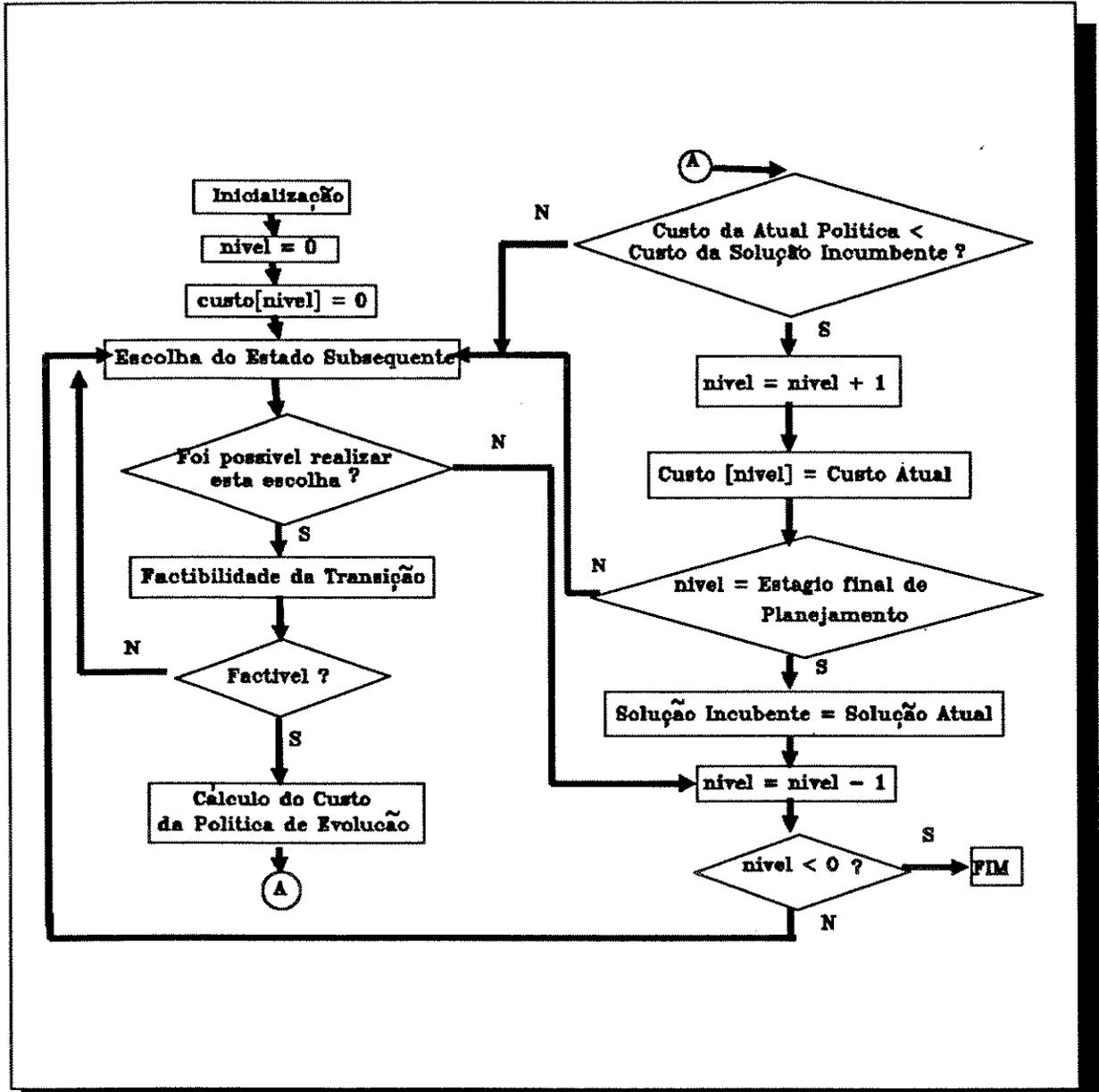


Figura IV.4

A seguir são detalhados os passos apresentados no diagrama de blocos da Figura IV.4.

### ■Passo 1) Inicialização

Este passo é responsável pela entrada de dados necessários a resolução do subproblema. Os dados são:

- Horizonte de estudo
- Estado inicial da rede.
- Parâmetros financeiros e de custo.
- Topologia da rede em cada um dos estágios de planejamento.
- Matriz de Assinantes das Zonas de Tráfego nas Zonas de Filiação ( $M_{TF}$ ).
- Matriz de Interesse de Tráfego entre as Zonas de tráfego ( $M_{TT}$ ).
- Informações sobre os equipamentos: capacidade de comutação, terminais de assinantes, juntores, vida útil, data de disponibilidade e indisponibilidade, etc.

### ■Passo 2) Escolha do Estado Subseqüente

A escolha do estado subseqüente a ser testado é feita de uma maneira seqüencial obedecendo as regras de transições de estado determinadas pelo planejador. Estas regras determinam as transições admissíveis, sob o ponto de vista tecnológico, de forma a contemplar aspectos como: irreversibilidade de modernização, opções de planejamento, etc.

### ■Passo 3) Factibilidade da Transição

Este passo visa verificar a factibilidade de uma transição de estado. Investigando-se:

i)• Restrições nodais (desativação, substituição, etc..). Considere, por exemplo, a situação onde o planejador determinou que um certo tipo de equipamento deva ser desativado até o terceiro estágio de planejamento. Todas as estratégias de evolução que empregarem este equipamento a partir deste estágio são consideradas infactíveis.

ii)• Restrições de equipamentos (disponibilidade, indisponibilidade tecnológica, vida útil, etc..).

iii)•Se é possível distribuir os assinantes nos equipamentos do nó de comutação de modo a factibilizar o tráfego comutado por cada um dos equipamentos, respeitando-se também as capacidades de assinantes destes.

Esta distribuição é realizada através de um processo de aproximações sucessivas, que visa promover uma distribuição dos assinantes pelos equipamentos de comutação, maximizando a utilização dos recursos já existentes.

Para exemplificar o funcionamento do procedimento computacional considere a situação onde se analisa a hipótese de instalação de um terceiro equipamento em um centro de fios.

A notação utilizada é a seguinte:

$k$  = número de equipamentos instalados no nó  $i$ .

$P_i$  = proporção dos assinantes do nó de comutação atribuídos ao equipamento  $i$ .

$N$  = número de assinantes do nó de comutação

$CPT_i$  = capacidade de tráfego do equipamento  $i$ .

$CPN_i$  = capacidade de assinantes do equipamento  $i$ .

$Ft_i$  = folga de tráfego do equipamento  $i$ .

$Fn_i$  = folga de assinantes do equipamento  $i$ .

$Tt_i$  = é o tráfego total associado ao equipamento  $i$ , definido de acordo com a seção II.4.4.

Os passos seguidos pelo procedimento são mostrados no diagrama de blocos da figura IV.5

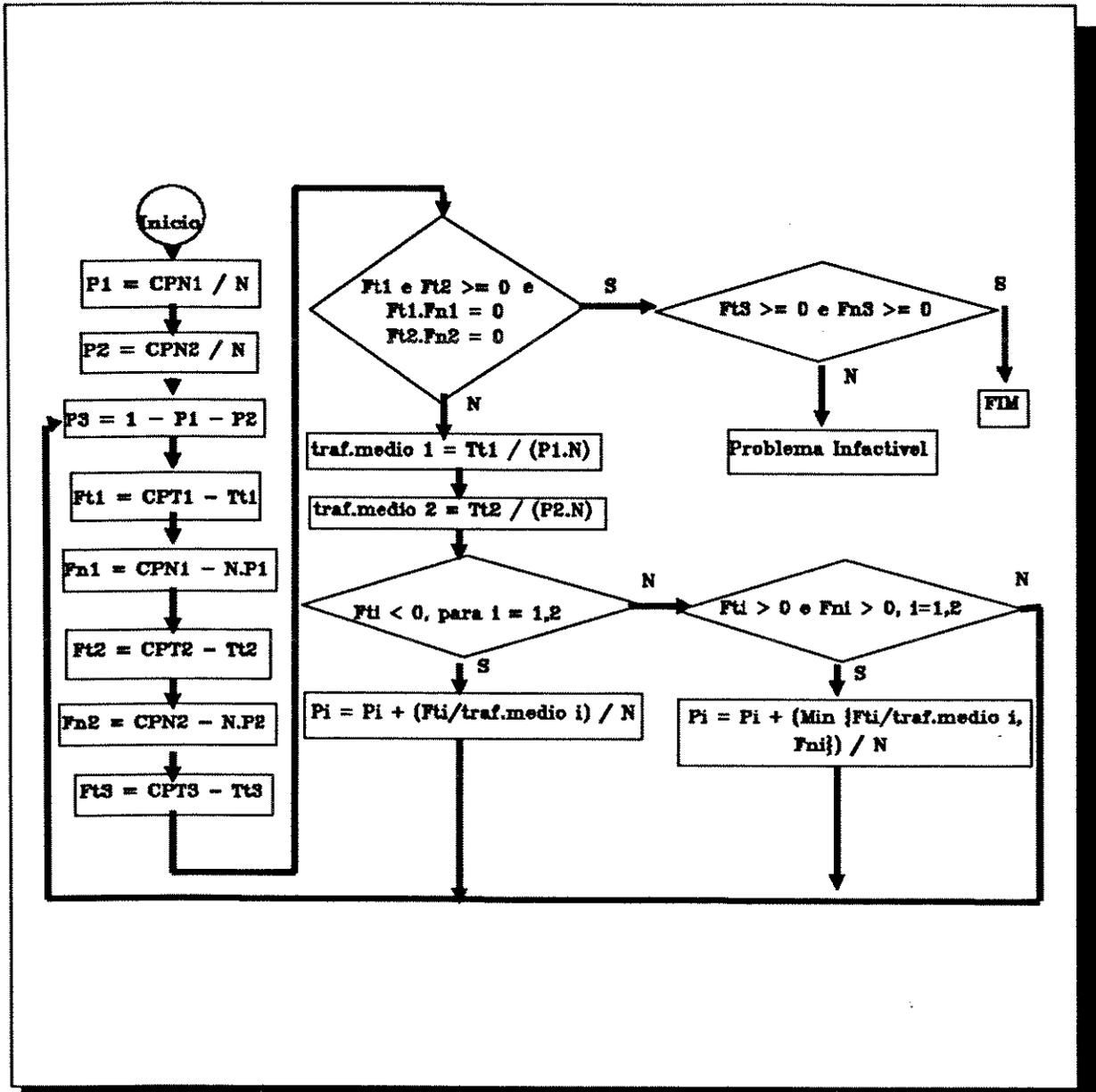


Figura IV.5

#### ■ Passo 4) Cálculo do Custo da Política de Evolução

O cálculo do custo da política de evolução é feito de acordo com o modelo apresentado na seção II.4.5. Compreende as seguintes parcelas: custo de instalação dos equipamentos, custo de comutação, custo de terminais de assinantes, custo de juntores, equipamentos de ponta, custo de infra-estrutura, manutenção, conversão, valor de retorno.

Uma política de evolução parcial é considerada sondada (excluída de considerações futuras) se o custo desta for superior ou igual ao custo da melhor política de evolução completa (solução incumbente) encontrada até aquele instante. Também é considerada sondada se esta revelar-se inactivável. Se uma política de evolução parcial é considerada sondada, o algoritmo retorna para o nível mais baixo da árvore que ainda não tenha sido sondado (a estratégia "primeiro em profundidade") e a correspondente solução parcial é examinada. Finalmente, o procedimento termina quando todas as políticas de evolução tiverem sido explicitamente ou implicitamente examinadas. A última solução incumbente é a solução ótima do problema.

Analisando-se a performance do algoritmo observa-se que os principais fatores que afetam o tempo de execução são:

- número de centros de fios existentes na rede;
- número de estágios de planeamento;
- número de regras de transições de estado fixadas pelo usuário.

## IV.5 Fase II: Filiação de Unidades Remotas

A fase II tem por objetivo definir uma Política de Filiação de Unidades Remotas. Há, portanto, a necessidade de se distribuir as UR's (Unidades Remotas) pelas centrais servidoras (mães) respeitando-se as restrições de unicidade de filiação (cada Unidade Remota deve ser filiada a uma única mãe), capacidade de terminais de assinantes e de tráfego a ser comutado nas centrais servidoras. O critério que orienta as decisões de filiação é o critério econômico.

A estratégia adotada divide o subproblema de Filiação de Unidades Remotas em um série de subproblemas menores. Cada subproblema visa determinar a política de filiação ótima para uma determinada família de Unidades Remotas.

O método de resolução adotado baseia-se na técnica de "Branch and Bound", onde cada nó da árvore corresponde uma política de filiação (parcial ou completa).

Consiste em fixar uma variável livre em um, ou seja, atribuir uma unidade remota não filiada a uma dada central servidora, verificando-se a seguir a factibilidade desta filiação. Posteriormente, calcula um limitante inferior através da relaxação dos requisitos de integridade da modelagem linear inteira (seção III.7.3).

Uma política de filiação parcial é considerada sondada se o valor do limitante inferior for maior ou igual ao melhor valor da função objetivo de uma política de filiação completa (solução incumbente). Se a solução parcial é considerada sondada, o algoritmo retorna para o nível mais baixo da árvore de "Branch and Bound" que ainda não tenha sido sondado (estratégia de busca em profundidade) e a correspondente solução parcial é a próxima a ser sondada. O procedimento termina quando todos os vértices da árvore de "Branch and Bound" tiverem sido sondados explicitamente ou implicitamente.

A figura IV.6 ilustra o procedimento descrito anteriormente.

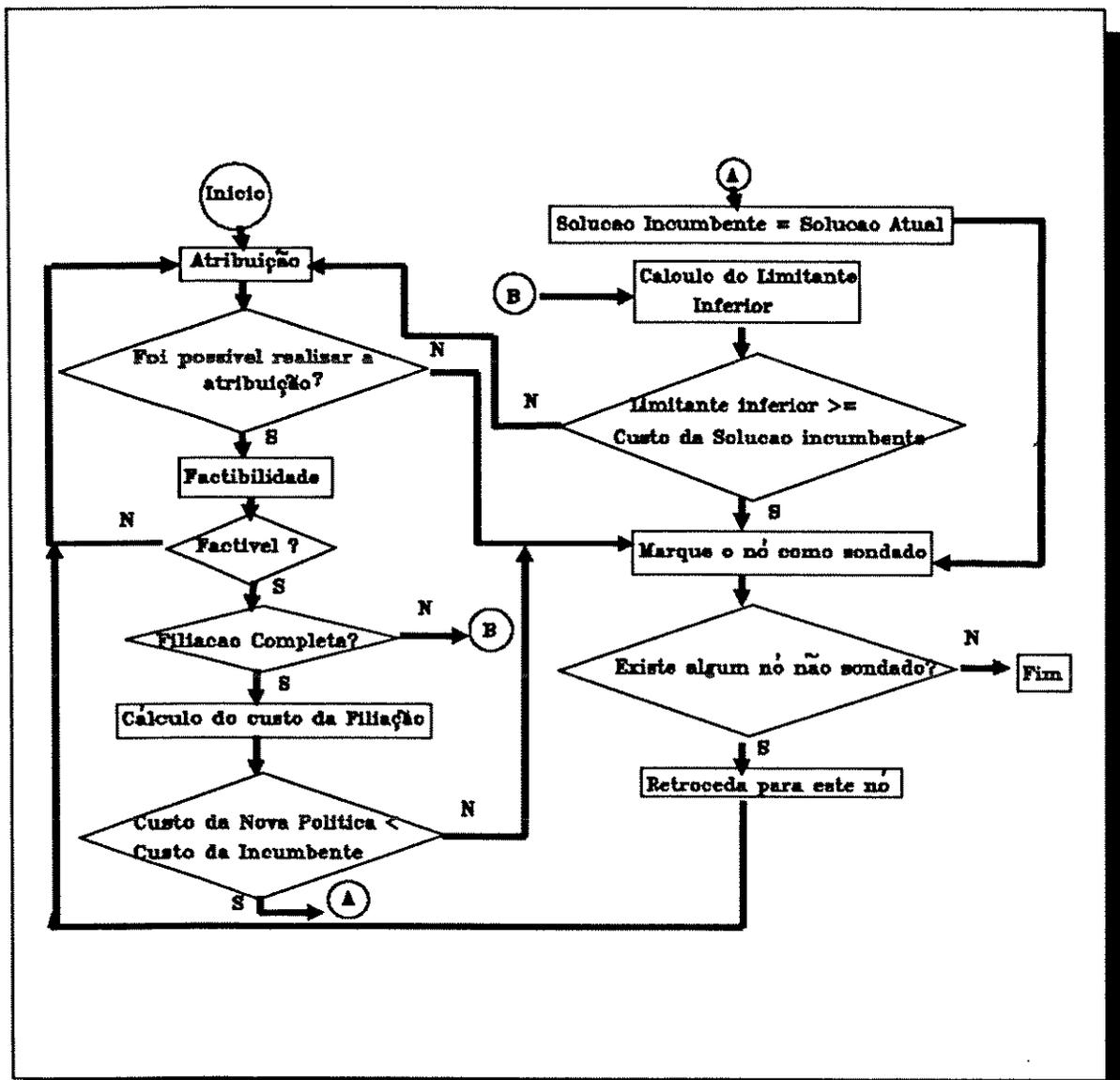


Figura IV.6

A seguir são detalhados os passos apresentados na Figura IV.6.

■Passo 1) Atribuição

●Consiste em atribuir uma unidade remota, cuja filiação ainda não tenha sido determinada na solução parcial em questão, a uma central servidora ainda não testada. Se todas as opções de expansão da solução parcial tiverem sido consideradas, o nó correspondente é considerado sondado.

## ■Passo 2) Factibilidade

●Este passo visa verificar se uma política de filiação de unidades remotas atende os requisitos de capacidade de tráfego e de terminais de assinantes de cada uma das centrais servidoras.

## ■Passo 3) Cálculo do Custo da Filiação

●Calcula o custo de uma política de filiação de acordo com a função objetivo apresentada na seção III.7.3. Envolvendo as seguintes parcelas:

- Custo de ligação das Unidades Remotas às Centrais Servidoras.
- Custo de comutação de tráfego nas Centrais Servidoras.
- Custo de transmissão de tráfego entre as Centrais Servidoras.
- Custo de transmissão de tráfego nas interligações entre Centrais Servidoras e a Central Trânsito.

## ■Passo 4) Cálculo do Limitante Inferior

●Este passo determina um limitante inferior para cada vértice da árvore de "Branch and Bound", e é obtido relaxando-se os requisitos de integralidade do modelo de programação linear inteira (seção III.7.3).

*A performance do algoritmo de filiação é definida pelo número de unidades remotas e de centrais servidoras existentes em cada um dos subproblemas.*

## **IV.6 Heurística de Filiação**

Pelo que foi exposto no capítulo III, pode-se concluir que o Problema de Filiação de Unidades Remotas constitui um problema NP-completo. Problemas deste tipo comportam um grande número de alternativas, pois são sujeitos à chamada "explosão combinatorial"; por isto, para problemas de dimensões maiores se faz necessário o desenvolvimento de uma heurística de filiação.

A heurística proposta tenta agrupar os nós que possuem um alto interesse de tráfego entre si, e é dividida em duas sub-fases: **PROSPECTIVA** e **DECISÓRIA**.

### **IV.5.1 Sub-fase Prospectiva**

Refere-se a uma evolução de salto único que nos faz partir do ano inicial e planejar diretamente a filiação do ano horizonte. Em princípio, este passo é pouco realista, pois não considera nuances do crescimento da rede nos estágios de tempo intermediários.

Esta sub-fase tem caráter de orientação sob a sub-fase seguinte onde realmente são tomadas as decisões de planejamento. A sub-fase prospectiva proporciona uma "fotografia", uma visão da rede no ano horizonte, que será encarada como um alvo a ser atingido nos passos mais detalhistas da sub-fase **DECISÓRIA**.

Em outras palavras, a fotografia da rede no ano horizonte obtida na sub-fase **PROSPECTIVA** é uma visão de como seria o futuro, caso ele pudesse "realizar-se", a partir da situação presente, sem respeitar dificuldades e características dos estágios intermediários quanto a demandas, indisponibilidade de equipamento, etc.

Numa imagem metafórica pouco rigorosa, a sub-fase prospectiva constitui o **FAROL ALTO** que permite enxergar o alvo a distância. O caráter de mera orientação desta sub-fase, delineando um alvo que talvez nunca seja alcançado, desobriga o planejador de concluí-la em todos os seus detalhes: ele deve avançar o trabalho até o ponto em que fiquem evidenciadas as tendências de "crescimento" de nós da rede. Estará assim cumprido o papel prospectivo desta sub-fase.

Os seguintes procedimentos serão evocados durante esta sub-fase:

#### **IV.5.1.1 Procedimento Mãe**

Durante a primeira fase do sistema computacional, quando se procede à evolução individual dos nós de comutação, centros de fios importantes, quanto ao número de assinantes e/ou volume de tráfego, recebem equipamentos com características do tipo Central Mãe. Dentre elas serão selecionadas algumas para receber ligações umbilicais de Unidades Remotas. O critério de escolha para estas Mães, durante a fase Prospectiva, será o do maior tráfego  $TT_i$ ; sendo:

$T_{ij}$  = interesse de tráfego do CF i para o CF j

tem-se:

$$TT_i = O_i + D_i - T_{ii} + TX_i$$

com:

$TT_i$  = tráfego total do CF i

$$O_i = \sum_j T_{ij} = \text{tráfego originado no CF i}$$

$$D_i = \sum_j T_{ji} = \text{tráfego destinado ao CF i}$$

$TX_i$  = tráfego externo originado em e destinado ao CF i.

#### IV.5.1.2 Procedimento Filha

Considere já determinado o sub-conjunto M de índices que caracteriza as Centrais Mães e seja  $I = \{1, 2, \dots, n\}$  o conjunto de todos os CF da rede.

Para cada nó j que caracteriza uma Unidade Remota ou uma Central Satélite,  $j \in I$  e  $j \notin M$ , determina-se uma Mãe k,  $k \in M$ , segundo o critério  $T_{kj} + T_{jk} = \text{Max}_{i \in M} (T_{ij} + T_{ji})$

Diz-se então que j é FILHA de k.

#### IV.5.1.3 Procedimento Factibilidade

Após assegurar que cada UR tem uma Mãe de tecnologia compatível, o programa deve verificar a factibilidade do esquema de filiação em termos das grandezas relevantes: assinantes, juntores, comutação etc....

Caso seja detectada alguma infactibilidade, ela será comunicada ao planejador que decidirá por:

- Interromper o estudo da alternativa

- Proceder alterações na alternativa antes de continuá-la.

#### **IV.5.1.4 Passos da Sub-Fase Prospectiva**

Os passos seguidos pela Sub-Fase Prospectiva são:

##### **■Passo 1) Ordenação das Centrais Servidoras**

- Ordenar as Centrais Servidoras decrescentemente com o tráfego total  $TT_i$ .

##### **■Passo 2) Escolha das Mães**

- Escolher as  $p$  Centrais Servidoras com maior interesse de tráfego para servirem como candidatas a Mães, onde  $p$  é um parâmetro definido pelo usuário.

##### **■Passo 3) Escolha da Filha**

- Escolher uma unidade Remota ou uma Central Satélite ainda não filiada.
- Se foi possível realizar esta escolha então vá para o passo 4; se não vá para o passo 6.

##### **■Passo 4) Atribuição**

- Atribuir a Unidade Remota ou a Central Satélite escolhida no passo 3 a uma Mãe ainda não testada, de acordo com o critério descrito no Procedimento Filha.
- Se foi possível realizar esta atribuição então vá para o passo 5; caso contrário informe ao usuário que não foi possível gerar uma política de filiação e FIM.

##### **■Passo 5) Factibilidade**

- Verificar a factibilidade desta atribuição .
- Se a atribuição for factível executar o passo 3; se não executar o passo 4.

##### **■Passo 6) Cálculo do Custo da Filiação**

- Calcular o custo da política de filiação.FIM.

#### IV.5.2 Sub-Fase Decisória

É subdividida em tantos passos quantos são os estágios de planejamento; para cada um deles devem ser determinadas Mães, com declaração explícita das unidades remotas ou centrais satélites filiadas a cada uma delas, numa sistemática do tipo descrita no item IV.5.1.

Os passos são efetuados de forma seqüencial e crescente; o resultado já obtido para um estágio é o ponto de partida para a determinação da solução do estágio que o sucede no tempo.

É importante ressaltar que a solução encontrada para o ano horizonte, nesta sub-fase, não coincide necessariamente com aquela determinada na sub-fase prospectiva, pois guarda compromisso com o crescimento da rede em anos intermediários.

Metafóricamente, a sub-fase decisória constitui uma seqüência de saltos pequenos realizados com FAROL BAIXO.

As decisões mais importantes serão tomadas pelo planejador (usuário) que terá, como interlocutor, a assistência de uma máquina para a execução de cálculos e sugestão de alternativas.

As decisões com maiores chances de serem aplicadas são as referentes ao futuro mais próximo; por esta razão elas devem ser aprofundadas ao maior nível de detalhe do sistema computacional.

Para o futuro distante é razoável admitir que o estudo será refeito no intervalo entre o presente e sua efetiva aplicação. Assim, à medida que o futuro se distancia, o planejador poderá adotar atitudes mais soltas, mais relaxadas, pois seria temerário admitir como inviável uma alternativa (no futuro distante) que poderia vir a ter solução graças ao avanço técnico esperado. Em outras palavras, para o futuro distante, o planejador sensato renuncia a detalhes de maneira seletiva.

A filiação determinada na segunda fase desta heurística será decidida através de um diálogo planejador-máquina, onde cabe ao usuário fixar uma alternativa de solução, que será analisada pelo programa, de forma a verificar a factibilidade desta alternativa, e calcular o custo da mesma.

Deve-se ressaltar que a estratégia adotada por esta heurística não conduz necessariamente à solução ótima, nem é exaustivo; ela trabalha com alternativas propostas pela máquina e/ou usuário, que sempre terá amplo poder de alteração sobre qualquer alternativa.

---

# CAPÍTULO V

## Um Estudo de Caso

---

### V.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se a aplicação das Etapas de Evolução Individual e Filiação de Unidades Remotas a uma rede exemplo. Os dados utilizados foram obtidos tomando-se por base a rede da cidade de João Pessoa.

Devido as dimensões deste caso exemplo, optou-se por não empregar a estratégia heurística de resolução do problema de Filiação.

No estudo realizado tem-se como referência os anos de 1989 (Ano base) e 2000 (Ano Horizonte de Planejamento).

A partir da definição de um Plano Fundamental procedeu-se a fase de Evolução Individual. Dois cenários foram avaliados:

● **Digitalizador**: Neste cenário define-se um cronograma de desativações parciais dos equipamentos analógicos, de modo a garantir que a rede se torne totalmente digitalizada ao final do horizonte de planejamento.

● **Conservador**: Toda a expansão da rede local é feita através de equipamentos digitais, nenhum cronograma de desativação é definido. Sendo assim a rede poderá possuir comutação analógica no Ano Horizonte.

De posse dos resultados da Fase de Evolução Individual (Fase I), procedeu-se a execução da Fase de Filiação de Unidades Remotas correspondente ao Ano Horizonte de planeamento .A seguir investigou-se o efeito que a demanda de tráfego entre as Unidades Remotas tem sobre a definição da Política de Filiação.

## V.2 Rede de Estudo

A rede estudo tomada como palco para avaliação é baseada na cidade de João Pessoa, devido à familiaridade e confiabilidade dos dados disponíveis.

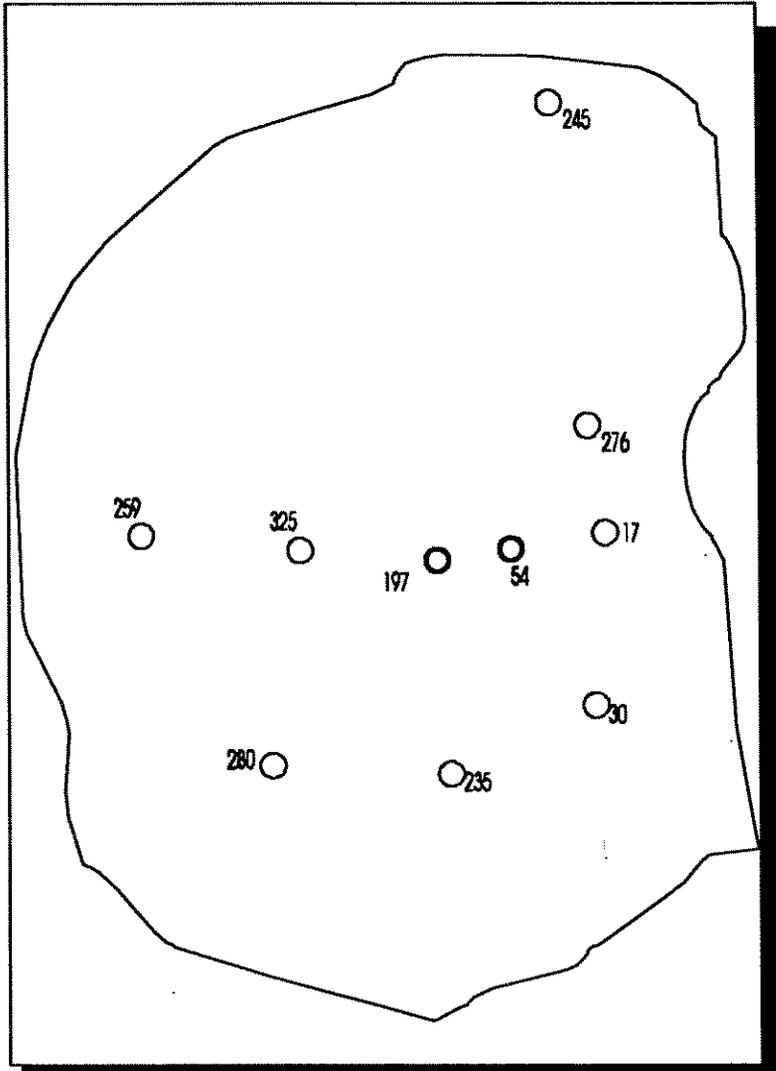
O período de planeamento vai de 1989 ao ano horizonte 2000, com etapas intermediárias em 1990, 1991, 1992 e 1995.

A tabela V.1 sintetiza o crescimento da demanda da rede ao longo dos estágios de planeamento.

**Tabela V.1**

<b>Crescimento de Demanda</b>			
<b>Ano</b>	<b>Terminais de Assinantes</b>	<b>% de crescimento por estágio</b>	<b>% de crescimento Ano Base</b>
1989	47994	-	-
1990	54495	13,55	13,55
1991	56527	3,73	17,78
1992	63832	12,92	33,00
1995	71623	12,21	49,23
2000	98991	38,21	106,26

Em 1989 existiam 10 centros de fios (CF) instalados servindo 48 mil usuários, representados na Figura V.1.As características em termos dos equipamentos, capacidade instalada de terminais de assinantes e de tráfego comutado são apresentados na Tabela V.2.



**Figura V.1**

**Tabela V.2**

Situação dos Centros de Fios no Ano Base					
Centro de Fios	Capac.de Infra-estrutura	Equip.	Ano Implantação	Capac. Assinantes <sup>10</sup>	Capac.Tráfego (Erl's) <sup>10</sup>
CE-1 (197)	60000	TR	1987	2816	480
		AN	1970	16000	1600
CE-2 (54)	40000	AN	1970	13920	1600
CE-3 (17)	40000	AN	1970	3200	400
CE-6 (235)	8000	AN	1980	2720	800
BESSA(133)	8000	AN	1976	3200	800
DIND (280)	8000	AN	1981	2080	800
CBD (245)	8000	AN	1970	1600	1200
SRTA (259)	8000	AN	1970	1600	1200
BANC (30)	8000	AN	1979	1120	800
BAY (325)	8000	AN	1980	1120	800

A legenda para os equipamentos de comutação considerados no exemplo são:

**AN - analógico**

**TR - trópico R**

**TRS- trópico RAS**

**TRA - trópico RA**

**MULT - multinacional**

que são centrais do tipo CA, isto é, com autonomia de encaminhamento; e

**UDR - unidade distante da trópico R**

**UDA - unidade distante da trópico RA/RAS**

**UDM - unidade distante da MULT**

que são unidades remotas sem autonomia de encaminhamento de tráfego externo e mesmo sem a possibilidade de processamento do tráfego interno.

---

<sup>10</sup> Estas colunas representam as capacidades de terminais de assinantes e de comutação de tráfego instaladas no ano base, que podem não estar sendo totalmente utilizadas.

Os dados de custos e capacidades de cada um dos equipamentos utilizados são indicados nas Tabelas V.3, V.4, V.5 e V.6.

**Dados de Centrais :**

**Tabela V.3**

	Assinantes	Comutação (Erl's)	Juntores
<b>Trópico RA</b>			
Capacidade do módulo	160	1440	30
Número de módulos	360	4	200
Custo do módulo (US\$)	38783	40724	3600
<b>Trópico RAS</b>			
Capacidade do Módulo	160	360	30
Número de Módulos	100	4	60
Custo do Módulo (US\$)	38783	15818	5763
<b>Trópico R</b>			
Capacidade do Módulo	128	160	30
Número de Módulos	100	4	60
Custo do Módulo (US\$)	34129	7923	6139
<b>Analógico</b>			
Capacidade do Módulo	160	400	30
Número de Módulos	360	4	200
Custo do Módulo (US\$)	34219	7923	6139
<b>MULT</b>			
Capacidade do Módulo	160	1440	30
Número de Módulos	360	4	200
Custo do Módulo (US\$)	17730	40724	3600

**Tabela V.4**

Equipamento	Custo de Implantação (US\$)
Trópico RA	69780
Trópico RAS	69780
Trópico R	39868
Analógico	69780
MULT	150767

*Dados de Unidades Remotas:*

**Tabela V.5**

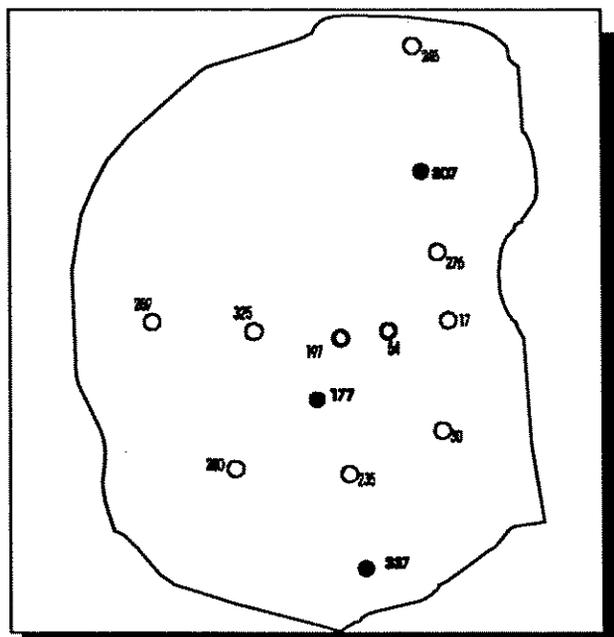
	<b>Assinante</b>	<b>Sistema PCM</b>
<b>UDR</b>		
Capacidade do módulo	160	30 canais
Número de módulos	10	20
Custo do módulo (US\$)	38309	6339
<b>UDA</b>		
Capacidade do módulo	160	30 canais
Número de módulos	10	20
Custo do módulo (US\$)	31661	6339
<b>UDM</b>		
Capacidade do módulo	160	30 canais
Número de módulos	32	27
Custo do módulo (US\$)	40000	5239

**Tabela V.6**

<b>Equipamento</b>	<b>Custo de Implantação (US\$)</b>	<b>Tipo de Mãe</b>
UDR	2986	TR
UDA	4978	TRA OU TRS
MULT	15077	MULT

Dados da evolução, ao longo do período de planejamento, do número de assinantes e de volume de tráfego (originado, terminado, interno e interurbano) de cada centro de fios (CF) são necessários para execução do sistema computacional; por isto ele é precedido por programas do tipo "Plano Fundamental": LOCEST, CROEST e PEOR, em que se definem a criação de novos CF's e a delimitação de suas áreas de influência.

Os sub-itens que se seguem apresentam sucintamente os resultados obtidos pelo programas do tipo "Plano Fundamental".



○ - Centro de Fios Existente no Ano Base.

● - Centro de Fios Novo

Figura V.2 Resultado do LOCEST

A fase de determinação do cronograma de implantações apresentou os seguintes resultados:

Tabela V.7

Cronograma de Implantação de Novas Centrais	
1990	-
1991	N(307)
1992	N(177), N(337)
1995	-
2000	-

A tabela abaixo representa o número de assinantes dos centros de fios em cada uma dos estágios de planeamento.

**Tabela V.8**

<b>Número de Assinantes dos Centros de Fios</b>						
	<b>1989</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>	<b>1992</b>	<b>1995</b>	<b>2000</b>
CE-1 (197)	18762	19315	20274	19764	20257	25536
CE-2 (54)	13711	13579	13465	15369	17300	20493
CE-3(17)	2575	2528	3215	4450	4163	4534
CE-6(235)	2699	2746	2932	3049	3007	4769
BESSA(276)	2884	4080	3943	3890	3678	7099
DIND(280)	2066	2582	2409	2860	3008	7238
CBD(245)	1600	1659	1788	2098	2425	3610
SRTA(259)	1603	910	1182	1512	1780	2056
BANC(30)	1096	3781	4044	3883	5006	5797
BAY(325)	998	1048	976	1253	1741	4986
N(337)	0	0	0	1375	1909	5425
N(177)	0	0	0	2145	4872	4900
N(307)	0	2267	2299	2184	2477	2548

A partir destes dados, procedeu-se o estudo da definição da política de evolução ótima de cada um dos centros de fios. Os resultados obtidos por esta etapa são apresentados em forma de gráficos e tabelas.

### V.3 Resultados da Evolução Individual

De posse dos dados provenientes da definição do "Plano Fundamental" procedeu-se a Fase de Evolução Individual, onde dois cenários foram simulados e avaliados:

● **Digitalizador:** Neste cenário define-se um cronograma de desativações parciais dos equipamentos analógicos, de modo a garantir que a rede se encontre totalmente digitalizada ao final do horizonte de planeamento.

● **Conservador:** Toda a expansão da rede local é feita através de equipamentos digitais, nenhum cronograma de desativação das centrais analógicas é definido. Sendo assim a rede poderá possuir comutação analógica no Ano Horizonte.

É importante salientar que a transição de estado de um nó entre dois estágios de planeamento subseqüentes (por exemplo 1990 e 1991) ocorre segundo situações pré-determinadas pelo planeador, conforme mostrado na Tabela V.9.

Tabela V.9

Est. Atual	Estados Subseqüentes													
NOVO	NOVO	UDR	UDA	UDM	TR	TRS	TRA	MULT						
AN	AN	AN+UDR	AN+UDA	AN+UDM	AN+TR	AN+TRS	AN+TRA	AN+MULT	UDA	UDM	TR	TRS	TRA	MULT
UDR	UDR	UDA	UDM	TR	TRS	TRA	MULT							
UDA	UDA	UDM	UDR	TR	TRS	TRA	MULT							
UDM	UDM	TR+UDM	TRS+UDM	TRA+UDM	TRS+MULT	TR	TRS	MULT	TRA					
TR	TR	TR+TR	TR+TRS	TR+TRA	TR+MULT	TRS	TRA	MULT						
TRS	TRS	TRS+TR	TRS+TRA	TRA	TRS+MULT	TRA	MULT							
TRA	TRA	TR+TRA	TRS+TRA	TRA+TRA	TRA+MULT									
MULT	MULT	TR+MULT	TRS+MULT	TRA+MULT										
AN+TR	AN+TR	AN+TRA	AN+TRS	TR	AN+MULT	TRS	TRA	MULT						
AN+UDR	AN+UDR	AN+UDA	AN+TR	AN+TRS	AN+TRA	TR	TRS	TRA	MULT					
AN+UDA	AN+UDA	AN+TR	AN+TRS	AN+TRA	AN+MULT	TRS	TRA	MULT						
AN+TR	AN+TR	AN+TRS	AN+TRA	AN+TR+TR	AN+TR+TRS	TR+TR	TR+TRS	TR+TRA	TR	TRS	MULT	TRA		
AN+TRS	AN+TRS	AN+TRA	AN+TR+TRS	TR+TRS	AN+MULT	TRS+MULT	TRS	MULT	TRA					
AN+TRA	AN+TRA	TRA	MULT	TRS+TRA	TRA+MULT	TR+TRA								
AN+MULT	AN+MULT	TR+MULT	MULT	TRS+MULT										
TR+TR	TR+TR	TR+TRS	TR+TRA	TRS	TR+MULT	TRA	MULT							
TR+TRS	TR+TRS	TR+TRA	TRS+TRA	TR+MULT	TRS+MULT	MULT								
TR+TRA	TR+TRA	TR+MULT	TRS+TRA	TRA	MULT									
TRS+TRA	TRS+TRA	TRA	MULT	TRS										
TR+MULT	TR+MULT	MULT												
TRS+TRA	TRS+TRA	TRA												
TRS+MULT	TRS+MULT	MULT												
TRA+MULT	MULT	TRA+MULT												
AN+TR+TR	AN+TR+TR	AN+TR+TRS	AN+TRS	AN+TRA	TR+TR	TR+TRS	TR+TRA	TR+MULT	TRS	TRA	MULT			
AN+TR+TRS	AN+TR+TRS	AN+TR+TRA	TR+TRS	TR+TRA	TRA	MULT	TRS+MULT							

O sistema decide pela transição mais econômica, levando em conta os seguintes custos:

- **Custos do Equipamento:** implantação, placas de assinantes, comutação, juntores.
- **Custos de Manutenção:** assinantes, comutação, juntores. (É importante observar que os custos de manutenção que aparecem nos gráficos mostrados a seguir se referem a manutenção do equipamentos que se encontram instalados no estágio anterior de planejamento).
- **Custos de Conversão.**
- **Custos de Infra-estrutura:** terreno, construção predial.
- **Valor de Retorno.**

O custo de evolução de cada um dos estágios planejamento é um reflexo destas diversas parcelas de custo e corresponde ao custo de evolução acumulado do ano base até este estágio.

Deve-se ressaltar que os resultados obtidos são fortemente dependentes dos custos utilizados e das demandas.

### V.3.1 Cenário Conservador

A tabela V.10 explicita a evolução ótima obtida para cada um dos centros de fios.

**Tabela V.10**

Nome	Nó	1989	1990	1991	1992	1995	2000
CE-1	197	AN+TR	MULT	MULT	MULT	MULT	MULT+TRS
CE-2	54	AN	AN	MULT	MULT	MULT	MULT
CE-3	17	AN	TRA	TRA	TRA	TRA	TRA
CE-6	235	AN	AN+UDM	AN+UDM	AN+UDM	AN+UDM	AN+UDM
BESSA	276	AN	AN+TR	AN+TR	AN+TR	AN+TR	AN+TR+TRS
DIND	280	AN	AN+TR	AN+TR	AN+TR	AN+TR	AN+TR+TRS
CBD	245	AN	AN+UDR	TRS	TRS	TRS	TRS
SRTA	259	AN	UDM	UDM	UDM	UDM	UDM
BANC	30	AN	AN+TR	AN+TR	AN+TR	AN+TR	AN+TR+TRS
BAY	325	AN	UDM	UDM	UDM	UDM	UDM
N	337	NOVO	NOVO	NOVO	UDM	UDM	MULT
N	177	NOVO	NOVO	NOVO	UDM	UDM	UDM
N	307	NOVO	UDM	UDM	UDM	UDM	UDM

O custo total de evolução da rede no cenário conservador é de US\$ 18225 x 10<sup>3</sup>

A seguir detalha-se a evolução ótima de alguns centros de fios.

**Centro de Fios CE-1 (197)**

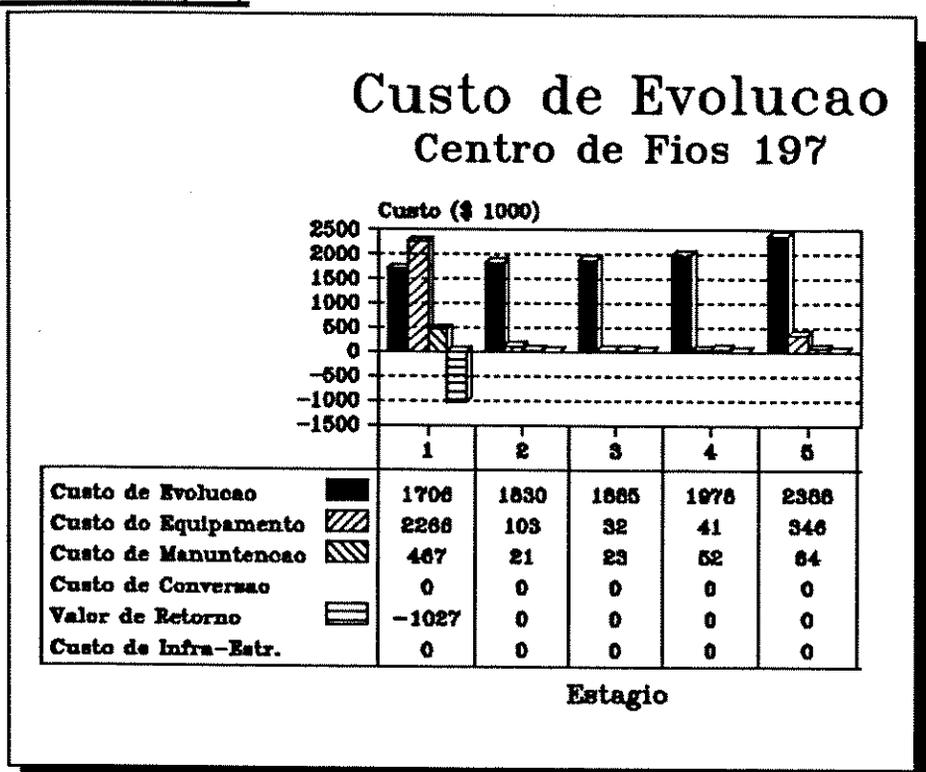


Figura V.3

A tabela V.11 apresenta as características deste centro de fios ao longo do período de planejamento.

Tabela V.11

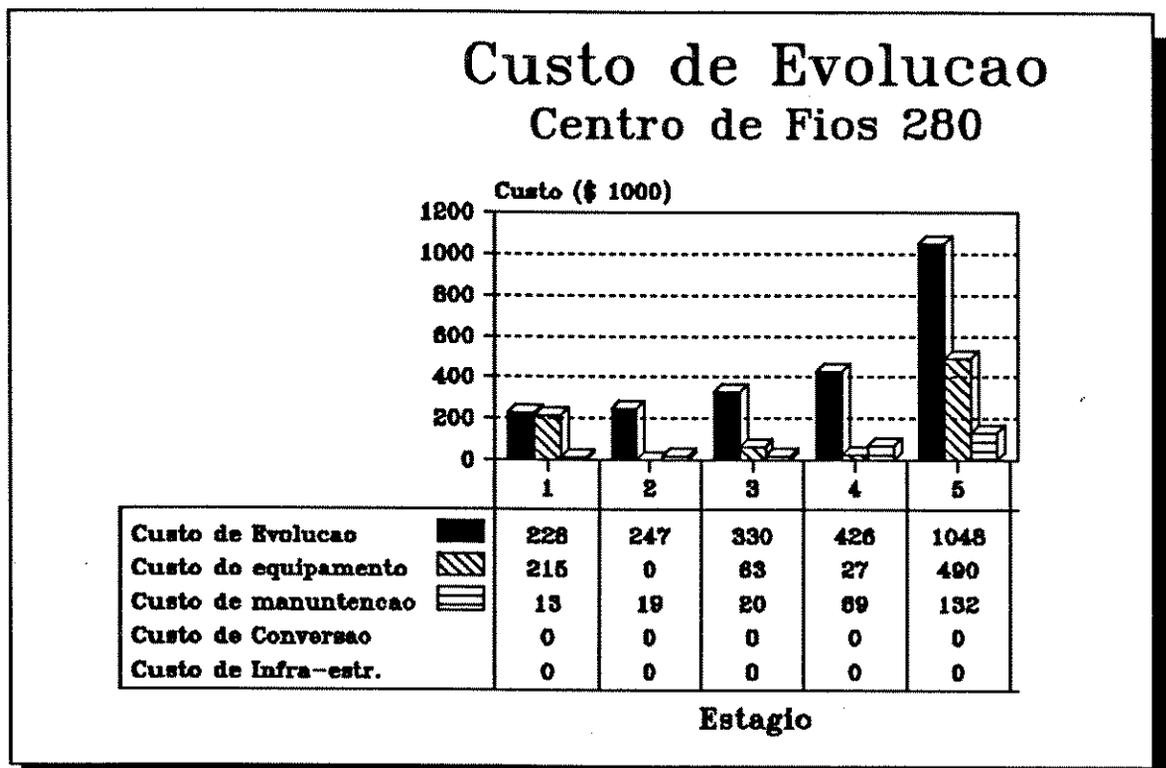
Estágio	Equipamento	Nº de Terminais de Assinantes Instalados	Capac. de Comutação Instalada(Erl's)	Nº de Juntores Instalados	Ano de Implantação
1	MULT	193315	1526	1315	1990
2	MULT	20274	1673	1440	1990
3	MULT	20274	1960	1740	1990
4	MULT	20274	2486	2204	1990
5	MULT	24984	5759	5310	1990
	TRS	552	142	210	2000

A evolução do centro de fios 197 apresenta uma característica interessante, o emprego do valor de retorno na redução do custo total de evolução.

Ao se analisar a evolução deste nó, conclui-se que a transição de estado do estágio 0 para o estágio 1 deveu-se ao fim da vida útil do equipamento analógico, e como o equipamento Trópico R não tem condições de atender a demanda de tráfego e de assinantes fez-se necessário a instalação de um novo equipamento. O sistema então determinou que a melhor opção reside na instalação de uma central multinacional (MULT). Este estado permaneceu inalterado até o 5º estágio de planejamento quando o equipamento multinacional atingiu a sua capacidade plena em termos de comutação de tráfego, sendo pois necessário instalar um novo equipamento, de modo a suprir a demanda adicional.

Cabe mencionar que os valores residuais dos equipamentos Trópico R e Analógico foram utilizados para amortizar o custo de instalação do equipamento MULT.

**Centro de Fios DIND (280)**



**Figura V.4**

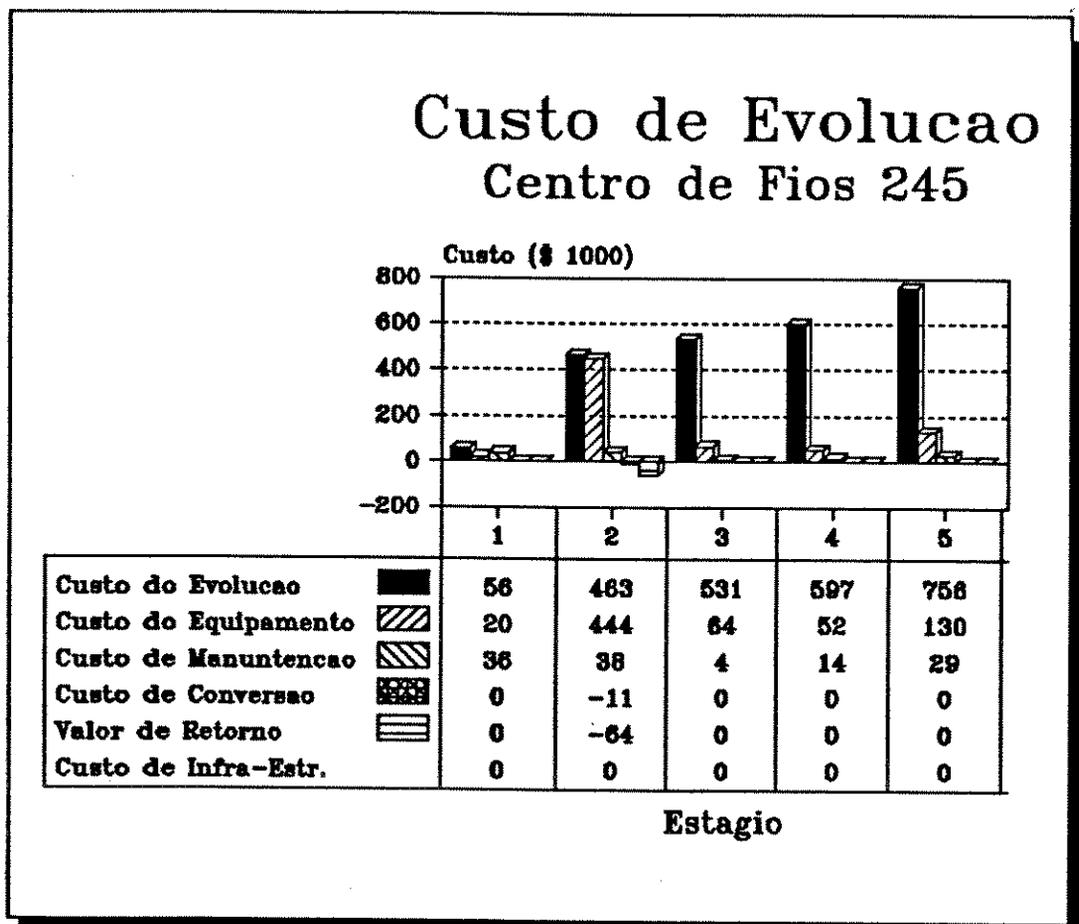
A tabela V.12 apresenta as características deste centro de fios ao longo do período de planejamento.

**Tabela V.12**

Estágio	Equipamento	Nº de Terminais de Assinantes Instalados	Capac. de Comutação Instalada(Erl's)	Nº de Juntores Instalados	Ano de Implantação
1	AN	1920	800	270	1981
	TR	662	54	85	1990
2	AN	1920	800	270	1981
	TR	662	54	85	1990
3	AN	1920	800	270	1981
	TR	940	87	125	1990
4	AN	1920	800	270	1981
	TR	1088	115	150	1990
5	AN	1920	800	270	1981
	TR	2541	478	553	1990
	TRS	2777	523	600	2000

O aspecto interessante com respeito a evolução deste centro de fios é que a melhor estratégia de evolução individual encontrada consiste em instalar três equipamentos de comutação distintos (AN+TR+TRS). Isto ressalta a versatilidade do sistema em relação as propostas anteriores, que permitiam no máximo dois equipamentos por centro de fios.

**Centro de Fios CBD (245)**



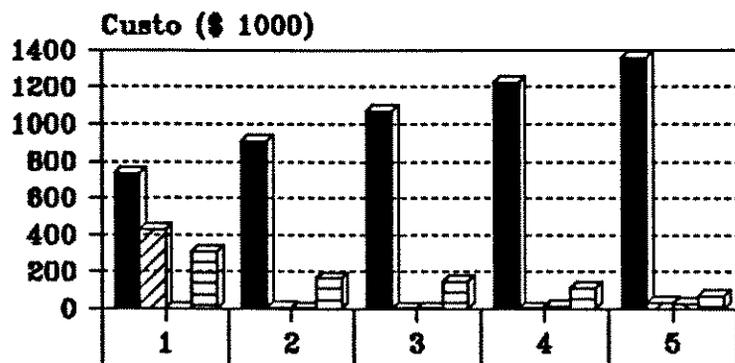
**Figura V.5**

**Tabela V.13**

Estágio	Equipamento	Nº de Terminais de Assinantes Instalados	Capac. de Comutação Instalada(Erl's)	Nº de Juntões Instalados	Ano de Implantação
1	AN	1600	1200	150	1970
	UDR	59	4	16	1990
2	TRS	1788	110	153	1991
3	TRS	2098	147	195	1991
4	TRS	2425	198	251	1991
5	TRS	3610	529	607	1991

Uma vez que o equipamento analógico tem a sua vida útil esgotada ao final do horizonte planejamento (ano 2000), o sistema prefere antecipar a data de desativação do mesmo substituindo-o por um equipamento Trópico-RAS. É interessante notar, contudo, que não é possível antecipar a instalação do equipamento TRS para 1990, uma vez que a data de disponibilidade deste equipamento é 1991. Sendo assim, se faz necessário instalar uma Unidade Remota da central Trópico-R, de forma a atender o acréscimo de demanda, já que as centrais analógicas se encontram congeladas. Posteriormente, esta é desativada e convertida no equipamento Trópico-RAS.

## Custo de Evolucao Centro de Fios 307



	1	2	3	4	5
Custo de Evolucao	734	911	1070	1228	1355
Custo do Equipamento	426	8	4	4	34
Custo de Manutencao	0	4	4	13	28
Custo de Conversao	0	0	0	0	0
Valor de Retorno	0	0	0	0	0
Custo de Infra-Estr.	308	165	150	113	70

Estagio

**Figura V.6**

**Tabela V.14**

Estágio	Equipamento	Nº de Terminais de Assinantes Instalados	Capac. de Comutação Instalada(Erl's)	Nº de Juntores Instalados	Ano de Implantação
1	UDM	2267	140	187	1990
2	UDM	2299	150	198	1990
3	UDM	2299	161	211	1990
4	UDM	2477	211	266	1990
5	UDM	2548	389	459	1990

Pode-se observar que todos os centros de fios anteriormente estudados possuíam capacidade de infra-estrutura instalada capaz de atender a demanda em cada estágio de planejamento. O centro de fios 307, por se tratar de um centro de fios novo, não possui nenhuma capacidade de infra-estrutura instalada por ocasião da sua ativação, o que acarretará despesas adicionais, que visam dotá-lo da infra-estrutura necessária para atender o acréscimo de demanda.

Deve-se ressaltar que a utilização de unidades remotas faz com que os custos dos equipamentos em cada estágio de planejamento incluam as seguintes parcelas adicionais:

- Custo de Equipamento de Ponta na Interligação ELR - Servidora. Este custo representa os recursos de ponta exigidos na interligação de ELR a centrais servidoras. É uma função do número de canais exigidos na interligação.
- Custo de Juntores. Esta parcela estima o custo adicional de juntores que os assinantes de ELR irão acarretar na central servidora.

### V.3.2. Cenário Digitalizador

O cenário digitalizador programa para cada centro de fios um cronograma de desativação parcial dos equipamentos analógicos, de maneira a garantir que a rede alvo a ser alcançada se encontre totalmente digitalizada ao final do horizonte de estudo.

A tabela V.15 apresenta sucintamente os resultados obtidos para este cenário.

**Tabela V.15**

Nome	Nó	1989	1990	1991	1992	1995	2000
CE-1	197	AN+TR	MULT	MULT	MULT	MULT	MULT+TRS
CE-2	54	AN	AN	MULT	MULT	MULT	MULT
CE-3	17	AN	TRA	TRA	TRA	TRA	TRA
CE-6	235	AN	AN+UDR	AN+TRS	TRS	TRS	TRS
BESSA	276	AN	AN+UDR	AN+TRS	TRS	TRS	TRS
DIND	280	AN	AN+UDR	AN+TRS	TRS	TRS	TRS
CBD	245	AN	AN+UDR	TRS	TRS	TRS	TRS
SRTA	259	AN	UDM	UDM	UDM	UDM	UDM
BANC	30	AN	AN+UDR	AN+TRS	TRS	TRS	TRS
BAY	325	AN	UDM	UDM	UDM	UDM	UDM
N	337	NOVO	NOVO	NOVO	UDM	UDM	MULT
N	177	NOVO	NOVO	NOVO	UDM	UDM	UDM
N	307	NOVO	UDM	UDM	UDM	UDM	UDM

O custo total de evolução da rede no cenário digitalizador é de US\$ 20142 x 10<sup>3</sup>.

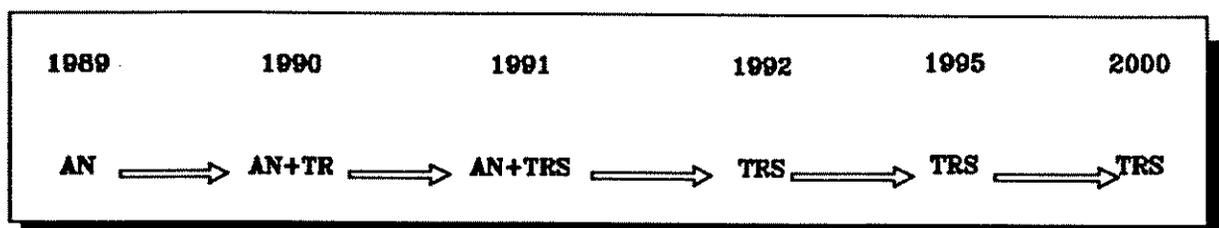
O custo total de evolução para o cenário digitalizador é 10% mais caro que o obtido para o cenário conservador.

Analisando-se os resultados, pode-se verificar que apenas os centros de fios que possuíam comutação analógica no ano horizonte tiveram as suas políticas de evoluções alteradas. Pode-se observar, também, que o sistema prefere antecipar a data de desativação das centrais analógicas, ao invés de esperar que estas sejam inteiramente retiradas pelo cronograma de desativações parciais.

É importante notar que a política de evolução obtida para o ano de 1990 é infactível. Esta infactibilidade se deve à existência de unidades remotas UDR sem que haja centrais servidoras às quais estas unidades remotas possam ser filiadas. Neste caso, o

planejador deve intervir alterando a política de evolução de algum centro de fio de forma a factibilizar a política de evolução da rede.

Caberá, ao planejador, definir qual estratégia de alteração adotar, bem como apontar em qual centro de fios esta será implementada. No presente caso optou-se por substituir uma das unidades remotas (UDR) por uma central digital Trópico R, de forma que esta possa ser empregada como mãe (central servidora). O critério que orientou o processo de escolha do centro de fios visou minimizar o acréscimo no custo de evolução da rede. A escolha recaiu sobre o centro de fios BANC-30. Sua nova trajetória ótima de evolução é apresentada na Figura V.7.



**Figura V.7**

O acréscimo total no custo de evolução da rede foi de aproximadamente US\$ 14000,00.

## V.4 Resultados da Fase de Filiação de Unidades Remotas

De posse dos resultados da Fase de Evolução Individual (Fase I), procedeu-se a execução da Fase de Filiação de Unidades Remotas correspondente ao Ano Horizonte.

Nesta etapa adotou-se os resultados relativos ao Cenário conservador anteriormente descrito.

Após a evolução individual de cada centro de fios, verifica-se que a rede possuirá, no ano horizonte, 5 (cinco) Unidades Remotas do mesmo tipo (UDM) e 3 (três) Centrais Servidoras (Figura V.8). Sendo assim, depara-se com o problema de filiar otimamente estas Unidades Remotas.

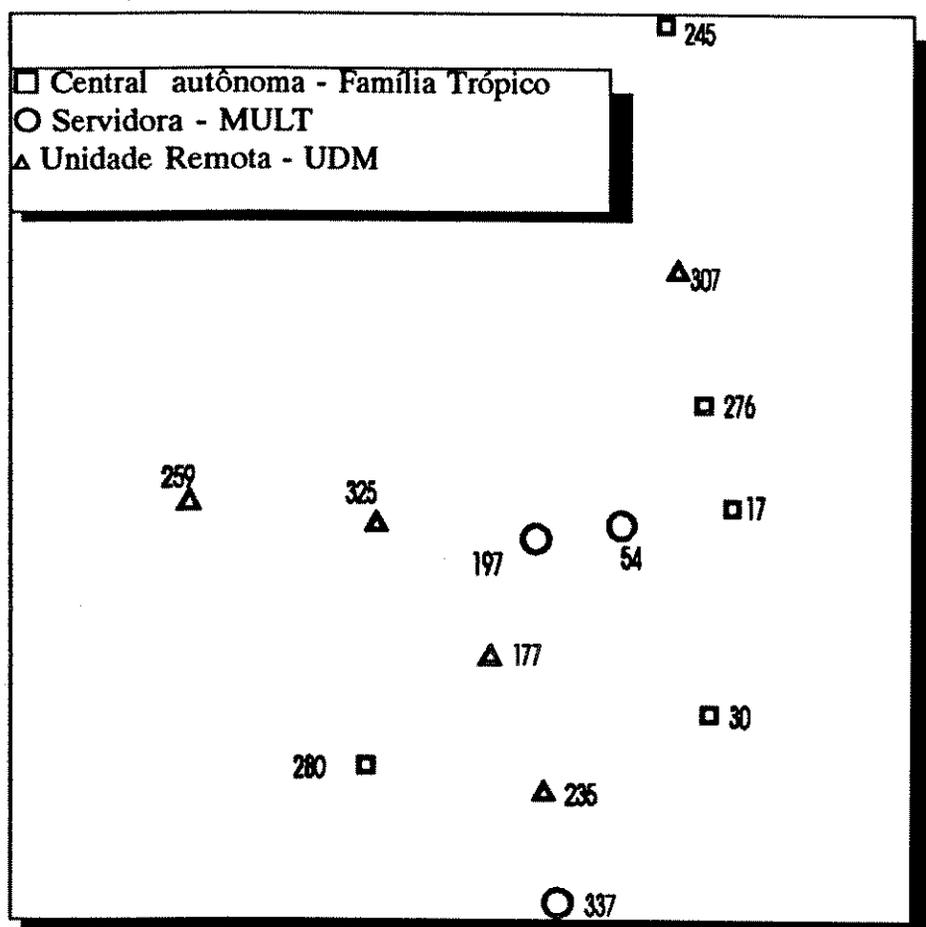


Figura V.8 Caso exemplo correspondente a Tabela V.1 - ano 2000

A política de filiação ótima obtida pelo algoritmo de otimização é apresentado na Figura V.9.

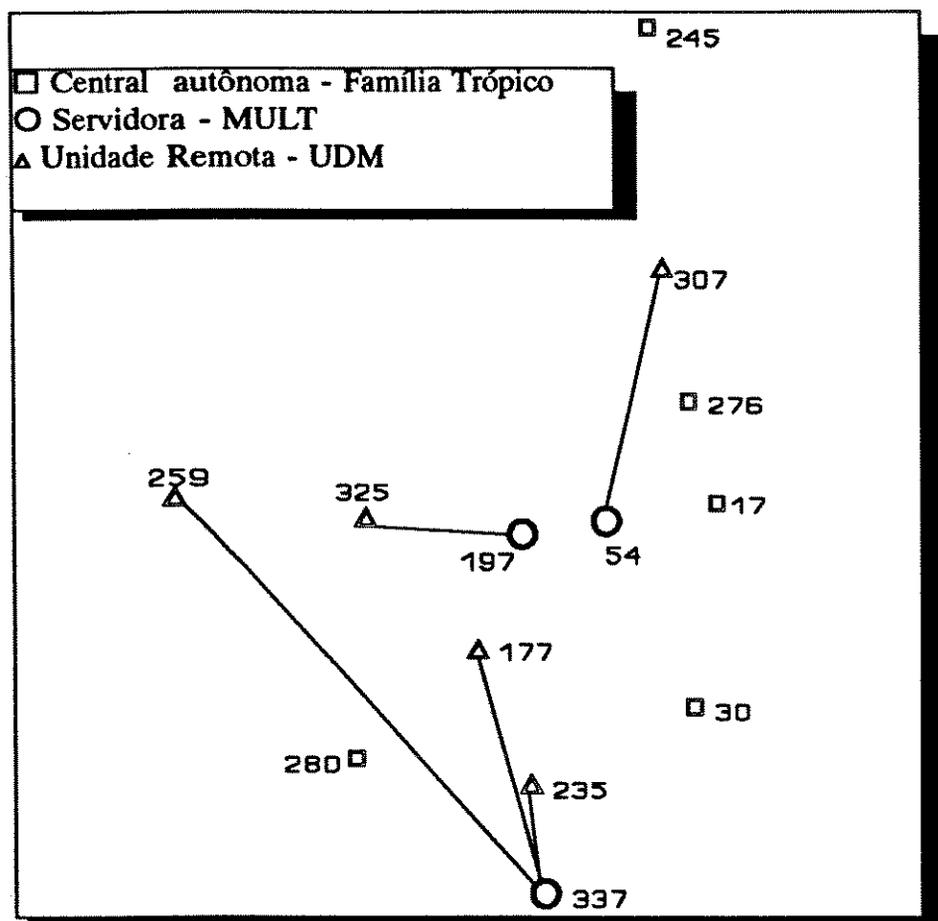


Figura V.9

O custo total desta política de filiação é US\$  $572 \times 10^3$ .

As seguintes parcelas de custos são consideradas na determinação da política de filiação ótima:

● **Custo de Comutação de Tráfego nas Centrais Servidoras:** representa os custos dos módulos de comutação adicionais que serão instalados nas centrais servidoras de maneira a atender a demanda de tráfego das unidades remotas.

● **Custo de Transmissão:** corresponde ao custo de rotear o tráfego das unidades remotas entre as centrais servidoras, e envolve os custos dos equipamentos para transmissão em fibra óptica, que é utilizado entre as centrais servidoras.

● **Custo do Cordão Umbilical:** corresponde ao custo de ligação das unidades remotas às centrais servidoras. É calculado como sendo uma função do tráfego e da distância. As ligações entre as unidades remotas e as centrais servidoras são feitas utilizando-se equipamentos para transmissão em PCM.

Os dados de custos de transmissão utilizados no caso exemplo são mostrados na Tabela V.16.

**Tabela V.16**

<b>Equipamentos para Transmissão em PCM</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Custo (US\$)</b>
Par-Km de cabo PCM	345,00
Regenerador <sup>11</sup>	815,00
<b>Equipamentos para Transmissão em Fibras Ópticas</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Custo (US\$)</b>
MCP-2	6971,00
MCP-3	9994,00
ELO-34	16291,00

Os dados de custos de comutação são idênticos àqueles mostrados na Tabela V.3.

Pode-se observar da Figura V.9 que o critério de filiação não segue a regra de alocação à central servidora mais próxima (Veja Tabela V.17).

<sup>11</sup> A distância entre os regeneradores é de 1,8 Km.

**Tabela V.17**

<b>Solução Ótima</b>		
<b>Unidade Remota</b>	<b>Filiado à Central Servidora</b>	<b>Mais Próxima?</b>
177	337	Não
235	337	Sim
259	337	Não
307	54	Sim
325	197	Sim

#### **V.4.1 O Efeito da Demanda Tráfego Entre Unidades Remotas**

Diz-se que determinado Interesse de Tráfego é dominante em relação aos demais (originados ou terminados) se sua magnitude é bem superior.

A seguir são analisados três casos, que apresentam diferentes composições de dominância:

- Caso 1: há apenas um tráfego dominante que é aquele entre as UR's 177 e 235.
- Caso 2: há dois tráfegos dominantes: aqueles existentes entre as UR's 177 e 235, e entre 235 e 307.
- Caso 3: ocorre quando relaxamos as restrições de capacidade das centrais servidoras do problema original.

Nos dois primeiros casos, os tráfegos totais de cada uma das UR's não foi alterado; sendo assim, o aumento de interesse de tráfego entre as UR's foi acompanhado de uma diminuição do interesse de tráfego das unidades remotas com os demais centros de fios.

As políticas de filiação ótimas para cada um dos casos, juntamente com a filiação obtida através do critério de alocação à central servidora mais próxima, são mostradas na Tabela V.18.

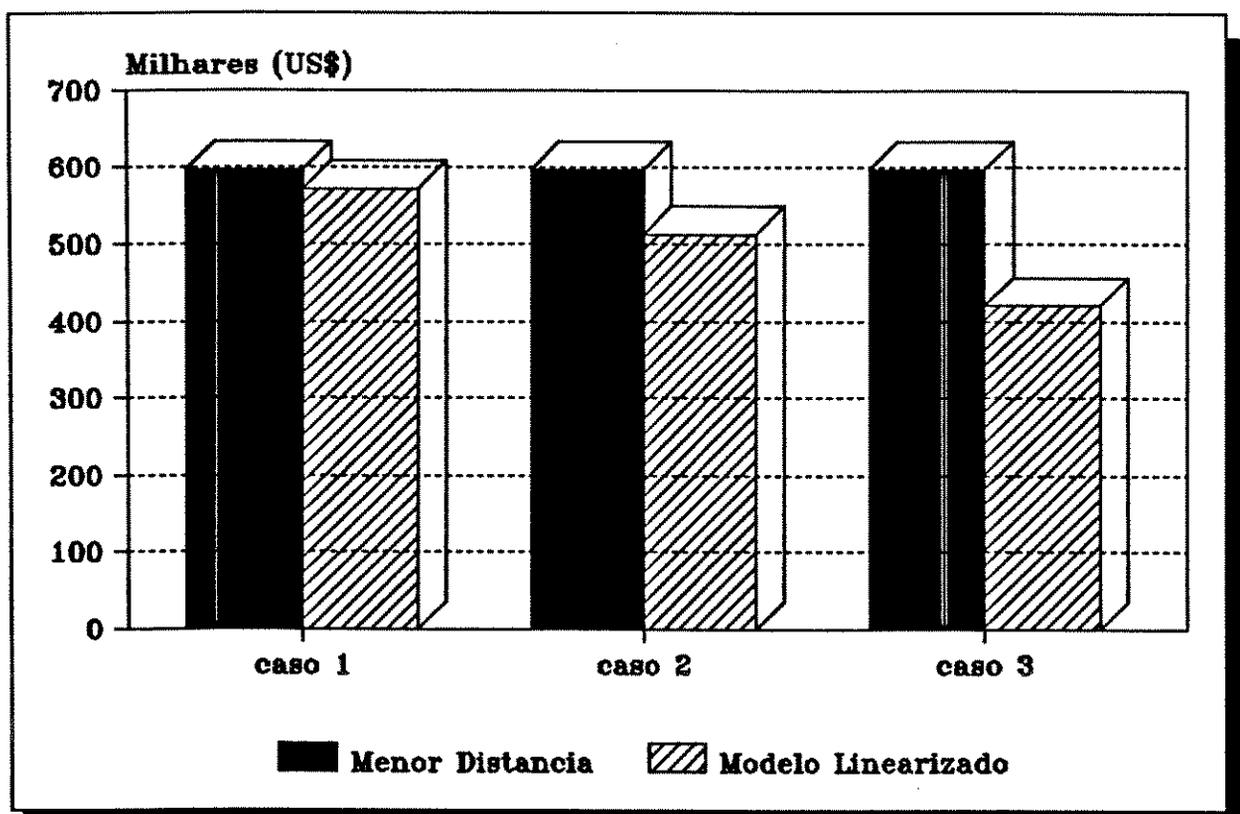
A Figura V.11 compara os custos obtidos pelo modelo linearizado com aqueles obtidos pelo critério de menor distância, para cada um dos casos.

**Tabela V.18**

Estudo dos Casos						
	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
Unidade Remota	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
177	337	197	337	197	197	197
235	337	337	337	337	197	337
259	337	197	54	197	197	197
307	54	54	337	54	197	54
325	197	197	54	197	197	197

•Método 1 = Modelo Linearizado.

•Método 2 = Método da Menor Distância.



**Figura V.10**

A figura V.11 deixa bem claro que qualquer metodologia de resolução, para o problema de Filiação de Unidades Remotas, que se baseie exclusivamente em um critério de distância tenderá a se afastar cada vez mais do ótimo, a medida que alguns tráfegos passam a dominar os demais.

Os resultados computacionais também demonstram o que o método otimizador tende a filiar as UR's que possuem alto interesse de tráfego entre si à mesma central servidora (mãe), de modo a formar grupos ("cluster") que possuam um grande interesse de tráfego intra-grupo e reduzindo o tráfego total a ser transmitido entre os grupos.

Os resultados, também sugerem, que pode ser economicamente atraente ampliar a capacidade de algumas centrais servidoras de forma a reduzir o número de centrais mães, formando assim clusters maiores.

---

## CAPÍTULO VI

# Conclusões e Sugestões de Melhoramentos

---

A metodologia descrita subdivide o problema de evolução dos centros de fios em dois subproblema hierarquicamente interligados:

● *Evolução Individual dos Centros de Fios.*

● *Filiação de Unidades Remotas.*

O subproblema de Evolução Individual é tratado utilizando-se uma abordagem via Diagrama de Transições de Estado, que é capaz de capturar o impacto econômico das decisões de ampliação e substituição de equipamentos em cada um dos centros de fios, e que tem por objetivo otimizar a alocação de recursos e minimizar os investimentos.

O subproblema de Filiação de Unidades Remotas tem como elemento chave um modelo matemático de programação inteira que explicitamente gera e analisa alternativas de alocação das Unidades Remotas às Centrais Servidoras.

A metodologia apresentada permite que se determine a melhor estratégia de evolução de uma rede, em termos dos equipamentos instalados e a serem instalados em cada um dos nós de comutação (estações, centros de fios) durante um período de planejamento, bem como possibilita a definição de uma Política de Filiação ótima para as Unidades Remotas. Estratégias alternativas podem ser facilmente geradas para diferentes composições dos parâmetros de custos, disponibilidade dos equipamentos, indisponibilidade dos equipamentos, vida útil dos equipamentos, opções de transições de estado, etc..., simplificando consideravelmente o trabalho do planejador e permitindo que este avalie diferentes cenários de evolução.

Esta metodologia apresenta uma série de avanços em relação aos trabalhos anteriores:

● A caracterização de ESTADO é obtida pelo número e tipo de equipamento de comutação existente no nó.

● Permite a utilização de até 3 equipamentos em cada nó de comutação.

● Admite tantas transições de estado quantos são os estágios de planejamento.

●Leva em consideração as tendências de crescimento da rede em termos de demanda de terminais de assinantes e de tráfego a ser comutado.

●Promove uma distribuição dos terminais de assinantes e do tráfego comutado entre os equipamentos existentes no nó, respeitando-se as respectivas capacidades dos equipamentos e maximizando a utilização dos recursos já instalados.

●Apresenta uma nova proposta de modelagem matemática para o problema de Filiação de Unidades Remotas, com a sua correspondente implementação computacional.

Finalmente, pode-se concluir que o sistema EVOL constitui uma ferramenta bastante versátil, poderosa que permite analisar e avaliar estratégias alternativas de evolução da comutação.

A seguir são apresentadas algumas melhorias potenciais que podem ser introduzidas no sistema EVOL visando enriquecer e aperfeiçoar o modelo básico:

●Integrar o sistema EVOL com os sistemas LOCEST e CROEST em termos de interfaces de dados.

●Adequar o sistema EVOL ao contexto das novas tecnologias (redes de transmissão síncrona), arquiteturas e serviços (redes inteligentes, RDSI) emergentes.

●Expandir o modelo matemático utilizado para abordar o problema de Filiação de Unidades Remotas de modo a que este possa ser empregado na resolução de outros problemas, como por exemplo o Problema de Atribuição de Tarefas em Redes de Computadores [15], [16], [17] e [18].

---

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] Araújo, E. & França, P.M. & Soares, S. & Tavares, H.M., (1983). "Optimal Location of Telephone Exchanges", *Proc. of 3rd IFAC/IFORS Symp. on Large Scale Systems*, Warsaw, Poland, North Holland.
- [2] Carlson Filho, C.M. & Tavares, H.M. & Fernandes, J.F. R., (1984). "Cronograma de Implantação de Centrais Telefônicas: Uma Nova Metodologia", *Anais do 2º Congr. Latino Americano de Investigación Operativa e Ingeniería de Sistemas*, B. Aires, Argentina, p.47-55.
- [3] Fraisleben, F., (1984). "Evolução Dinâmica de Cortes de Área em Redes Telefônicas Urbanas", *Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEE*.
- [4] Tiba, C.R. & Solon, L.R. & Uehara, J.M., (1981), "Otimização do Entroncamento Local-OTELO", *Relatório Interno, TELESP*.
- [5] Garcia, A.S., (1987). "Planejamento do Entroncamento em Redes Telefônicas Urbanas em Processo de Digitalização", *Tese de Doutorado, FEE/UNICAMP*.
- [6] Combot, J.P. & Epstein, N., (1979). "The Introduction of Digital Switching to the Local Network", *IEEE Trans. on Comm.*, Vol.COM-27, nº7, p.1056-1064.
- [7] Combot, J.P. & Tsui, M.S.C. & Weihmayer, R., (1981). "Optimal Digital Switching Introduction Into the Local Network", *IEEE Trans. on Comm.*, Vol.COM-29, nº10, p.1446-1454.

- [8] Nakagawa, J.M. & Garcia, A.S. & Tavares, H.M.F., (1990), "A Escolha Tecnológica na Expansão de Nós de Comutação em Redes Locais de Telecomunicações", **Anais do 8º Congr. Brasileiro de Automática**, Belém, Brasil, p.1245-1251.
- [9] Trindade, M.B., (1991), "Evolução Otimizada do Nó de Comutação de uma Rede Local", **Tese mestrado, UNICAMP/FEE**.
- [10] O'Kelly, M. E., (1987). "A Quadratic Integer Program for the Location of Interacting Hub Facilities", **European Journal of Operations Research**, Vol.32, p.393-404.
- [11] Helme, M.P. & Magnanti, T.L., (1989), "Designing Satellite Communication Networks by Zero-One Quadratic Programming", **Networks**, Vol.19, p.427-450.
- [12] Klincewicz, J.G., (1991), "Heuristic for the p-hub location problem", **European Journal of Operations Research**, Vol.53, p.25-37.
- [13] Garcia, A. S., (1978). "Método Dual Simplex para Problemas com Critério Linear por Partes", **Tese de Mestrado, IMECC/UNICAMP**.
- [14] Price, C.C. & Krishnaprasad, S., (1984). "Software Allocation Models for Distributed Computing Systems", **Proceedings 4th International Conference on Distributed Computing Systems**, p. 40-48.
- [15] Stone, H. S., (1977). "Multiprocessor Scheduling with the Aid of Networks Flow Algorithms", **IEEE Transactions on Software Engineering**, Vol.3, nº1, p.85-93.
- [16] Sofianopoulou, S., (1990). "Optimum allocation of Processes in a Distributed Environment: A Process-to-process Approach", **Journal of the Operational Research Society**, Vol.41, nº 4, p.329-337.
- [17] Ma, P. R. & Lee, E. Y. S. & Tsuchiya, M., (1982). "A Task Allocation Model for Distributed Computing Systems", **IEEE Transactions on Computers**, Vol. 31, nº1, p.41-47.

[18] Lo, V. M.,(1988)."Heuristic Algorithms for Task Assignment in Distributed Systems",  
**IEEE Transactions on Computers**, Vol. 37, nº11, p.1384-1397.

### **Referências Complementares**

[19] Madureira,M.C.G., (1991), "DIMERA - Dimensionamento Automático do Trópico - RA", **Relatório Técnico - ELEBRA TELECOM.**

[20] Moreno, A.O.,(1974). "Planejamento de Redes Telefônicas: Determinação do Circuito de Junção", **Tese Mestrado, ITA.**

[21] Carlson Filho, C.M. & Fernandes, J.F. R. & Tavares, H.M.F. & Yamakami, A., (1982).  
"ECIC - Programa Estimador do Custo de Interligação de Centrais", **Relatório Técnico, RT-11, Convênio UNICAMP/TELEBRÁS, Redes Digitais.**

[22] Kerner, M. & Lemberg, H.L. & Simmons, D.M., (1986)."An Analysis of Alternative Architectures for the Interoffice Network", **IEEE Journal on Select Areas in Comm.**, Vol.4, n.9, p.1404-1413

[23] Luby, J.F., (1990)."Survivability of the Public Switched Networks: Integration of Market, Switching, Transmission and OA&M Considerations in Network Design", **Proc. of XIII ISS**, Vol.4, p.164-172.

[24] Frank, R.J & Warkany, J.H. & Rensing, R.F., (1990). "Integrated Switching and Transmission Planning in Exchange Networks", **Proc. of XIII ISS**, Vol.5, p.165-170.

[25] Brungard & Grotjohann & Kallenberg, (1990), "Impact of New Transmission Technologies on Networks Architecture, Network Management and Economics", **Proc. of XIII ISS**, Vol.1, p.9-14.

- [26] Garcia, B.B. & Garcia, A.S, (1992), "Uma Abordagem Quadrática para a Filiação de Unidades Remotas", **Anais do 9º Congresso Brasileiro de Automática**, p.460-465.
- [27] Soriano, P. & Gendrau, M. & Soumi, F., (1991)."Optimizing Switching Evolution in a Multi-Service Environment".
- [28] Minoux, M., (1989). "Networks Synthesis and Optimum Networks Design Problems: Models, Solution Methods and Applications", **Networks**, Vol.19, p.313-360.
- [29] Luss, H., (1986)."A Heuristic for Capacity Expansion Planning with Multiple Facility Types", **Naval Research Logistics Quarterly**, Vol.33, p.685-701.
- [30] Finke, G. & Burkard, R. & Rendl, F., (1987)."Quadratic Assignment Problems", **Annals of Discrete Mathematics**, Vol.31, p.61-82.
- [31] Burkard, R., (1984)."Quadratic Assignment Problems", **European Journal of Operations Research**, Vol.15, p.283-289.
- [32] West, D. H., (1983), "Aproximate Solution of the Quadratic Assignment Problem", **ACM Transactions on Mathematical Software**, Vol.9, p.461-466.
- [33] Klincewicz, J.G., (1985)."A Large-Scale Distribution and Location Model", **AT&T Technical Journal**, Vol.64, nº 7, p.1705-1730.
- [34] Connolly, D. T., (1990)."An improved Annealing Scheme for the QAP", **European Journal of Operations Research**, Vol.46, p.93-100.
- [35] Salkin, H. N., (1975). **Integer Programming**, Addison-Wesley.

- [36] Diogo, J.M.B. & Clímaco, J.C.N. & Nordeste, P.M.N. & Craveirinha, J.M.F., (1989). "Dynamic Planning Model for Urban Telephone Networks and its Applications", **IEE Proceeding**, Vol.136, nº4, p.283-290.
- [37] Aikens, C.H., (1985). "Facility Location Models for Distribution Planning", **European Journal of Operations Research**, Vol.22, p.263-279.
- [38] Cruz, G.C. & Hisiger, R.S. & Wolff, R.S, (1989). "Strategic Telecommunications Network Planning in the Context of Emerging Technologies, Architectures, and Services", **IEEE Journal on Select Areas in Comm.**, Vol.7, n.8, p.1198-1206.
- [39] Kaku, B.K. & Thompson, G.L, (1986). " An Exact Algorithm for the General Quadratic Assignment Problem", **European Journal of Operations Research**, Vol.23, p.382-390.
- [40] Klincewicz, J.G. & Luss, H. & Yu, C., (1988), "A Large-scale Multilocation Capacity Planning Model", **European Journal of Operations Research**, Vol.34, p.178-190.