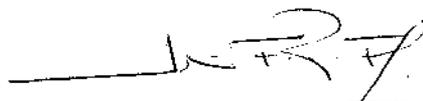


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Este exemplar corresponde à redação
final da tese defendida por Carlos Magnus
Carlson Filho e aprovada pela comissão julgadora em
20/12/1984.



PLANEJAMENTO DE SISTEMAS TELEFÔNICOS:
PLANO DE INTERLIGAÇÃO E CRONOGRAMA DE
IMPLANTAÇÃO DE ESTAÇÕES URBANAS

CARLOS MAGNUS CARLSON FILHO

Orientador: Prof. Dr. Jurandir F.R. Fernandes

016/85

Co-orientador: Prof. Dr. Hermano de M.F. Tavares

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Campinas, da Uni
versidade Estadual de Campinas-
UNICAMP - como parte dos requi
sitos exigidos para obtenção do
Título de MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

1984

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Este trabalho foi realizado através do Convênio UNICAMP/TELEBRÁS
024A/83 e contou com o apoio financeiro da CAPES.

A meus pais,
Carlos Magnus e
Maria Conceição.

AGRADECIMENTOS

A todos que participaram, de alguma maneira, da realização deste trabalho. Muito especialmente, a;

- . Jurandir, Hermano, Akebo e Anilton;
- . Flávio, Nakagawa e demais amigos da UNICAMP e da TELEBRÁS;
- . Fábio de Lima e Edson Bim;
- . Maria Júlia, Edson e Luiz, e
- . Magda, Maninho e Bando.

RESUMO

São abordadas duas etapas do planejamento de longo prazo dos sistemas telefônicos, quais sejam o estabelecimento de Planos de Interligação e Cronogramas de Implantação das estações urbanas.

Na primeira parte do trabalho, descreve-se o problema do entroncamento e se propõe uma metodologia de dimensionamento e roteamento dos troncos necessários à interligação das estações. O objetivo é estimar a rede de troncos para um ano horizonte a fim de permitir comparações entre alternativas de localização das estações.

A segunda parte dedica-se à obtenção do cronograma. A sistemática proposta inclui passos heurísticos que reduzem as dimensões do problema, viabilizando sua resolução de maneira simples e rápida. São adotados critérios tais que a solução final encontrada seja ao menos sub-ótima.

Experiências computacionais e resultados obtidos para os dois problemas são também relatados.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - PLANEJAMENTO DE SISTEMAS TELEFÔNICOS URBANOS	1
1. Introdução	2
2. Metodologia de Planejamento Adotada	2
3. Conceitos Importantes	6
4. Modelamento da Rede Telefônica	9
5. Comentários	12

PRIMEIRA PARTE

PLANO DE INTERLIGAÇÃO DE ESTAÇÕES TELEFÔNICAS

CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
1. Introdução	15
2. Descrição do Problema	15
3. Algumas Abordagens	18
4. Localização e Interligação de Estações	19
5. Comentários	20
CAPÍTULO III - SISTEMÁTICA DE RESOLUÇÃO	21
1. Introdução	22
2. Abordagem Básica	22
3. Tráfego Entre Estações	23
4. Dimensionamento da Rede de Troncos	32
5. Roteamento de Troncos	38
6. Custos Associados	45
7. Comentários	48

CAPÍTULO IV - EXEMPLO DE APLICAÇÃO	50
1. Introdução	51
2. O Programa ECIC	51
3. Rede-Exemplo	55
4. Planos de Interligação Obtidos	57
5. Comentários	60
 CAPÍTULO V - CONCLUSÕES	 61

SEGUNDA PARTE

CRONOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO DE ESTAÇÕES TELEFÔNICAS

CAPÍTULO VI - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	65
1. Introdução	66
2. Descrição do Problema	66
3. Duas Abordagens	67
4. Comentários	69
 CAPÍTULO VII - SISTEMÁTICA DE RESOLUÇÃO	 70
1. Introdução	71
2. Enfoque Básico	71
3. Estagiamento	72
4. Formulação Matemática Após o Estagiamento	74
5. Hierarquização das Estações	81
6. Estabelecimento da Hierarquia	84
7. Avaliação das Alternativas	88
8. Reflexão Sobre o Resultado	93

9. Mudança de Estágio	94
10. Implantações Modularizadas	94
11. Comparação Entre Cronogramas Diversos	102
12. Comentários	103
CAPÍTULO VIII - EXEMPLO DE APLICAÇÃO	104
1. Introdução	105
2. O Programa CRONOS II	105
3. Rede-Exemplo	109
4. Implantações Não-Modularizadas	111
5. Implantações Modularizadas	132
6. Comentários	136
CAPÍTULO IX - CONCLUSÕES	138
APÊNDICE A - ENCAMINHAMENTOS ALTERNATIVOS	141
1. Introdução	142
2. Método do Equivalente Aleatório	143
3. Regra do Triângulo	149
APÊNDICE B - FASE DE TRANSIÇÃO	155
1. Introdução	156
2. Idéia Fundamental	156
3. Surgimento de Estação	157
4. Desaparecimento de Estação	159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163

CAPÍTULO I

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS TELEFÔNICOS URBANOS

1. INTRODUÇÃO

A união de fatores como o aumento do número de assinantes e a possibilidade de mudanças tecnológicas torna necessária a existência de uma metodologia de planejamento da expansão de redes telefônicas que possibilite análises de alternativas de evolução do sistema a médio e longo prazo.

Tal preocupação resultou na assinatura de um Convênio de Pesquisas UNICAMP/TELEBRÁS, patrocinado pela última, com o objetivo de deseenvolver e aperfeiçoar ferramentas de auxílio ao planejamento de sistemas telefônicos.

Dois resultados destas pesquisas, relativos a redes urbanas, são apresentados neste trabalho.

2. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO ADOTADA [1]

De modo geral, o planejamento da expansão de redes telefônicas urbanas tem por objetivo estabelecer a estratégia de atendimento da demanda a custo mínimo, durante um período de tempo pré-fixado (por exemplo, um horizonte de 20 anos). São características da estratégia estabelecida: localização e implantação de novas estações, ampliações das já existentes, evolução da rede de assinantes, interligação das estações, dentre outras.

Um modelo matemático que contemple todas estas fases tem enorme dimensão, inviabilizando-se sua resolução pelos recursos computacionais atualmente disponíveis. A sistemática adotada para contornar esta dificuldade consiste em decompor o problema em parcelas menores, através da hierarquização dos objetivos, sem comprometer a qualidade da solução final encontrada.

Três subproblemas principais são definidos:

- *localização de estações telefônicas (onde localizar);*
- *cronograma de implantação das estações (quando implantar); e*
- *evolução dinâmica de cortes de área (como evoluir).*

Um quarto subproblema, voltado para a incorporação às redes de uma inovação tecnológica, consiste em determinar a alocação de concentradores (o concentrador é um equipamento que permite a ligação de assinantes a estações utilizando-se menos pares de fios do que o número desses assinantes, ao contrário do procedimento atual, em que cada par é utilizado por uma única linha telefônica).

Os subproblemas são resolvidos separadamente, interagindo do segundo a Fig. I.1.

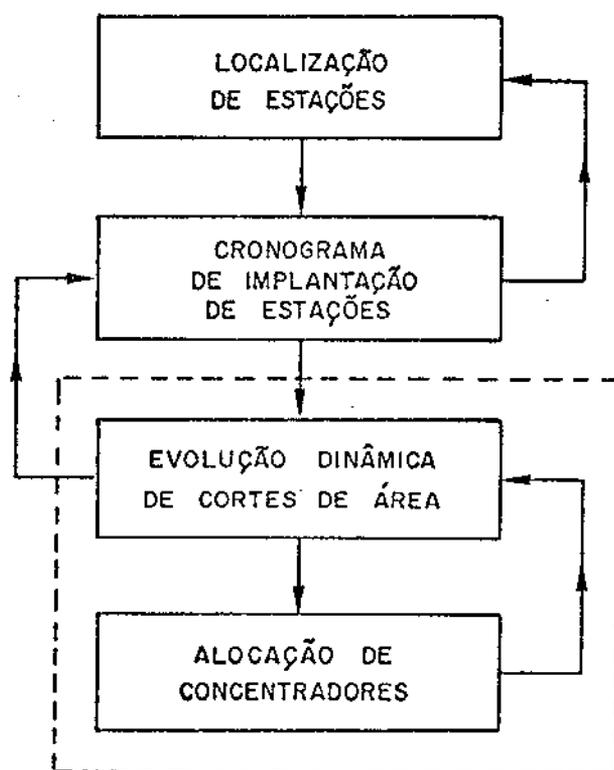


Fig. I.1 - Interação dos subproblemas

Segue-se uma descrição sucinta de cada subproblema.

. localização de estações [2]

É preciso determinar, a partir do início do período de

planejamento, a configuração da rede no ano horizonte: localização de novas estações, ampliação das já existentes e sua interligação, a custo mínimo. O procedimento é estático, desconsiderando-se os estágios intermediários do período.

Dado o grande porte deste subproblema, nova decomposição é feita: a interligação das estações é obtida à parte.

. cronograma de implantação [3]

Tendo em vista a configuração da rede no ano horizonte, são estabelecidas as datas de implantação das novas estações, entre as várias alternativas possíveis. O procedimento é dinâmico, considerando-se que as implantações ocorrem nos estágios de planejamento.

. evolução dinâmica de cortes de área [5]

De posse do cronograma de implantação das estações, é preciso definir a filiação dos assinantes às estações ao longo do período de planejamento, visando aproveitar os investimentos já realizados e atingir a configuração da rede no ano horizonte. É também um procedimento dinâmico.

. alocação de concentradores [4]

Em cada estágio é analisada a conveniência da instalação de concentradores na rede, comparando-se a economia de rede primária obtida e os custos do equipamento. A análise é efetuada após a delimitação das áreas de influência das estações, sendo os resultados transferidos aos estágios seguintes.

A Fig. I.2 apresenta um diagrama da interação dos subproblemas descritos para um horizonte de planejamento de dezes seis anos, dividido em quatro subperíodos. Inicialmente, a partir da rede de 1984 obtém-se uma "fotografia otimizada" da rede do

ano 2000: decide-se pela implantação de seis estações (localização). Em seguida, conforme indicado no canto inferior dos retângulos referentes aos estágios, são estabelecidas as datas de implantação das estações (cronograma). Define-se as zonas de filiação das estações em cada um dos estágios (evolução), analisando-se também a possibilidade da instalação de concentradores.

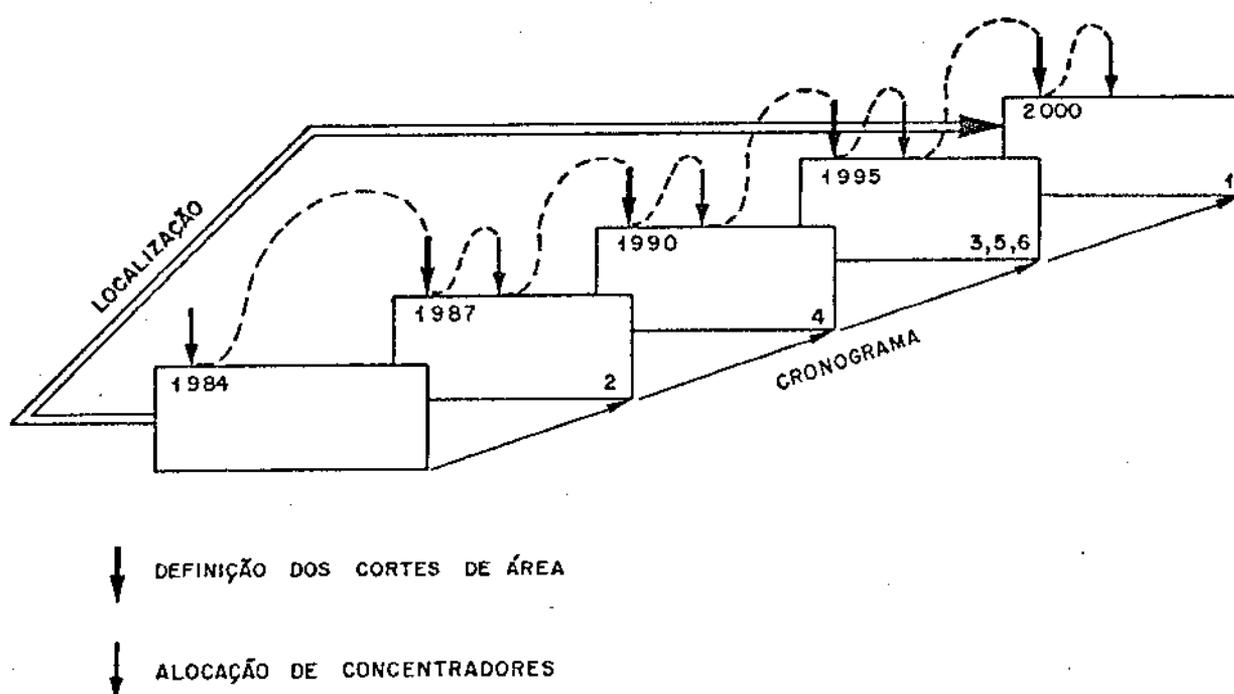


Fig. I.2 - Exemplo de interação dos subproblemas no tempo

O trabalho aqui apresentado divide-se em duas partes , abordando dois subproblemas distintos. A primeira parte refere-se à interligação das estações no ano horizonte, enquanto a segunda trata do cronograma de implantação dessas estações.

3. CONCEITOS IMPORTANTES

Seguem-se algumas considerações e definições encontradas ao longo deste trabalho.

3.1. Terminologia Técnica

São definidos alguns termos técnicos de telecomunicações, relativos a sistemas urbanos [6].

- . *central* - centro local de comunicação telefônica que abriga equipamentos de comutação.
- . *assinante* - usuário do sistema telefônico, atendido sempre por uma central.
- . *estação telefônica* - conjunto de uma ou mais centrais instaladas num mesmo prédio.
- . *zona de filiação* ou *zona de influência* de uma estação - área geográfica determinada pelos assinantes atendidos pela estação.
- . *ponto de controle* ou *armário de distribuição* - dispositivo destinado a abrigar blocos de conexão que possibilitam a interligação dos cabos da rede primária com os da rede secundária.
- . *rede primária* - rede de cabos, em geral subterrâneos, que liga os pontos de controle às estações.
- . *rede secundária* - rede de cabos, em geral aéreos, que liga os assinantes aos pontos de controle.
- . *rede de troncos* - rede de cabos que interliga as estações.

- . *estação tandem* - conjunto de uma ou mais centrais cuja finalidade única é comutar troncos.
- . *duto* - tubulação subterrânea onde são instalados os cabos telefônicos.
- . *galeria* - conjunto de dutos que interligam dois pontos de controle.
- . *disponibilidade* - termo utilizado para caracterizar os dispositivos implantados (e portanto disponíveis) no início do período de planejamento, tanto na rede primária como nas estações.
- . *par de fios* - condutores metálicos que ligam o assinante à sua estação.

3.2. Componentes de uma Rede Telefônica Urbana

Um sistema telefônico urbano compõe-se basicamente de:

- . rede secundária;
- . rede primária;
- . rede de troncos e
- . estações.

Cada assinante é filiado a uma estação, ligando-se inicialmente a um ponto de controle pela rede secundária. Este ponto de controle, que concentra um certo número de assinantes, conecta-se à estação através da rede primária. As estações, por sua vez, interligam-se por meio da rede de troncos.

A Fig. 1.3 mostra um exemplo de sistema telefônico urbano.

Este trabalho não leva em conta a existência da rede secundária, por se tratar de parcela não otimizável no nível de detalhamento desejado.

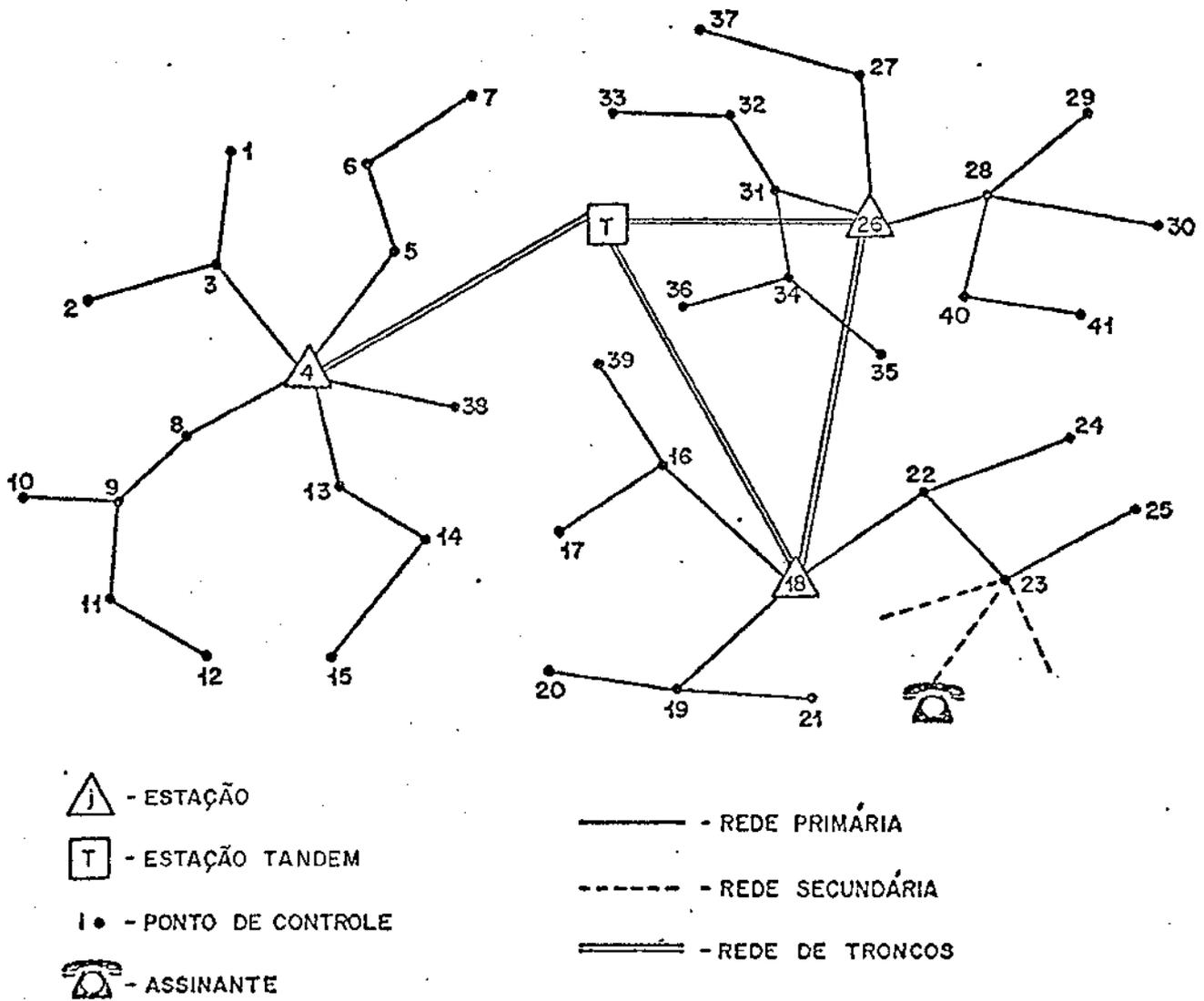


Fig. I.3 - Exemplo de sistema telefônico urbano

3.3. Termos Específicos de Planejamento

É conveniente definir alguns termos relativos ao planejamento.

- . *período de planejamento* - intervalo de tempo abrangido pelo estudo.

- . ano base ou ano atual - ano em que se inicia o período de planejamento.
- . ano horizonte ou ano meta - ano em que se encerra o período de planejamento.
- . subperíodo de planejamento - subdivisão do período de planejamento. Os subperíodos não precisam ter a mesma duração; seu número está ligado à precisão de sejadá no estudo e à disponibilidade de dados.
- . estágio de planejamento - limite entre os subperíodos.

A Fig. I.4 ilustra estes conceitos.

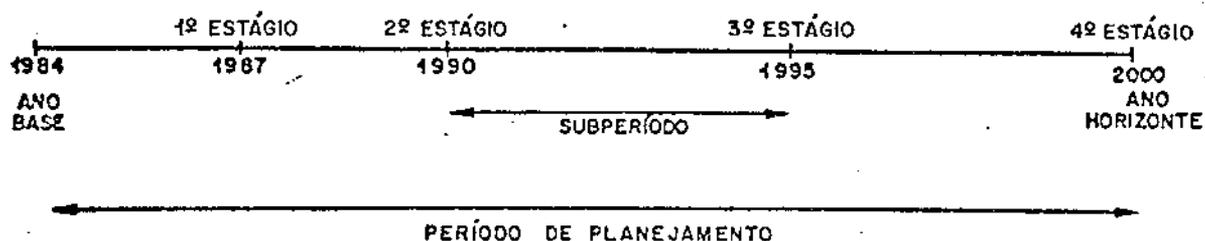


Fig. I.4 - Exemplo de período de planejamento

4. MODELAMENTO DA REDE TELEFÔNICA

Na resolução dos subproblemas anteriormente descritos é interessante poder trabalhar com a rede real, levando-se em consideração todos os investimentos já efetuados no sistema telefônico, tais como disponibilidade de pares de fios e dutos nas galerias, equipamentos de comutação já instalados e capacidade ociosa das estações, principalmente.

Um modelo de grafos é capaz de satisfazer tais requisitos, sendo por isso o adotado no desenvolvimento deste trabalho.

4.1. Modelo de Grafos

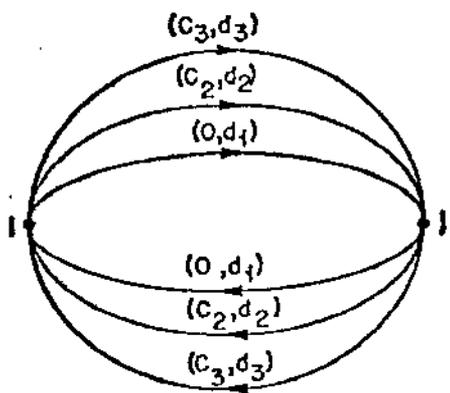
Segue-se a apresentação das diferentes partes que compõem o sistema telefônico em estudo e suas representações no modelo adotado.

. pontos de controle

São representados pelos nós do grafo. A todo nó associa-se um número de assinantes, relativo a cada estágio de planejamento; os nós são portanto fontes de assinantes.

. rede primária

Deve-se considerar as galerias da rede primária existentes no ano base e aquelas possíveis de serem implantadas até o final do ano horizonte. Assim, cada galeria é representada por três tipos de arcos: um com capacidade igual ao número de pares de fios já existentes, outro com capacidade igual à ociosidade dos dutos e um terceiro, de ampliação. A cada arco associa-se um custo, relativo ao seu significado. Como não se sabe a princípio a orientação dos fluxos no grafo, criam-se arcos orientados nos dois sentidos, conforme ilustrado na Fig. I.5.



- c_2 - custo de instalar um par de fios num duto ocioso
- c_3 - custo de instalar um par de fios num duto novo
- d_1 - número de pares instalados
- d_2 - ociosidade (em pares de fios) dos dutos
- d_3 - ampliação

Fig. I.5 - Representação de uma galeria da rede primária

Caso a galeria não exista no ano base, seu modelo possui somente os arcos de ampliação. Supõe-se, em qualquer caso, que as ampliações podem assumir quaisquer valores.

As modularidades dos cabos da rede primária, bem como as diferentes bitolas dos fios, são ignoradas, por não apresentarem influências marcantes num planejamento a longo prazo e complicarem demasiadamente o modelo.

Os arcos representativos da ociosidade de dutos são descartados do modelo, por simplicidade. Considerá-los, entretanto, não acarreta dificuldade.

. estações

A exemplo dos pontos de controle, também as estações são indicadas por nós no modelo de grafos. A diferença reside no fato de que a elas não se associam demandas de assinantes, mas sim capacidade de atendimento. Sendo o total das capacidades das estações no mínimo igual ao total de assinantes, é preciso criar um nó artificial, o nó de fechamento, ligado às estações através de arcos também artificiais, capacitados e orientados, os arcos de fechamento. O papel desempenhado pelos arcos e nó de fechamento varia com o subproblema a ser resolvido; neste trabalho, dois modelos distintos serão detalhados oportunamente.

. 4.2. Algumas Definições

Da teoria de otimização em grafos algumas definições importantes são utilizadas neste trabalho.

- . *arco básico* - corresponde à variável básica em programação linear.
- . *arco não-básico* - corresponde à variável não-básica em programação linear.
- . *ciclo* - sequência de arcos formando uma cadeia fechada.

- . *árvore* - grafo conexo e sem ciclos que corresponde a uma solução básica em programação linear.

Por um abuso de linguagem, ao longo do texto a palavra *rede* pode aparecer com o significado de *grafo*. Quando necessário, será explicitado.

5. COMENTÁRIOS

Este trabalho aborda dois subproblemas relativos ao planejamento da expansão de redes telefônicas urbanas, quais sejam: o estabelecimento de um Plano de Interligação de estações num certo ano horizonte e a obtenção de um Cronograma de Implantação de estações ao longo do tempo. Para tanto, é promovida a divisão do texto em duas partes distintas.

Da primeira parte, referente ao Plano de Interligação, constam quatro Capítulos, nos quais se descreve o problema, propõe-se uma sistemática de resolução, apresenta-se um exemplo e tecem-se comentários. Um Apêndice é utilizado para esclarecimento de alguns tópicos.

A segunda parte obedece à mesma estrutura, reportando-se ao Cronograma de Implantação de estações.

1ª PARTE

PLANO DE INTERLIGAÇÃO DE ESTAÇÕES TELEFÔNICAS

CAPÍTULO II

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

1. INTRODUÇÃO

Um sistema telefônico urbano deve permitir a comunicação entre todos os seus usuários, mesmo aqueles situados em zonas de filiação diferentes. Para tanto, é necessário que as diversas estações da rede estejam de alguma maneira conectadas ; assim, uma das etapas do planejamento do sistema é determinar o *Plano de Interligação* (ou *Entroncamento*) das estações, ao longo do tempo ou em algum estágio pré-definido.

Neste Capítulo caracteriza-se o problema de estabelecimento do Plano de Interligação, descrevendo-se as principais variáveis envolvidas e os objetivos a atingir. Algumas abordagens são comentadas.

Ressalte-se que sistemas interurbanos estão além do interesse deste trabalho.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Estabelecer o Plano de Interligação equivale a determinar - sob um critério de custo mínimo e qualidade de serviço prestado - a rede de canais (ou troncos) que escoará as chamadas entre as diversas estações*. Este problema é dividido em outros três, resolvidos na sequência:

- . *encaminhamento*: obtém a estrutura da rede de troncos, definindo a forma de interligação das estações (se diretamente ou por caminhos alternativos, por exemplo);
- . *dimensionamento*: encontra o número de troncos necessário ao atendimento da demanda, considerados o encaminhamento obtido e a qualidade do serviço desejada e

* Lembrando que uma estação pode abrigar várias centrais de comutação, por vezes tecnicamente desiguais, é mais rigoroso considerar o Plano de Interligação a nível de centrais. A simplificação adotada, entretanto, não prejudica o bom entendimento do texto.

. roteamento: estabelece os caminhos físicos por onde passarão os troncos, sob critérios de custo e segurança.

A Fig. II.1, que esquematiza uma rede telefônica urbana, será utilizada no detalhamento de cada um destes três subproblemas.

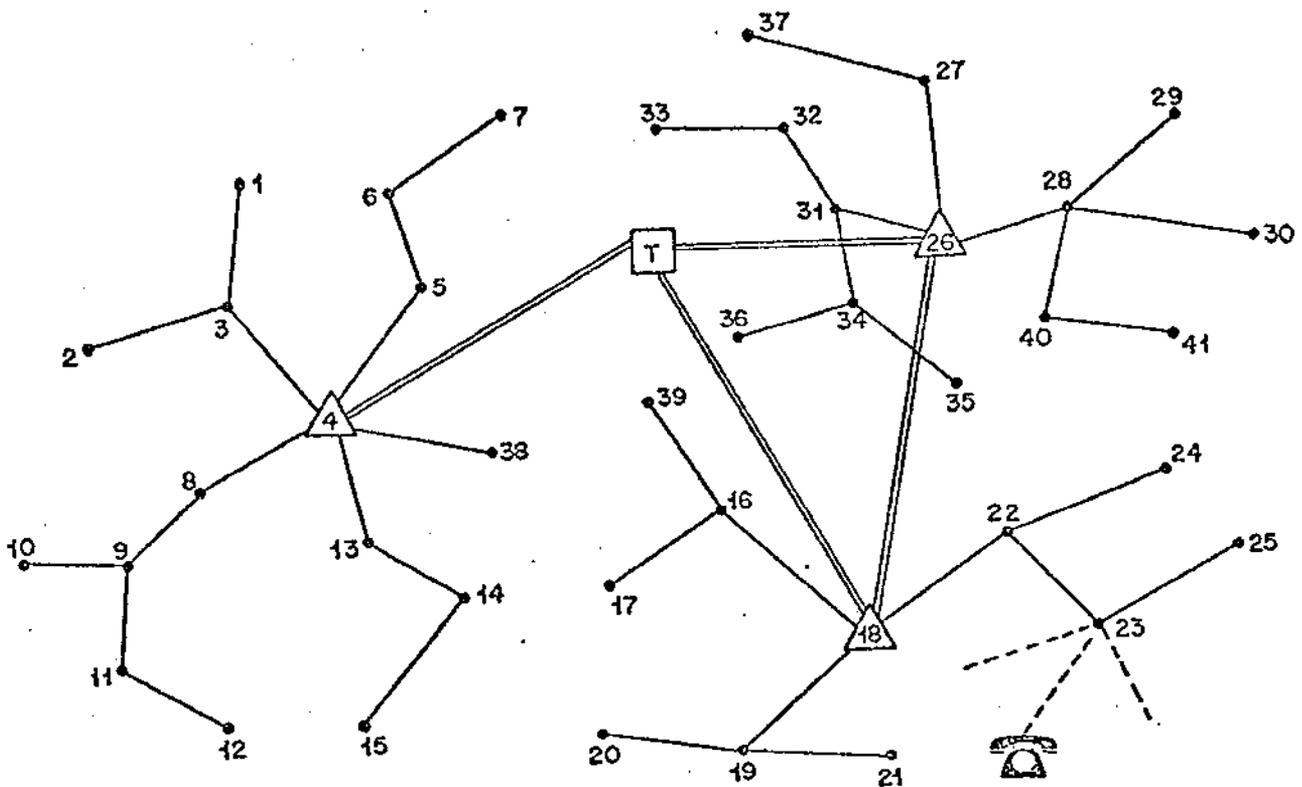


Fig. II.1 - Rede telefônica urbana

. encaminhamento

Imagine-se que um assinante ligado ao nó 23 (filiado à estação 18) deseja falar com outro ligado ao nó 37 (filiado à estação 26). Embora em princípio existam várias maneiras de se estabelecer este contato, apenas algumas delas são razoáveis.

Admitindo-se a não-existência da estação tandem, a chamada deve ser cursada pelo feixe de troncos que une as duas estações.

ções em questão, caracterizando uma *rota direta*. Neste caso, as chamadas não-completadas - bloqueadas por falta de meios - são perdidas (por hipótese não se organizam filas de espera de atendimento; se a chamada não se completa, é descartada do sistema).

Se a estação tandem existe, mais duas maneiras razoáveis se apresentam: escoar a chamada unicamente via tandem ou fazer uso de um processo misto, qual seja inicialmente oferecer a chamada ao caminho direto (neste caso denominada *rota de alto uso*) e, em caso de bloqueio, tentar o caminho alternativo, via tandem (*rota final*).

O encaminhamento estabelece portanto a forma pela qual as chamadas são escoadas; esta decisão deve obedecer normas já consagradas no Sistema TELEBRÁS [7]. O elemento variável fica por conta da eventual existência de tandens, seu número e localização.

. dimensionamento

Uma vez conhecido o encaminhamento, é preciso dimensionar o número de troncos necessários ao escoamento das chamadas. Para fins de planejamento, cada tronco compreende:

- . equipamento de comutação nas estações origem e destino da chamada (juntores); e
- . meio de transmissão (pares de fios).

O dimensionamento da rede de troncos depende basicamente do interesse de conversação entre os assinantes (expresso pelo *tráfego*) e de critérios econômicos, tais como custo da rota e eficiência na utilização dos troncos. Depende também do nível de qualidade que se deseja para o serviço prestado. Este nível, denominado *grau de serviço*, é definido como sendo a proporção de chamadas oferecidas ao sistema que são perdidas, sendo fixado por normas internacionais.

Outro fator influente no dimensionamento é a característica técnica dos equipamentos das estações, descrita pela acesibilidade.

. roteamento

Determinar sobre a rede telefônica o caminho físico a tribuído aos troncos é preocupação do roteamento. Em geral é utilizado o critério de custo, embora o aspecto da segurança possa também ser considerado [8 ,9].

Os três subproblemas resultam num modelo de grande porte, o qual apresenta característica não-lineares. Tal modelo deve sofrer simplificações que viabilizem sua resolução.

3. ALGUMAS ABORDAGENS

Alguns tratamentos destinados à obtenção do Plano de Interligação - ou parte dele - são descritos a seguir.

3.1. Programa OTELO [10]

Trata-se de sofisticada ferramenta computacional disponível no Sistema TELEBRÁS. Destina-se exclusivamente ao dimensionamento da rede de troncos em sistemas urbanos, trabalhando a nível de centrais e admitindo encaminhamentos alternativos. Os custos de entroncamento são linearmente proporcionais ao número de troncos.

O programa requer como dados principais o encaminhamento, a matriz de tráfego e de distâncias entre centrais, custos e dados de equipamentos. A metodologia utilizada é bastante rigorosa, permitindo levar em conta inclusive características de restrições de equipamentos nas centrais.

Diferentes propostas de encaminhamento podem ser avaliadas através de sucessivas execuções do programa OTELO.

3.2. Programa PORRUS [9]

É a implementação computacional de um modelo de otimiza

ção do roteamento em redes urbanas, levando em conta aspectos de segurança da transmissão. Tal modelo, de Programação Linear por Partes, tem estrutura de problemas com *limite superior generalizado* (GUB), sendo bastante flexível, a ponto de permitir competição entre meios analógicos e digitais de transmissão, emendas de cabos, limitação do número de cabos em galerias, dentre outras facilidades.

Uma extensão do modelo para aplicação a roteamento de longo prazo, evolutivo, resultou no programa PORULP.

3.3. Outros [11]

Diversos outros programas tratam do problema (ou sub-problemas) do Plano de Interligação, seja em redes urbanas ou interurbanas. Pode-se destacar: SETTER, CIJULO, OTIRE, CIJUIU, MACAN, ROT, TOTJUN, entre outros.

Raj [12] apresenta uma sistemática de planejamento de sistemas interurbanos, sob o ponto de vista da interligação.

4. LOCALIZAÇÃO E INTERLIGAÇÃO DE ESTAÇÕES

A primeira etapa da metodologia de planejamento descrita no Capítulo I e adotada ao longo deste trabalho visa determinar, para um ano horizonte, a quantidade de novas estações na rede, suas localizações e capacidades. O entroncamento pode influir no resultado final obtido. Entretanto, dadas as dimensões do problema composto, é preciso separá-lo, a fim de permitir sua resolução.

Assim, a etapa de localização é abordada em primeiro lugar; sobre este resultado é necessário realizar um estudo, ainda que simplificado, do Plano de Interligação das estações. Tal estudo é o objeto de interesse deste trabalho.

A intenção é fornecer diretrizes para o planejamento da rede de troncos no ano horizonte considerado e possibilitar a comparação de diversas alternativas de localização com base nos

custos de entroncamento.

5. COMENTÁRIOS

Tendo em vista o grande porte do problema de obtenção do Plano de Interligação das estações de uma rede urbana, uma primeira simplificação consiste em separá-lo em três subproblemas : encaminhamento das chamadas, dimensionamento da rede de troncos e seu roteamento.

Em geral o encaminhamento é obtido à mão, mesmo para redes de grande porte, uma vez que o número de alternativas razoáveis não é muito grande e existem normas rígidas sobre o assunto. Em outras palavras, as metodologias existentes a princípio não consideram o encaminhamento uma variável otimizante do problema.

Para o dimensionamento e roteamento dos troncos diversas abordagens são disponíveis, com maior ou menor rigor de modelagem; entretanto, todas exigem volume substancial de dados e geralmente resultam em estudos detalhados, a nível de engenharia e projeto.

A proposta deste trabalho, contrariamente, é desenvolver uma sistemática de planejamento que estime a rede de troncos num dado horizonte, propiciando meios simples e rápidos de comparação entre alternativas de localização de estações. As simplificações a serem feitas devem apresentar coerência com os objetivos desejados e garantir o nível qualitativo do resultado.

CAPÍTULO III

SISTEMÁTICA DE RESOLUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Desenvolve-se neste Capítulo uma sistemática de obtenção do Plano de Entroncamento de estações telefônicas num dado ano horizonte. A idéia é permitir, na etapa de localização das estações nesse horizonte, análises do ponto de vista do entroncamento. Dado o grande porte do problema, bem como suas características não-lineares, algumas hipóteses e considerações são feitas, de modo a se obter uma boa estimativa da rede de troncos no ano horizonte (dimensão, topologia e custo).

A metodologia aborda todos os passos necessários ao estabelecimento do Plano de Interligação; construção de matrizes de tráfego, dimensionamento e roteamento de troncos. Apenas o encaminhamento é suposto conhecido.

2. ABORDAGEM BÁSICA

Dada uma configuração de estações, obter seu Plano de Interligação significa resolver três subproblemas: encaminhamento, dimensionamento e roteamento, já descritos no Capítulo II. O primeiro envolve a determinação da necessidade, número e localização ótima de estações tandem, objetivo além deste trabalho. Assim, o encaminhamento de chamadas na rede é suposto conhecido; esta simplificação é razoável, uma vez que estabelecer um encaminhamento de boa qualidade é relativamente fácil. É preciso lembrar, entretanto, que na comparação entre diferentes configurações a forma de escoamento das chamadas pode assumir importância, eventualmente levando a resultados distorcidos. Para evitar isso, é conveniente adotar um encaminhamento comum às configurações, qual seja admitir que todas as estações se interligam entre si; esta situação (denominada *rede em malha*), é bastante comum em sistemas de pequeno porte, tornando-se mais rara à medida que o aumento de tamanho recomenda o uso de tandem para diminuir os custos totais (*rede mista*). Os possíveis desvios cometidos, no entanto, são comuns a todas as configurações testadas: na comparação interessam mais os valores relativos do

que os absolutos. A metodologia prevê, portanto, redes em malha ou mistas.

Uma vez estabelecido o encaminhamento das chamadas, é possível dimensionar os troncos, em função principalmente da matriz de tráfego entre as estações e do grau de serviço a considerar nas rotas. Considerando-se que nem sempre é conhecida a matriz de tráfego para a configuração a ser testada, a metodologia aqui apresentada prevê o seu cálculo.

Observe-se que, dadas as finalidades da metodologia e o longo prazo considerado, é mais conveniente trabalhar a nível de estações e não de centrais, reduzindo bastante a dimensão do problema sem prejuízo substancial do resultado. Por isso, o dimensionamento dos troncos baseia-se no tráfego entre as estações.

Dimensionados os troncos, é preciso roteá-los; o critério básico é utilizar caminhos mínimos e desconsiderar a segurança do roteamento. São necessários então dados da rede telefônica, bem como a localização das estações da configuração em estudo.

Definido o Plano de Interligação, resta o cálculo dos custos a ele associados, que compreendem parcelas fixas (juntadores nas estações) e variáveis (pares de fios).

Os próximos itens enfocam os diversos aspectos da metodologia, detalhando hipóteses simplificadoras e procedimentos adotados.

3. TRÁFEGO ENTRE ESTAÇÕES

Para o dimensionamento dos troncos é preciso conhecer, entre outras coisas, a matriz de tráfego entre estações. No ano horizonte, não se dispõe de tal matriz, a menos que um estudo à parte seja efetuado. Descartando-se esta possibilidade, torna-se necessário construir a matriz, tarefa que se detalha neste item.

O procedimento baseia-se no fato de a rede telefônica estar dividida em zonas de tráfego (Z_T 's), que são regiões de mesmo tráfego médio (não são consideradas diferentes classes de assinantes).

As Z_T 's independem de quaisquer propostas de localização de estações. Determinar a matriz de interesse de tráfego entre Z_T 's (matriz T_T) para o ano horizonte é o primeiro passo. Esta matriz é quadrada, não-simétrica, completamente cheia (uma vez que todos os assinantes podem se comunicar), estando os seus elementos em Erlang por assinante ao quadrado. Por hipótese, ou essa matriz é conhecida ou se admite que tanto as Z_T 's como a taxa média de tráfego por assinante (ou seja, a matriz T_T) mantêm-se constantes ao longo do tempo. Neste caso, a matriz de tráfego entre Z_T 's pode facilmente ser calculada a partir da matriz T_T .

Entretanto, tal matriz não tem utilidade prática: necessita-se, na verdade, da matriz de tráfego entre estações (entre zonas de filiação - matriz T_F). Assim, é preciso:

- estabelecer a zona de filiação de cada uma das estações;
- identificar, na zona de filiação, nós de diferentes zonas de tráfego; e
- construir a matriz T_F .

3.1. Zonas de Filiação das Estações

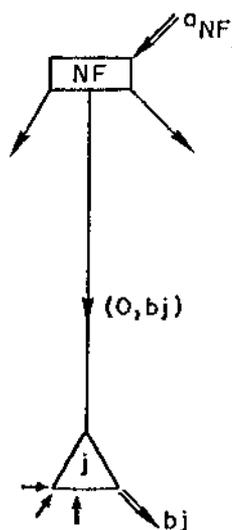
A entrada em funcionamento das estações previstas para o ano horizonte torna necessário alocações (ou realocações) de assinantes, realizadas do modo mais econômico possível, para delimitar a área de influência (zona de filiação) das estações. A partir da localização dessas estações e de suas capacidades previstas, é preciso atender os assinantes do ano horizonte a mínimo custo, o que sugere a adoção de um *programa de fluxo de custo mínimo* (PFCM) para resolução do problema.

. modelo de grafos e formulação do PFCM

O grafo adotado para representação da rede telefônica possui, para pontos de controle e galerias, as características mostradas no Capítulo I deste trabalho. Resta apenas detalhar o modelo de estação telefônica. Enquanto no grafo os pontos de controle são representados por nós fontes de assinantes, os nós que indicam estações são sumidouros, simbolizando as capacidades de atendimen

to de cada estação. Um nó artificial - o nó de fechamento - é utilizado no grafo para prover o balanceamento entre o total de capacidades das estações e o número total de assinantes. Cada estação é ligada ao nó de fechamento por um arco também artificial, o arco de fechamento, que escoo fluxo para completar sua capacidade de atendimento (o fluxo no arco de fechamento indica portanto a ociosidade da estação).

A. Fig. III.1 detalha o modelo, representando uma estação j qualquer. Nota-se que o limitante superior do arco de fechamento, embora considerado igual à capacidade de atendimento da estação, pode ser diminuído a fim de caracterizar um atendimento mínimo obrigatório ou controlar a redução no número de assinantes hoje atendido.



- NF - nó de fechamento
- j - estação
- a_{NF} - desbalanço total da rede
- b_j - capacidade de atendimento da estação

Fig. III.1 - Modelo adotado para as estações

Sejam os conjuntos:

K - arcos da rede, exceto os de fechamento

G - nós da rede, exceto o de fechamento

J - estações

I(i) - arcos que chegam ao nó i, i ∈ G, exceto o arco de fechamento

E(i) - arcos que saem do nó i, i ∈ G

Pode-se formular o problema de fluxo de custo mínimo da seguinte maneira:

$$\text{Min } \sum_{k \in K} c_k x_k \quad (1)$$

$$\text{sujeito a } \sum_{k \in I(j)} x_k - \sum_{k \in E(j)} x_k + y_j = b_j - a_j, \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{k \in I(i)} x_k - \sum_{k \in E(i)} x_k = -a_i, \forall i \in (G-J) \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = \sum_{j \in J} b_j - \sum_{i \in G} a_i = a_{NF} \quad (4)$$

$$0 \leq x_k \leq d_k, \forall k \in K \quad (5)$$

$$0 \leq y_j \leq b_j, \forall j \in J \quad (6)$$

onde:

c_k = comprimento do arco k

a_i = número de assinantes próprios do nó i

d_k = capacidade em pares de fios do arco k

b_j = capacidade de atendimento da estação j

e as variáveis são:

x_k = variável de fluxo do arco k

y_j = variável de fluxo do arco de fechamento da estação j

Procura-se então, respeitando o balanço de fluxo em todos os nós da rede - restrições (2), (3) e (4) - e a capacitação dos arcos - restrições (5) e (6) - proceder à filiação ótima dos assinantes sob o critério da distância.

. ponto de controle repartido

Na solução ótima do PFCM, é possível que alguns nós sejam ligados a mais de uma estação (ou seja, assinantes de um mesmo nó filiados a estações diferentes). Diz-se, neste caso, que o nó (ponto de controle) está repartido. A repartição dos nós pode acontecer devido ao esgotamento da capacidade de uma estação (arco de fechamento no limitante inferior) ou à sua tendência de não angariar assinantes (arco de fechamento no limitante superior, indicando ociosidade máxima).

A repartição de pontos de controle provoca a união e descaracterização das áreas de influência das estações envolvidas. Uma vez que a metodologia proposta neste trabalho exige zonas de filiação bem definidas, é preciso decidir sobre a efetiva filiação do nó repartido (bem como de eventuais famílias* a ele ligadas). Isto deve ser feito cuidadosamente, visando um afastamento mínimo da solução ótima do PFCM e também pequena variação dos assinantes ligados a cada estação.

Fraislebem [5] detalha aspectos teóricos e descreve diversos casos de repartição de pontos de controle, além de propor sistemáticas de tratamento do problema, aplicadas à rede ótima do PFCM. Tais sistemáticas são adotadas pela metodologia aqui desenvolvida.

O tratamento das repartições proposto por Fraislebem não considera as eventuais disponibilidades de pares de fios da rede. Neste caso, modelado por arcos de custo (comprimento) nulo, o número de repartições aumenta bastante, tornando a análise dos casos muito difícil.

* Na solução ótima do PFCM, o nó repartido pode servir de passagem a assinantes de outros nós (a família). A alocação destes assinantes também faz parte do problema a ser resolvido.

Assim, o PFCM anteriormente formulado não trabalha com as disponibilidades. No entanto, se existem pares de fios já enterrados na rede, o número de assinantes das estações pode mudar, em virtude do aproveitamento desses pares de fios. Um procedimento alternativo é determinar à parte o número ótimo de assinantes das estações, através de um PFCM bastante rigoroso. Em seguida, um PFCM simplificado (sem disponibilidades) é resolvido, para permitir a determinação das zonas de influência das estações. A rede submetida a este PFCM, no entanto, tem seus arcos de fechamento limitados superior e inferiormente, de modo a não permitir excessiva variação no número de assinantes das estações (por exemplo, $\pm 10\%$). Note-se que alguma variação deve ser permitida, uma vez que o tratamento dispensado aos nós repartidos altera levemente a filiação original.

3.2. Matriz de Tráfego

Suponha-se que uma rede está dividida em N_{Z_T} zonas de tráfego; conhece-se a matriz de interesse de tráfego (T_T) entre Z_T 's - dimensão ($N_{Z_T} \times N_{Z_T}$) - para o ano horizonte. Cada nó da rede pertence a uma única zona de tráfego Z_T .

Uma vez estabelecida a filiação das estações (N_{Z_F} zonas de filiação), cada nó passa a ser atendido por uma única estação, (ou seja, pertence a uma zona de filiação Z_F). É preciso calcular a matriz de tráfego entre Z_F 's, que depende de seu número de assinantes (conhecido) e do interesse de tráfego entre elas (em geral desconhecido, uma vez que as Z_T 's não coincidem com as Z_F 's necessariamente).

Dispõe-se do número de assinantes de cada Z_T . Pode-se então construir a matriz A_{TF} de assinantes por Z_T e Z_F , de dimensões ($N_{Z_T} \times N_{Z_F}$). Para tanto, definam-se os seguintes subconjuntos:

E_ℓ - nós da rede pertencentes à zona de tráfego ℓ

F_p - nós da rede pertencentes à zona de filiação p

A matriz A_{TF} é construída de maneira que:

$$A_{TF}(\ell, p) = \sum_{i \in [E_{\ell} \cap F_p]} a_i$$

A matriz de tráfego entre estações (zonas de filiação) T_F resulta agora do produto:

$$T_F = (A_{TF})' \cdot T_T \cdot A_{TF}$$

sendo cada elemento (unidade: Erlang) dado por:

$$T_F(p, q) = \sum_{\ell=1}^{N_{ZT}} \left\{ A_{TF}(\ell, p) \cdot \sum_{m=1}^{N_{ZT}} [A_{TF}(m, q) \cdot T_T(\ell, m)] \right\}$$

Seja por exemplo a rede simbolizada pela Fig. III.2, onde se tem 4 zonas de tráfego e 3 zonas de filiação. Indicam-se também os elementos não-nulos da matriz A_{TF} .

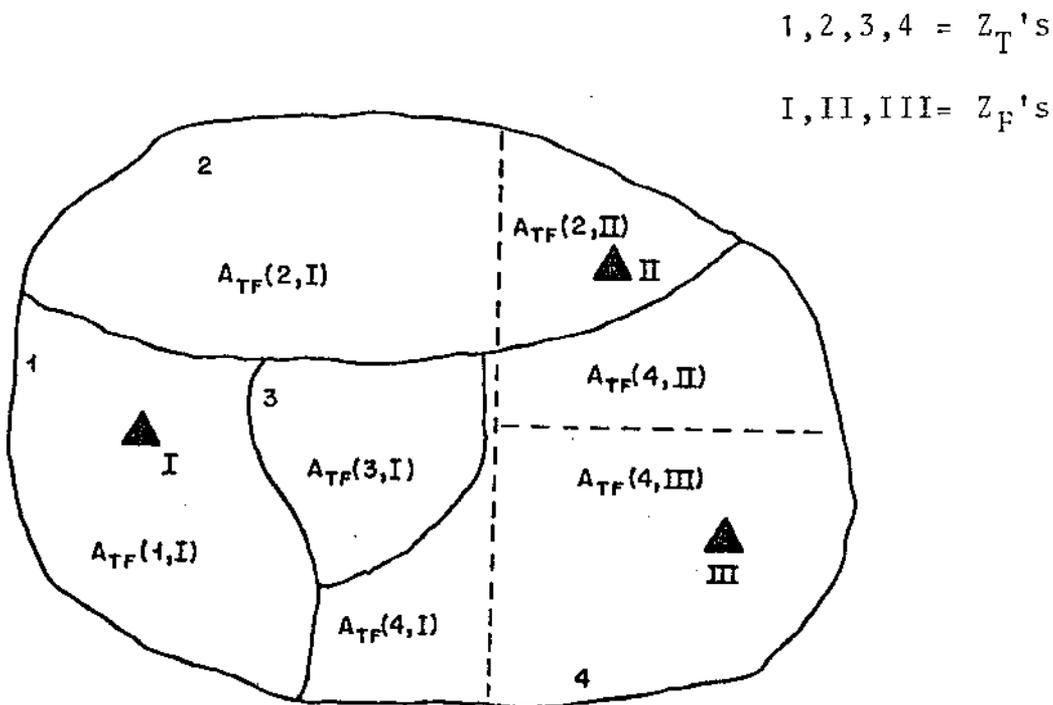


Fig. III.2 - Divisão da rede em Z_T 's e Z_F 's

A matriz de interesse de tráfego T_T disponível é (elementos em Erlang por assinante ao quadrado):

	1	2	3	4
1	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}
2	t_{21}	t_{22}	t_{23}	t_{24}
3	t_{31}	t_{32}	t_{33}	t_{34}
4	t_{41}	t_{42}	t_{43}	t_{44}

o objetivo é construir a matriz T_F de tráfego entre Z_F 's (elementos em Erlang):

	I	II	III
I	$T_{I I}$	$T_{I II}$	$T_{I III}$
II	$T_{II I}$	$T_{II II}$	$T_{II III}$
III	$T_{III I}$	$T_{III II}$	$T_{III III}$

Cada um dos elementos desta matriz corresponde a uma ligação da Fig. III.3.

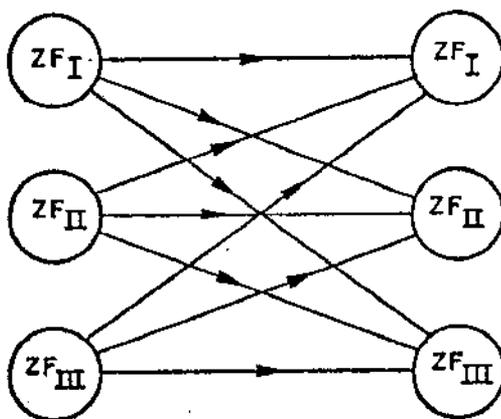
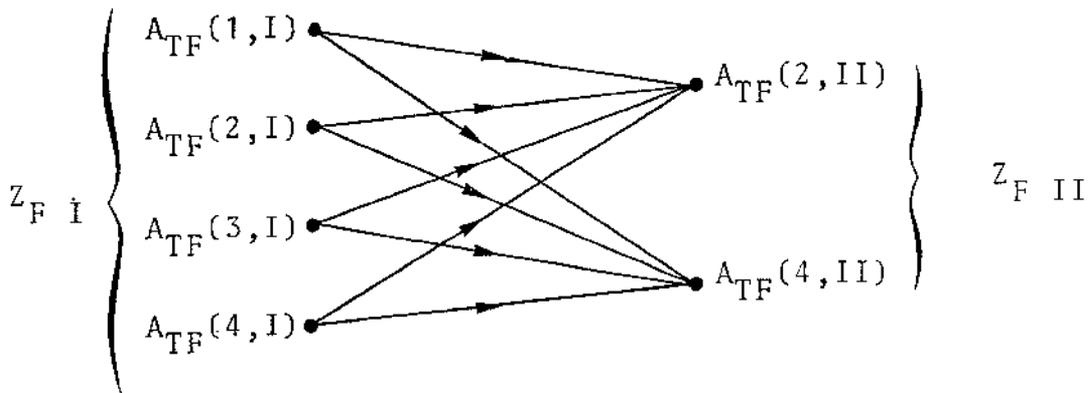


Fig. III.3 - Conversações possíveis à rede

Demonstra-se o cálculo do elemento $T_{I II}$, correspondente à ligação $Z_{FI} \rightarrow Z_{FII}$. Esta ligação deve permitir a comunicação entre todos os assinantes envolvidos. Assim:



Sendo $A_{TF}(1,II) = A_{TF}(3,II) = 0$, tem-se:

$$\begin{aligned}
 T_{I II} = & A_{TF}(1,I) [A_{TF}(2,II) \cdot t_{12}] + A_{TF}(1,I) \cdot [A_{TF}(4,II) \cdot t_{14}] + \\
 & A_{TF}(2,I) [A_{TF}(2,II) \cdot t_{22}] + A_{TF}(2,I) [A_{TF}(4,II) \cdot t_{24}] + \\
 & A_{TF}(3,I) [A_{TF}(2,II) \cdot t_{32}] + A_{TF}(3,I) [A_{TF}(4,II) \cdot t_{34}] + \\
 & A_{TF}(4,I) [A_{TF}(2,II) \cdot t_{42}] + A_{TF}(4,I) [A_{TF}(4,II) \cdot t_{44}] .
 \end{aligned}$$

3.3. Comentários

O método aqui apresentado para obtenção da matriz de tráfego entre estações no ano horizonte de planejamento não é rigoroso, devido às simplificações e hipóteses assumidas. Contudo, dadas as finalidades de metodologia, tais simplificações são muito razoáveis, sendo os eventuais desvios compensados pela velocidade conferida ao processo.

Tratamentos mais rigorosos de matrizes de tráfego são discutidos por Girão e Cardoso [13].

4. DIMENSIONAMENTO DA REDE DE TRONCOS

Conhecidas a forma de encaminhamento das chamadas e a matriz de tráfego entre as estações, é possível efetuar o dimensionamento da rede de troncos.

4.1. Hipóteses Assumidas

De forma simplificada, pode-se dizer que tentativas de chamadas entre estações devem ser escoadas por um conjunto de troncos; se alguma chamada não encontra os meios disponíveis para se completar, duas coisas podem acontecer: a chamada permanece no sistema, numa fila, à espera de um tronco vago, ou é simplesmente descartada. Este último caso - *sistemas de perda* - é o mais comum, sendo assim o previsto neste trabalho.

Dentre os diversos modelos existentes, escolheu-se para representação do sistema o modelo de Erlang para sistemas de perda [14] com infinitas fontes e número de troncos finito, que possui como características principais:

- a taxa de ocorrência de chamadas é constante (distribuição poissoniana de razão λ), independentemente do número de troncos ocupados;
- as chamadas também são independentes e
- os tempos de ocupação dos troncos de saída têm distribuição exponencial negativa de razão μ e são independentes entre si.

Admite-se que na existência de um tronco não-ocupado qualquer chamada oferecida ao sistema é escoada (*acessibilidade plena*).

Erlang determinou para estes sistemas a probabilidade de uma chamada encontrar todos os troncos ocupados (probabilidade de perda da chamada, ou grau de serviço):

$$B(N,a) = \frac{\frac{a^N}{N!}}{\sum_{k=0}^N \frac{a^k}{k!}}$$

onde:

$$a = \frac{\lambda}{\mu} \text{ é o tráfego oferecido ao sistema e}$$

N é o número de troncos do sistema.

Entretanto, freqüentemente se deseja a expressão inversa, isto é, conhecido a e especificado $B(N,a)$, determinar o número N de troncos necessários. Obter tal expressão não é muito simples [15]; utilizam-se então curvas e tabelas que relacionam a , N e $B(N,a)$. Uma expressão recorrente pode ser também aproveitada:

$$B(N+1,a) = \frac{a \cdot B(N,a)}{N+1 + a \cdot B(N,a)},$$

com $B(0,a) = 1$.

Um extrato de tabela relacionando a e N é apresentado no Quadro III.1, onde se supõe grau de serviço 1% e se tomam valores de N múltiplos de 20. Indica-se também uma hipotética proporcionalidade entre a e N (β corresponde à inclinação da reta que lineariza a relação $a \times N$ em cada intervalo considerado).

Verifica-se que, uma vez fixada a perda, a relação tráfego - troncos tende a ser linear quando os valores de a e N aumentam. Se a metodologia proposta neste trabalho utiliza tráfegos oferecidos entre estações (e não entre centrais), é de se esperar valores altos tanto para tráfego como para troncos, justificando-se a adoção de um coeficiente (variável com a perda) que relacione linearmente a e N . Os erros cometidos são maiores para pouco tráfego e pequeno número de troncos, onde os custos envolvidos são menores e portanto facilmente compensáveis. Dado o caráter estimativo da solução desejada, a metodologia assume então a linearidade tráfego-troncos.

N	a(Er1)	$\beta = \frac{\Delta a}{\Delta N}$
20	12,0	0,600
40	29,0	0,850
60	46,9	0,895
80	65,4	0,925
100	84,1	0,935
120	103,0	0,945
140	122,0	0,950
160	141,2	0,960
180	160,4	0,960
200	179,7	0,965

$B(N,a) = 1\%$

Quadro III.1 - Relação tráfego-troncos para perda fixada

4.2. Rotas Diretas

Para fins da metodologia aqui apresentada rota direta é aquela que interliga duas estações sem o auxílio de estações tan dens, tem perda especificada e não oferece encaminhamento alterna tivo para chamadas bloqueadas.

O dimensionamento do número de troncos de uma rota dire ta qualquer torna-se bastante simples, a partir das hipóteses an teriormente enumeradas. De fato, conhecendo-se a perda especifica da na rota (ou o fator de proporcionalidade tráfego-tronco), a quantidade de troncos decorre do tráfego oferecido à rota, forne ci do pela matriz T_F . É importante frisar que a rota é suposta orien tada, isto é, troncos que escoam tráfego de uma estação A para B não o podem fazer no sentido inverso (e o fato de uma rota $A \rightarrow B$ ser direta não implica em que a rota $B \rightarrow A$ também o seja).

Recorde-se a necessidade já comentada de um encaminhamento

comum a várias alternativas de localização de estações, traduzido pela avaliação de uma rede de troncos em malha, isto é, todas as estações interligando-se por meio de rotas diretas. Adote-se, por simplicidade, uma única perda para todas as rotas (e conseqüentemente um único fator de proporcionalidade tráfego-tronco para o sistema). O dimensionamento dos troncos resulta na matriz N_T - dimensão $(N_{ZF} \times N_{ZF})$ - de elementos

$$N_T(p,q) = \frac{1}{\beta} \cdot T_F(p,q) ,$$

onde β é o fator de proporcionalidade utilizado (Erlang por tronco). Obviamente, a matriz N_T é composta de elementos inteiros; quando tal não ocorre, devem-se fazer aproximações para os inteiros imediatamente superiores.

4.3. Rotas Alternativas

Quando ao tráfego bloqueado em uma rota direta é oferecido outro caminho de escoamento, diz-se que existe encaminhamento alternativo. Este se caracteriza pela existência de uma terceira estação, a tandem, com finalidade única de comutar troncos.

A Fig. III.4 representa um caso de encaminhamento alternativo.

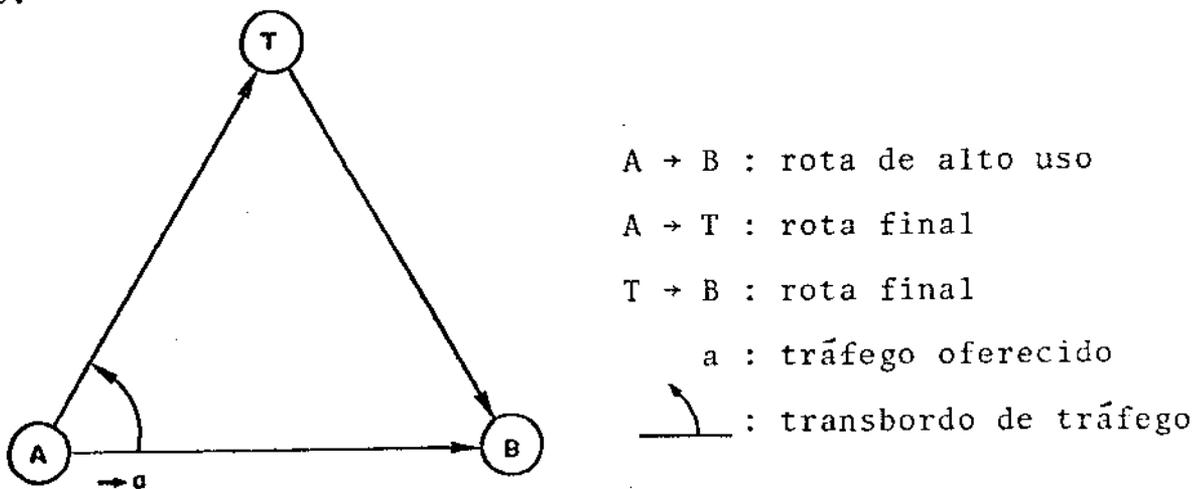


Fig. III.4 - Encaminhamento alternativo

Numa rota direta de baixa perda, se o tráfego oferecido é constante os troncos trabalham com eficiência baixa (a eficiência é definida como sendo a razão entre o tráfego efetivamente escoado e o número de troncos da rota). Mais ainda, se a escolha dos troncos para atendimento ao tráfego é sequencial (segue uma certa ordem), os últimos trabalham com eficiência inferior à média.

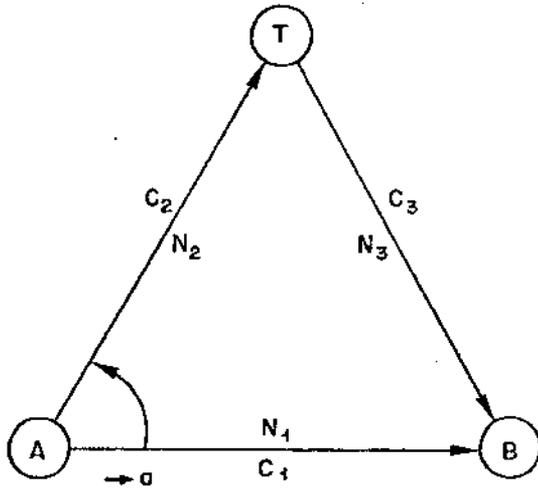
Retirar troncos da rota direta significa aumentar a eficiência do sistema. Em compensação, a perda também aumenta. A rota alternativa prevista - em geral de maior custo por tronco, devido ao seu maior comprimento e mais equipamentos de comutação na tandem - só é econômica quando trabalha também com alta eficiência, o que se consegue aproveitando-a para escoamento de outras parcelas de tráfego excedente (mesma origem e vários destinos).

Nestas condições a rota direta torna-se uma *rota de alto uso*, dada a sua grande eficiência. Quando as rotas alternativas constituem a última opção para o tráfego excedente (ou seja, se não houver troncos disponíveis a chamada é perdida), são denominadas *rotas finais*.

Neste trabalho, permite-se às chamadas no máximo um encaminhamento alternativo.

Um problema decorrente da utilização de rotas alternativas é o fato de os tráfegos excedentes a elas encaminhados não mais possuírem características poissonianas, invalidando o modelo de Erlang. Para contornar este problema, a sistemática adotada faz uso do Equivalente Aleatório de Wilkinson [15], cujo objetivo é transformar o conjunto de tráfegos excedentes num sistema poissoniano. A caracterização detalhada do modelo equivalente é feita no Apêndice A deste trabalho.

O dimensionamento ótimo dos troncos na presença de encaminhamentos alternativos não é imediato. Considere-se o sistema representado pela Fig. III.5, para o qual se deseja conhecer os valores de N_1 , N_2 e N_3 (respectivamente os números de troncos na rota de alto uso $A \rightarrow B$, na rota final $A \rightarrow T$ e na rota final $T \rightarrow B$).



N_1, N_2, N_3 : número de troncos nas rotas

C_1, C_2, C_3 : custo por tronco nas rotas

a : tráfego oferecido

Fig. III.5 - Encaminhamentos de chamadas A → B

Os custos C_1, C_2 e C_3 são supostos lineares com os troncos N_1, N_2 e N_3 , sendo o custo total

$$C = C_0 + C_1 N_1 + C_2 N_2 + C_3 N_3 .$$

O problema reside em determinar N_1, N_2 e N_3 tal que o custo total C seja mínimo e o grau de serviço mantenha-se nos limites requeridos. No entanto, a única variável independente é N_1 , que, uma vez conhecido, permite o cálculo do tráfego excedente oferecido às rotas finais. Os valores N_2 e N_3 são estabelecidos com o uso do método do Equivalente Aleatório.

Dentre os meios existentes de obtenção de N_1 , destaca-se a Regra do Triângulo, que basicamente consiste em fazer

$$\frac{\partial C}{\partial N_1} = 0 .$$

Com algumas simplificações é possível chegar a uma relação envolvendo N_j e a taxa de utilização do último tronco da rota de alto uso $A \rightarrow B$ (tráfego marginal), que é um dado do problema.

Y. Rapp [15] desenvolveu um método de estimativa de N_j , utilizado em geral como inicializador da Regra do Triângulo. Por se tratar de um processo rápido e de excelentes resultados, a metodologia proposta neste trabalho contenta-se com o valor de N_j obtido por seu intermédio, abstendo-se de refinar o dimensionamento pela análise completa do "triângulo".

O inicializador de Rapp e a Regra do Triângulo são descritos no Apêndice A deste trabalho.

5. ROTEAMENTO DOS TRONCOS

É preciso rotear os troncos dimensionados, ou seja, definir o caminho físico a ser utilizado nas ligações entre estações da rede telefônica.

5.1. Hipóteses Assumidas

Considera-se que a rede de troncos aproveita as galerias da rede primária, o que permite a utilização, nos estudos de roteamento, do modelo de grafos já descrito.

Supõe-se que o caminho utilizado na ligação de duas estações pode abrigar troncos nos dois sentidos, isto é, se a etapa de dimensionamento recomendar abertura de rotas entre as estações tanto para envio como para recebimento de chamadas, os troncos nestas rotas utilizarão as mesmas galerias.

Não se considera neste trabalho a segurança no roteamento, implicando que todos os troncos necessários à interligação de duas estações quaisquer seguem o mesmo - e único - trajeto.

Tal hipótese simplifica o problema e justifica-se plenamente, das as finalidades da metodologia aqui exposta.

Deseja-se, afinal, que os caminhos a serem percorridos pelos troncos sejam os menores possíveis. Isto leva à utilização de um procedimento de determinação de caminhos mínimos para roteamento dos troncos.

5.2. Determinação dos Caminhos Mínimos

Sendo o custo de interligação proporcional ao comprimento dos troncos (vale dizer: das distâncias entre estações), é conveniente roteá-los através dos caminhos mínimos. É suposta aqui a ausência de disponibilidade de troncos, ou seja, não existem na rede pares de fios utilizados nos serviços de entroncamento. Se isto acontecesse, os custos seriam alterados, e no caminho mínimo provavelmente estariam envolvidas as galerias com pares de fios disponíveis.

Em suma, o critério adotado na obtenção dos caminhos mínimos depende apenas das distâncias efetivas entre as estações.

Dentre os procedimentos que podem ser utilizados, destacam-se os comentados em seguida.

. Dijkstra [16,17]

É um dos algoritmos clássicos de obtenção de caminhos mínimos, destacando-se também por ser um dos mais simples, notadamente quando não existem custos negativos no problema. Aplica-se ao modelo de grafos da rede telefônica.

O algoritmo determina as distâncias mínimas de todos os nós em relação a um deles, previamente selecionado. Como é previsto em qualquer caso, o estudo da rede em malha (todas as estações ligando-se diretamente entre si) torna necessária a construção de uma matriz de distâncias mínimas entre as estações. Tal

matriz é simétrica, dadas as hipóteses efetuadas. O número de utilizações do algoritmo de Dijkstra para construção dessa matriz é portanto igual ao número de estações da rede menos um.

Não é necessário, entretanto, saber a distância das estações a nós da rede que não representem estações. Assim, um procedimento que evite estes cálculos desnecessários pode ser mais atraente.

. PFCM

O problema de obtenção de caminhos mínimos entre um nó e os demais da rede pode ser formulado como um PFCM onde aquele nó é fonte de produtos - e os outros são os sumidouros. Nós que não interessam ao problema não têm demanda ou oferta própria.

O resultado obtido por esta abordagem é rigorosamente o mesmo em relação àquele do algoritmo de Dijkstra. Para obtenção da matriz de distâncias mínimas entre as estações, o número de resoluções de PFCM é também igual ao total de estações menos um.

. algoritmo misto

Visando aproveitar ao máximo as informações disponíveis quando do roteamento de troncos, uma terceira abordagem é proposta. Recorde-se que na etapa de cálculo da matriz de tráfego um dos passos consistia em estabelecer as zonas de filiação das estações. Para isto, um PFCM era resolvido e, após a análise de nós repartidos, as zonas de filiação eram delimitadas. O resultado final era, em termos de grafos, uma árvore na qual as famílias das estações correspondiam às suas respectivas zonas de influência. A Fig. III.6 representa um pedaço da árvore relativo a duas estações vizinhas.

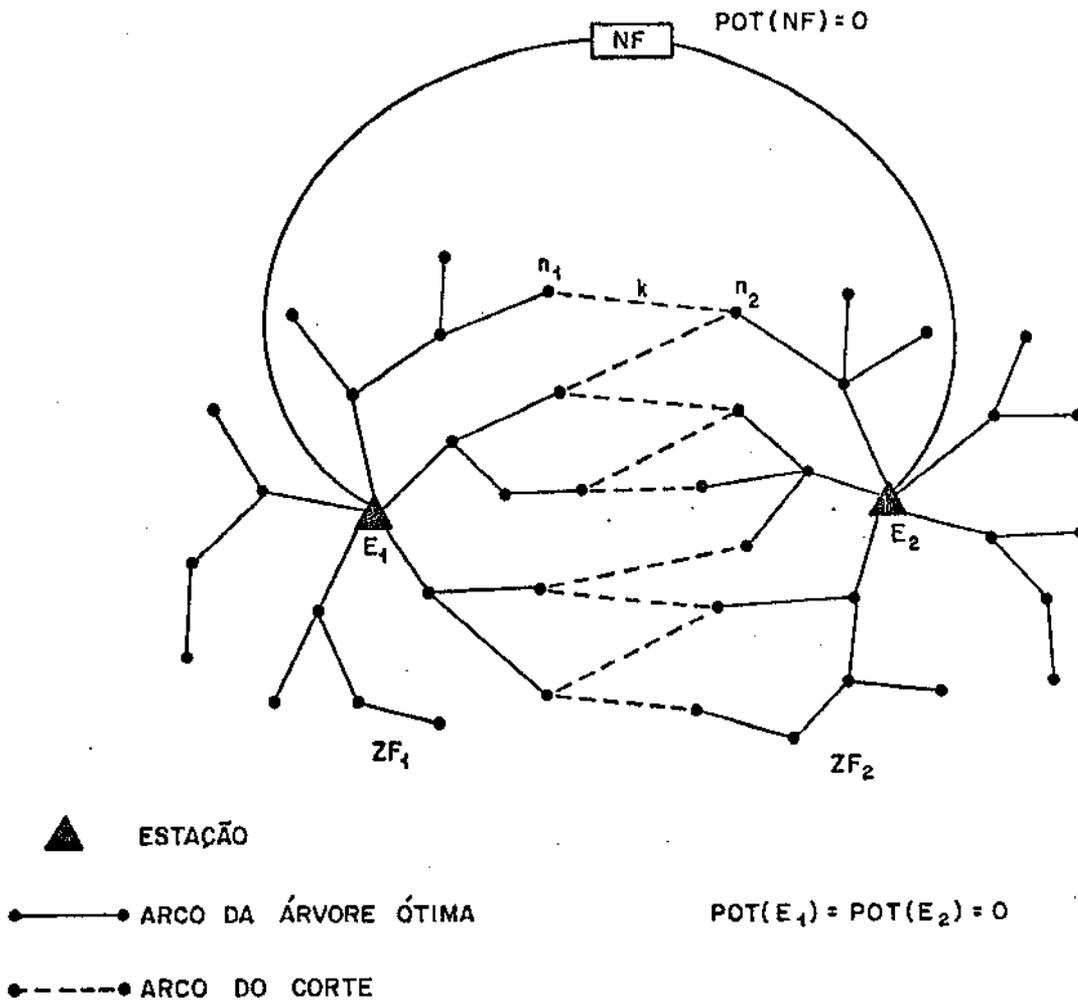


Fig. III.6 - Duas zonas de filiação vizinhas

Dada a hipótese de que os troncos devem utilizar galerias da rede primária, aproveitar as informações disponíveis ao fim da delimitação das zonas de influência das estações parece interessante. O procedimento adotado para resolução de PFCM [18] calcula para cada nó da rede um certo potencial, que é na verdade o multiplicador dual de sua restrição de balanço de fluxo (ou seja, a variável dual associada ao nó). Na solução (árvore) ótima do PFCM, o potencial significa a menor distância do nó considerado à sua estação-mãe. Por outro lado, os arcos não pre

sentas na árvore e com nós origem e destino em zonas de filiação diferentes (arcos do corte, não-básicos) constituem uma fronteira, separando as diversas zonas de filiação.

Portanto, uma simples análise dos potenciais dos nós de fronteira, em conjunto com os comprimentos dos arcos do conjunto de corte é em geral suficiente para selecionar o caminho mínimo entre estações vizinhas. De acordo com a notação da Fig. III.6, tem-se:

$$\text{DIST\AA}NCIA(E_1, E_2) = \min_{k \in K} \left\{ \text{POT}(n_1) + \text{POT}(n_2) + \text{COMP}(k) \right\}, \quad k = (n_1, n_2),$$

onde K - conjunto de arcos do corte ZF_1 - ZF_2 .

Convém ressaltar que, após a delimitação das zonas de influência, a rede encontra-se totalmente preparada para a aplicação deste procedimento.

Uma questão se apresenta: é sempre encontrado realmente o caminho mínimo? A resposta é não; a posição dos nós e arcos de fronteira entre duas estações pode ser tal que justifique, por exemplo, a passagem dos troncos por uma terceira zona de filiação. Tal situação é indicada na Fig. III.7.

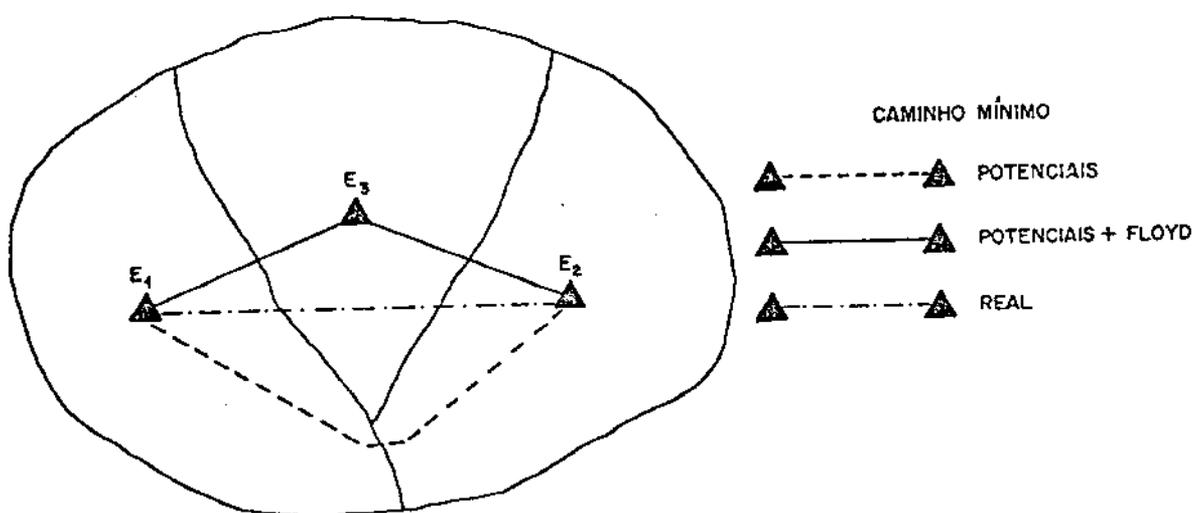


Fig. III.7 - Caminhos mínimos entre estações

Isto levanta uma segunda questão: o procedimento proposto não leva em conta zonas de filiação não-adjacentes. Não é possível portanto determinar a distância mínima entre estações que não são vizinhas.

Para contornar este problema e ao mesmo tempo amenizar ao máximo as distorções apontadas acima, lança-se mão do algoritmo de Floyd [17], extremamente simples e rápido. Por ser matricial, o algoritmo de Floyd em geral não pode ser aplicado a todo o grafo que representa a rede telefônica, o qual pode ser relativamente grande. Se, entretanto, é construída a matriz inicial de distâncias mínimas entre as estações, a utilização do algoritmo torna-se viável. O grafo a ele submetido, neste caso, possui somente os nós-estações, enquanto os arcos que os ligam têm comprimento dados pela matriz citada (os arcos da rede primária são substituídos por distâncias equivalentes).

Esta matriz é obtida através da análise de potenciais já descrita; para as estações de zonas de filiação não-adjacentes, a distância inicial é considerada infinita. Através de comparações entre as distâncias, o algoritmo de Floyd estabelece os caminhos mínimos entre as estações.

Uma vez que estas comparações não mais se realizam sobre a rede primária, não há ainda garantias de que os caminhos obtidos sejam os mínimos possíveis. O algoritmo, entretanto, trabalha sob a hipótese de que caminhos entre duas estações adjacentes quaisquer podem também participar de outros, entre estações não-adjacentes. Na Fig. III.7, por exemplo, a estação 3 é passagem da rota direta entre as estações 1 e 2. Tal hipótese, felizmente, é bastante representativa do que ocorre nos sistemas de entroncamento existentes, onde nem sempre o caminho utilizado é o de mínima distância: opta-se por aqueles que ofereçam também a infra-estrutura para abrigar troncos a custos baratos. É razoável supor que compartilhar caminhos diminua estes custos.

A Fig. III.8 sintetiza o procedimento misto aqui descrito. Note-se que a primeira parte (análise dos potenciais) trabalha com toda a rede primária; admitem-se conhecidas as zonas

de filiação e os potenciais dos nós, decorrentes da resolução do PFCM para construção da matriz de tráfego. A segunda parte do procedimento misto (Floyd) considera apenas as estações, sendo assim bastante rápida.

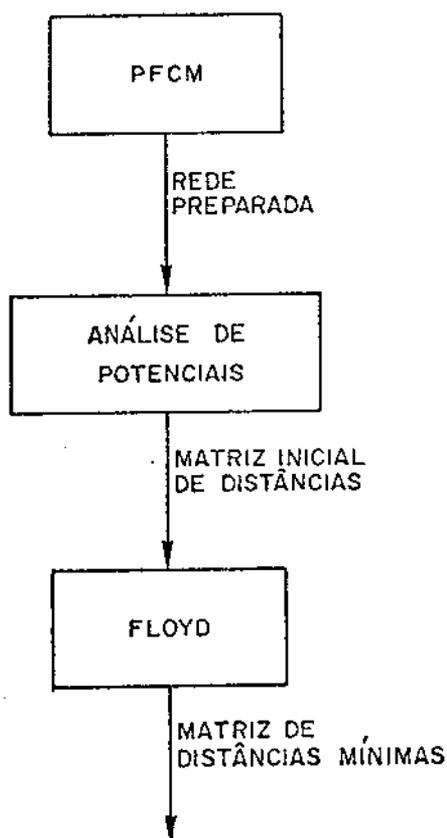


Fig. III.8 - Procedimento misto

. comentários

Qualquer dos três procedimentos sugeridos para obtenção da matriz de distâncias mínimas entre as estações pode, a princípio, ser utilizado. Todavia, a partir das considerações

sobre a manipulação de dados da rede e sobre as hipóteses assumidas, a metodologia desenvolvida neste trabalho incorpora o algoritmo misto (potenciais + Floyd).

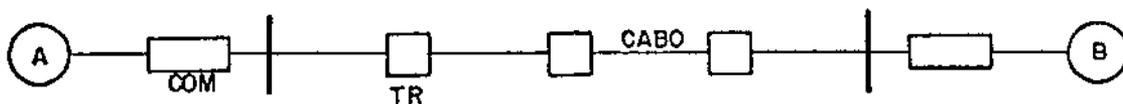
Se por algum motivo é conhecida previamente a distância entre pares de estações ou se deseja utilizar um caminho pré-estabelecido, é suficiente substituir o elemento (ou elementos) na matriz de distâncias mínimas, não invalidando em absoluto o procedimento.

6. CUSTOS ASSOCIADOS

Resta calcular o custo do Plano de Interligação estabelecido nas etapas anteriores da metodologia.

6.1. Hipóteses Assumidas e Estrutura de Custos

Analise-se o modelo de tronco proposto na Fig. III.9 . Suponha-se que a tecnologia utilizada é a analógica, tanto nos equipamentos de comutação como nos de transmissão.



COM. : EQUIPAMENTOS DE COMUTAÇÃO (JUNTORES)

TR. : TRATAMENTO DE ENLACE(POTES DE PUPINIZAÇÃO)

CABO : PAR DE FIOS

A,B : ESTAÇÕES

Fig. III.9 - Modelo de tronco

Verifica-se que o custo dos equipamentos de comutação (juntores) independe da distância entre as estações. Para cada tronco, são necessários dois juntores: um na estação envidadora de chamadas e outro na estação recebedora (assume-se que os juntores são unidirecionais).

Já os custos relativos à transmissão e tratamento de enlace (regeneração e/ou manutenção do sinal cursado) dependem fundamentalmente da distância; para fins de planejamento, pode-se assumir que esta relação seja direta (embora os postes de punização sejam instalados a intervalos regulares, seu custo é diluído, ficando proporcional à distância).

Para um tronco, portanto, o custo é da forma

$$A + B \cdot D ,$$

onde: A : parcela fixa correspondente ao custo de dois juntores;

B : custo do par de fios e tratamento de enlace por unidade de distância; e

D : distância entre as duas estações consideradas.

A ligação entre duas estações necessita, geralmente, de vários troncos. Admite-se, neste caso, que o custo total é diretamente proporcional ao número de troncos (ou seja, a exemplo da rede primária são desconsideradas as modularidades dos cabos utilizados nos serviços de entroncamento). Assim, o custo é da forma

$$(A + B \cdot D) \cdot N_T ,$$

onde : N_T : total de troncos dimensionados para a interligação das estações.

Outros parâmetros técnicos, tais como bitola dos cabos, resistência de "loop" e atenuação máxima do sinal transmitido são desconsiderados.

O cálculo do custo total do Plano de Interligação é

feito somando-se os custos das diversas rotas previstas.

6.2. Utilização de Equipamentos Digitais

Dada a aplicação da metodologia aqui desenvolvida (planejamento de longo prazo, com um horizonte médio de 20 anos), é interessante que ela contemple também a possibilidade de uso de equipamentos digitais, tanto nas estações como nos troncos.

Uma primeira ressalva é necessária: na presença de sistemas digitais o conceito de tronco muda um pouco, passando a ser relevante o de canal. O Quadro III.2 relaciona as grandezas para um sistema digital de 1ª ordem (o único a ser considerado neste trabalho).

SISTEMA	TRONCOS	CANAIS	FIOS
Analógico	1	1	2
Digital	1	30	6

Quadro III.2 - Sistemas analógicos e digitais

O modelo de canal digital praticamente não se altera em relação ao de tronco analógico. O tratamento de enlace é feito sob a forma de regeneração do sinal; do mesmo modo que os postes de pupinização, os regeneradores são instalados a intervalos regulares. Seu custo pode também ser diluído, incorporando-se ao custo do canal (que é de proporcionalidade direta com a distância). A estrutura de custos permanece linear; não se consideram, também neste caso, as modularidades dos cabos.

A coexistência de estações analógicas e digitais gera o problema da escolha dos meios de transmissão entre elas. Tal decisão pode se basear em critérios técnicos ou econômicos. A

metodologia aqui descrita adota, por simplicidade, o critério ex posto no Quadro III.3 abaixo.

ESTAÇÕES	TRANSMISSÃO
analógica x analógica	analógica
analógica x digital	digital
digital x digital	digital

Quadro III.3 - Transmissão em redes de tecnologia mista

7. COMENTÁRIOS

Neste Capítulo é descrita a metodologia de obtenção do Plano de Interligação, abordando a construção de matrizes de tráfego, dimensionamento e roteamento dos troncos para um certo ano horizonte. O encaminhamento é suposto conhecido.

O grande porte e a não-linearidade do problema exigem algumas hipóteses simplificadoras. Dado o caráter estimativo da metodologia, no entanto, tais hipóteses são plenamente justificáveis.

Para o dimensionamento da rede de troncos, dois encaminhamentos podem ser considerados: o primeiro supõe que todas as estações se interligam diretamente. Se a dimensão da rede e o número de estações é suficientemente grande, um estudo de encaminhamentos alternativos (utilizando tandens) é feito. No dimensionamento utilizam-se os valores de tráfego agrupados por estação.

O roteamento procura utilizar os caminhos mínimos entre as estações. Desconsidera-se a segurança, pois o objetivo não é realizar o projeto detalhado da futura rede de troncos, mas sim

obter algumas diretrizes de planejamento.

A metodologia permite também estudos de entroncamentos digitais.

No próximo Capítulo são apresentados exemplos de aplicação da metodologia proposta.

CAPÍTULO IV

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A implementação computacional da metodologia proposta resultou no programa ECIC - Estimador do Custo de Interligação de Estações [19].

Neste Capítulo serão relatados alguns aspectos computacionais, bem como descritos exemplos da aplicação da metodologia.

2. O PROGRAMA ECIC

O programa foi elaborado em linguagem FORTRAN IV.

2.1. Dados Necessários

Os principais dados necessários à execução do programa ECIC são listados a seguir.

. rede

É preciso conhecer:

- o total de nós, seu número de assinantes no ano horizonte e sua zona de tráfego e
- o total de arcos (não-orientados), seus nós terminais, seu comprimento e a disponibilidade atual em pares de fios.

. estações

É exigido:

- o total de estações, os nós da rede em que se localizam e sua capacidade no ano horizonte e

- em caso de encaminhamento alternativo, as tandens e sua influência (estações que as utilizam).

. custos

São necessários:

- custo de um quilômetro de um par de fios utilizado nos serviços de entroncamento (incluindo, se houver, o tratamento de enlace); e
- custo de um par de juntores (entrada e saída da estação).

2.2. Descrição das Subrotinas

É atribuição do programa coordenador:

- realizar a leitura e impressão de dados;
- calcular a matriz de tráfego entre estações;
- construir a matriz inicial de distâncias entre estações e
- controlar o acesso às demais subrotinas.

Além do programa coordenador, seis subrotinas constituem o ECIC.

. subrotina SUBP

É utilizada na resolução de fluxos de custo mínimo. Trata-se de um método simplex revisado especial para grafos [18].

. subrotina ZOFIL

Efetua a delimitação das zonas de influência das estações, decidindo - quando necessário - sobre os pontos de controle repartidos [5].

. subrotina FLOYD

Determina caminhos mínimos entre todos os nós de um grafo por meio do algoritmo de Floyd [17].

. subrotina TRONCO

Realiza o dimensionamento rigoroso (recorrência da fórmula de perda de Erlang) dos troncos necessários à interligação de estações, supondo que a rede de troncos é do tipo malha.

. subrotina RAPPN1

Realiza o dimensionamento dos troncos na presença de encaminhamentos alternativos.

. subrotina CUSTRO

Calcula os custos associados ao Plano de Interligação obtido .

2.3. Diagrama Simplificado

Uma execução do programa ECIC é mostrada na Fig. IV.1, de maneira simplificada.

2.4. Informações de Saída

O programa imprime:

- relatório sintético da delimitação das zonas de influência das estações;
- matriz de tráfego entre estações;

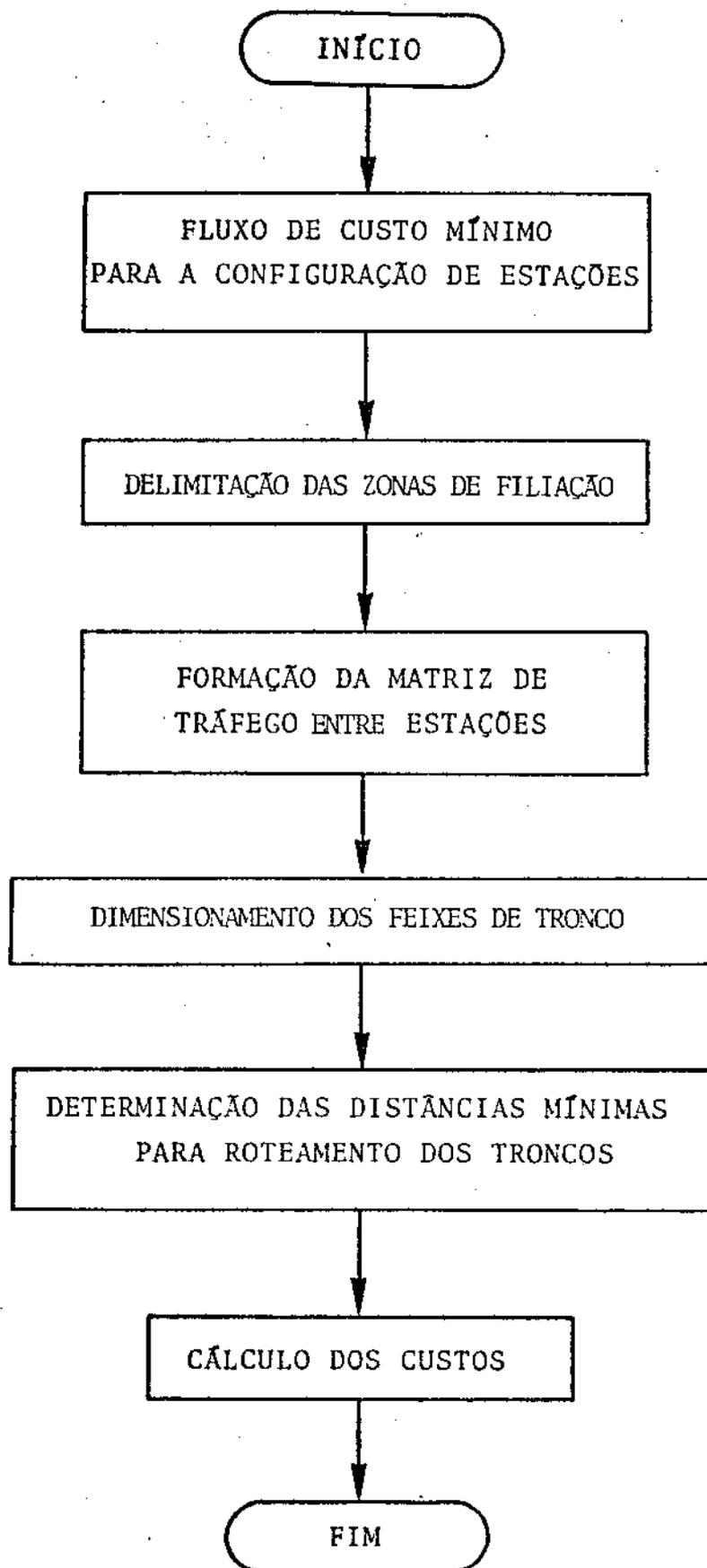


Fig. IV.1 - Diagrama simplificado do procedimento

- matriz de distâncias mínimas;
- matrizes de troncos, considerando ou não os encaminhamentos alternativos; e
- custos associados.

É possível obter como subprodutos principais:

- matriz de assinantes por zonas de tráfego e de filiação;
- e
- rotas utilizadas pelos feixes de troncos.

3. REDE-EXEMPLO

Estuda-se a obtenção de Planos de Interligação de estações da rede telefônica da cidade de Curitiba, cujo grafo representativo tem 586 nós e 744 arcos não-orientados. O horizonte é o ano 2000, quando são previstos mais de 400.000 assinantes.

A rede conta atualmente com nove estações; estudos de localização prevendo unicamente a utilização de tecnologia analógica apontaram outras nove como fortes candidatas a serem implantadas. As características de tais estações encontram-se no Quadro IV.1.

ESTAÇÃO	NÓ	CAPACIDADE	ESTAÇÃO	NÓ	CAPACIDADE
01	001	70.000	10	049	30.000
02	116	40.000	11	583	20.000
03	439	40.000	12	398	30.000
04	348	30.000	13	332	30.000
05	282	30.000	14	519	20.000
06	207	40.000	15	382	20.000
07	541	30.000	16	264	30.000
08	385	30.000	17	493	20.000
09	501	30.000	18	204	20.000

Quadro IV.1 - Características das estações consideradas

▲ estações existentes

⊙ estações candidatas

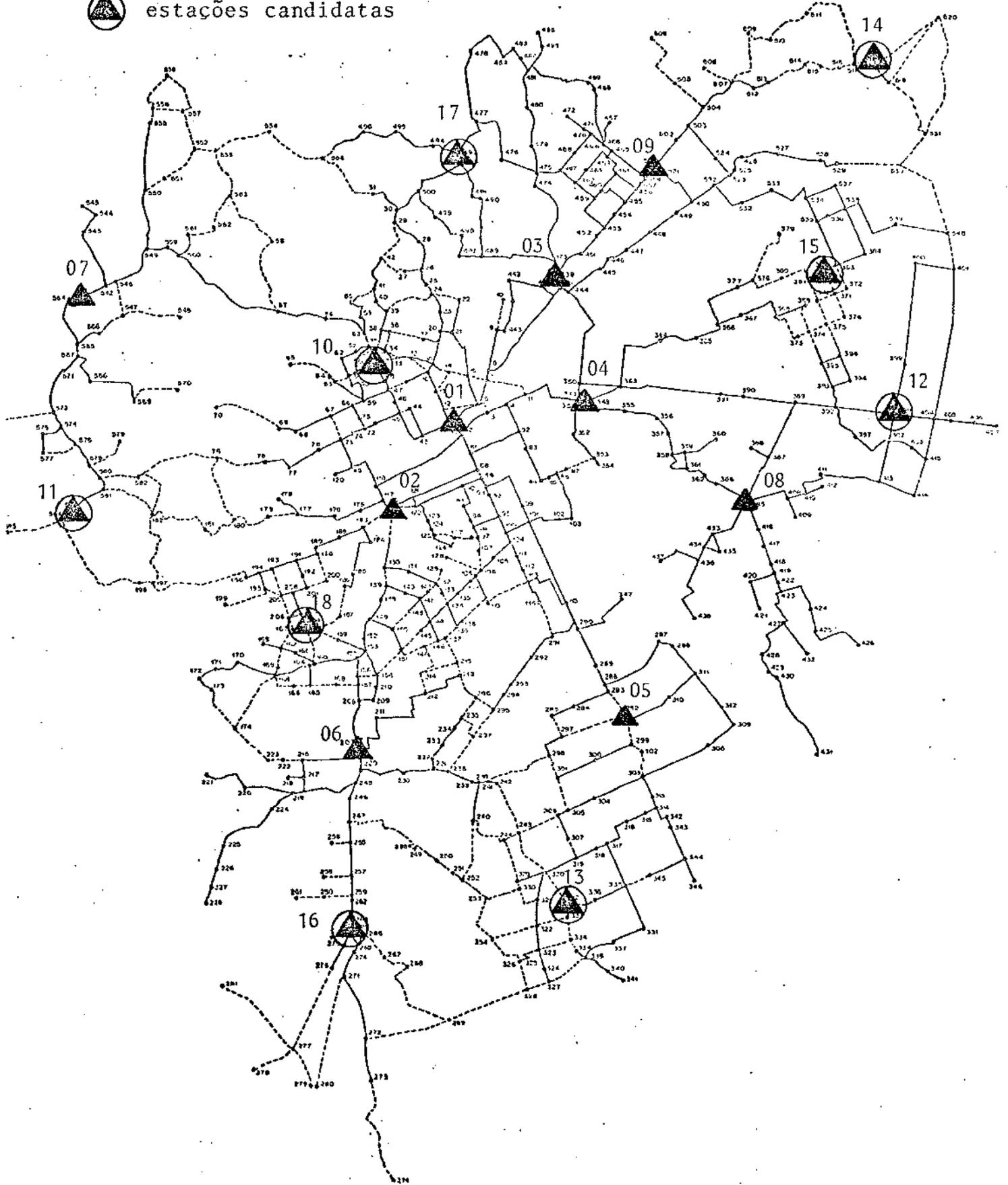


Fig. IV.2 - Mapa da rede-exemplo

A Fig. IV.2 detalha, no mapa da rede, as estações em questão.

No ano 2.000, admite-se a divisão da rede em quinze zonas de tráfego.

4. PLANOS DE INTERLIGAÇÃO OBTIDOS

Três configurações têm seu Plano de Interligação estudado. As nove estações já existentes aparecem em todas elas. Quanto às novas, tem-se:

- 1ª configuração: estações 10, 12, 13 e 16;
- 2ª configuração: as mesmas, mais 11, 14 e 15; e
- 3ª configuração: todas as estações.

Em todos os testes considera-se dois tipos de encaminhamento: com e sem rotas alternativas. Neste último caso (rede em malha) o dimensionamento dos troncos é feito duas vezes: linearizadamente (proporcionalidade tráfego - tronco) e rigorosamente (recorência da fórmula de perda de Erlang). A perda máxima especificada para as rotas diretas é 1%. Na possibilidade de encaminhamentos alternativos (rede mista), toma-se como tandem única a estação 01. Todas as estações tentam escoar tráfego pelas rotas de alto uso, em primeiro lugar (tais rotas não têm perda especificada). O transbordo segue via tandem (a rota final tem perda máxima de 0,2%).

No cálculo dos custos, assumem-se 60 Cr\$ x 10³/km do par de fios e 650 Cr\$ x 10³ para os dois juntores. Um tronco é formado por dois juntores e um par de fios.

. comparações

O Quadro IV.2 coloca lado a lado as três configurações. O custo de localização citado compõe-se de parcelas fixas (edifica

ções, terreno e infra-estrutura) e variáveis (equipamentos de comunicação e rede de pares de fios), sendo o mais exato possível. No entroncamento, o valor-base é aquele relativo à rede em malha (cálculo rigoroso); com ele é feita a totalização de custo de cada configuração. Todos os dados de custo estão em Cr\$ x 10⁶.

CONFIGURAÇÃO	CUSTO DE LOCALIZAÇÃO	CUSTO DE INTERLIGAÇÃO					TOTAL ESTIMADO
		MALHA RIGOR.	MALHA LINEAR.	%	MISTA	%	
1	65.892	42.675	42.319	99,2	42.634	99,9	108.577
2	63.322	45.971	45.952	99,9	45.822	99,7	109.293
3	63.508	47.572	47.317	99,5	46.908	98,6	111.080

Quadro IV.2 - Comparativo dos Planos de Interligação

Verifica-se que o menor custo de interligação associa-se à configuração 1 (13 estações) e o maior à 3 (18 estações). A configuração 1, entretanto, é a mais cara quando se considera apenas a localização. Depreende-se que o peso do custo de entroncamento age no sentido de diminuir o número de estações a localizar.

Pode-se dizer que para uma rede deste porte o custo de interligação é bastante significativo em decorrência dos altos valores de tráfego (e muitos troncos necessários ao seu escoamento) e das grandes distâncias entre as estações. Quanto à rede mista, observa-se que considerar encaminhamentos alternativos não diminui, na prática, os resultados obtidos. Embora o encaminhamento em cada configuração possa sofrer melhorias, o alto custo da rede mista parece sugerir a criação de novas estações tandem na rede.

outros comentários

Uma análise necessária é a da qualidade do dimensionamen

to quando se supõe linearidade tráfego - troncos. O Quadro IV.3 mostra dados de algumas conexões diretas da configuração 2. A relação de proporcionalidade utilizada refere-se ao valor médio de tráfego oferecido a cada rota (no caso, média de 137,0 Erlang/rota e 156 troncos para perda de 1% significa 1,139 tronco por Erlang). O número de troncos da rota de alto uso é também indicado.

ROTA	TRÁFEGO OFERECIDO	TRONCOS NECESSÁRIOS				
		DIRETA RIGOR.	DIRETA LINEAR.	%	ALTO USO	%
01→02	534,7	562	609	108,4	562	100,0
13→05	315,8	340	360	105,9	337	99,1
02→10	199,0	220	227	103,2	218	99,0
08→05	119,0	137	136	99,3	129	94,1
07→06	71,7	87	82	94,3	76	87,3
14→15	29,0	40	33	82,5	37	92,5
16→15	11,9	20	14	70,0	11	55,0

Quadro IV.3 - Comparativo dos modos de dimensionamento

Vê-se que para valores altos de tráfego o dimensionamento linearizado determina um número de troncos acima do real, enquanto para pequenos tráfegos há sub-dimensionamento, em decorrência do fator de proporcionalidade único utilizado. Os custos obtidos e mostrados no Quadro IV.2 avalizam o uso da linearização no dimensionamento dos troncos da rede em malha.

Um comentário preliminar pode ser feito em relação às rotas de alto uso: para grandes valores de tráfego a tendência é utilizar ao máximo a rota direta; pequenos valores de tráfego geram rotas de alto uso com número de troncos pequeno (a proporção de tráfego transbordado à rota final é maior).

5. COMENTÁRIOS

Com o objetivo de aquilatar o desempenho da metodologia proposta, faz-se uma comparação com os resultados obtidos para a mesma rede de Curitiba (configuração 2) através da execução do programa OTELO [10]. A tecnologia utilizada é a analógica.

O OTELO realiza o dimensionamento da rede de troncos a nível de centrais e não de estações. Considera também diferentes tipos de juntores e bitolas de fios. Assim, é preciso compatibilizar os dados de entrada do programa ECIC. A matriz de tráfego - entre centrais - do OTELO torna-se, com o agrupamento por estações, a matriz de tráfego do ECIC. Os custos são tomados em seu valor médio: 17 Cr\$ x 10³/km do par de fios e 220 Cr\$ x 10³ para dois juntores. O encaminhamento (misto) é exatamente o mesmo nos dois programas; no ECIC a rede em malha é também calculada (dimensionamento rigoroso). O roteamento dos troncos não é fixado: cabe ao ECIC decidir. O Quadro IV.4 apresenta os resultados de custo da experiência (valores em Cr\$ x 10⁶).

PROGRAMA OTELO	PROGRAMA ECIC			RELAÇÃO ECIC/OTELO (%)	
	MALHA	MISTA	%	MALHA	MISTA
12.487	11.077	10.206	92,1	88,7	81,7

Quadro IV.4 - Comparativo de resultados ECIC x OTELO

Recordando-se o comentário feito ao final do item anterior em relação às rotas de alto uso, pode-se afirmar que o resultado obtido é absolutamente o esperado. De fato, verifica-se que no ECIC o agrupamento do tráfego por estações estimula o uso da rota direta em detrimento das rotas finais; no OTELO, ao contrário, os pequenos valores de tráfego ocasionam um transbordo total maior (as rotas de alto uso apresentam perda maior do que no ECIC). O custo do entroncamento, neste caso, tende a aumentar.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Apresenta-se neste trabalho uma metodologia de estabelecimento do Plano de Interligação de estações telefônicas num certo ano horizonte. Objetiva-se comparar alternativas de localização de estações sob a ótica do entroncamento. O encaminhamento é suposto conhecido, restando o dimensionamento (inclusive cálculo da matriz de tráfego, quando necessário) e o roteamento da rede de troncos.

Em virtude das finalidades da metodologia, algumas hipóteses são feitas de modo a simplificá-la. Nesta linha de raciocínio, o tráfego é considerado entre estações, os troncos podem ser dimensionados rapidamente e o custo de cada rota é admitido linearmente proporcional à distância entre as estações envolvidas e ao número de troncos da rota.

Verifica-se que agrupar o tráfego por estações (ao invés de trabalhar com centrais) provoca certo subdimensionamento dos troncos. Por outro lado, admitir linear a relação tráfego - tronco na rede em malha agiliza bastante o procedimento; os resultados obtidos são excelentes quando comparados àqueles relativos ao dimensionamento rigoroso (através de recorrência da fórmula de perda de Erlang).

A utilização de rotas alternativas no processo estimativo não leva a grandes economias nos exemplos mostrados, em virtude principalmente da própria topologia da rede e da localização da estação tandem. Ou seja, nesses exemplos, o cálculo de redes em malha é suficiente para permitir comparações. Entretanto, dado o interesse em realizar testes de diferentes encaminhamentos e de localização de novas tandens no futuro, é conveniente dispor de meios para tal.

O algoritmo especializado de obtenção de distâncias mínimas entre estações tem excelente comportamento nos exemplos mostrados. Na verdade, a menos de alguns poucos casos, os resultados obtidos são os mesmos que um algoritmo exato forneceria. Note-se, ainda, que a rede-exemplo apresenta muitas possibilidades de ligação entre dois nós quaisquer; em redes pouco malhadas, ao contrário, onde zonas de filiação adjacentes têm poucos arcos de fronteira,

o desempenho do algoritmo misto deve ser ainda melhor.

Em suma, pode-se afirmar que a metodologia fornece estimativas de boa qualidade da rede de troncos para diversas configurações de estações num ano horizonte, além de permitir o confronto de alternativas de planejamento do futuro sistema de interligação.

2ª PARTE

CRONOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO DE ESTAÇÕES TELEFÔNICAS

CAPÍTULO VI

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

1. INTRODUÇÃO

Uma das etapas do planejamento de sistemas telefônicos urbanos consiste em determinar a época de entrada em operação de novas estações, com a finalidade de atender o aumento da demanda de assinantes. Os planejadores devem para isso dispor de um *Cronograma de Implantação* das estações ao longo de um período de tempo pré-estabelecido.

Neste Capítulo caracteriza-se o problema de obtenção do Cronograma, seus objetivos e critérios. Duas abordagens são descritas e comentadas.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A expansão do sistema telefônico que deve acompanhar o aumento do número de assinantes traduz-se pela construção de novas estações ou pela ampliação das já existentes. Essa expansão normalmente não é contínua, ocorrendo em determinados estágios do período de planejamento.

Em quais estágios deve o sistema expandir-se, ou, em outras palavras, quando construir ou ampliar estações é a pergunta básica a ser respondida pelo Cronograma.

A metodologia de planejamento descrita no Capítulo I é considerada neste trabalho tem por primeira etapa a determinação da quantidade e localização de novas estações, estabelecendo-lhes também as capacidades. Para as estações já existentes, a primeira etapa de planejamento indica as ampliações a serem feitas. O resultado final é a configuração ótima da rede no ano horizonte, tratando-se, em suma, do alvo a ser perseguido ao longo do período de planejamento.

É preciso traçar a política de evolução da rede atual para a configuração ótima futura. Deseja-se que esta evolução seja otimizada sob o critério de custo, ou seja, a expansão da rede, a que se associam custos de implantação ou ampliação das estações e de ligação dos assinantes a essas estações (lançamento de novos pares de fios), deve se dar da forma mais barata possível. A demanda de assi

nantes precisa sempre ser atendida.

Há aqui uma situação de compromisso: instalar todas as estações no início do período de planejamento gera elevada ociosidade dos equipamentos instalados (além do alto custo inicial), enquanto deixar a instalação para o final do período ocasiona significativos gastos de rede, devido ao baixo aproveitamento dos pares de fios já disponíveis.

Assim a intenção do Cronograma é estabelecer a política de implantações (e ampliações) ao longo do período que conduza à situação de compromisso ótimo dos custos de instalação das estações e de filiação dos assinantes.

A subdivisão do período de planejamento sugere que em cada estágio seja analisada a possibilidade de implantação ou ampliação das estações, considerando-se tanto o atendimento da demanda no estágio, a custo mínimo, quanto a existência de uma configuração-alvo a ser atingida no ano horizonte.

3. DUAS ABORDAGENS

Dois tratamentos de natureza dinâmica destinados à obtenção do Cronograma são mostrados neste item.

3.1. Plano Fundamental Dinâmico [20]

Trata-se de uma metodologia de planejamento da expansão de sistemas telefônicos que procura solucionar as questões relativas à localização (no tempo e no espaço) de novas estações, filiação dos assinantes e interligação das estações, através da decomposição em três subproblemas:

- 1) localização temporal das estações;
- 2) localização espacial das estações e sua interligação;
- 3) filiação dos assinantes.

O primeiro deles corresponde ao estabelecimento do Crono

nograma. Adota-se portanto a hipótese de que a localização espacial das estações não altera substancialmente a política de implantações obtida. A área em estudo - onde se encontra a rede telefônica - é dividida em quadrículas. Cada uma destas representa um ponto de concentração de assinantes, uma estação já existente ou uma estação candidata a implantação.

Um estudo prévio indica a quantidade de estações candidatas em cada estágio do período de planejamento, bem como sua localização aproximada. O modelo matemático resultante é o de um problema misto zero-um que procura minimizar simultaneamente os custos de implantação e de ligação dos assinantes associados a todos os estágios. As variáveis zero-um do problema, relativas às estações em cada estágio, fornecem o Cronograma, determinando se e quando as estações oferecidas entram em operação.

Os outros dois subproblemas são resolvidos em etapas posteriores.

3.2. Programa CRONOS [4]

É um programa computacional de resolução do problema. A rede telefônica é representada por um grafo. A metodologia de planejamento da expansão do sistema é a descrita no Capítulo I deste trabalho. Assim, conhece-se a configuração ótima da rede, no ano horizonte, a ser perseguida.

O programa exige também as zonas de filiação das estações no ano base e no ano horizonte, e não permite que os assinantes sejam refiliados mais de uma vez. Variáveis zero-um, indicando as implantações, são associadas às estações em cada estágio de planejamento. O programa calcula o custo de implantação de cada estação em cada estágio; neste cálculo são incluídos também os gastos com a rede. Os custos obtidos para cada estação não consideram as influências, em termos de rede, que ela sofre em função da instalação ou não das demais estações.

O modelo final é o de um problema linear zero-um, cujo objetivo é minimizar o custo total das implantações efetuadas durante o período de planejamento.

4. COMENTÁRIOS

Delineadas as finalidades e restrições do Cronograma, alguns comentários podem ser feitos:

• plano fundamental dinâmico

A representação da rede por meio de quadrículas e a resolução do problema de forma dinâmica forçam o aparecimento de matrizes de variáveis, com dupla e às vezes tripla indexação, o que nem sempre se deseja, principalmente se a rede telefônica em estudo é de médio ou grande porte: o problema misto resultante pode apresentar dimensões muito elevadas.

• programa CRONOS

A hipótese de única refiliação dos assinantes faz que os cortes de área - realizados quando da implantação de estações - sejam por demais abruptos, e não ocorram de maneira suave e evolutiva.

Admitir que a implantação de cada estação acontece independentemente das outras é uma hipótese simplificadora que possibilita o rápido cálculo dos custos envolvidos, permitindo a resolução do problema do Cronograma.

A indexação das variáveis zero-um no tempo e no espaço torna o programa suscetível aos aumentos do total de estações a implantar ou do número de estágios considerados.

Estas características das abordagens descritas permitem o estabelecimento de algumas diretrizes a serem seguidas, dentro do possível, na metodologia de obtenção do Cronograma a ser apresentada:

- modelo de pequenas dimensões e relativa simplicidade matemática, de forma a permitir resolução rápida e pouco trabalhosa;
- comprometimento com a necessidade de evolução da rede; e
- observação das facilidades já existentes (disponibilidade de pares de fios, capacidade ociosa de comutação).

CAPÍTULO VII

SISTEMÁTICA DE RESOLUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo é descrita a metodologia de obtenção do Cronograma. O objetivo maior é conseguir uma solução para o problema de maneira simples e rápida. Assim, torna-se necessário contornar os obstáculos devidos à grande dimensão e à natureza dinâmica do Cronograma.

Para tanto, a abordagem básica consiste em passos heurísticos que reduzam o problema a dimensões factíveis. Verifica -se que um modelo consideravelmente rigoroso pode ser formulado a partir do estagiamento do período de planejamento. Tal modelo corresponde ao de um problema linear misto zero-um, cuja resolução por técnicas clássicas é bastante conhecida. Entretanto, através do levantamento de indicadores das possibilidades de implantação das estações nos estágios, simplifica-se o modelo ainda mais, tornando a obtenção do Cronograma possível graças à utilização de uma técnica mista de enumeração e resolução de problemas de fluxo de custo mínimo.

2. ENFOQUE BÁSICO

A obtenção do Cronograma tem sua viabilidade ditada por dois fatores principais: o tratamento matemático requerido pelo problema e suas elevadas dimensões. Portanto o modelo adotado - embora rigoroso - deve permitir um tratamento matemático simples; as dimensões precisam ser reduzidas com base em critérios razoáveis, de modo a possibilitar a resolução do problema sem prejudicar a qualidade da solução encontrada. Ou seja, a despeito das simplificações introduzidas no modelo, é necessário garantir que o Cronograma obtido seja ao menos sub-ótimo.

Duas idéias principais sustentam o desenvolvimento aqui mostrado: a) *estagiamento do problema e*

b) *hierarquização das estações quanto à sua implantação**
num dado estágio.

* Doravante, a palavra implantação designará também a ampliação de estações. Quando houver necessidade, o texto será explícito.

3. ESTAGIAMENTO

O período de planejamento é dividido em subperíodos, ao cabo dos quais - ou seja, nos estágios - é analisada a possibilidade de se implantar as estações a custo mínimo, levando-se em conta a demanda de assinantes e a disponibilidade de pares de fios na rede.

A intenção é aproveitar-se, a cada estágio, do compromisso existente entre os custos de ligação dos assinantes às estações e os de implantação destas estações. À medida que cresce o número de estações, diminuem os gastos de ligação (rede) e aumentam os de implantação. Este compromisso entre os custos determina a existência de um número ótimo de estações a serem instaladas no estágio.

Decorre do estagiamento que o problema é abordado estaticamente. Isto significa que decisões tomadas num estágio dependem do Cronograma adotado até o momento, mas são incapazes de modificá-lo. Em outras palavras, a análise de um estágio depende dos anteriores, mas não dos seguintes.

Outra implicação importante do estagiamento é a substancial redução das possibilidades de Cronograma a estudar (equivalente a dizer: das dimensões do problema), o que pode ser aferido por meio de um pequeno exemplo numérico: seja um período de planejamento dividido em 4 subperíodos, o que totaliza 4 estágios (exclui-se das análises o ano base). Suponha-se que estudos de planejamento evidenciassem a necessidade de 10 novas estações até o ano horizonte.

Por hipótese, todas as estações devem ser implantadas no decorrer do período de planejamento; esta implantação se dá nos estágios. Existem portanto

$$4^{10} = 2^{20} = 1.048.576 \text{ possibilidades de Cronograma.}$$

Em cada estágio, entretanto, há um máximo de

$$2^{10} = 1.024 \text{ configurações possíveis para as estações.}$$

Considerando-se que no último estágio (correspondente

ao ano meta) as estações ainda não implantadas devem sê-lo , em função da hipótese assumida, o número máximo é de

$$(4 - 1) \cdot 2^{10} = 3 \cdot 2^{10} = 3.072 \text{ possibilidades a estudar na abordagem com estagiamento.}$$

Cada possibilidade corresponde a uma configuração de estações num certo estágio.

Suponha-se que o estagiamento do problema leve à proposta de Cronograma descrita no Quadro VII.1:

Estágio	1	2	3	4
Possibilidades	2^{10}	2^{10-5}	2^{10-5-1}	-
Implantadas	5	1	2	2

Quadro VII.1 - Cronograma possível para o exemplo

O número real de possibilidades neste caso é

$$2^{10} + 2^{10-5} + 2^{10-5-1} = 2^{10} + 2^5 + 2^4 = 1.072 .$$

Retirando-se a hipótese de obrigatoriedade de implantação das estações, o total aumenta para

$$(4 + 1)^{10} = 5^{10} = 9.765.625 \text{ possibilidades de Cronograma!}$$

Com o estagiamento do problema, tem-se um máximo de

$$4 \cdot 2^{10} = 4.096 \text{ possibilidades a explorar.}$$

De volta ao possível Cronograma, admita-se que desobrigar a implantação de todas as estações leva uma delas a ser adiada para além do período de planejamento.

Estágio	1	2	3	4
Possibilidades	2^{10}	2^{10-5}	2^{10-5-1}	$2^{10-5-1-2}$
Implantadas	5	1	2	1

Quadro VII.2 - Cronograma sem obrigatoriedade de im
plantação

O total de possibilidades então é

$$2^{10} + 2^5 + 2^4 + 2^2 = 1.076 .$$

A drástica redução nas dimensões do problema avaliza o uso do estagiamento, dando à metodologia um caráter estático. Neste caso, o preço a ser pago por viabilizar a resolução do problema é perder a garantia de convergência ao ótimo global; a metodologia deve portanto estabelecer, nos estágios, critérios tais que a solução final encontrada seja um sub-ótimo de boa qualidade.

4. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA APÓS O ESTAGIAMENTO

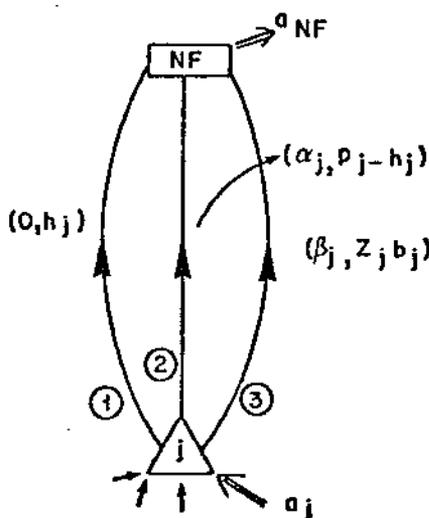
Uma vez estagiado, o problema do Cronograma consiste em encontrar a solução de melhor compromisso entre os custos de ligação dos assinantes às estações e os custos fixos de implantação das mesmas. Ou seja, descobrir qual o número de estações implantadas que minimiza a soma dos custos fixos e os de rede, em cada estágio. A utilização de um grafo para representar a rede telefônica e a adoção de variáveis zero-um para indicar a implantação ou não da estação no estágio em estudo fazem com que a estrutura principal do Cronograma seja a de um problema de fluxo de custo mínimo (PFCM) no qual as variáveis binárias têm custos fixos.

4.1. Modelo de Grafos

O grafo adotado para modelo de rede telefônica possui as características mostradas no item 4 do Capítulo I deste trabalho. Entretanto, difere daquele utilizado no tratamento do problema de interligação (Capítulos II a V) no tocante à representação das estações.

Na formulação do Cronograma, o nó de fechamento indica o atendimento à demanda do estágio em questão. Assim, para ele convergem todos os assinantes da rede. Cada estação liga-se ao nó de fechamento através de arcos artificiais capacitados e orientados, os arcos de fechamento, cuja soma de fluxos resulta no total de assinantes filiados à estação.

A Fig. VII.1 detalha o modelo, representando uma estação j qualquer.



NF - nó de fechamento

j - estação

a_{NF} - total de assinantes da rede

a_j - assinantes próprios do nó j

h_j - capacidade de comutação implantada

p_j - capacidade da infra-estrutura existente

b_j - capacidade de ampliação

α_j - custo (por assinante) do equipamento de comutação instalado na parte ociosa da estação

β_j - custo (por assinante) do equipamento de comutação instalado na parte ampliável da estação

z_j - variável zero-um

Fig. VII.1 - Modelo adotado para as estações

Os arcos de fechamento são três:

- *tipo 1* : representa a utilização dos equipamentos de comutação já instalados na estação e temporisso, custo nulo;
- *tipo 2* : indica o aproveitamento da infra-estrutura e existente e ociosa, devendo portanto assumir apenas os custos dos equipamentos de comutação; e
- *tipo 3* : representa a implantação (ou ampliação), tendo assim associados um custo variável (comutação) e um custo fixo (edificação, climatização e energia).

Deve-se notar que o limite superior do arco do tipo 3 é comandado pela variável zero-um z_j : se $z_j = 0$ (a estação não é implantada ou ampliada no estágio) o limite superior é zero. Será igual à capacidade de implantação quando $z_j = 1$.

Se a estação ainda não existe (é nova), então possui a penas o arco do tipo 3 que, neste caso, representa sua implantação. Contrariamente, se não é permitido à estação qualquer ampliação na infra-estrutura, apenas os dois primeiros arcos são necessários.

A inclusão de limitantes inferiores nos arcos do tipo 1 torna possível controlar a diminuição do número de assinantes filiados a uma estação já existente. Já a presença de limitantes inferiores nos arcos do tipo 3 indica o tamanho mínimo estabelecido para a implantação das estações. Ao longo do desenvolvimento aqui mostrado considera-se, sem perda de generalidade, que estes arcos têm limitante inferior nulo.

4.2. Estrutura de Custos

Associam-se ao problema os custos de rede e os de implantação das estações.

. rede

É o custo de ligação dos assinantes, levando-se em conta apenas a rede primária, para a qual considerações e hipóteses já foram apresentadas no item 4 do Capítulo I deste trabalho. O custo de rede não contém parcelas fixas; depende do número de assinantes e da distância (em termos econômicos) destas às suas estações. Pode ser obtido também pelo produto do fluxo pelo comprimento (também econômico) em cada arco da rede.

. implantação das estações

Compreende dois custos principais: infra-estrutura e comutação. O primeiro divide-se por sua vez em custos de edificação (que compreende o valor do terreno), de climatização e de energia. Por hipótese, estes custos são da forma

$$A + B \cdot T ,$$

onde: A : parcela fixa, cujo valor depende da capacidade total de implantação da estação;

B : coeficiente da parcela variável com o número de assinantes filiados à estação; e

T : número de assinantes.

Então, tem-se para cada estação:

- edificação : $A_{ED} + B_{ED} \cdot T ;$

- climatização: $A_{CL} + B_{CL} \cdot T ;$

- energia : $A_{EN} + B_{EN} \cdot T ;$ e

- comutação : $A_{CO} + A_{CO} \cdot T .$

Supondo-se que, a menos dos equipamentos de comutação, a implantação das estações ocorre de maneira não-modularizada, então os custos podem ser reduzidos a

$$F + B_{CO} \cdot T ,$$

onde $F = (A_{ED} + A_{CL} + A_{EN} + A_{CO}) + (B_{ED} + B_{CL} + B_{CN}) \cdot T_F ;$ e

T_F : capacidade total (em número de assinantes) de implantação da estação.

A partir da representação adotada para as estações no modelo de grafos e utilizando-se a notação proposta na Fig.VII.1, pode-se dizer que para uma estação j :

$$\beta_j = B_{CO} \quad e$$

$$b_j = T_F \cdot$$

4.3. Modelo Matemático

Definam-se os conjuntos:

- K - arcos da rede, exceto os de fechamento
- G - nós da rede, exceto o de fechamento
- J_1 - estações existentes ampliáveis
- J_2 - estações existentes não-ampliáveis
- J_3 - estações ainda não implantadas
- $I(i)$ - arcos que chegam ao nó i , $i \in G$
- $E(i)$ - arcos que saem do nó i , $i \in G$, exceto os arcos de fechamento

A cada estágio, o Cronograma é formulado como um problema misto zero-um, da seguinte maneira:

$$\text{Min} \left\{ \sum_{k \in K} c_k x_k + \sum_{j \in (J_1 + J_2)} \alpha_j y_j'' + \sum_{j \in (J_1 + J_3)} \beta_j y_j''' + \sum_{j \in (J_1 + J_3)} z_j F_j \right\} \quad (1)$$

sujeito a

$$\sum_{k \in I(j)} x_k - \sum_{k \in E(j)} x_k - (y_j' + y_j'' + y_j''') = -a_j, \quad \forall j \in J_1 \quad (2)$$

$$\sum_{k \in I(j)} x_k - \sum_{k \in E(j)} x_k - (y_j' + y_j'') = -a_j, \quad \forall j \in J_2 \quad (3)$$

$$\sum_{k \in I(j)} x_k - \sum_{k \in E(j)} x_k - (y_j''') = -a_j, \forall j \in J_3 \quad (4)$$

$$\sum_{k \in I(i)} x_k - \sum_{k \in E(i)} x_k = -a_i, \forall i \in [G - (J_1 + J_2 + J_3)] \quad (5)$$

$$\sum_{j \in (J_1 + J_2)} (y_j' + y_j'') + \sum_{j \in (J_1 + J_3)} y_j''' = \sum_{i \in G} a_i = a_{NF} \quad (6)$$

$$0 \leq x_k \leq d_k, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\underline{h}_j \leq y_j' \leq \bar{h}_j, \forall j \in (J_1 + J_2) \quad (8)$$

$$0 \leq y_j'' \leq (p_j - \bar{h}_j), \forall j \in (J_1 + J_2) \quad (9)$$

$$z_j \underline{b}_j \leq y_j''' \leq z_j \bar{b}_j, \forall j \in (J_1 + J_3) \quad (10)$$

$$z_j = 0 \text{ ou } 1, \forall j \in (J_1 + J_3) \quad (11)$$

$$\text{restrições adicionais sobre } z \quad (12)$$

onde:

- c_k - custo do par de fios no arco k
- α_j - custo (de comutação por assinante) da utilização da infra-estrutura ociosa da estação j
- β_j - custo (de comutação por assinante) da ampliação ou implantação da estação j
- F_j - custo fixo de implantação ou ampliação da estação j
- a_i - número de assinantes próprios do nó i
- d_k - capacidade em pares de fios do arco k

- h_j - mínimo utilizado (em número de assinantes) dos equipamentos de comutação da estação j
- \bar{h}_j - capacidade ocupada com equipamentos de comutação na estação j
- p_j - capacidade total da infra-estrutura existente na estação j
- b_j - número mínimo de assinantes exigidos para a ampliação ou implantação da estação j
- \bar{b}_j - capacidade de ampliação ou implantação da estação j

e as variáveis são:

- x_k - variável de fluxo do arco k
- y_j^I - variável de fluxo do arco de fechamento do tipo 1 da estação j
- y_j^{II} - variável de fluxo do arco de fechamento do tipo 2 da estação j
- y_j^{III} - variável de fluxo do arco de fechamento do tipo 3 da estação j
- z_j - variável zero-um. Se $z_j = 1$, a estação j será implantada (ou ampliada); caso contrário, $z_j = 0$.

O objetivo (1) é minimizar simultaneamente os custos associados ao problema (pares de fios na rede, instalação e equipamentos nas estações). A primeira parcela considera todos os arcos da rede primária; a segunda e a terceira, os equipamentos de comutação nas estações; e a quarta, a parte fixa dos custos de implantação ou ampliação.

As restrições de (2) a (6) dão os balanços de fluxos em todos os nós da rede: (2), (3) e (4), respectivamente, nos conjuntos de estações ampliáveis, não-ampliáveis e a implantar; (5), no conjunto dos nós comuns; e (6), no nó de fechamento.

As restrições (7) consideram a capacitação dos arcos da rede primária, enquanto (8), (9) e (10) introduzem limitantes nos arcos de fechamento.

As variáveis binárias são definidas em (11). Já as restrições adicionais (12) dependem do problema e impõem outras relações sobre as variáveis zero-um; uma delas pode ser, por exemplo, a limitação do número de estações a implantar no estágio em estudo, ou a proibição de duas ou mais estações específicas serem instaladas no mesmo estágio.

Note-se que esta formulação para o Cronograma tem estrutura principal correspondente à de um problema de fluxo de custo mínimo (PFCM). De fato, atribuídos valores zero ou um às variáveis z_j , a análise é reduzida a um PFCM. Isto sugere que a cada estágio a resolução do problema ocorra em dois níveis: no primeiro fixam-se os valores de z_j (o que equivale a determinar o conjunto de estações a serem implantadas no estágio), enquanto no segundo o PFCM associado é resolvido (ou seja, a configuração de estações determinada pela variáveis z_j é avaliada sob o critério do custo de filiação dos assinantes).

5. HIERARQUIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES

Várias técnicas de Programação Linear Inteira podem ser utilizadas na resolução de problemas mistos zero-um. Em particular, para aqueles cuja estrutura é semelhante à do modelo adotado, encontram-se na literatura abordagens que fazem uso de métodos do tipo "branch-and-bound" ou de decomposição de Benders [21]. Estas técnicas, embora conduzam à solução exata desejada, são em geral de difícil implementação computacional e têm razões de convergência consideravelmente afetadas pelas dimensões do problema.

Por outro lado, o estagiamento, apesar de reduzir o universo dos casos a explorar, não tem influência sobre o número de estações a implantar - o vetor z de variáveis binárias. Este número pode ser grande, notadamente para redes de médio e grande porte. Não há garantia então de que apenas o estagiamento do problema possibilite a obtenção do Cronograma de modo rápido e simples.

É desejável também diminuir o número de variáveis binárias. Neste sentido, uma outra simplificação é feita: consiste em hierarquizar as estações, indicando uma prioridade quanto à sua im

plantação. A cada estágio, a priorização conduz a três categorias principais: estações

- a) *preferenciais*: devem ser implantadas;
- b) *em dúvida*: têm implantação a ser decidida; e
- c) *adiadas*: com implantação postergada.

A hierarquia estabelecida decorre de uma pré-análise das condições de cada estação no estágio em estudo, e direciona a decisão a ser tomada (e portanto também o Cronograma), tendo como consequência imediata a redução do número de alternativas a pesquisar.

No modelo matemático adotado, percebe-se que priorizar as estações corresponde a fixar valores de algumas variáveis binárias z_j . Com efeito, estações classificadas como preferenciais ganham $z_j = 1$ no estágio, enquanto aquelas tidas como adiadas têm $z_j = 0$. Somente para as estações em dúvida os valores de z_j devem ser pesquisados.

Retorne-se ao exemplo numérico apresentado no item 3 deste Capítulo: 4 estágios de planejamento e 10 estações a serem implantadas até o ano horizonte. Mantenha-se a condição de instalar todas as estações. Neste caso, tem-se:

- sem estagiamento: $4^{10} = 1.048.576$ possibilidades de Cronograma;
- com estagiamento: $3 \cdot 2^{10} = 3.072$ possibilidades a estudar, no máximo.

Adote-se o Cronograma proposto, que é repetido no quadro VII.3; verifica-se

Estágio	1	2	3	4
Possibilidades	2^{10}	2^{10-5}	2^{10-5-1}	-
Implantadas	5	1	2	2

Quadro VII.3 - Cronograma possível para o exemplo

que o número real de possibilidades é

$$2^{10} + 2^5 + 2^4 = 1.072 ,$$

obtido apenas com o estagiamento do problema.

A simplificação de também hierarquizar as estações a ca da estágio pode levar à situação descrita no Quadro VII.4:

Estágio	1	2	3	4
Preferenciais	3	-	1	2
Em dúvida	5	3	2	-
Adiadas	2	2	1	-
Possibilidades	2^5	2^3	2^2	-
Implantadas	5	1	2	2

Quadro VII.4 - Abordagem com estagiamento e hierarquização.

O número de possibilidades efetivamente exploradas é

$$2^5 + 2^3 + 2^2 = 44 ,$$

donde se conclui que a combinação estagiamento + hierarquização é bastante eficiente em termos de diminuição do tamanho do problema, simplificando e conferindo velocidade à metodologia.

Conforme já se afirmou , há o risco de não - convergência ao ótimo global com a utilização da heurística apresentada. É necessário portanto garantir que a solução final obtida, embora sub-ótima, seja de boa qualidade. Esta responsabilidade recai sobre a hierarquização das estações, que é na verdade o primeiro passo de

cisório da metodologia, pois direciona o problema em cada estágio de planejamento. Hierarquias mal estabelecidas podem comprometer a solução final encontrada.

6. ESTABELECIMENTO DA HIERARQUIA

As prioridades a serem atribuídas dependem da viabilidade de de implantação de cada estação no estágio em estudo. Sem dúvida, o melhor indicador dessa viabilidade é o número de assinantes que seriam comutados pela estação caso ela fosse implantada, desconsiderados os custos fixos envolvidos. É importante notar que a disputa por estes assinantes envolve todas as estações, existentes (ampliáveis ou não) e ainda a implantar.

Por outro lado, é de interesse que os assinantes sejam filiados da maneira mais barata possível. Assim, tenta-se levantar indicadores para o estabelecimento da hierarquia através da resolução de um problema de fluxo de custo mínimo, em que todas as estações previstas para o ano horizonte são consideradas.

Tão importante quanto filiar os assinantes a custo mínimo, entretanto, é respeitar a necessidade de expansão da rede telefônica, cujas diretrizes são traçadas pelo Cronograma. É fácil perceber que estes dois objetivos são conflitantes; visar somente a evolução da rede implica num aumento de custos no estágio, relativo à refiliação de assinantes e ao lançamento de novos pares de fios; a atitude oposta provoca elevação dos custos nos estágios finais do período de planejamento, quando então torna-se obrigatório o aumento da capacidade da rede para atender a demanda.

Tendo em vista este compromisso do Cronograma com a evolução da rede, o levantamento das informações necessárias à hierarquização das estações é feito em duas etapas, nas quais se busca estabelecer um certo equilíbrio no que diz respeito a essa evolução. Em cada uma destas etapas é resolvido um problema de fluxo de custo mínimo.

Na primeira etapa, não é considerada a existência de pares de fios na rede. Neste caso, apenas a densidade de distribuição

de assinantes pelos nós tem peso na solução do PFCM. Trata-se de uma característica de certa forma revolucionária, mais comprometida com a configuração futura da rede.

A etapa II incorpora as disponibilidades de pares de fios no estágio em estudo. Isto leva a uma solução conservadora para o PFCM, uma vez que as novas estações têm maior dificuldade em competir com as antigas.

Em ambas as etapas consideram-se todas as estações - já instaladas ou não - respeitando-lhes as capacidades previstas. Não é necessário determinar as zonas de influência de cada estação; a penas o número de assinantes comutados é de interesse. A partir do modelo adotado, verifica-se que este número corresponde ao total dos fluxos dos arcos de fechamento das estações.

De posse dos resultados das etapas I e II, pode-se classificar as estações nas seguintes categorias:

- a) *preferenciais* : devem ser implantadas no estágio corrente;
- b) *quase preferenciais*: em dúvida;
- c) *quase adiadas* : em dúvida; e
- d) *adiadas* : com instalação postergada.

Note-se que as estações em dúvida são alocadas em duas categorias, dependendo da natureza da dúvida.

A distribuição das estações pelas categorias deriva da combinação dos resultados das etapas I e II. Recordem-se as características das duas etapas: a primeira condiciona a rede a evoluir em direção a um alvo (o ano horizonte), enquanto a segunda mede a adaptabilidade das estações à rede existente. O peso dado aos resultados de cada uma das etapas depende da conotação que se quer imprimir ao Cronograma: a linha conservadora recomenda que a etapa II tenha maior importância na análise classificatória das estações. Adotar uma linha mais renovadora significa prestar maior atenção aos resultados da etapa I.

É importante frisar que, além das características da rede em estudo, quem desempenha papel fundamental na hierarquização das estações é o planejador, não sendo portanto intenção deste tra

balho fixar regras para tal.

No entanto, algumas observações podem ser feitas. Seja por exemplo uma estação a ser implantada numa região de grande concentração de assinantes e alta disponibilidade de pares de fios na rede. Tal estação com certeza atrairá um número significativo de assinantes tanto na etapa I como na etapa II, justificando-se sua inclusão na categoria das preferenciais. A situação oposta (baixa concentração de assinantes e pouca disponibilidade na rede) leva a estação ao conjunto das adiadas.

Outros fatores devem ser considerados, alguns objetivos, tais como a capacidade mínima de entrada em funcionamento na estação, e outros subjetivos, que dependem das características da rede telefônica em estudo .

A Fig. VII.2 representa alguns resultados possíveis para uma estação qualquer nas etapas I e II, através de coordenadas cartesianas. Estes resultados podem ser número de assinantes ou porcentagem de ocupação da estação relativamente à capacidade final prevista. A linha a 45° simboliza a igualdade no número de assinantes conseguido pela estação em ambas as etapas. Pode-se afirmar que quanto mais próximos desta linha estão os pontos representativos das estações, melhor é o planejamento efetuado para a rede.

A respeito da Fig. VII.2 é possível comentar:

- ponto 1: a estação se encontra em região de alta densidade de assinantes e disponibilidade de pares de fios; com certeza será alocada na categoria das preferenciais.
- ponto 2: a grande disponibilidade em volta da estação atrai, na etapa II, assinantes filiados a outras estações na etapa I. Deduz-se que, se a estação fôr implantada, o gasto em rede na sua região será pequeno; no entanto, se o resultado da etapa I é insatisfatório, a atribuição de categoria deve levar em conta os comportamentos das estações adjacentes: é um caso em dúvida.
- ponto 3: a estação perde assinantes na etapa II, por se

encontrar em região de baixa disponibilidade de pares de fios. É uma situação oposta à do ponto 2 e também causa dúvida.

- ponto 4: os resultados das etapas I e II não justificam a implantação da estação no estágio em estudo, levando-a à categoria das adiadas.

Tais observações sugerem a existência, no gráfico da Fig. VII.2, de zonas preferencial, em dúvida ou adiada, indicadas respectivamente pelas letras A, B e C e delimitadas a partir das características das estações cuja implantação é estudada.

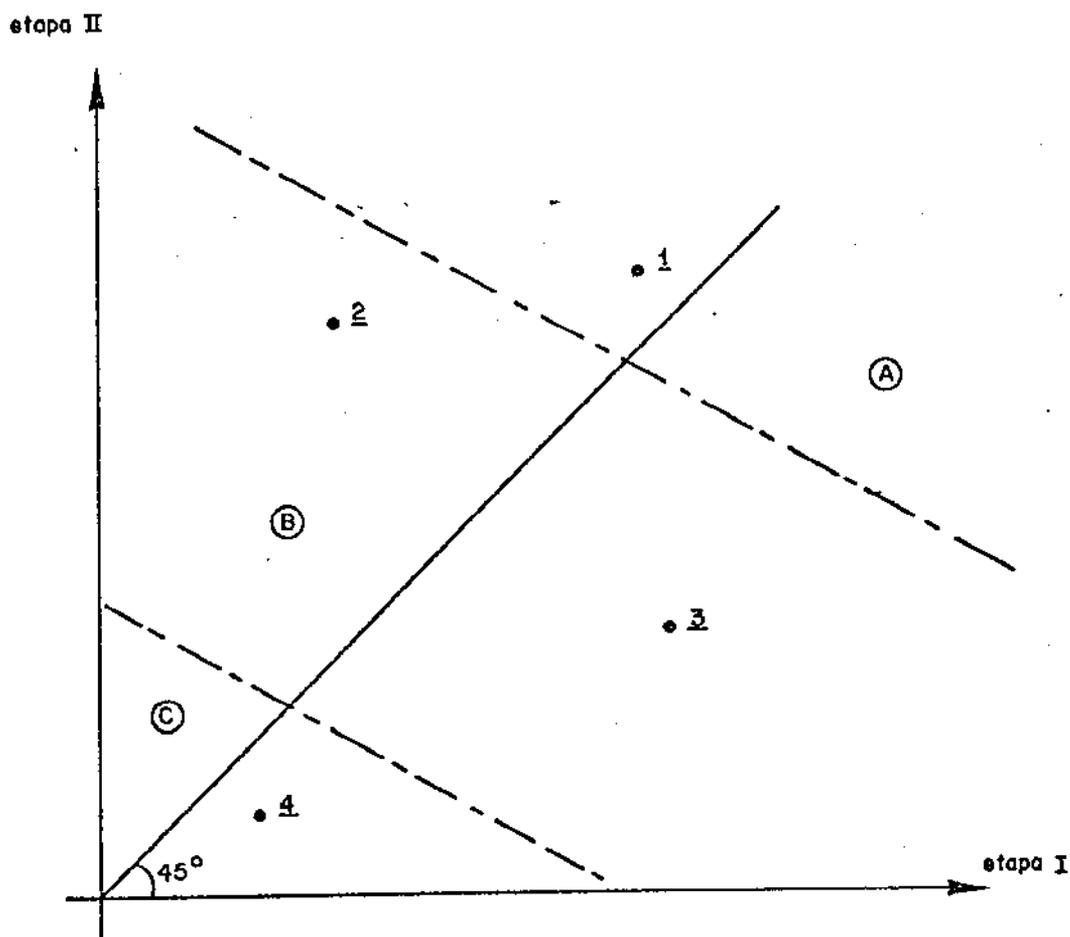


Fig. VII.2 - Exemplos de resultados das etapas I e II

A partir da formulação matemática do problema, verifica-se que hierarquizar estações significa fixar valores de algumas variáveis z_j . Como já se disse, as estações classificadas como preferenciais ganham $z_j = 1$; às adiadas atribui-se $z_j = 0$. Somente aquelas em dúvida (quase preferenciais ou quase adiadas) mantêm seu valor de z_j incógnito. A hierarquização das estações implica assim numa diminuição do número de alternativas a explorar.

7. AValiação DAS ALTERNATIVAS

O próximo passo é avaliar as alternativas contidas na classificação proposta para o estágio em estudo, testando-se as estações em dúvida. As demais estações são tidas como instaladas ou não, conforme seu z_j valha um ou zero, respectivamente. O número de alternativas a avaliar é portanto função do total de estações em dúvida; cada alternativa corresponde a uma diferente configuração de implantação destas estações, sendo representada por um vetor z de variáveis zero-um.

Decompõe-se o problema linear misto zero-um em dois níveis. No primeiro busca-se uma configuração a avaliar (caracterizada pelas variáveis z_j das estações em dúvida); a partir desta configuração, um PFCM é resolvido no segundo nível, pois o objetivo é filiar os assinantes a custo mínimo. São consideradas as disponibilidades de pares de fios da rede primária.

7.1. Estações em Teste

Com a finalidade de diminuir ainda mais o número de alternativas a pesquisar, é introduzido neste ponto um novo passo heurístico: parcelar o teste das estações em dúvida. Propõe-se que em primeiro lugar sejam testadas somente as estações quase adiadas, atribuindo-se às variáveis z_j das classificadas como quase preferenciais o número um (implantadas). O melhor resultado obtido nessa primeira parcela (ou seja, uma configuração de estações) em combinação com as quase preferenciais - sobre as quais ainda existe

indecisão - dá origem a uma outra disposição das estações pelas categorias, que é então testada novamente.

A idéia é fazer uso da seguinte inequação:

$$2^n \geq 2^k + 2^m, \text{ se } k < n \text{ e } m < n, \text{ com } k, m, n : \text{ inteiros positivos.}$$

O número de parcelas que compõem o teste das estações em dúvida não é necessariamente dois. Deve-se garantir, apenas, a avaliação das alternativas de modo rápido.

A razão de se testar primeiro as estações quase adiadas é que o resultado obtido nesta parcela do teste pode diminuir realmente o total de casos em dúvida. Esse resultado é constituído pelo valor das variáveis z_j das quase adiadas. Se a classificação é consistente, embora nada se possa afirmar em relação àquelas que ganham $z_j = 1$ no teste, as estações cujo $z_j = 0$ são adiadas com certeza.

As simplificações resultantes deste último passo heurístico possibilitam a resolução do primeiro nível do problema linear misto que modela o Cronograma através da enumeração completa das alternativas zero-um.

7.2. Fase de Transição

Cada alternativa enumerada, correspondente a uma configuração de estações, é levada ao segundo nível para resolução de um PFCM. Utiliza-se para esta resolução um algoritmo especializado (simplex revisado para grafos) [18], que compreende a escolha de uma solução factível inicial (fase 1) e a obtenção da solução factível ótima (fase 2). A fase 1 consiste em criar uma variável artificial para cada nó da rede, o que exige no mínimo tantas trocas de base quantos forem os nós. Além disso, nem sempre leva a uma boa solução factível inicial, demandando assim grande esforço da fase 2.

A enumeração explícita dos vetores zero-um faz com que vários PFCM sejam resolvidos em seqüência. Para redes de médio e

grande porte, a resolução pela via clássica (fase 1 + fase 2) pode ser demorada, uma vez que o trabalho realizado pela fase 1 aumenta com o número de nós, e o realizado pela fase 2 depende da qualidade da solução inicial. É desejável portanto agilizar o procedimento.

. fase 1

A solução factível inicial do PFCM para uma alternativa enumerada pode ser obtida mais rapidamente aproveitando-se como ponto de partida a solução ótima encontrada para a alternativa anterior: troca-se a fase 1 por uma *fase de transição*.

No grafo adotado como modelo da rede telefônica, a implantação de uma estação (se ela ainda não existe no estágio em estudo) ou sua ampliação é indicada pelo arco de fechamento do tipo 3. Assim, a variável z_j traduz, na verdade, a existência ou não deste arco de fechamento no grafo utilizado para a resolução do PFCM. Dada uma configuração de estações, o papel da fase de transição é adicionar ou retirar esses arcos a partir da disposição ótima da rede encontrada para a alternativa anterior. O processo é rápido e a solução factível inicial obtida para a alternativa em avaliação é em geral de boa qualidade, pois provém de uma solução já ótima.

A fase de transição foi estudada inicialmente por Xavier [22] em redes sem disponibilidades de pares de fios. Nakagawa [2] concluiu seu estudo, desenvolvendo uma sistemática aplicável a redes com disponibilidades. O Apêndice B deste trabalho detalha os aspectos teóricos envolvidos.

. fase 2

Considera-se ao longo deste trabalho para a obtenção da solução ótima a, assim chamada, fase 2 clássica. Não são efetuadas alterações no procedimento. Cumpre notar, entretanto, que poderia ser aproveitada a *multi-iteração* [2], que corresponde a realizar mais de uma troca de variáveis básicas em uma única iteração, dada a estrutura especial do grafo (arcos nos dois sentidos em todos os segmentos).

7.3. Enumeração das alternativas

Dadas as características da fase de transição, é razoável supor que ela será tanto mais ágil quanto menor for a diferença entre duas configurações subsequentes. Desta maneira, o processo de enumeração completa adotado deve seguir um caminho inteligente, qual seja proporcionar uma configuração de estações que se diferencie o mínimo possível da imediatamente anterior.

Em notação zero-um, o problema é estabelecer para os vetores \underline{z} uma seqüência que obedeça à regra: dois elementos consecutivos (desta seqüência) devem ser o mais parecidos possível. É fácil verificar que a lei de formação desta seqüência obriga a que os vetores \underline{z} enumerados se alterem em apenas um valor de variável z_j de cada vez.

O estabelecimento desta seqüência é um problema sempre factível, de múltipla solução. Seja, por exemplo, $n = 3$ a dimensão dos vetores \underline{z} . Assim, o total de vetores é $2^3 = 8$. Este elenco pode ser disposto, entre outras, na seguinte ordem:

vetor	z_1	z_2	z_3
1	0	0	1
2	0	1	1
3	1	1	1
4	1	0	1
5	1	0	0
6	1	1	0
7	0	1	0
8	0	0	0

A questão é saber qual das seqüências possíveis tem características de melhor aplicação ao problema do Cronograma. Desde que por construção todas as seqüências garantem mínima diferença entre dois vetores consecutivos, qualquer uma delas pode, a princípio, ser utilizada.

Recorde-se que para o levantamento de indicadores, a fim de se estabelecer a hierarquia das estações, dois PFCM são resolvidos: a etapa I não considera as disponibilidades de pares de fios na rede, as quais são incorporadas na etapa II. Ao fim desta, portanto, dispõe-se da rede ótima para a configuração na qual todas as estações são consideradas implantadas no estágio.

Assim, a seqüência desejada para enumeração dos vetores \underline{z} pode ser qualquer uma, desde que seu primeiro elemento represente a configuração do maior número possível de estações implantadas, a partir da hierarquia estabelecida.

Em outras palavras, o primeiro vetor enumerado deve apresentar todos os $z_j = 1$ (a menos das adiadas), representando a configuração de estações mais próxima da disponível (etapa II) e agilizando ao máximo a fase de transição.

Para vetores de dimensão 3, por exemplo, a seqüência pode ser:

vetor	z_1	z_2	z_3
1	1	1	1
2	1	1	0
3	1	0	0
4	1	0	1
5	0	0	1
6	0	0	0
7	0	1	0
8	0	1	1

7.4. Melhor Alternativa

A melhor alternativa corresponde à configuração mais barata, computados tanto os custos de ligação dos assinantes (rede) quanto aqueles de implantação das estações (edificação do prédio ,

energia, climatização, terreno e equipamento de comutação).

Os custos de entroncamento são desconsiderados no processo otimizador.

7.5. Mudanças de Categoria

Na primeira parcela do procedimento de avaliação das estações em dúvida, a melhor alternativa encontrada engloba apenas o teste das quase adiadas. Sobre as quase preferenciais, que permaneceram com $z_j = 1$, resta no entanto alguma dúvida. É preciso aferir também o seu comportamento, o que se pode fazer analisando-se a alternativa ótima disponível em conjunto com as quase preferenciais e reclassificando-se as estações pelas categorias, com vistas a uma nova avaliação.

Não é possível fixar regras para esta reclassificação. De um modo geral, é de se esperar que as estações quase adiadas que apresentem $z_j = 0$ na melhor alternativa sejam definitivamente adiadas. Para aquelas com $z_j = 1$, todavia, análises de cunho mais subjetivo devem ser feitas. Embora não obrigatório, é desejável que as estações pré-classificadas como preferenciais e adiadas permaneçam nestas categorias. Mudanças deste tipo são deixadas para uma etapa posterior do trabalho.

De qualquer maneira, essa reclassificação das estações deve ser tal que evite (se possível) o aparecimento de configurações já testadas.

8. REFLEXÃO SOBRE O RESULTADO

Terminada a avaliação das alternativas, é necessário estudar o resultado obtido. Pode ser interessante testar outra hierarquia ainda no mesmo estágio, particularmente quando pairam ainda dúvidas em relação às estações pré-classificadas como preferenciais e adiadas, ou se deseja comparar duas linhas diferentes de Cronograma.

No primeiro caso, a nova hierarquia deve expressar a sensibilidade adquirida pelo planejador na avaliação da anterior; apresenta, com certeza, menor número de estações em dúvida (obviamente se considera aqui que a hierarquia anterior, embora dê margem a dúvidas, seja consistente). A reflexão neste caso é um passo adiante rumo à solução do problema no estágio em estudo.

Quando se deseja comparar duas linhas de Cronograma, por outro lado, a mudança dos pesos atribuídos aos indicadores levantados nas etapas I e II pode levar a uma hierarquia bastante diferente daquela já avaliada.

Em qualquer caso, o surgimento de uma nova hierarquia exige o retorno à etapa de avaliação, para os testes das possíveis configurações.

9. MUDANÇA DE ESTÁGIO

Se a melhor alternativa - o resultado disponível - é satisfatória, adota-se para o estágio em estudo a política de implantação estabelecida, provocando necessidade de atualizações nas capacidades das estações e nas disponibilidades de pares de fios na rede, para o atendimento aos novos assinantes.

Após as atualizações, passa-se ao estágio seguinte, repetindo o procedimento descrito.

10. IMPLANTAÇÕES MODULARIZADAS

Um modelo matemático mais realista para o problema do Cronograma em cada estágio pode ser obtido quando se considera que a implantação (ou ampliação) das estações não é feita de uma só vez, mas sim aos módulos, evitando grande ociosidade dos equipamentos instalados.

Esta consideração exige o controle dos limitantes superiores dos arcos de fechamento dos tipos 2 e 3, que representam res

pectivamente a capacidade já implantada da estação, e a capacidade de ampliação (a implantar).

10.1. Estrutura de Custos

A modularidade de implantação das estações dá origem a uma estrutura de custos diferente daquela adotada para o modelo matemático já descrito. Os custos de ligação dos assinantes (rede) não se alteram; entretanto, os de implantação sofrem certas mudanças.

Implantar uma estação envolve, no modelo adotado, custos de edificação do prédio, climatização, energia e equipamentos de comutação. Por simplicidade considera-se que a edificação não é modularizada, ou seja, o prédio é construído de uma só vez. Assim, a implantação envolve um custo inicial, que inclui os gastos com terreno, e depende somente da capacidade total prevista para a estação. Já os elementos que constituem a infra-estrutura de climatização e energia e os equipamentos de comutação podem ser instalados aos módulos, conforme a necessidade, envolvendo custos fixos e variáveis.

A cada estação se associam:

- edificação : $A_{ED} + B_{ED} \cdot T$;
- climatização : $A_{CL} + B_{CL} \cdot T$;
- energia : $A_{EN} + B_{EN} \cdot T$; e
- comutação : $A_{CO} + B_{CO} \cdot T$,

onde A_{ED} : parcela fixa do custo de toda a edificação;

A_{CL}, A_{EN}, A_{CO} : parcelas fixas dos custos de cada módulo; e

$B_{ED}, B_{CL}, B_{EN}, B_{CO}$: coeficientes das parcelas variáveis de custo.

Suponha-se, por simplicidade, que os módulos são todos de mesma capacidade, seja para equipamentos de comutação ou para infra-estrutura de climatização e energia. Definam-se:

- T_F : capacidade total de assinantes prevista para a estação;
- T_{MOD} : capacidade em assinantes de cada módulo;
- T : número de assinantes da estação;
- $a(T)$: função que "arredonda" o número de assinantes para valores múltiplos da capacidade de cada módulo; e
- N_{MOD} : número de módulos implantados.

A Fig. VII.3 representa a função $a(T)$, a qual pode ser descrita matematicamente pela expressão:

$$a(T) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } T = 0 \\ \left[\text{int} \left(\frac{T}{T_{MOD}} \right) + 1 \right] \cdot T_{MOD} & , \text{ se } T \neq 0 \end{cases}$$

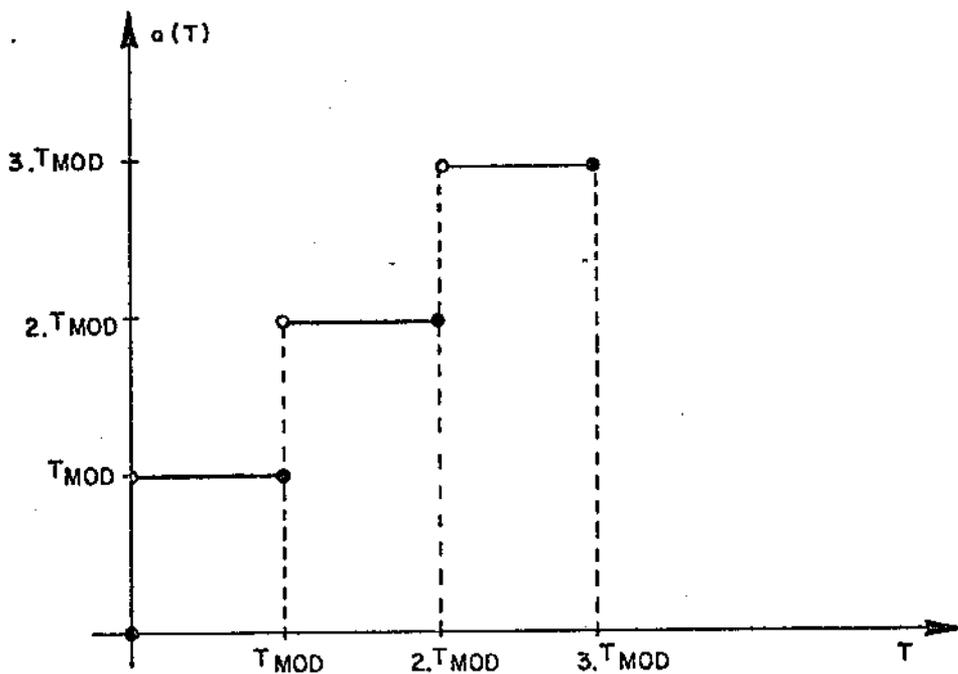


Fig. VII.3 - Função de "arredondamento" $a(T)$

O número de módulos é sempre inteiro e depende do número "arredondado" de assinantes da estação e da capacidade de cada módulo:

$$N_{MOD} = \frac{a(T)}{T_{MOD}}$$

Deste modo, tem-se os seguintes custos:

- inicial:

$$(A_{ED}) + (B_{ED}) \cdot T_F ,$$

considerado somente se a estação ainda não existe;

- fixo de implantação:

$$(A_{CL} + A_{EN} + A_{CO}) \cdot N_{MOD} ,$$

computado sempre que há implantação de módulos; e

- variável de implantação:

$$(B_{CL} + B_{EN} + B_{CO}) \cdot a(T) .$$

10.2. Sistemática de Resolução

O modelo matemático anteriormente adotado é também utilizável quando se pretende considerar implantação modularizada das estações, bastando para isso efetuar uma pequena simplificação: linearizar a função de "arredondamento", fazendo-se:

$$a(T) = T ,$$

sendo que o número de assinantes corresponde ao fluxo no arco de fechamento do tipo 3 da estação.

Nestes termos um modelo linear, semelhante ao já descrito, pode ser construído para o Cronograma em cada estágio de planejamento. O processo de avaliação das alternativas é o mesmo (enumera

ração + PFCM), a menos do cálculo dos custos associados, onde a modularização deve ser levada em conta.

Uma consequência importante da modularidade é o aumento do número total de alternativas a avaliar. Tem-se definidos os conjuntos:

- J_1 : estações existentes ampliáveis;
- J_2 : estações existentes não ampliáveis; e
- J_3 : estações ainda não implantadas.

As estações dos conjuntos J_1 e J_3 associam-se variáveis binárias. Caso se considere que a implantação ocorre de uma só vez, as estações que ganhem $z_j = 1$ num dado estágio passam, a partir do estágio seguinte, a fazer parte do conjunto J_2 , diminuindo-se o total de implantações a estudar. Se, ao contrário, as implantações (e ampliações) são feitas aos módulos, estações dos conjuntos J_1 e J_3 podem apenas eventualmente passar para J_2 ; quando o número de módulos implantados no estágio não atinge o máximo previsto para a estação, ela passa a fazer parte - se já não fizer - do conjunto J_1 , levando a variável zero-um associada ao próximo estágio.

O aumento do número de alternativas decorrente da modularização, embora significativo, não inviabiliza a sistemática de resolução proposta.

10.3. Comentários

Uma comparação entre as estruturas de custos relativas a implantações modularizadas e não-modularizadas torna-se possível através do estudo de alguns gráficos.

A Fig. VII.4 apresenta o comportamento, em termos de custo, da opção de implantações não-modularizadas. No instante da entrada em operação da estação computa-se a parcela fixa F , a qual engloba a construção de todo o prédio, a instalação de toda a infra-estrutura de climatização e energia e ainda o total de gastos fixos dos equipamentos de comutação. Cada assinante a ser filiado

ã estação provoca o gasto com equipamentos de comutação no valor de B_{CO} (no modelo de grafos, B_{CO} é o custo do arco de fechamento do tipo 2 - preenchimento da infra-estrutura ociosa). Os custos são portanto da forma

$$F + B_{CO} \cdot T$$

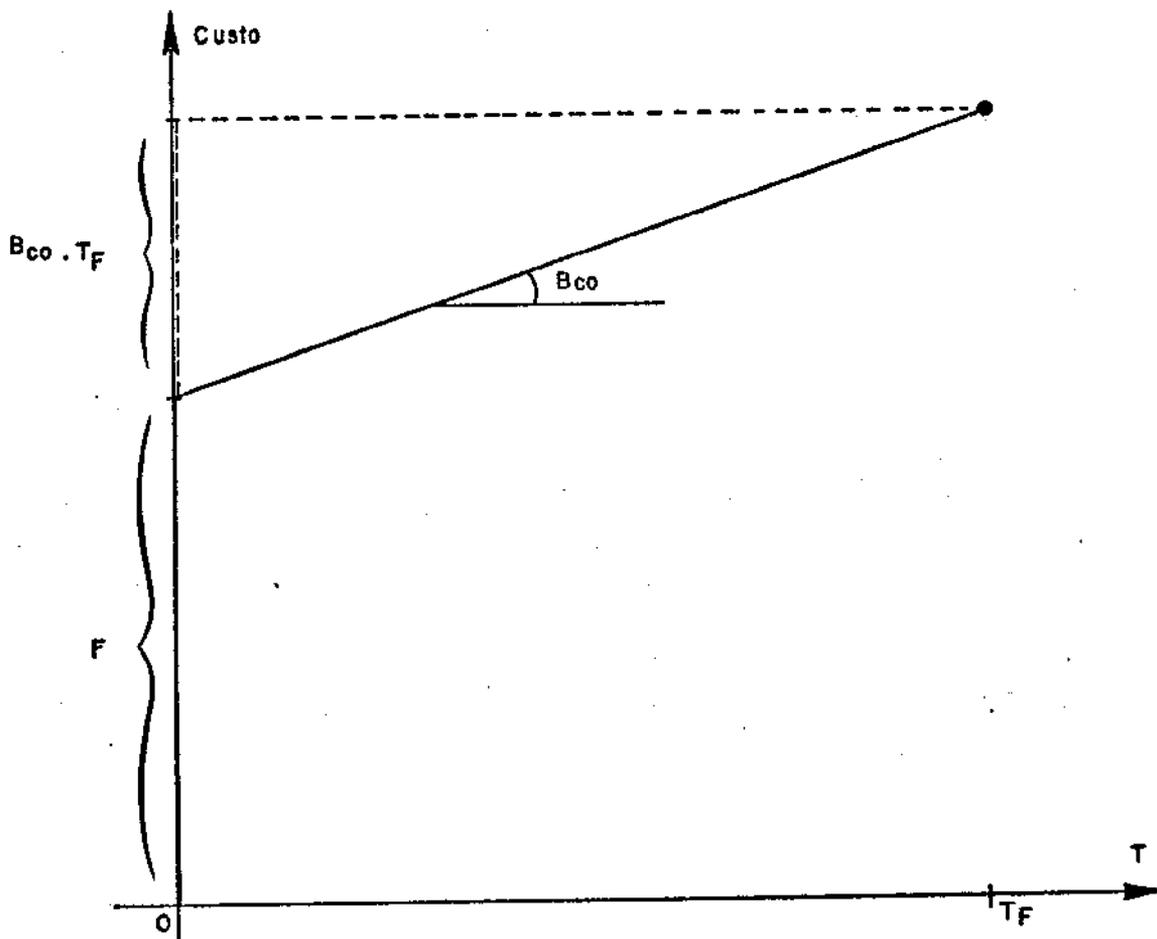


Fig. VII.4 - Implantações não-modularizadas

Se por outro lado se supõe que também todo o equipamento de comutação é instalado no ato de implantação da estação, ã parce

la fixa F adiciona-se $B_{CO} \cdot T_F$, e o gasto por assinante passa a ser nulo, o que se indica na linha tracejada da Fig. VII.4.

A estrutura de custos para implantações modularizadas é vista na Fig. VII.5, onde se admite que a capacidade final da estação, T_F , é dividida em três módulos. Supõe-se que todo o prédio é construído de uma só vez, constituindo a parcela inicial do custo. Cada módulo implantado acarreta um gasto fixo de infra-estrutura, conforme já descrito. O gasto por assinante de climatização, energia e equipamentos de comutação tem valor $(B_{CL} + B_{EN} + B_{CO})$.

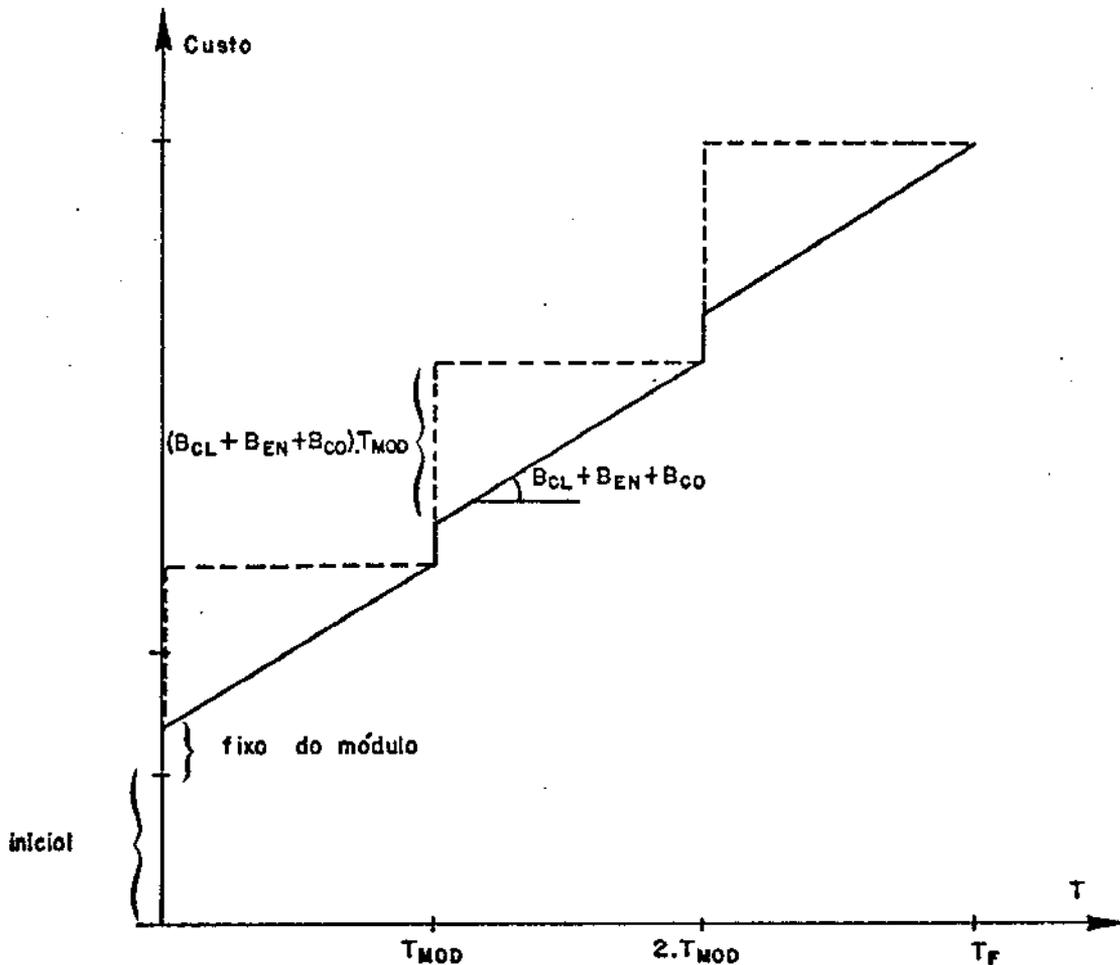


Fig. VII.5 - Implantações modularizadas

Se, a exemplo do caso não-modularizado, se consideram todos os gastos variáveis acumulados no instante de implantação de cada módulo, o gasto por assinante torna-se nulo (até esgotar-se a capacidade do módulo), conforme indicam as linhas tracejadas da Fig. VII.5.

A comparação entre os dois tipos de implantação (modularizada x não-modularizada) pode ser vista na Fig. VII.6, que apresenta a superposição das duas estruturas de custo. Verifica-se que considerar as modularidades significa trabalhar com custos sempre inferiores àqueles associados a implantações não-modularizadas, o que é sem dúvida interessante. Note-se que o custo final da estação (ocupação plena) em ambos os casos é o mesmo.

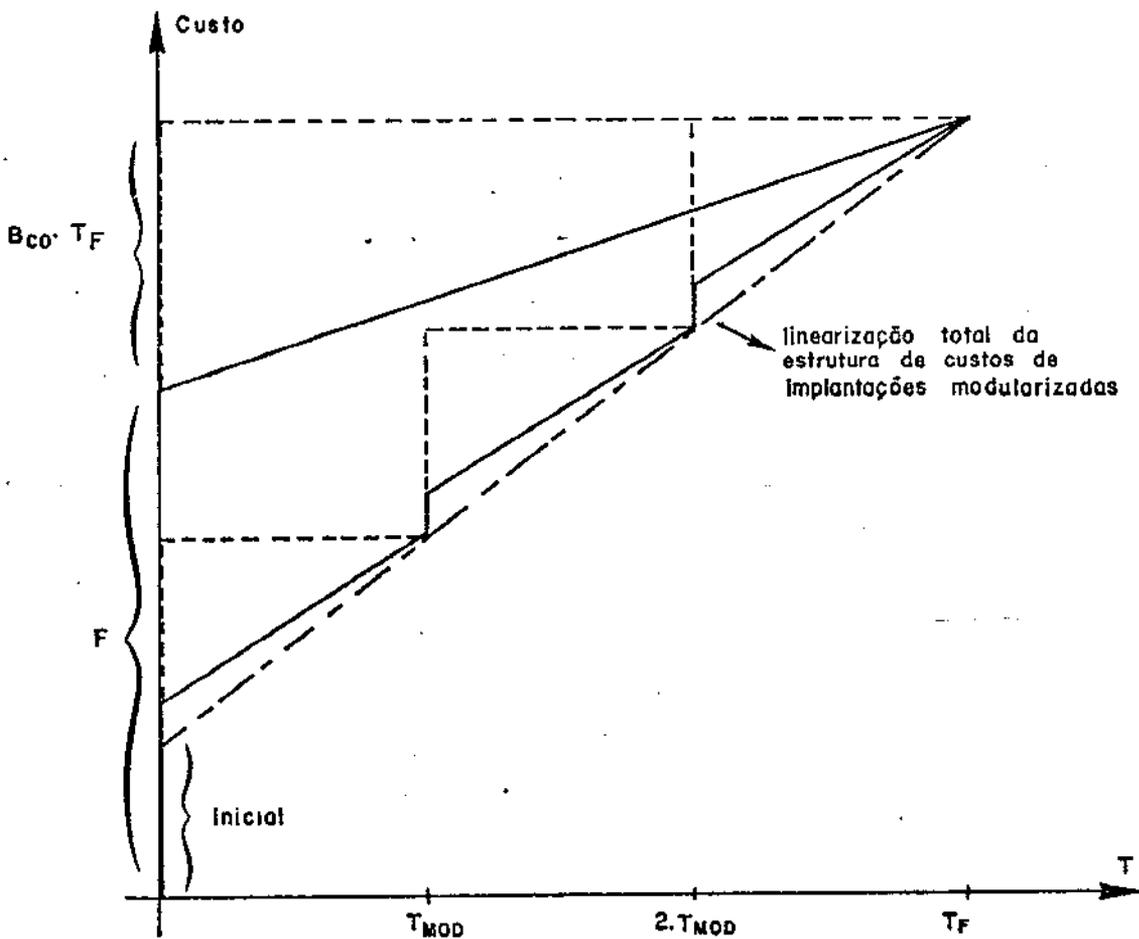


Fig. VII.6 - Comparação: modularidade x não-modularidade

Uma linearização total da estrutura de custos para im plantações modularizadas é também indicada na Fig. VII.6. Nota - se que a maior competitividade emprestada à estação com a diminuição de seu custo fixo é compensada pelo aumento do custo por assinante atendido.

11. COMPARAÇÃO ENTRE CRONOGRAMAS DIVERSOS

A comparação entre políticas diferentes de Cronograma pode ser realizada por meio de seus valores presentes, calculados a partir de uma taxa de juros comum.

Por outro lado, a abordagem adotada para o problema permite a obtenção dos custos associados ao Cronograma a cada estágio de planejamento, ou seja, o investimento feito estágio a estágio, que constitui também um bom indicador da qualidade do Cronograma escolhido.

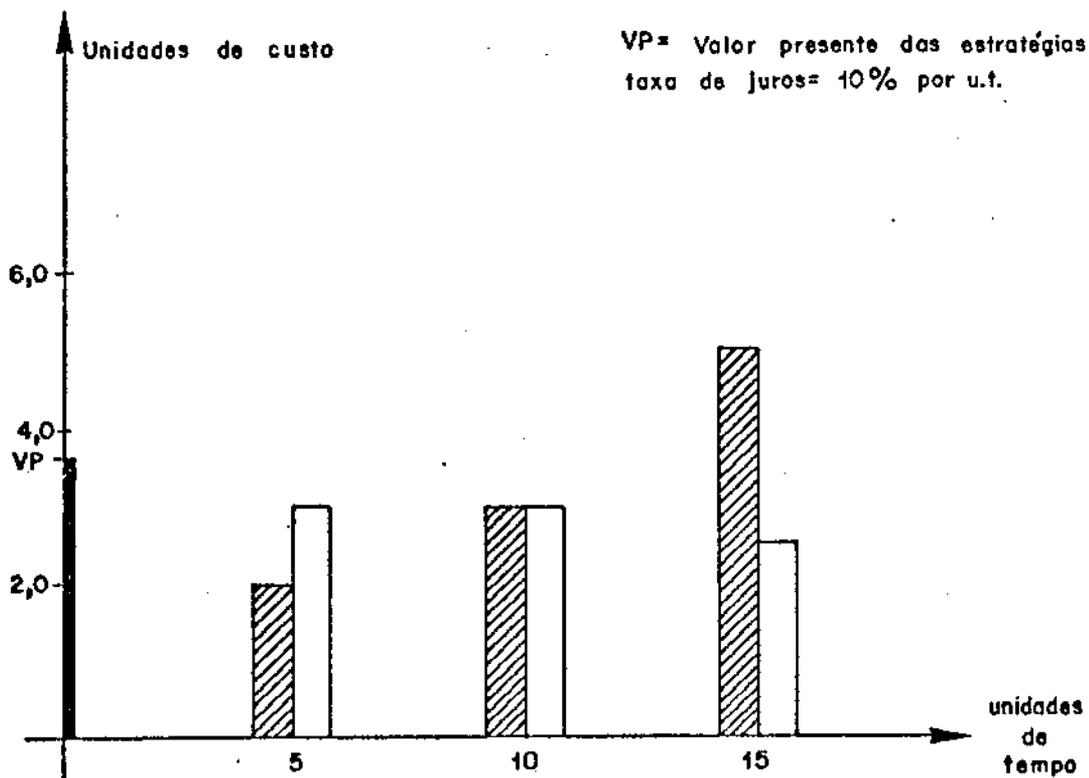


Fig. VII.7 - Duas estratégias de investimento

De fato, Cronogramas com valores presentes próximos entre si podem apresentar investimentos bastante desiguais nos estágios. Seja o exemplo hipotético da Fig. VII.7, em que um mesmo valor presente pode equivaler a duas estratégias de investimento bastante diferentes.

É interessante portanto comparar, além dos valores presentes, as distribuições de investimento ao longo dos estágios. A uniformidade desta distribuição pode ser uma opção do planejador para o estabelecimento do Cronograma.

12. COMENTÁRIOS

Descreve-se neste Capítulo a sistemática proposta para resolução do problema de obtenção do Cronograma de Implantação de estações telefônicas.

Dada sua grande dimensão, o problema é tratado por meio de passos heurísticos que permitem, embora sem garantias de convergência ao ótimo global, a obtenção de uma política de Cronograma de boa qualidade, de maneira rápida e pouco trabalhosa.

O modelo matemático desenvolvido para cada estágio em que se divide o período de planejamento é bastante rigoroso. A priorização das estações, pelo fato de direcionar a política final de Cronograma, deve por sua vez fundamentar-se em critérios que considerem tanto a necessidade de expansão da rede quanto os investimentos nela já realizados.

As alternativas de implantação em cada estágio podem ser avaliadas rapidamente, com o uso da fase de transição a partir de um processo inteligente de enumeração. A rapidez conseguida possibilita ao planejador analisar um espectro maior de Cronogramas.

Outros comentários são feitos no próximo Capítulo após a aplicação da metodologia para obtenção de Cronogramas em algumas situações-exemplo.

CAPÍTULO VIII

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A implementação computacional do procedimento descrito deu origem ao programa CRONOS II [23] utilizado para obtenção de Cronogramas nos estudos de planejamento de redes telefônicas de diversas cidades brasileiras.

Além de alguns aspectos computacionais, são relatados neste Capítulo exemplos de aplicação da metodologia a uma rede de porte médio.

2. O PROGRAMA CRONOS II

O programa foi elaborado em linguagem FORTRAN IV.

2.1. Dados Necessários

Os principais dados necessários à execução do programa CRONOS II são listados a seguir.

. rede

É preciso saber:

- o total de nós, seu número de assinantes em cada estágio de planejamento, seu padrão de terreno e seu grau e
- o total de arcos (não-orientados), seus nós terminais, seu comprimento e o número de pares de fios atualmente instalados.

. estações

Exige-se:

- o total de estações (existentes e a implantar ou ampliar), os nós da rede em que se localizam, seu número atual de assinantes, equipamentos de comutação já instalados, capacidade da infra-estrutura já implantada e dos módulos de infra-estrutura e comutação;
- somente para as estações a implantar ou ampliar, a capacidade de implantação (ou ampliação) e a área de terreno requerida para tal.

. custos

São necessários:

- custo de um quilômetro de um par de fios , incluindo sua instalação;
- custo do metro quadrado de terreno em cada um dos padrões considerados;
- custos de implantação das estações, seguindo uma das estruturas detalhadas no Capítulo VII deste trabalho e
- para o cálculo do valor presente, a taxa de juros adotada e o ano-base.

. estágios

É preciso saber:

- o número de estágios de planejamento.

2.2. Descrição das Subrotinas

Além do programa coordenador, cinco subrotinas constituem o CRONOS II.

. subrotina LEIDAU

Realiza a leitura e impressão de todos os dados fornecidos ao programa. Estes dados são transferidos ao coordenador e às demais subrotinas por meio de áreas de memória comum (COMMON's).

. subrotina CONSIG

Verifica a consistência dos dados da rede [24].

. subrotina SUBP

É utilizada na resolução dos problemas de fluxo de custo mínimo [18]. Trata-se de uma especialização para grafos do método simplex revisado, dotada de sofisticações computacionais que permitem eficiente desempenho, mesmo em redes de grande porte. Contém internamente outras dez subrotinas.

. subrotina ENUME

Consiste num algoritmo de enumeração completa que gera vetores zero-um obedecendo o critério estabelecido no item 7.3 do Capítulo VII (dois vetores consecutivamente enumerados diferem um do outro em apenas um valor de variável zero-um). Cada vetor gerado corresponde a uma alternativa de implantações no estágio considerado.

. subrotina ITERA

Realiza a fase de transição (ver Apêndice B).

2.3. Execução

Uma execução do programa CRONOS II é mostrada na Figura VIII.1, de maneira simplificada.

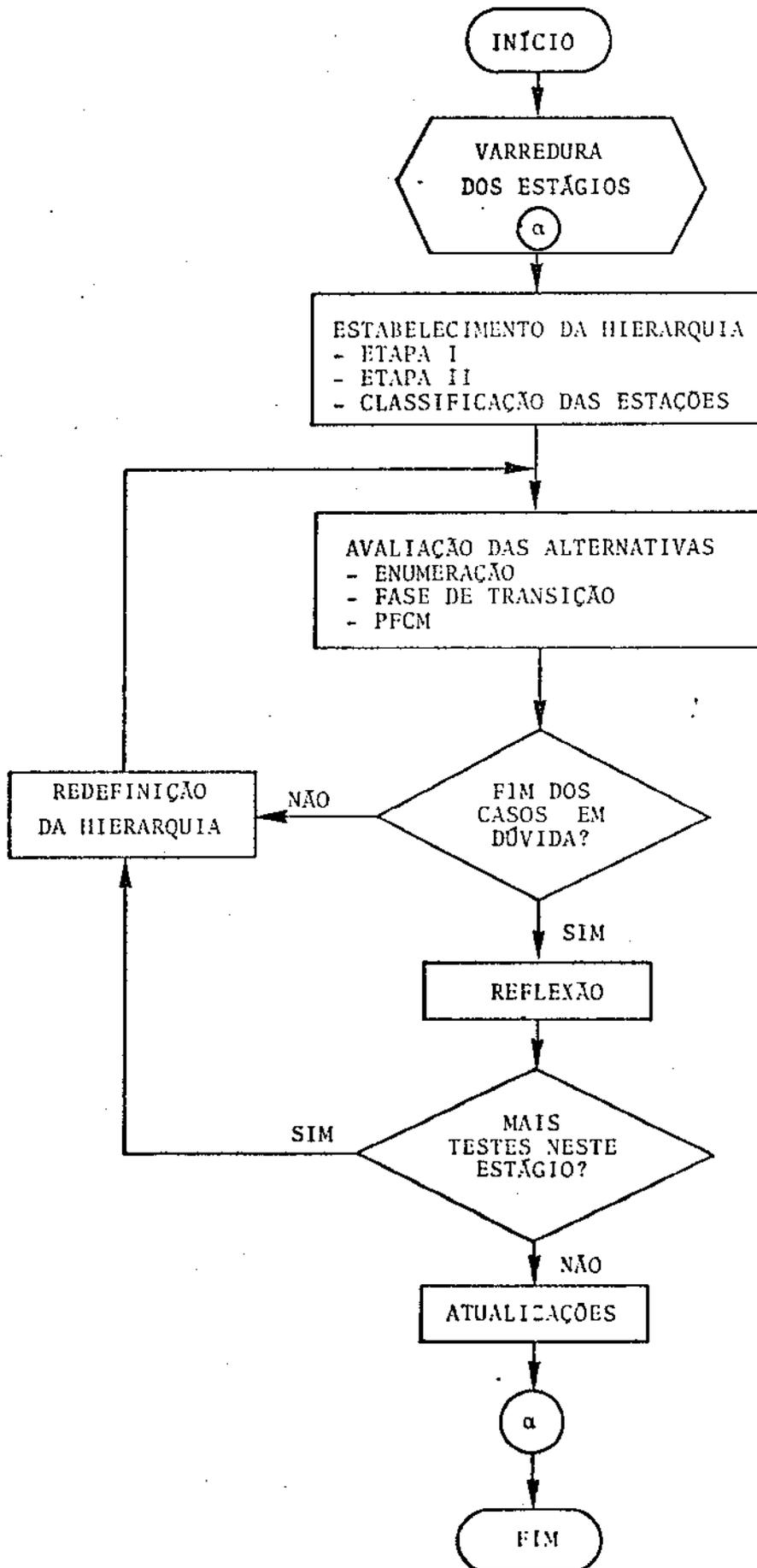


Fig. VIII.1- Diagrama simplificado do procedimento

2.4. Informações de Saída

O programa imprime, a cada estágio:

- resultados das etapas I e II;
- resultados da avaliação de alternativas;
- atualizações necessárias nas estações a partir da política de implantação escolhida e
- valor presente do Cronograma.

3. REDE-EXEMPLO

Relata-se neste trabalho a aplicação da metodologia à rede telefônica da cidade de Curitiba, cujo grafo representativo conta com 586 nós e 744 arcos não-orientados. Tal grafo é mostrado na Fig. VIII.2.

O período de planejamento considerado vai de 1984 a 2000, com estágios em 1985, 1990, 1995 e 2000; o Quadro VIII.1 indica, para cada estágio, o total de assinantes da rede.

ESTÁGIO	1985	1990	1995	2000
ASSINANTES	218.207	289.699	355.809	410.743

Quadro VIII.1 - Assinantes da rede

No ano base existem nove estações, todas não-ampliáveis, cujos dados são fornecidos pelo Quadro VIII.2: número de assinantes, total de equipamentos de comutação instalados e a capacidade (em assinantes) da infra-estrutura implantada, além do número do nó da rede em que se localiza cada estação (ver Fig. VIII.2).

- ▲ estações existentes
- ⊙ estações a implantar

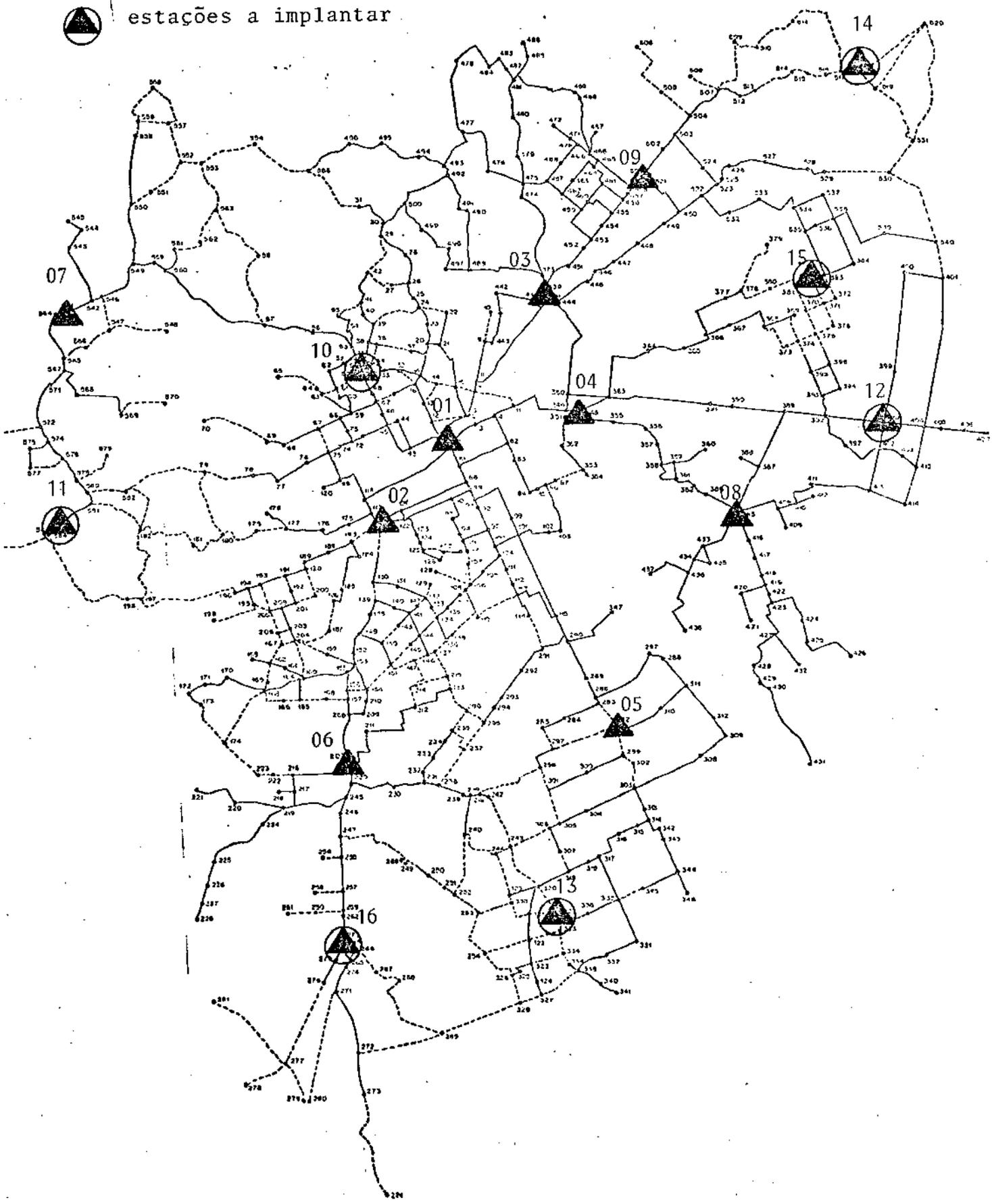


Fig. VIII.2 - Mapa da rede-exemplo

ESTAÇÃO	Nº	ASSINANTES	EQUIP. COMUTAÇÃO	INFRA-ESTRUTURA
1	1	59.000	69.000	70.000
2	116	24.000	28.000	40.000
3	439	24.000	25.000	40.000
4	348	15.000	22.000	30.000
5	282	15.000	22.000	30.000
6	207	12.000	19.000	40.000
7	541	6.000	10.000	30.000
8	385	8.000	17.000	30.000
9	501	3.000	7.000	30.000

Quadro VIII.2 - Dados das estações existentes no ano-base

Estudos de planejamento evidenciam a necessidade de instalação de sete novas estações até o ano horizonte. Suas localizações e capacidades previstas (em assinantes) estão no Quadro VIII.3.

ESTAÇÃO	Nº	CAPACIDADE
10	49	30.000
11	583	20.000
12	398	30.000
13	332	30.000
14	519	20.000
15	382	20.000
16	264	30.000

Quadro VIII.3 - Dados das estações a implantar

4. IMPLANTAÇÕES NÃO-MODULARIZADAS

Neste primeiro exemplo admite-se que a implantação das

estações ocorre de maneira não-modularizada, a menos dos equipamentos de comutação, cujas instalações acompanham o número de assinantes atendidos. Estas hipóteses implicam em assumir que os custos de implantação têm uma parcela fixa e outra variável linearmente com os assinantes.

4.1. Custos Envolvidos

Os dados de custo do exemplo são descritos a seguir.

estações existentes

Sendo tais estações não-ampliáveis, a elas não se associam custos fixos de espécie alguma. Apenas o custo dos equipamentos de comutação (por assinante) é levado em conta. Para todas as estações existentes, este custo é $150 \text{ Cr\$} \times 10^3/\text{assinante}$. No modelo de grafos do problema, este é o custo atribuído ao arco de fechamento do tipo 2 de cada estação não-ampliável.

estações a implantar

Neste caso, cada estação tem custo fixo de implantação - dependendo de sua capacidade e padrão de terreno - e custo variável de comutação (por assinante). Por hipótese, todas as estações exigem área de 1500 metros quadrados para implantação. O Quadro VIII.4 detalha os custos associados a cada estação (em $\text{Cr\$} \times 10^3$); note-se que a parcela fixa compõe-se de outras duas: infra-estrutura e terreno. A parcela variável, por seu lado, é no modelo de grafos o custo do arco de fechamento do tipo 3 da estação, enquanto esta não é implantada. Quando isto ocorre, a estação torna-se não-ampliável e o custo passa então a vigorar sobre o arco do tipo 2. Assume-se que todas as estações a implantar utilizar-se-ão do mesmo tipo de equipamentos de comutação, o que iguala os custos variáveis ($180 \text{ Cr\$} \times 10^3/\text{assinante}$).

ESTAÇÃO	Nº	INFRA-ESTRUTURA	TERRENO
10	49	1.150.000	67.500
11	583	850.000	11.250
12	398	1.150.000	11.250
13	332	1.150.000	15.750
14	519	850.000	6.750
15	382	850.000	8.250
16	264	1.150.000	24.750

Quadro VIII.4 - Custos fixos das estações a implantar

. rede

Um quilômetro de um par de fios, incluindo sua instalação, custa $60 \text{ Cr\$} \times 10^3$.

. taxa de juros

A taxa de juros considerada no cálculo do valor presente (base 1984) é 10% ao ano.

4.2. Um Cronograma

Segue-se um relatório detalhado da obtenção de um Cronograma para o exemplo. Todos os custos estão em $\text{Cr\$} \times 10^3$.

. estágio 1 - ano 1985

Os resultados das etapas I e II (em número de assinantes) são mostrados no Quadro VIII.5.

ESTAÇÃO	COM. INST.	INF. INST.	CAP. AMPL.	ETAPA I	ETAPA II
1 1	69000	70000	0	61456	69000
2 116	28000	40000	0	27151	28000
3 439	25000	40000	0	24000	24000
4 348	22000	30000	0	22000	22000
5 282	22000	30000	0	19007	20753
6 207	19000	40000	0	19000	19000
7 541	10000	30000	0	9242	9401
8 385	17000	30000	0	14910	15144
9 501	7000	30000	0	7000	4920
10 49	0	0	30000	0	0
11 583	0	0	20000	1070	911
12 398	0	0	30000	2173	1047
13 332	0	0	30000	3948	1504
14 519	0	0	20000	989	989
15 382	0	0	20000	2182	1163
16 264	0	0	30000	4079	375

Quadro VIII.5 - Resultados das etapas I e II no estágio 1

A partir destes resultados, efetua-se a classificação das estações, indicada no Quadro VIII.6. Nenhuma estação reúne condições de ser implantada, dados os maus resultados obtidos nas etapas I e II. Apenas a estação 13 gera alguma dúvida, enquadrando-se por isso na categoria das quase adiadas.

CATEGORIA	ESTAÇÕES
PREFERENCIAL	-
QUASE PREFERENCIAL	-
QUASE ADIADA	13
ADIADA	10,11,12,14,15,16

Quadro VIII.6 - Classificação das estações no estágio 1

Duas alternativas devem ser avaliadas: implantar ou não a estação 13. O resumo de custos desta avaliação é visto no Quadro VIII.7.

ALT.	ESTAÇÕES EM TESTE	INFRA-ESTRUTURA	TERRENO	COMUTAÇÃO	REDE	TOTAL
1	13	1.150.000	15.750	270.720	4.357.348	5.793.818
2	-	0	0	86.250	4.665.765	4.752.015

Quadro VIII.7 - Resumo de custos do estágio 1

A alternativa 2 é escolhida como ótima. Verifica-se que a diferença entre os custos totais das duas alternativas corresponde praticamente ao custo fixo de implantar a estação 13; o custo de rede primária, por seu lado, varia muito pouco, indicando que a disponibilidade de pares de fios é suficiente para atender economicamente os assinantes do estágio 1 e desfavorece a implantação de novas estações.

A situação final do estágio é mostrada no Quadro VIII.8.

Quadro VIII.8 - Situação ao final do estágio 1

ESTAÇÃO	ETAPA I	ETAPA II	FINAL
1 1	61456	69000	69000
2 116	27151	28000	28520
3 439	24000	24000	24034
4 348	22000	22000	22000
5 282	19007	20753	22000
6 207	19000	19000	19055
7 541	9242	9401	10000
8 385	14910	15144	17000
9 501	7000	4920	6598
10 49	0	0	0
11 583	1070	911	0
12 398	2173	1047	0
13 332	3948	1504	0
14 519	989	989	0
15 382	2182	1163	0
16 264	4079	375	0

O valor presente do Cronograma é 4.320.013.

. estágio 2 - ano 1990

Os resultados das etapas I e II são mostrados no Quadro VIII.9.

ESTAÇÃO	COM. INST.	INF. INST.	CAP. AMPL.	ETAPA I	ETAPA II
1 1	69000	70000	0	69000	70000
2 116	28520	40000	0	28520	33397
3 439	25000	40000	0	25000	29362
4 348	22000	30000	0	22324	24340
5 282	22000	30000	0	22000	24560
6 207	19055	40000	0	29257	23362
7 541	10000	30000	0	13390	14178
8 385	17000	30000	0	20574	22149
9 501	7000	30000	0	13621	9083
10 49	0	0	30000	7566	10011
11 583	0	0	20000	5765	4473
12 398	0	0	30000	7328	5819
13 332	0	0	30000	9494	6432
14 519	0	0	20000	3041	2602
15 382	0	0	20000	5862	2509
16 264	0	0	30000	6957	7422

Quadro VIII.9 - Resultados das etapas I e II no estágio 2

A classificação das estações é indicada no Quadro VIII.10.

CATEGORIA	ESTAÇÕES
PREFERENCIAL	10
QUASE PREFERENCIAL	13,16
QUASE ADIADA	11,12,15
ADIADA	14

Quadro VIII.10 - Classificação das estações no estágio 2

Oito alternativas correspondem ao teste das estações quase adiadas: o resumo de custos é apresentado no Quadro VIII.11. No te-se que esta avaliação não inclui o teste das estações 13 e 16 (quase preferenciais), que são tidas como implantadas. Além disso, também as estações 10 e 14 têm seus valores de variáveis zero-um fixados.

ALT.	ESTAÇÕES EM TESTE	INFRA-ESTRUTURA	TERRENO	COMUTAÇÃO	REDE	TOTAL
1	11,12,15	6300000	138750	11607300	6935400	24981450
2	11,12	5450000	130500	11574600	7275971	24431071
3	11	4300000	119250	11357460	8512733	24289443
4	11 15	5150000	127500	11479650	7829901	24587051
5	15	4300000	116250	11345400	8824899	24586549
6	-	3450000	108000	11223210	9507731	24288941
7	12	4600000	119250	11440350	8270969	24430569
8	12,15	5450000	127500	11473050	7930398	24980948

Quadro VIII.11 - Resumo de custos do estágio 2

A alternativa 6 é a mais barata, sendo por isso escolhida como ótima nesta primeira classificação. Esta alternativa recomenda a não-implantação das três estações neste estágio. Juntando esta informação à necessidade de se avaliar as estações quase preferenciais, efetua-se uma reclassificação, detalhada no Quadro VIII.12. A estação 10 é incluída no teste.

CATEGORIA	ESTAÇÕES
PREFERENCIAL	-
QUASE PREFERENCIAL	10,13,16
QUASE ADIADA	-
ADIADA	11,12,14,15

Quadro VIII.12 - Reclassificação das estações no estágio 2

O resumo de custos está no Quadro VIII.13.

ALT.	ESTAÇÕES EM TESTE	INFRA-ESTRUTURA	TERRENO	COMUTAÇÃO	REDE	TOTAL
1	10,13,16	3450000	108000	11223210	9507731	24288941
2	10,13	2300000	83250	11018130	10267110	23668490
3	10	1150000	67500	10807590	11673858	23698948
4	10, 16	2300000	92250	11072340	10767431	24232021
5	16	1150000	24750	10783350	11669125	23627225
6	-	0	0	10518600	12575554	23094154
7	13	1150000	15750	10729140	11168804	23063694
8	13,16	2300000	40500	10934220	10409425	23684145

Quadro VIII.13 - Resumo de custos do estágio 2

A alternativa 7 é a mais barata. É interessante verificar que ela recomenda o adiamento da estação 10, anteriormente classificada como preferencial. Tal decisão deve ser respeitada, dentro do critério de mínimo custo. Assim, a situação ao final do estágio é a do Quadro VIII.14.

ESTAÇÃO	ETAPA I	ETAPA II	FINAL
1 1	69000	70000	70000
2 116	28520	33397	38557
3 439	25000	29362	29944
4 348	22324	24340	29573
5 282	22000	24560	24672
6 207	29257	23362	30237
7 541	13390	14178	18676
8 385	20574	22149	27760
9 501	13621	9083	13262
10 49	7566	10011	0
11 583	5765	4473	0
12 398	7328	5819	0
13 332	9494	6432	7018
14 519	3041	2602	0
15 382	5862	2509	0
16 264	6957	7422	0

Quadro VII.14 - Situação ao final do estágio 2

O valor presente acumulado do Cronograma é 17.338.867.

estágio 3 - ano 1995

Os resultados das etapas I e II estão no Quadro VIII.15.

ESTAÇÃO	COM. INST.	INF. INST.	CAP. AMPL.	ETAPA I	ETAPA II
1 1	70000	70000	0	70000	70000
2 116	38557	40000	0	38557	40000
3 439	29944	40000	0	29944	33760
4 348	29573	30000	0	29573	30000
5 282	24672	30000	0	24672	26389
6 207	30237	40000	0	30657	33307
7 541	18676	30000	0	18676	21932
8 385	27760	30000	0	27760	30000
9 501	13262	30000	0	20955	20112
10 49	0	0	30000	10063	11639
11 583	0	0	20000	7935	4932
12 398	0	0	30000	10571	8694
13 332	7018	30000	0	13314	11991
14 519	0	0	20000	5664	4290
15 382	0	0	20000	7786	2506
16 264	0	0	30000	9682	6257

Quadro VIII.15 - Resultados das etapas I e II no estágio 3

A classificação das estações é mostrada no Quadro VIII.16. Note-se que a estação 13, implantada no estágio anterior, é agora antiga e não-ampliável, não devendo por isso ser considerada na classificação.

CATEGORIA	ESTAÇÕES
PREFERENCIAL	10
QUASE PREFERENCIAL	12,16
QUASE ADIADA	11,14,15
ADIADA	-

Quadro VIII.16 - Classificação das estações no estágio 3

As três estações quase adiadas geram oito alternativas de implantação, considerando-se que nesta primeira parcela do teste as quase preferenciais são tidas como instaladas, o mesmo acontecendo com a estação 10 (preferencial). O Quadro VIII.17 apresenta o resumo de custos.

ALT.	ESTAÇÕES EM TESTE	INFRA-ESTRUTURA	TERRENO	COMUTAÇÃO	REDE	TOTAL
1	11,14,15	6000000	129750	11212860	6224176	23566786
2	11,14	5150000	121500	11207730	6564015	23043245
3	11	4300000	114750	11076210	7425202	22916162
4	11, 15	5150000	123000	11084160	7075219	23432379
5	15	4300000	111750	10942530	8164989	23519269
6	-	3450000	103500	10934580	8514972	23003052
7	14	4300000	110250	11066100	7653785	23130135
8	14,15	5150000	118500	11071230	7313946	23653676

Quadro VIII.17 - Resumo de custos do estágio 3

A mais barata é a alternativa 3, que permite a implantação de somente uma das quase adiadas (estação 11). Deve-se então testar as quase preferenciais. Para isto, é feita uma reclassificação das estações, detalhada no Quadro VIII.18.

CATEGORIA	ESTAÇÕES
PREFERENCIAL	10
QUASE PREFERENCIAL	11,12,16
QUASE ADIADA	-
ADIADA	14,15

Quadro VIII.18 - Reclassificação das estações no estágio 3

O resumo de custos é apresentado no Quadro VIII.19..

ALT.	ESTAÇÕES EM TESTE	INFRA-ESTRUTURA	TERRENO	COMUTAÇÃO	REDE	TOTAL
1	11,12,16	4300000	114750	11076210	7425202	22916162
2	11,12	3150000	90000	10908420	8150729	22299149
3	11	2000000	78750	10777050	11290637	24146437
4	11, 16	3150000	103500	10944840	10565110	24763450
5	16	2300000	92250	10795800	11667575	24855625
6	-	1150000	67500	10628010	12393102	24238612
7	12	2300000	78750	10766790	9240499	22386039
8	12,16	3450000	103500	10934580	8514972	23003052

Quadro VIII.19 - Resumo de custos do estágio 3

A alternativa 2 é a mais barata; ela proíbe apenas a implantação da estação 16. Não é necessário realizar mais testes neste estágio, sendo a situação final aquela descrita pelo Quadro VIII.20. São implantadas as estações 10, 11 e 12.

ESTAÇÃO	ETAPA I	ETAPA II	FINAL
1 1	70000	70000	70000
2 116	38557	40000	40000
3 439	29944	33760	33734
4 348	29573	30000	30000
5 282	26472	26389	26389
6 207	30657	33307	39005
7 541	18676	21932	21932
8 385	27760	30000	30000
9 501	20955	20112	24667
10 49	10063	11639	11560
11 583	7935	4932	4932
12 398	10571	8694	10935
13 332	13314	11991	12655
14 519	5664	4290	0
15 382	7786	2506	0
16 264	9682	6257	0

Quadro VIII.20 - Situação ao final do estágio 3

O valor presente acumulado do Cronograma é 25.154.582.

. estágio 4 - ano 2000

Os resultados das etapas I e II são mostrados no Quadro VIII.21.

ESTAÇÃO	COM. INST.	INF. INST.	CAP. AMPL.	ETAPA I	ETAPA II
1 1	70000	70000	0	70000	70000
2 116	40000	40000	0	40000	40000
3 439	33734	40000	0	33734	36432
4 348	30000	30000	0	30000	30000
5 282	26389	30000	0	26389	28077
6 207	39005	40000	0	39005	40000
7 541	21932	30000	0	22057	24663
8 385	30000	30000	0	30000	30000
9 501	24667	30000	0	26817	27807
10 49	11560	30000	0	15988	21795
11 583	4932	20000	0	10766	8888
12 398	10935	30000	0	16929	19415
13 332	12655	30000	0	18901	18269
14 519	0	0	20000	8313	5094
15 382	0	0	20000	9394	2338
16 264	0	0	30000	12450	7965

Quadro VIII.21 - Resultados das etapas I e II no estágio 4

A classificação das estações é apresentada no Quadro VIII.22. Em princípio, deseja-se que as três estações restantes sejam implantadas neste último estágio. Dado o seu pequeno número, entretanto, opta-se pela enumeração completa de possibilidades, a tribuindo a todas as estações a categoria quase preferencial.

CATEGORIA	ESTAÇÕES
PREFERENCIAL	-
QUASE PREFERENCIAL	14, 15, 16
QUASE ADIADA	-
ADIADA	-

Quadro VIII.22 - Classificação das estações do estágio 4

As oito alternativas têm seu resumo de custos no Quadro VIII.23.

ALT.	ESTAÇÕES EM TESTE	INFRA-ESTRUTURA	TERRENO	COMUTAÇÃO	REDE	TOTAL
1	14,15,16	2850000	39750	9549090	5924769	18363609
2	14,15	1700000	15000	9492870	7221080	18428950
3	14	850000	6750	9474660	7489618	17821028
4	14, 16	2000000	31500	9530880	6193308	17755688
5	16	1150000	24750	9390570	7249405	17814725
6	-	0	0	9334350	8545716	17880066
7	15	850000	8250	9365340	8211858	18435448
8	15,16	2000000	33000	9421560	6915547	18370107

Quadro VIII.23 - Resumo de custos no estágio 4

A mais barata é a alternativa 4, que deixa de implantar a estação 15. Não há reclassificação possível, sendo a situação final apresentada no Quadro VIII.24.

ESTAÇÃO	ETAPA I	ETAPA II	FINAL
1 1	70000	70000	70000
2 116	40000	40000	40000
3 439	33734	36432	36432
4 348	30000	30000	30000
5 282	26389	28077	28126
6 207	39005	40000	40000
7 541	22057	24663	24663
8 385	30000	30000	30000
9 501	26817	27807	28414
10 49	15988	21795	21852
11 583	10766	8888	9600
12 398	16929	19415	20238
13 332	18901	18269	18269
14 519	8313	5094	5235
15 382	9394	2338	0
16 264	12450	7965	7914

Quadro VIII.24 - Situação ao final do estágio 4

O valor presente acumulado do Cronograma é 29.018.737.

4.2. Análise do Resultado Obtido

Inicialmente é preciso destacar o pequeno número de testes necessários ao estabelecimento de um Cronograma no exemplo apresentado. De fato, 7 estações a serem implantadas em 4 estágios de planejamento significa

$$(4+1)^7 = 5^7 = 78.125$$

possibilidades, quando não se restringe a instalação das estações ao período de planejamento.

A aplicação da metodologia proposta requereu o teste de

$$(2^1) + (2^3 + 2^3) + (2^3 + 2^3) + (2^3) = 42 \text{ configurações,}$$

esquecido o fato de reclassificações num mesmo estágio gerarem, por vezes, alternativas já avaliadas.

Esta economia de testes permite o tratamento do problema, dada a redução no tempo computacional exigido.

Quanto à qualidade da solução final, a análise pode ser feita sob dois critérios principais: o comportamento das estações ao longo do tempo e o custo total do Cronograma.

O primeiro parâmetro, menos objetivo, é estudado através de gráficos indicativos da trajetória das estações, representada em termos do número de assinantes atendidos nos diversos estágios de planejamento. Interessa medir o quanto a implantação de uma estação afeta a rede ao seu redor (observe-se que uma das características desejáveis num Cronograma é o estabelecimento de uma política de implantações que implique em cortes de área não-abruptos). Assim, os gráficos são construídos por estação, levando-se em conta os resultados das etapas I e II em cada estágio de planejamento. Uma análise global destes gráficos pode levar a um rearranjo do Cronograma.

Quanto ao critério de custo, não há comparação possível entre o obtido e aquele relativo ao Cronograma ótimo, que é desconhecido. Um eventual rearranjo do Cronograma, entretanto, conduz a um novo custo; a melhoria (ou não) resultante é indicadora da qualidade da solução.

A Fig. VIII.3 mostra o comportamento padrão das estações antigas ao longo do período de planejamento considerado no exemplo. As abscissas e ordenadas representam respectivamente os resultados das etapas I e II (em porcentagem de ocupação). Note -se que as estações em geral atendem mais assinantes na etapa II (que considera as disponibilidades de pares de fios), uma vez que a rede ao seu redor já se encontra preparada.

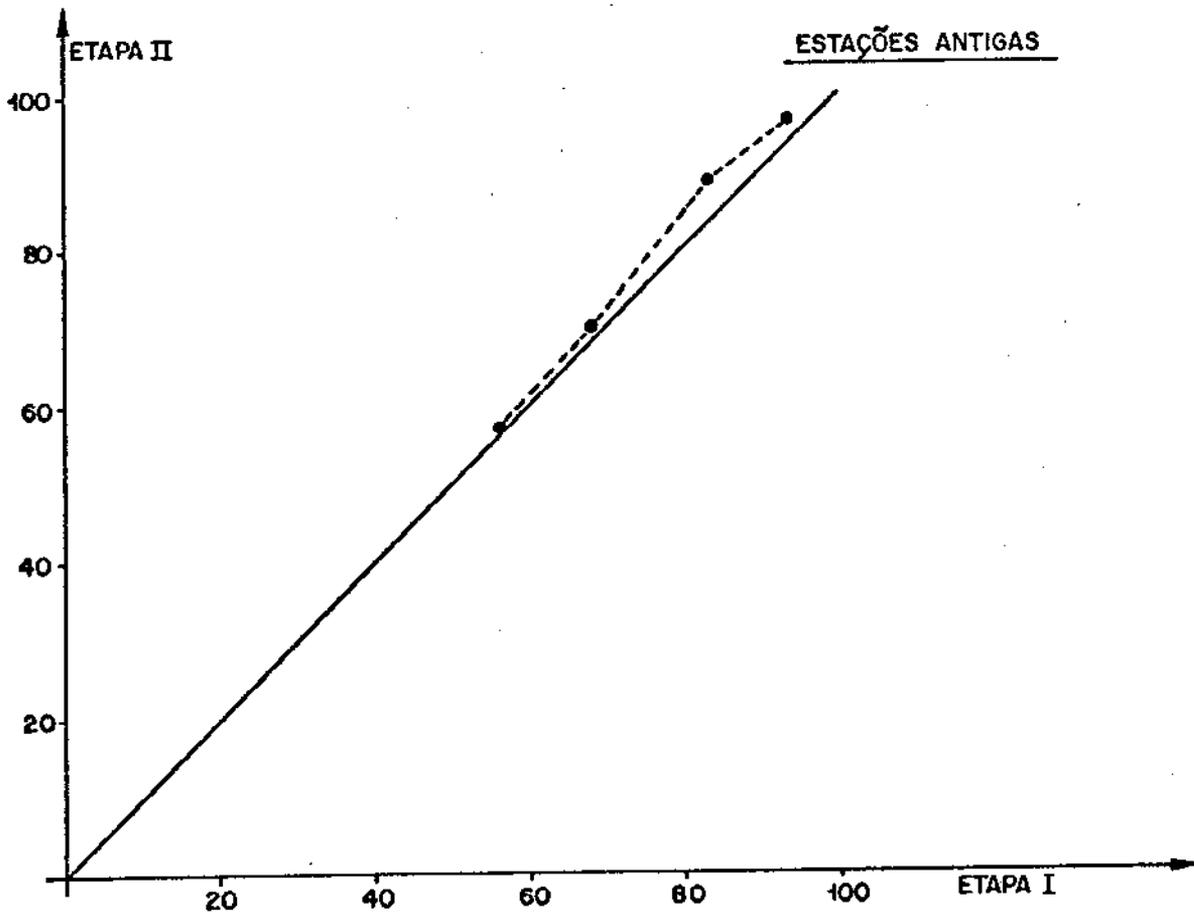


Fig. VIII.3 - Comportamento das estações antigas

O comportamento das estações novas (em número de assinantes) é detalhado na Fig. VIII.4, a qual indica também o estágio em que ocorre a implantação de cada estação. Casos extraordinários à parte, é possível verificar que:

- a tendência das estações novas é perder assinantes para as antigas na etapa II (apenas a estação 10 mantém o comportamento típico de antiga);
- algumas estações vêm diminuindo ao longo dos estágios os assinantes atendidos na etapa II, não obstante o aumento de densidade constatado na etapa I (caso específico das estações 14 e 15, a qual é inclusive adiada para além do período de planejamento); e
- a implantação de certas estações parece regularizar seu comportamento, tornando mais próximos os resultados das etapas I e II nos estágios seguintes (estações 11, 12 e 13).

A partir do Cronograma já estabelecido, a idéia é então alterar - antecipando ou adiando - o estágio de implantação de algumas estações, procurando estabilizar-lhes a trajetória de evolução (bem como das demais estações da rede) sem aumentar o custo da solução.

Dentre as candidatas a tal experiência, destacam-se as estações 10 e 16. A primeira, por ter sua implantação adiada quando seu comportamento já era típico de uma estação antiga; a segunda, por apresentar uma trajetória muito inconstante ao longo do período.

. estação 10

Modifica-se apenas sua data de implantação, trazendo - a para o estágio 2. O restante do Cronograma permanece inalterado. Note-se que não são necessários testes de alternativas; trata-se da avaliação de um Cronograma já fixado.

A Fig. VIII.5 superpõe os resultados dos Cronogramas ori

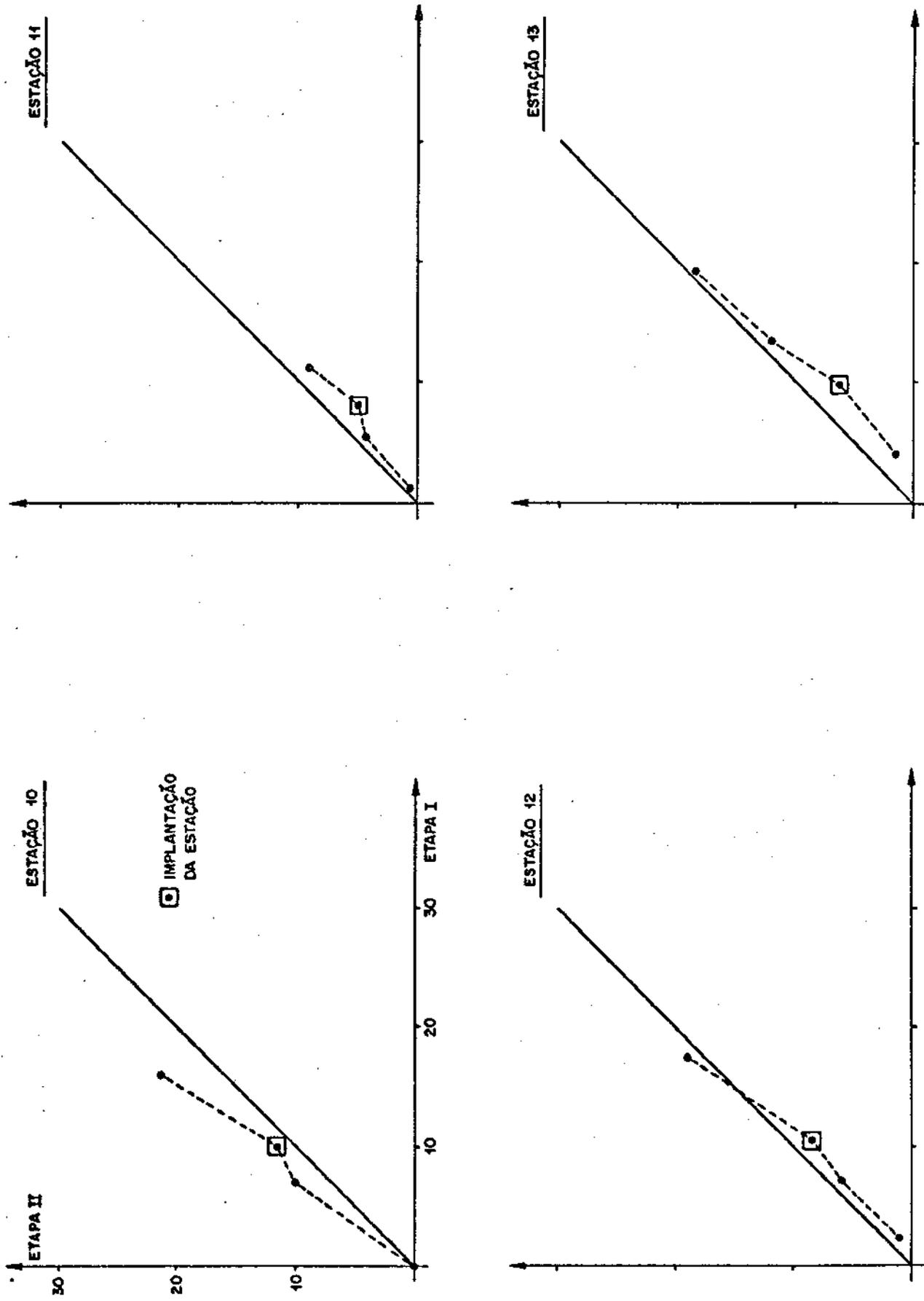


Fig. VIII.4 - Comportamento das estações novas

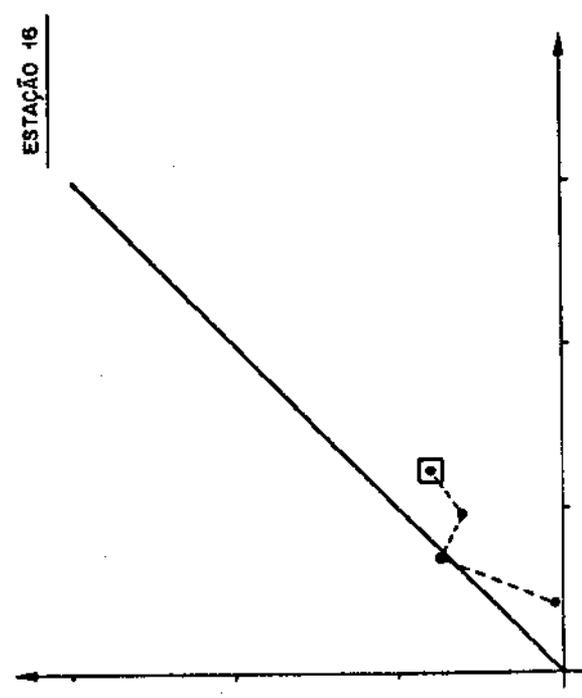
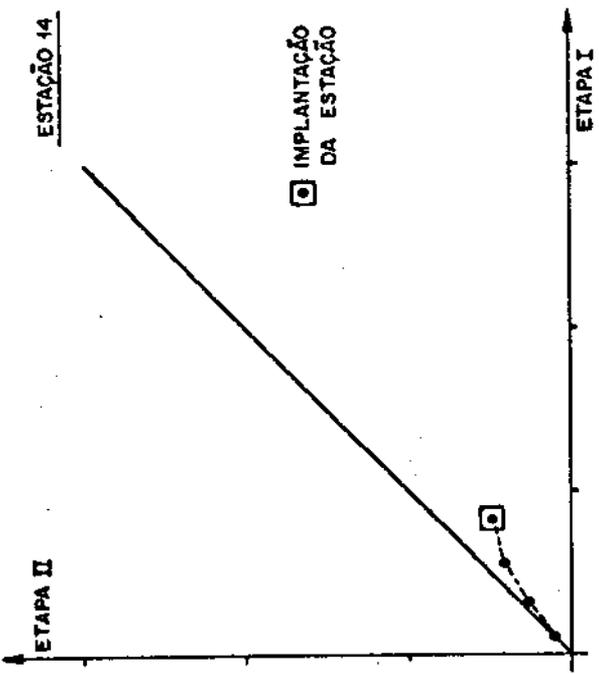
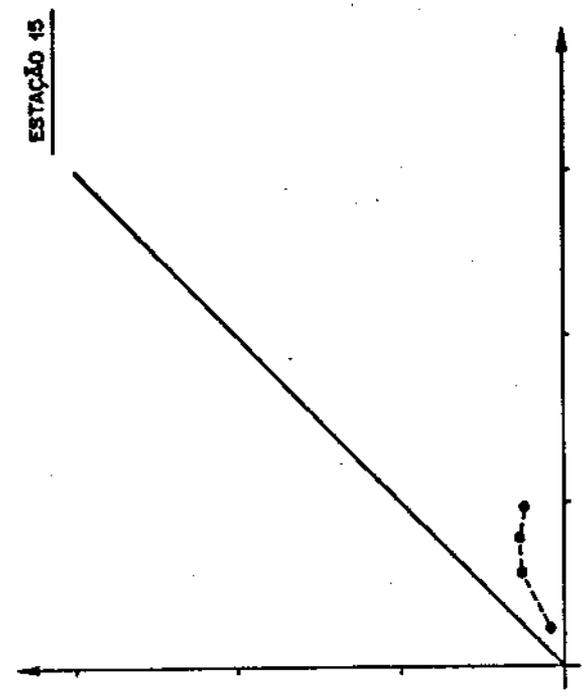


Fig. VIII.4 - (Continuação)

ginal e rearranjado. Implantar a estação 10 no estágio 2 tornou-a mais competitiva nos demais estágios. Seu comportamento típico de estação antiga foi reforçado.

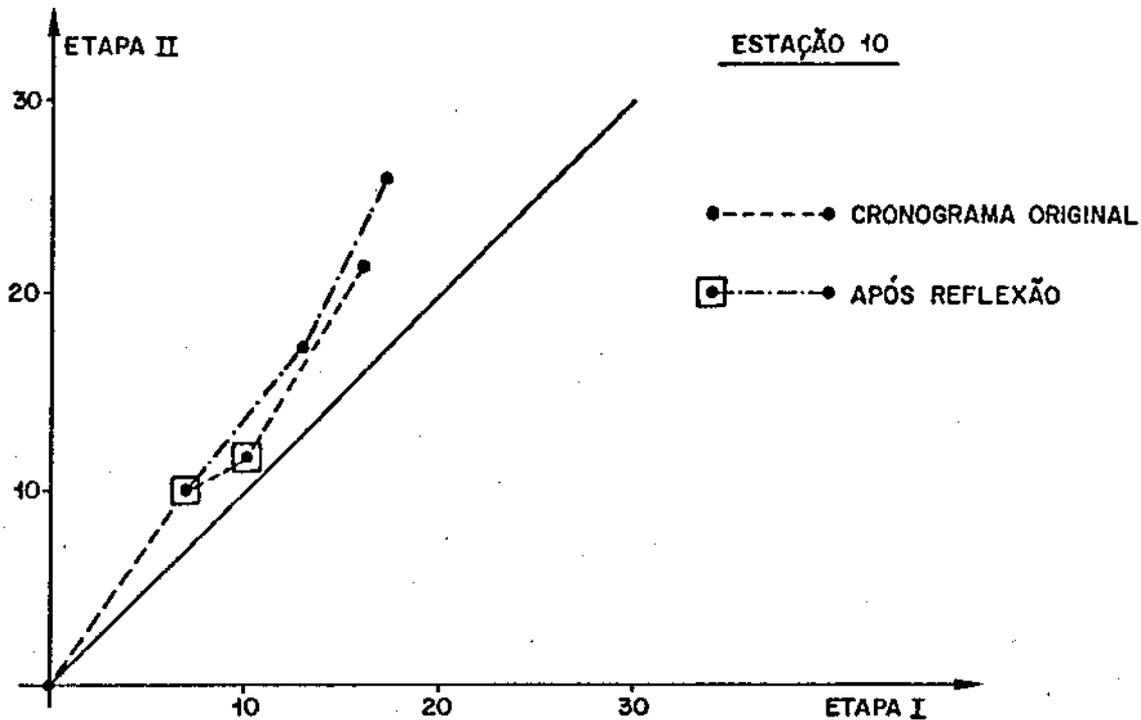


Fig. VIII.5 - Antecipação da estação 10

O comportamento das demais estações antigas e novas não passou por mudanças dignas de nota. O valor presente aumentou levemente (29.019.841). A decisão é antecipar a implantação para o estágio 2.

estação 16

No intuito de regularizar o comportamento dessa estação, antecipa-se sua implantação para o estágio 3 (já considerada a instalação da estação 10 no estágio 2). Novamente não se notam

grandes mudanças nas trajetórias das demais estações. Todavia, a estação 16 tem seu comportamento no estágio 4 melhorado, conforme atesta a Fig. VIII.6.

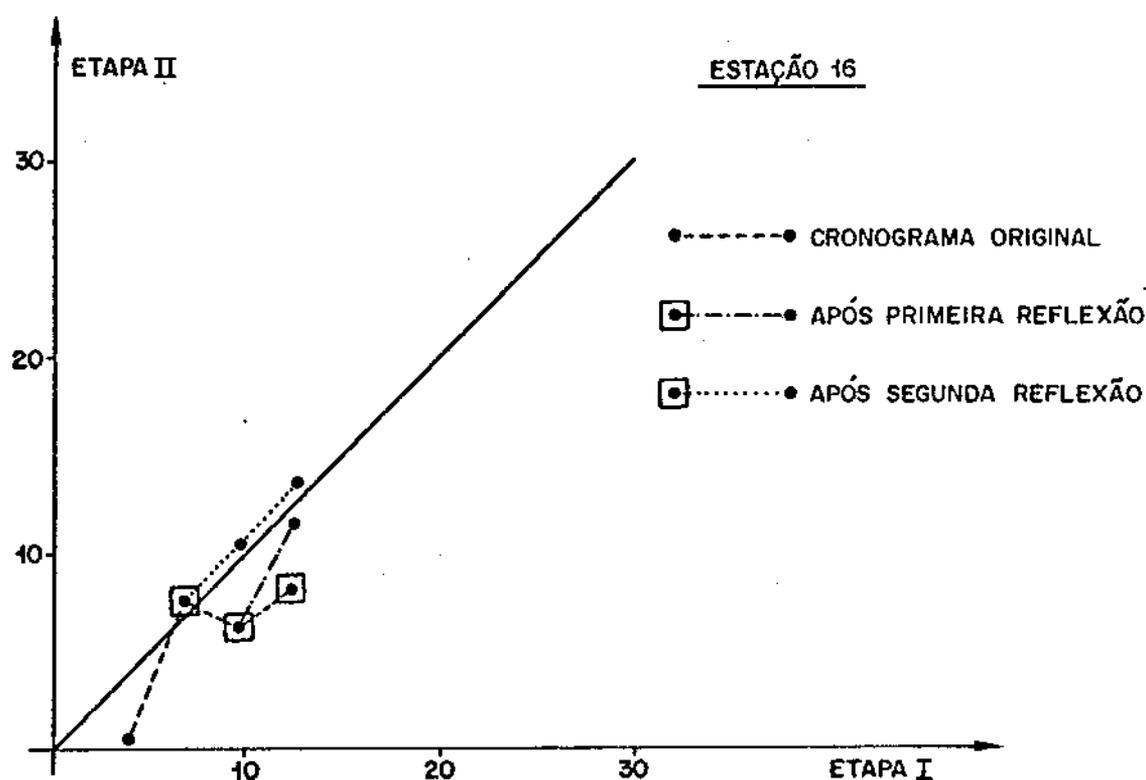


Fig. VIII.6 - Antecipação da estação 16

Houve pequena melhoria no valor presente do Cronograma (28.976.499). É feita mais uma tentativa: implantar a estação 16 no estágio 2. Verifica-se ainda desta vez que as demais estações não sofrem grandes mudanças de comportamento. A estação 16, por seu lado, alcança resultados excelentes, também retratados na Fig. VIII.6. O Cronograma volta a baratear (28.929.588).

Diversas experiências (reflexões) podem ser feitas a partir de um Cronograma inicial. Note-se, entretanto, que a variação de custo é em geral pequena (grandes diferenças significam erros sérios no estabelecimento da hierarquia das estações).

O Quadro VIII.25 resume as experiências. O primeiro estágio (custo 4.752.015) não é considerado.

CRONOGRAMA	ESTÁGIO 2		ESTÁGIO 3		ESTÁGIO 4		VALOR PRESENTE
	IMPL.	CUSTO	IMPL.	CUSTO	IMPL.	CUSTO	
0	13	23.063.694	10,11,12	22.299.149	14,16	17.755.688	29.018.737
1	10,13	23.668.490	11,12	21.358.140	14,16	17.707.582	29.019.841
2	10,13	23.668.490	11,12,16	21.975.153	14	16.514.719	28.976.499
3	10,13,16	24.288.941	11,12	20.817.854	14	16.553.713	28.929.588

Quadro VIII.25 - Experiências sobre o Cronograma original

O Cronograma de menor valor presente (número 3) recomenda a implantação de 3 estações no estágio 2 (1990). O Cronograma número 1, cujo valor presente é apenas 0,3% maior do que o Cronograma número 3, estabelece que a cada estágio duas estações devem entrar em operação. A adoção de uma ou outra proposta baseia-se em critérios empresariais, cuja análise está além dos objetivos deste trabalho.

5. IMPLANTAÇÕES MODULARIZADAS

Neste segundo exemplo assume-se que as estações são implantadas aos módulos, a menos da edificação do prédio. Para os serviços de infra-estrutura (climatização, energia) são considerados módulos de 10.000 terminais (um terminal por assinante atendido). Os equipamentos de comutação, por sua vez, são instalados em módulos de 1.000 terminais, inclusive nas estações antigas.

5.1. Custos Envolvidos

Os dados de custo do exemplo são descritos a seguir.

. estações existentes

Apenas os custos dos equipamentos de comutação devem ser considerados para tais estações. Visando compatibilidade com o exemplo anterior, admite-se que os módulos de comutação não apresentem custos fixos, permanecendo o custo variável em $150 \text{ Cr\$} \times 10^3 /$ assinante.

. estações a implantar

Cada estação tem seu custo inicial, além de custos fixos e variáveis dos módulos de infra-estrutura e comutação. A área necessária a cada estação é 1500 metros quadrados. O Quadro VIII.26 apresenta os custos iniciais e de terreno, enquanto o Quadro VIII.27 detalha os custos dos módulos (todos em $\text{Cr\$} \times 10^3$).

ESTAÇÃO	Nº	INICIAL	TERRENO
10	49	400.000	67.500
11	583	350.000	11.250
12	398	400.000	11.250
13	332	400.000	15.750
14	519	350.000	6.750
15	382	350.000	8.250
16	264	400.000	24.750

Quadro VIII.26 - Custos das estações a implantar

MÓDULO	CAPACIDADE	FIXO	POR ASSINANTE
COMUTAÇÃO	1.000	9.000	180
INFRA-ESTRUTURA	10.000	60.000	10

Quadro VIII.27 - Custos dos módulos

Deste modo, o custo total de cada estação é o mesmo, quer se considerem implantações modularizadas ou não.

rede e taxa de juros

São os mesmos do exemplo anterior, ou seja, 60 Cr\$ x 10³/Km e 10% ao ano.

5.3. Um Cronograma

Segue-se um relatório simplificado da obtenção de um Cronograma para o exemplo. Todos os custos apresentados estão em Cr\$ x 10³.

Como decorrência do modelo linear misto adotado, quando se consideram as implantações modularizadas aumenta o número de possibilidades de um Cronograma, uma vez que em cada estágio é preciso decidir não apenas sobre a implantação de estações, mas também sobre a ampliação daquelas cuja capacidade modular ainda não se esgotou.

A Fig. VIII.7 apresenta o resultado obtido.

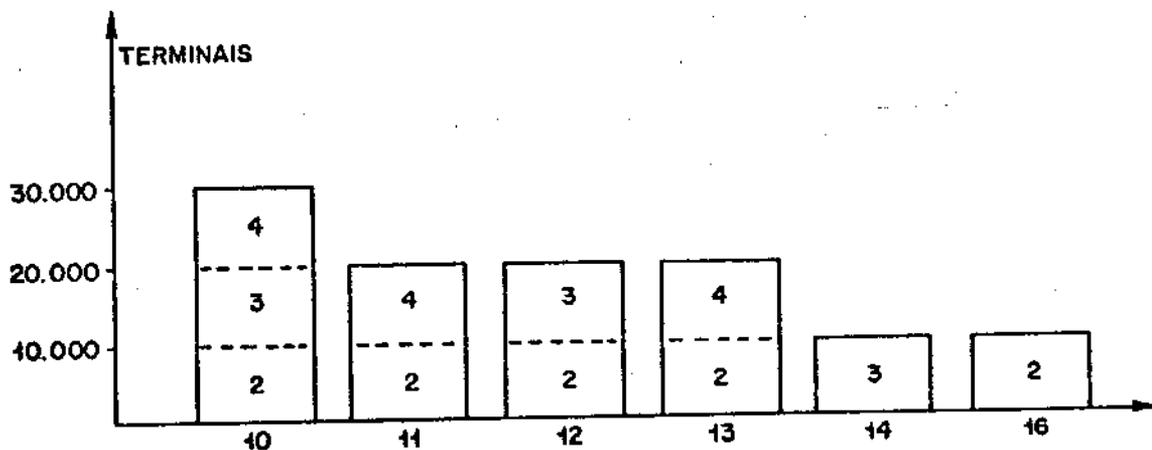


Fig. VIII.7 - Cronograma com implantações modularizadas

Verifica-se, como no exemplo anterior, que no estágio 1 (1985) nenhuma estação é implantada. No segundo estágio, aparecem os efeitos da modularização: em cinco estações (10, 11, 12, 13 e 16) é instalado um módulo de 10.000 terminais. No estágio 3 implanta-se a estação 14 (1 módulo) além de se ampliarem 10 e 12. No último estágio, ocorrem apenas ampliações: 10, 11 e 13.

Também neste exemplo, a estação 15 é adiada para além do período de planejamento.

É necessário para obtenção deste Cronograma o teste de 40 possibilidades.

O Quadro VIII.28 resume a experiência e compara os custos com aqueles relativos ao Cronograma de menor valor presente obtido quando se consideram implantações não-modularizadas.

CRONOGRAMA	ESTÁGIO 1		ESTÁGIO 2		ESTÁGIO 3		ESTÁGIO 4		VALOR PRESENTE
	IMPL./AMPL.	CUSTO	IMPL./AMPL.	CUSTO	IMPL./AMPL.	CUSTO	IMPL./AMPL.	CUSTO	
Modularizado	-	4.965.765	10,11,12,13,16	22.859.942	10,12,14	19.514.205	10,11,13	16.923.276	27.940.780
Não-modularizado	-	4.752.015	10,13,16	24.288.941	11,12	20.817.854	14	16.553.713	28.929.588

Quadro VIII.28 - Resumo e comparação de experiências

Verifica-se que o Cronograma com implantações modularizadas tem valor presente 3,4% menor em relação àquele não-modularizado. Comparando os custos por estágio nos dois Cronogramas, observa-se que:

- no estágio 1, a modularização dos equipamentos de comunicação provoca leve aumento de custo;
- nos estágios 2 e 3 o menor custo inicial de implantação reduz o custo do Cronograma modularizado, apesar de mais estações entrarem em operação neste caso; e

- no estágio 4 o Cronograma modularizado é mais caro.

6. COMENTÁRIOS

São apresentados neste Capítulo dois exemplos de aplicação da metodologia de obtenção do Cronograma à rede telefônica da cidade de Curitiba, com sete estações por implantar, além de nove já existentes.

O primeiro exemplo considera que as estações são implantadas de uma vez, a menos dos equipamentos de comutação. Um Cronograma é obtido com o teste de apenas 42 possibilidades. Análises da evolução das estações ao longo do período de planejamento sugerem mudanças no Cronograma original (reflexões); a concretização dessas mudanças (adiamento ou antecipação da entrada em funcionamento de algumas estações) pode ou não reduzir o custo final do Cronograma, expresso em termos de valor presente. A diferença de custos, entretanto, é mínima: critérios alternativos ou de natureza empresarial devem ser levados em conta (por exemplo, evitar a implantação de muitas estações num só estágio ou controlar a evolução de certas estações no período através da mudança de data de sua instalação).

No segundo exemplo admite-se, de maneira mais realista, que as estações são implantadas aos módulos, com exceção do prédio, que é construído por inteiro. Com o teste de 40 possibilidades determina-se um Cronograma. Verifica-se que a modularização das estações (e a conseqüente redução de seus custos fixos) torna-as mais competitivas, antecipando-lhes a implantação sem aumentar os custos totais em cada estágio.

Em ambos os exemplos uma certa estação teve sua implantação adiada para além do período de planejamento. A análise da evolução dessa estação indica que suas chances de ser implantada não são grandes. Neste caso, é conveniente que esta informação retorne à etapa do planejamento que determina a localização e as capacidades das estações. Como nesta etapa a configuração da rede no ano horizonte é estabelecida a partir da atual (critério

progressista), diferenças devem surgir quando se efetua a evolução estágio a estágio - precisamente o caso do Cronograma.

No aspecto computacional, cumpre ressaltar a velocidade da metodologia. O tempo médio de obtenção de um Cronograma para a rede exemplo (586 nós e 744 arcos não-orientados) no sistema DEC-10 é aproximadamente 8 minutos.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

Apresenta-se neste trabalho um procedimento para obtenção do Cronograma de Implantação de estações telefônicas ao longo do tempo, até um dado ano horizonte. A estratégia básica consiste em diminuir o número de possibilidades a serem testadas tomando duas providências: abordar o problema por estágios e atribuir, em cada um deles, prioridades às estações para sua implantação. A cada estágio, o modelo é o de um problema misto zero-um, cuja resolução acontece em dois níveis: o primeiro gera alternativas de implantação de estações, enquanto no segundo procura-se filiar os assinantes, em cada alternativa, obedecendo um critério de custo mínimo.

A priorização das estações (e conseqüentemente o processo de sondagem de possibilidades zero-um) leva em conta o aproveitamento da rede existente e visa também sua evolução ao longo dos estágios. Além disso, permite que as alternativas no primeiro nível de resolução sejam enumeradas completamente, em vista de seu pequeno número.

Em decorrência do critério adotado, assegura-se que o custo associado a cada alternativa é o mínimo possível (de fato, diversos custos de rede podem se associar a uma mesma configuração de estações, dependendo de como são utilizados os pares de fios e as galerias; a resolução de problemas de fluxo de custo mínimo toma a mais barata como solução para a rede). Assim, uma cuidadosa priorização das estações garante, no estágio, a obtenção da melhor alternativa.

O estagiamento do problema, por seu lado, pode fazer com que a solução final do Cronograma não seja o ótimo global: embora a cada estágio tome-se a melhor alternativa, podem existir alguns Cronogramas que aproveitem sub-ótimos de estágios e tenham valor presente acumulado menor. Neste caso, age o planejador: o estudo das trajetórias evolutivas das estações pode fornecer bons subsídios para mudanças no Cronograma.

Esta reflexão é necessária e importante, pois além de criar alternativas de Cronograma (em geral sub-ótimas) possibilita melhorias nos custos resultantes e compensa, em alguns casos,

o caráter conservador da metodologia ao antecipar a implantação de algumas estações, melhorando a evolução da rede e comprometendo pouco o custo global acumulado.

Outra característica de realce na metodologia é sua capacidade de permitir implantações modularizadas, que tornam as estações mais competitivas (evitando, também, Cronogramas muito conservadores) sem aumentar os custos associados nos estágios.

Uma última análise das características e propriedades da metodologia proposta revela que a solução final para o Cronograma é ao menos um sub-ótimo de boa qualidade, atingido de maneira simples e rápida. Este sub-ótimo será tanto melhor quanto menos pronunciado for o ótimo global, ou seja, quando os custos associados a diferentes Cronogramas forem próximos.

Do ponto de vista computacional, o desempenho da metodologia proposta é excelente. Procedimentos tais como a fase de transição e o aproveitamento da solução (árvore) ótima da etapa I para inicialização da etapa II reduzem consideravelmente os tempos necessários às resoluções de PFCM, viabilizando a utilização da metodologia mesmo em redes de maior porte.

APÊNDICE A

ENCAMINHAMENTOS ALTERNATIVOS

1. INTRODUÇÃO

São descritas neste Apêndice técnicas auxiliares ao dimensionamento de troncos em redes onde haja encaminhamento alternativo de chamadas.

Tome-se como exemplo a Fig. A.1, onde se pretende dimensionar os troncos que escoam as chamadas originadas em A e destinadas a B. O tráfego é inicialmente oferecido à rota direta A → B. Em caso de bloqueio, o tráfego transbordado é levado à rota alternativa A → T → B.

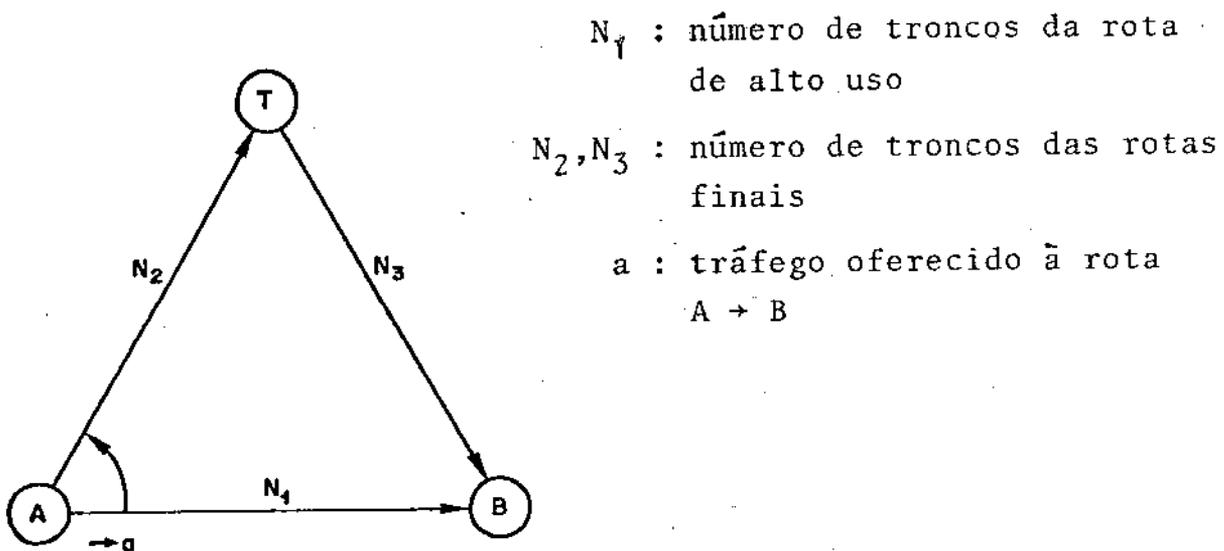


Fig. A.1 - Exemplo de encaminhamento alternativo

Suponha-se que a rota A → B tenha perda especificada : como o tráfego oferecido é poissoniano, N_1 pode ser facilmente dimensionado. Se o tráfego transbordado fosse também poissoniano, não haveria problema, sendo N_2 e N_3 conhecidos imediatamente. Infelizmente, tal não ocorre: o transbordo não é mais poissoniano,

invalidando o modelo de Erlang. É necessário um método de obtenção de N_2 e N_3 , conhecidos N_1 e o tráfego transbordado; o equivalente aleatório de Wilkinson resolve este problema.

Entretanto, N_1 só é dimensionado porque a rota $A \rightarrow B$ tem perda especificada. Não há garantia de que o encaminhamento alternativo como um todo funcione economicamente, tanto em termos de custo como de eficiência dos troncos. Propõe-se então relaxar a perda na rota direta, aumentando-lhe a eficiência: um procedimento iterativo conduz ao número de troncos N_1 que minimiza os custos do sistema como um todo. Este procedimento recebe o nome de Regra do Triângulo.

Um procedimento iterativo, no entanto, precisa sempre de uma solução inicial. É desejável também que esta solução inicial aproxime-se do ótimo o mais possível. O processo inicializador de Rapp estima então valores para N_1 , os quais são utilizados como solução inicial do "triângulo".

O dimensionamento rigoroso de um encaminhamento alternativo pode ser resumido pela Fig. A.2.

Neste trabalho, o passo iterativo - o triângulo - é suprimido. O valor de N_1 obtido no passo inicializador é considerado definitivo. Os feixes de troncos N_2 e N_3 são dimensionados por meio do equivalente aleatório.

2. MÉTODO DO EQUIVALENTE ALEATÓRIO [15]

O método do equivalente aleatório de Wilkinson* fornece uma solução aproximada para problemas em que o tráfego bloqueado numa certa rota é encaminhado a outra, alternativa. Presume-se no desenvolvimento aqui mostrado que só existe uma única rota alternativa para o transbordo.

* Cooper [14] declara que o método foi desenvolvido, simultânea e independentemente, por R.I. Wilkinson e G. Bretschneider, em 1956.

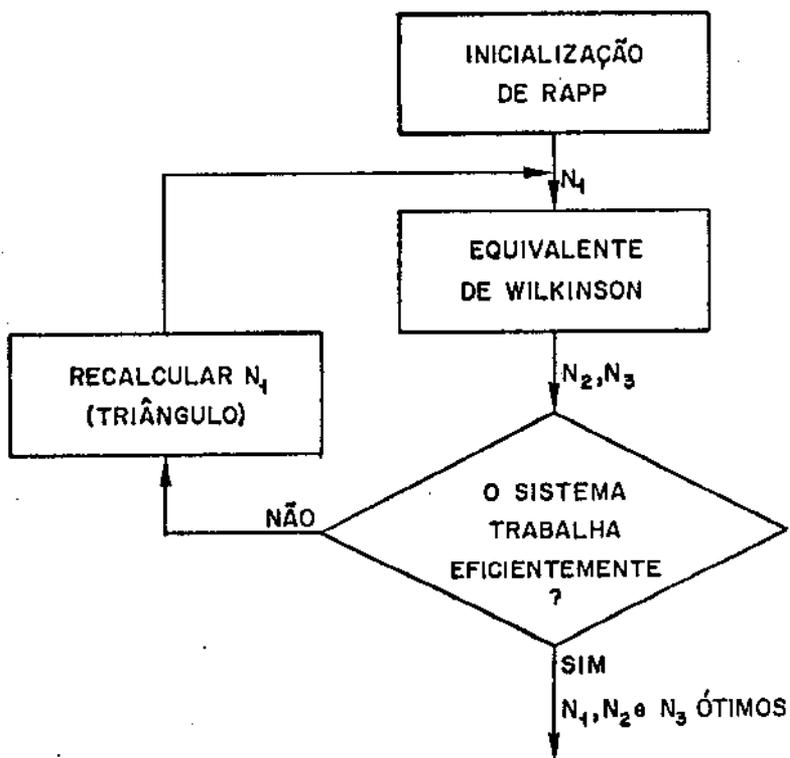


Fig. A.2 - Dimensionamento de rotas alternativas

Seja o sistema da Fig. A.1, onde se admite que o dimensionamento é feito por rotas e que o tráfego oferecido à rota A→B é poissoniano. O mesmo sistema pode ser representado pela Fig.A.3. Os troncos da rota A → B constituem o *sistema primário*. O tráfego de transbordo é caracterizado por dois parâmetros: média e variância.

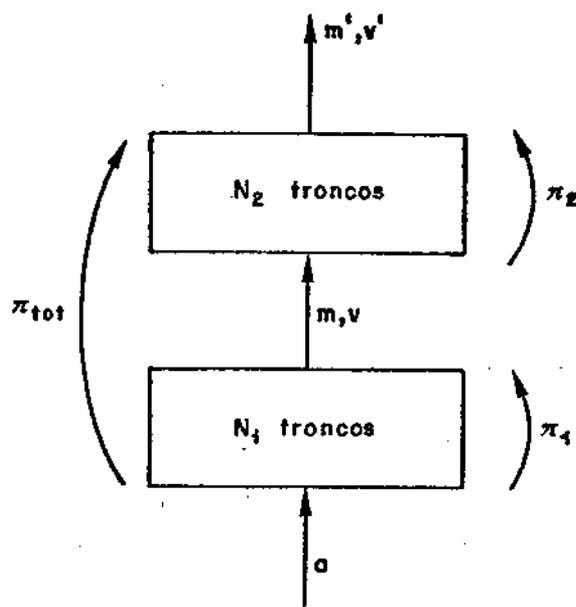


Fig. A.3 - Sistema de transbordo simples

Os valores da média e variância são dados pelas expressões:

$$m = a \cdot B(N_1, a)$$

e

$$v = m \cdot \left(1 - m + \frac{a}{N_1 + 1 + m - a} \right)$$

Rapp demonstrou que a , m , v e N_1 guardam as seguintes relações aproximadas:

$$a = v + 3 \cdot z \cdot (z - 1)$$

e

$$N_1 = \frac{a(m+z)}{m+z-1} - (m+1) ,$$

onde

$$z = \frac{v}{m} .$$

Isto significa, em suma, que os valores de m e v caracterizam o transbordo de um tráfego poissoniano a oferecido inicialmente a um sistema com N_1 troncos. A probabilidade de se perder uma chamada neste sistema é numericamente igual à relação entre o tráfego excedente e o tráfego total oferecido:

$$\pi_1 = \frac{a \cdot B(N_1, a)}{a} = \frac{m}{a} = B(N_1, a) .$$

Na rota alternativa, a probabilidade de uma chamada transbordada não encontrar meios de atendimento é a probabilidade condicional de não haver troncos disponíveis na rota final, dado que não há também troncos disponíveis na rota direta:

$$\pi_2 = \frac{a \cdot B(N_1 + N_2, a)}{a \cdot B(N_1, a)} = \frac{a \cdot B(N_1 + N_2, a)}{m} .$$

Se o sistema é visto como um todo, a probabilidade de uma chamada ser bloqueada é:

$$\pi_{\text{tot}} = \frac{a \cdot B(N_1 + N_2, a)}{a} .$$

Assim, especificando-se a perda na rota final, conhece-se N_2 .

Considere-se agora que o sistema à esquerda da Fig.A.4, para o qual se assume que os tráfegos oferecidos aos sistemas primários são poissonianos e independentes entre si. Esta situação corresponde, por exemplo, ao encaminhamento de chamadas de uma estação para as demais da rede: as chamadas inicialmente oferecidas às rotas diretas que são bloqueadas tentam a rota alternativa comum, via tandem. Deseja-se dimensionar este sistema secundário comum.

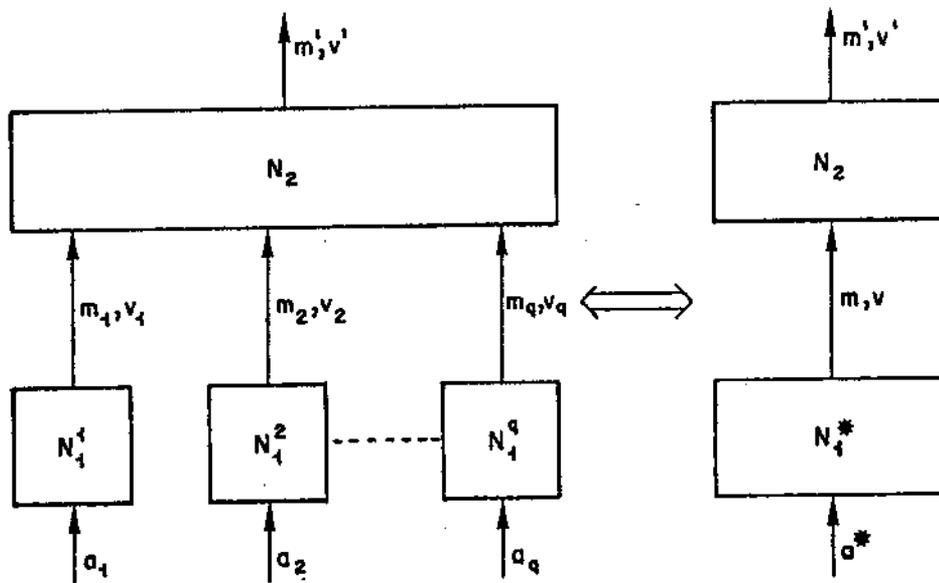


Fig. A.4 - Sistema de transbordo composto e seu equivalente

A idéia é reduzir o sistema composto a um único, equivalente, como indicado à direita da Fig. A.4.

Do tráfego transbordado no sistema equivalente são co-

Conhecidas a média e a variância:

$$m = \sum_{i=1}^q m_i$$

e

$$v = \sum_{i=1}^q v_i$$

Das relações aproximadas de Rapp, deduz-se que m e v caracterizam o transbordo de um tráfego a^* oferecido a um sistema primário de N_1^* troncos. É possível dizer então que:

$$a^* = v + 3 \cdot z \cdot (z - 1)$$

e

$$N_1^* = \frac{a^*(m+z)}{m+z-1} - (m+1),$$

onde

$$z = \frac{v}{m}$$

Como no caso de transbordo simples, os valores de N_1^* podem não ser inteiros. Seu arredondamento provoca leve mudança no valor de a^* :

$$a^* = \frac{([N_1^*] + m + 1) \cdot (m + z - 1)}{m + z}$$

Conhecidos a^* e N_1^* , é possível dimensionar o sistema secundário comum através das perdas especificadas π_2 ou π_{tot} , as quais são reescritas:

$$\pi_2 = \frac{a^* \cdot B(N_1^* + N_2, a^*)}{a^* \cdot B(N_1^*, a)} = \frac{a^* \cdot B(N_1^* + N_2, a^*)}{m}$$

e

$$\pi_{tot} = \frac{a^* \cdot B(N_1^* + N_2, a^*)}{a^*} = \frac{a^* \cdot B(N_1^* + N_2, a^*)}{\sum_{i=1}^q a_i}$$

3. REGRA DO TRIÂNGULO [25]

A utilização de encaminhamentos alternativos justifica-se somente quando isto acarretar economia de investimentos com manutenção da qualidade do serviço prestado. De fato, a rota alternativa é mais cara, isoladamente, do que a rota direta (maiores distâncias e mais equipamentos de comutação). Um sistema que faça uso apenas de rotas diretas, entretanto, trabalha com eficiência baixa. Retirar troncos de rotas diretas significa - mantido o tráfego - aumentar as perdas e também a eficiência, diminuindo os custos. Uma vez que as perdas não devem aumentar (o grau de serviço precisa se manter num valor pré-fixado), a idéia é utilizar rotas alternativas que escoem os transbordos das rotas diretas. Para elevar também a eficiência destas rotas alternativas, elas são usadas como sistema secundário comum a tráfegos bloqueados em várias rotas diretas.

As rotas diretas não têm, neste caso, perda específica, trabalhando com alta eficiência: são denominadas, por isso, rotas de alto uso.

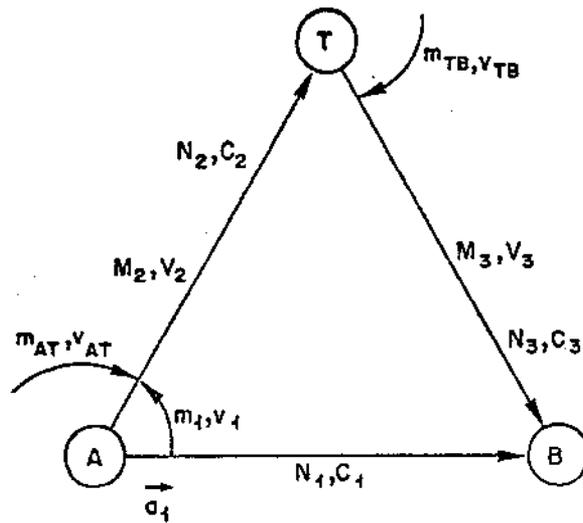
O problema consiste em determinar o número ótimo de troncos da rota de alto uso que minimize os custos totais do entroncamento. A Regra do Triângulo propõe uma solução para este problema. Determinado N_1 , os feixes N_2 e N_3 são obtidos pelo método do equivalente aleatório.

3.1. Desenvolvimento

Analise-se a Fig. A.5, onde se representa um encaminhamento alternativo. Os custos por tronco das rotas $A \rightarrow D$, $A \rightarrow T$ e $T \rightarrow B$ são, respectivamente, C_1 , C_2 e C_3 .

O custo total do encaminhamento mostrado é:

$$C = C_0 + C_1N_1 + C_2N_2 + C_3N_3 .$$



- a_1 : tráfego oferecido à rota A → B
- m_1, v_1 : características do transbordo de a_1 encaminhado à rota A → T
- m_{AT}, v_{AT} : características do tráfego oferecido à A → T que não se destina a B
- M_2, V_2 : características do tráfego total oferecido à rota A → T
 - $M_2 = m_{AT} + m_1$
 - $V_2 = v_{AT} + v_1$
- m_{TB}, v_{TB} : características do tráfego oferecido à rota T → B que não se origina em A
- M_3, V_3 : características do tráfego total oferecido à rota T → B
 - $M_3 = m_{TB} + m_1$
 - $V_3 = v_{TB} + v_1$

Fig. A.5 - Encaminhamento alternativo

Um valor de N_1 que minimiza esta função pode ser encontrado fazendo-se

$$\frac{\partial C}{\partial N_1} = C_1 + C_2 \frac{\partial N_2}{\partial N_1} + C_3 \frac{\partial N_3}{\partial N_1} = 0 .$$

Sendo N_2 e N_3 dependentes das médias e variâncias dos tráfegos a eles encaminhados, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_2}{\partial N_1} &= \frac{\partial N_2}{\partial M_2} \cdot \frac{\partial M_2}{\partial N_1} + \frac{\partial N_2}{\partial V_2} \cdot \frac{\partial V_2}{\partial N_1} \cong \\ &\cong \frac{\partial N_2}{\partial M_2} \cdot \frac{\partial M_2}{\partial N_1} = \frac{\partial N_2}{\partial M_2} \cdot \frac{\partial m_1}{\partial N_1} \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_3}{\partial N_1} &= \frac{\partial N_3}{\partial M_3} \cdot \frac{\partial M_3}{\partial N_1} + \frac{\partial N_3}{\partial V_3} \cdot \frac{\partial V_3}{\partial N_1} \cong \\ &\cong \frac{\partial N_3}{\partial M_3} \cdot \frac{\partial M_3}{\partial N_1} = \frac{\partial N_3}{\partial M_3} \cdot \frac{\partial m_1}{\partial N_1} \end{aligned}$$

uma vez que os tráfegos de média m_{AT} e m_{TB} independem de N_1 .

Disto resulta

$$C_1 + \frac{\partial m_1}{\partial N_1} \left[\frac{\partial N_2}{\partial M_2} \cdot C_2 + \frac{\partial N_3}{\partial M_3} \cdot C_3 \right] = 0$$

ou, resumindo,

$$\frac{C_1}{\frac{\partial m_1}{\partial N_1}} = \frac{C_2}{\frac{\partial M_2}{\partial N_2}} + \frac{C_3}{\frac{\partial M_3}{\partial N_3}}$$

Note-se que os termos que dividem C_1 , C_2 e C_3 indicam a variação do tráfego cursado nas respectivas rotas em função do aumento ou da diminuição de seu número de troncos. Representam,

assim, a eficiência marginal da rota (tráfego cursado pelo último tronco). Fazendo

$$- \frac{\partial m_1}{\partial N_1} = \alpha_1 ,$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial N_2} = \alpha_2$$

e

$$\frac{\partial M_3}{\partial N_3} = \alpha_3 ,$$

a relação obtida é:

$$\frac{C_1}{\alpha_1} = \frac{C_2}{\alpha_2} + \frac{C_3}{\alpha_3} ,$$

significando que resolver o "triângulo" é encontrar o ponto em que os custos ponderados (considerando a eficiência) são os mesmos, tanto para a rota de alto uso como para as rotas finais. Trata-se de uma equação de equilíbrio de custo marginal.

O funcionamento da equação pode ser visto por meio de um pequeno exemplo. Seja a situação em que

$$\frac{C_1}{\alpha_1} < \frac{C_2}{\alpha_2} + \frac{C_3}{\alpha_3} ,$$

indicando ser mais barato cursar tráfego pela rota direta de alto uso do que pela alternativa. A decisão tomada é aumentar N_1 ; em consequência, diminuem α_1 , N_2 e N_3 , crescendo α_2 e α_3 . Assim, a desigualdade de custos tende a diminuir.

Dado que existe uma dependência entre os valores N_1 , α_2, α_3 , M_2 e M_3 , o processo é iterativo. Em geral, são especificados valores para α_2 e α_3 , tais que:

$$0,6 \leq \alpha_3, \alpha_3 \leq 0,8 .$$

Deve então ser obtido o valor de N_1 que satisfaça α_1 calculado; quer-se N_1 tal que

$$a_1 [B(N_1, a_1) - B(N_1 + 1, a_1)] = \alpha_1 ,$$

ou seja, tal que o tráfego adicional cursado na rota direta com a inclusão de mais um tronco iguale α_1 . Neste caso, α_1 pode ser visto como um fator de melhoria.

3.2. Inicialização

Um valor inicial de N_1 pode ser rapidamente obtido quando se considera

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha ,$$

tornando-se a relação de custos marginais

$$\frac{C_1}{\alpha_1} = \frac{C_2 + C_3}{\alpha} .$$

Define-se

$$r = \frac{C_1}{C_1 + C_3} ,$$

de modo que

$$\alpha_1 = a_1 \cdot [B(N_1, a_1) - B(N_1 + 1, a_1)] = r\alpha .$$

Rapp [15] verificou experimentalmente que melhores re

sultados são obtidos quando se escreve α como função de κ :

$$\alpha = 1 - 0,3(1 - r^2) .$$

O valor de N_1 assim obtido está em geral muito perto de ótimo.

APÊNDICE B

FASE DE TRANSIÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A sistemática adotada para obtenção do Cronograma utiliza um modelo linear misto zero-um, cujo objetivo é minimizar simultaneamente os custos de implantação das estações e os de lançamento de novos pares de fios na rede, em cada estágio de planejamento. Para isso, um primeiro nível de resolução estabelece diferentes configurações de implantação - através de enumeração completa - enquanto num segundo nível cada configuração tem seu custo de rede minimizado através da resolução de um problema de fluxo de custo mínimo (PFCM). Dado o processo de enumeração completa das alternativas, vários PFCM devem ser resolvidos em seqüência, no mesmo estágio.

O algoritmo utilizado para resolução do PFCM perfaz a escolha de uma solução factível inicial (fase 1) e a obtenção da solução ótima (fase 2). Verifica-se que o algoritmo dispense esforço considerável na fase 1; pior ainda, a fase 1 nem sempre fornece uma solução factível de boa qualidade, o que demanda maior trabalho da fase 2.

Considerando-se a necessidade de resolução de vários PFCM consecutivamente, é desejável agilizar o algoritmo. Para tanto, utiliza-se a fase de transição, que procura aproveitar a solução ótima de uma alternativa de implementações já avaliada como solução inicial na avaliação da próxima alternativa.

A fase de transição foi estudada inicialmente por Xavier [22] em redes sem disponibilidades, e teve sua aplicabilidade estendida a redes com disponibilidades por Nakagawa [12]. O desenvolvimento aqui relatado baseia-se neste último trabalho.

2. IDÉIA FUNDAMENTAL

A partir do modelo matemático adotado para o problema do Cronograma depreende-se que, numa certa alternativa, as estações implantadas diferem das não-implantadas nas capacidades de seus arcos de fechamento do tipo 3. Se a estação é implantada na alterna

tiva, seu arco de fechamento tem limitante superior igual à capacidade de implantação; caso contrário, o arco de fechamento tem capacidade nula.

Por outro lado, o procedimento estabelecido para enumeração das alternativas (descrito no item 7.3 do Capítulo VII deste trabalho) garante que duas alternativas consecutivas diferem entre si em apenas um valor de variável zero-um.

Defina-se *solução de partida* como sendo a solução ótima (para a rede) da alternativa de implantações já avaliada que se pretende utilizar como solução inicial para a avaliação da próxima alternativa. Esta diferencia-se da solução de partida por somente uma variável zero-um, indicando que a estação correspondente torna-se candidata a implantação (caso em que a variável muda de zero para um) ou que a estação deixa de ser candidata (quando a variável muda de um para zero).

Assim, relativamente à solução de partida, pode ocorrer o surgimento ou o desaparecimento de uma estação. No primeiro caso, a fase de transição atualiza a capacidade do arco de fechamento do tipo 3 da estação; no segundo, penaliza o custo do arco de fechamento.

3. SURGIMENTO DE ESTAÇÃO

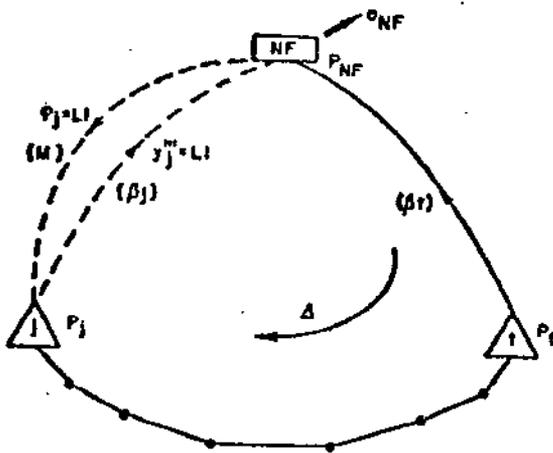
Ocorre quando uma estação torna-se candidata a implantação na alternativa a ser avaliada. Na solução de partida seu arco de fechamento do tipo 3 tem fluxo nulo (uma vez que a estação não é considerada).

A fase de transição preocupa-se, neste caso, em abrir o arco à passagem de fluxo, garantindo ainda que este fluxo respeite seu limitante inferior. O procedimento é:

- fazer o limitante superior do arco de fechamento em questão igual à capacidade de implantação da estação;
- tornar o limitante inferior do arco igual ao número mínimo de assinantes exigidos para sua implantação;

- atribuir ao arco fluxo igual ao seu limitante inferior;
- definir o custo do arco como sendo o custo de comutação;
- criar um arco artificial orientado do nó de fechamento para a estação, com fluxo no limitante superior e igual ao fluxo no arco de fechamento da estação; e
- penalizar o arco artificial designando-lhe custo de valor suficientemente grande e positivo.

A Fig. B.1 ilustra o procedimento. A criação do arco artificial tem por objetivo garantir que o limitante inferior do arco de fechamento seja respeitado e que o balanço de fluxo do nó de fechamento e da estação permaneçam inviolados.



- y_j^m - fluxo no arco de fechamento da estação j
- ϕ_j - fluxo no arco artificial
- LI - limitante inferior do arco de fechamento

Fig. B.1 - Surgimento de estação

O arco artificial (NF,j) tem custo relativo dado pela expressão

$$CR_{NF,j} = M - P_{NF} + P_j .$$

Como M é suficientemente grande, o custo relativo é positivo e o arco artificial é candidato a entrar na base. O fluxo Δ circula no sentido da diminuição do fluxo no arco artificial. Quando o fluxo no arco artificial se anula, o mesmo pode ser retirado do grafo. Neste momento, o arco de fechamento da estação tem fluxo igual ao seu limitante inferior e é ainda não-básico. Sua entrada na base depende de seu custo relativo.

4. DESAPARECIMENTO DE ESTAÇÃO

Acontece quando uma estação deixa de ser candidata a implementação na alternativa a ser avaliada. A finalidade da fase de transição é portanto zerar o fluxo que utiliza o arco de fechamento do tipo 3 da estação na solução de partida, o que equivale a retirar o arco da rede considerada.

O procedimento básico é:

- definir o custo do arco de fechamento como sendo suficientemente grande e positivo; e
- tornar o limitante inferior do arco de fechamento igual a zero.

Tal procedimento quebra a otimalidade da solução de partida, pois a passagem de fluxo no arco de fechamento da estação que deve desaparecer é penalizada.

Cumprе notar que o arco de fechamento em questão pode ser básico ou não.

. arco de fechamento na base

A obtenção do custo do arco de fechamento se reflete nos potenciais de todos os nós da família da estação correspondente (nós ligados à estação por arcos básicos), modificando porisso os custos relativos dos arcos do ciclo do arco de fechamento (arcos

de fronteira que ligam nós da família da estação aos demais nós da rede), conforme ilustra a Fig. B.2.

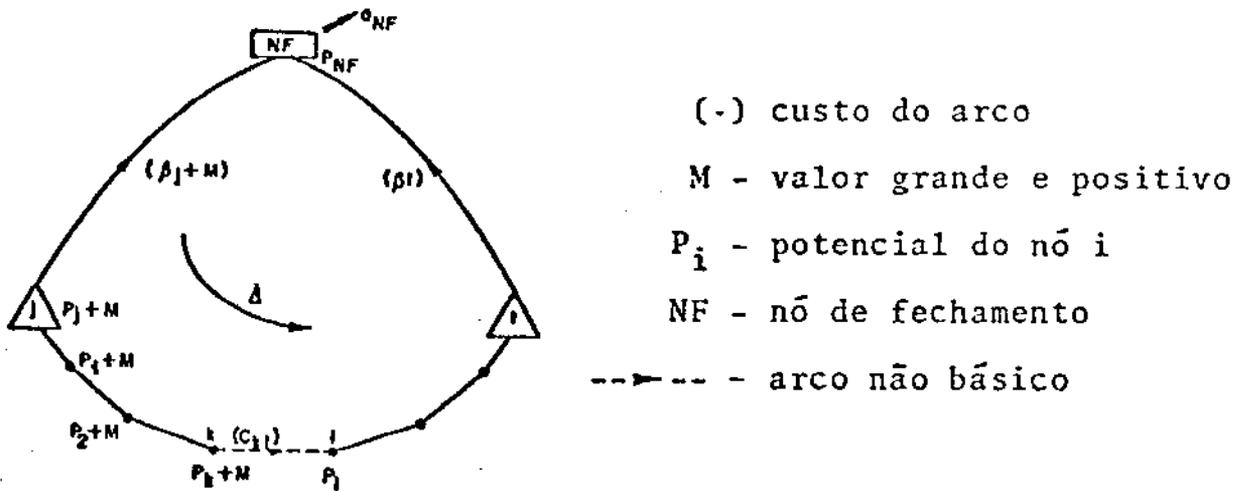


Fig. B.2 - Arco de fechamento na base

O arco de fronteira (k, l) tem custo relativo dado pela expressão

$$CR_{k,l} = (C_{k,l} - P_k + P_l) - M,$$

indicando que a alteração também é de valor M.

Como M é suficientemente grande, o custo relativo do arco (k, l) é negativo e ele é candidato a entrar na base. O fluxo Δ circula no sentido de diminuir aquele do arco de fechamento (ou seja, o número de assinantes filiados à estação que desaparece, os quais são distribuídos pelas estações adjacentes).

. arco de fechamento no limitante superior

O custo relativo do arco de fechamento (não-básico) após a alteração de seu custo é

$$CR_{j,NF} = M + (\beta_j - P_j + P_{NF}) .$$

Tal situação é mostrada na Fig. B.3.

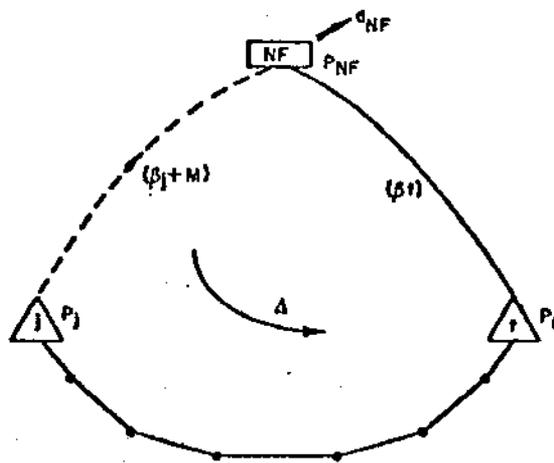


Fig. B.3 - Arco de fechamento não-básico

Como M é suficientemente grande, o custo relativo do arco de fechamento é positivo e ele é candidato a entrar na base, pois se encontra no limitante superior. O fluxo Δ circula no sentido de diminuir o fluxo do arco de fechamento, tornando-o básico. O processo fica então o mesmo já descrito para arcos de fechamento na base.

. arco de fechamento no limitante inferior

Analogamente ao caso anterior, o custo relativo do arco de fechamento é positivo. Por se encontrar no limitante inferior, entretanto, ele não é candidato a entrar na base. Se o limitante inferior é não-nulo, é preciso declarar que o arco está no limitante superior, recaindo-se assim no caso anterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TAVARES, H.; AQUINO, L.A.C.; FRANÇA, P.M. e LYRA Fº., C. Planejamento de Redes Telefônicas Locais - Conceção e Ferramental, Revista Telebrás VIII.2, Junho 1984.
- [2] NAKAGAWA, J.M. Planejamento de Sistemas Telefônicos: Alocação de Centros de Fios, Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEE, Julho 1984.
- [3] FERNANDES, J.F.R.; BASTOS, M.R. e CARLSON Fº, C.M. CRONOS - Um Programa para Determinar o Estágio de Implantação de Centrais, Revista Telebrás VIII.2, Junho 1984.
- [4] BASTOS MARTINI, M.R. Planejamento de Centros de Fios : Programas CRONOS, PALCO e RELUZ, Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEE, Outubro 1983.
- [5] FRAISLEBEM, F. Evolução Dinâmica de Cortes de Área em Redes Telefônicas Urbanas, Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEE, Maio 1984.
- [6] TELEBRÁS. Glossário de Termos Técnicos de Telecomunicações, Prática Telebrás, 201-100-001, 1978.
- [7] TELEBRÁS. Encaminhamento de Chamadas Telefônicas Automáticas e Semi-Automáticas, Prática Telebrás 210-110-700, 1978.
- [8] PEYRADE, M. La Planification à Court Terme et la Gestion Annuelle du Réseau Interurbain, L'echo des Recherches, Centre National d'Etudes des Télécommunications-CNET, Abril 1978.
- [9] GARCIA, A.S. e RIBEIRO, R.V. PORRUS-PORULP: Uma Metodologia Otimizante para Cálculo do Roteamento a Longo Prazo com Segurança, Revista Telebrás VIII.2, Junho 1984.
- [10] TIBA, C.R.; SOLON, L.R. e JEHARA, J.M. Otimização do Entroncamento Local - OTELO, Relatório Interno Telesp, 1981.

- [11] TELEBRÁS. Seminário de Digitalização - Palestras, Pub. Interna do Centro Nacional de Treinamento - CNTr/TELEBRÁS, Dezembro 1982.
- [12] RAJ, P.P. Otimização de um Entrôncamento Interurbano, Tese de Mestrado UFRJ/COPPE, Dezembro 1976.
- [13] GIRÃO, S. E. B. e CARDOSO, F.P. Matriz de Tráfego Local: Um Modelo Simples e Considerações Estatísticas/Experimentais, Pub. I Seminário de Tráfego Telefônico, Agosto 1978.
- [14] COPPER, R.B. Introduction to Queueing Theory, MacMillan Co., 1972.
- [15] RAPP, Y. Planning of Junction Network in a Multi-Exchange Area - I: General Principles, Ericsson Technics, No. 1, 1964.
- [16] BAZARAA, M.S. e JARVIS, J.J. Linear Programming and Network Flows, John Wiley and Sons, 1977.
- [17] HU, T.C. Integer Programming and Network Flows, Addison-Wesley Pub. Co., 1970.
- [18] KENNINGTON, J.L. e HELGASON, R.V. Algorithms for Network Programming, John Wiley and Sons, 1980.
- [19] YAMAKAMI, A.; CARLSON Fº, C.M.; TAVARES, H.M.F. e FERNANDES, J.F. R. ECIC - Programa Estimador do Custo de Interligação de Centrais, Relatório Técnico RT-11, Convênio UNICAMP/TELEBRÁS 033/80 Redes Digitais, Abril 1982.
- [20] RONCHETTI, P.S. Um Modelo Dinâmico de Otimização da Localização de Estações Telefônicas, Tese de Mestrado, UFRJ/COPPE, Dezembro 1981.
- [21] SALKIN, H.M. Integer Programming, Addison-Wesley Pub. Co., 1975.

- [22] XAVIER, R.C. Problema de Localização de Centrais Telefônicas Urbanas: Uma Nova Abordagem, Tese de Mestrado UNICAMP / IMECC, Novembro 1983.
- [23] CARLSON Fº, C.M.; TAVARES, H.M.F. e FERNANDES, J.F.R. Cronograma de Implantação de Estações Telefônicas: Manual Técnico do Programa CRONOS II, Relatório Técnico RT-31, Convênio UNICAMP/TELEBRÁS 024A/83 Redes Digitais, Setembro 1984.
- [24] CARLSON Fº, C.M. Programa CONSYS - Verificador de Consistência de Redes, Relatório Técnico RT-24, Convênio UNICAMP/TELEBRÁS 024A/83 Redes Digitais, Dezembro 1983.
- [25] WALLSTRÖM, B. Methods for Optimizing Alternative Routing Networks, Reprint Ericsson Technics, No. 1, 1969.