

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

*Este exemplar corresponde à
reclamação final da tese defendida
por Flávio Fraislebem e aprovada
pela comissão julgadora em 18/05/84*

*Paulo M. França
orientador*

EVOLUÇÃO DINÂMICA DE CORTES DE ÁREA
EM REDES TELEFÔNICAS URBANAS

FLÁVIO FRAISLEBEM

Orientadores :

PAULO MORELATO FRANÇA

HERMANO DE MEDEIROS FERREIRA TAVARES

027/84

Tese apresentada como requisito par-
cial para obtenção do título de MES-
TRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

MAIO/1984

BIBLIOTECA CENTRAL

A meus pais,
Florêncio e Anaíra,
e irmãos,
Conceição e Marco

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, e especialmente

- a França e Hermano, orientadores e amigos, pelo estímulo e dedicação constantes;
- a Akebo, Carlos e Nakagawa, pelas contribuições e incentivo, e ainda, ao segundo, pela revisão do texto final;
- a Aquino, ex-gestor do convênio Unicamp-Telebrás 033/80 e grande responsável pelas linhas gerais do mesmo, pelo apoio decisivo;
- ao Grupo de Digitalização da Telebrás e em particular aos Eng^{os} Roberto e Shibukawa, da Telepar, pelas críticas e sugestões;
- a Anilton, Ariovaldo, Cassilda, Christiano, Eunice, Ferreira, Jurandir, Marquinhos, Marta, Paulinho, Raul, Regina, Rosana, Secundino, Takaaki, Thadeusa e demais amigos da UNICAMP, pela motivante e agradável convivência;
- a Luiz pelo capricho com os desenhos; e
- a Elza Aoki pela paciência e zelo com a datilografia.

Este trabalho foi realizado através do contrato TELEBRÁS/UNICAMP 033/80 e contou com o apoio financeiro da CAPES/PICD-UFES.

RESUMO

Propõe-se uma metodologia otimizante para determinação de cortes de área em redes telefônicas, partindo do ano base e evoluindo até o ano horizonte, num planejamento de longo prazo. O procedimento leva em conta diretamente a rede primária, considera a disponibilidade de cabos no estágio anterior, e é dividido em duas fases : na primeira determina-se as zonas de filiação das estações, e na segunda promove-se a ligação dos assinantes àquelas. Ambas as fases são modeladas como um Programa de Fluxo de Custo Mínimo, o qual é resolvido por uma especialização do método simplex para grafos. O programa computacional desenvolvido com base nesta metodologia vem sendo aplicado às redes telefônicas de diversas cidades brasileiras. Algumas experiências e resultados, bem como outros aspectos referentes à implementação computacional do procedimento são comentados.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO	1
1.1. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO ADOTADA	1
1.2. CONCEITOS IMPORTANTES	5
CAPÍTULO 2 : O PROBLEMA DA EVOLUÇÃO DE CORTES DE ÁREA	10
2.1. ABORDAGEM	10
2.1.1. Dados Necessários	11
2.2. FERA : FASE DE EVOLUÇÃO À REDE ALVO	12
2.2.1. Concepção	12
2.2.2. Restrição aos Cortes de Área Bruscos	13
2.2.3. Formulação Matemática	17
2.2.4. Ponto de Controle Repartido	18
2.3. FARA : FASE DE ADAPTAÇÃO À REDE ATUAL	18
2.3.1. Concepção	18
2.3.2. Formulação Matemática	22
CAPÍTULO 3 : PONTO DE CONTROLE REPARTIDO	24
3.1. ORIGEM	24
3.2. TIPOS DE REPARTIÇÃO E SEUS TRATAMENTOS	24
3.2.1. Caso 1 : Estação Saturada	25
3.2.2. Caso 2 : Saturação de Duas Estações	27
3.2.3. Caso 3 : Estação Decrescente	30
3.2.4. Caso 4 : Estação Decrescente e Saturação de Es- tação	33

3.2.5.	Caso 5 : Ponto de Controle Tri-Repertido	36
3.2.6.	Caso 6 : Repartição da Própria Estação Ociosa	38
3.2.7.	Caso 7 : Repartição da Própria Estação Saturada	39
3.2.8.	Caso 8 : Dupla Repartição entre a Estação Saturada e a Estação Ociosa	40
CAPÍTULO 4 : IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL		43
4.1.	ESTRUTURAÇÃO DO PEOR1	43
4.1.1.	Descrição das Subrotinas	45
4.1.2.	Preparação da Rede para a FERA e a FARA	47
4.2.	ESTRUTURAÇÃO DO PEOR2	47
4.2.1.	Descrição das Subrotinas	49
4.2.2.	Preparação da Rede para a FERA e a FARA	49
4.3.	A SUBROTINA DE REPARTIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE	52
4.3.1.	Decisão e Execução da Repartição	54
4.4.	INFORMAÇÕES DE SAÍDA	58
4.5.	EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS	58
CAPÍTULO 5 : APLICAÇÃO A UMA REDE REAL		61
5.1.	DADOS DA REDE	61
5.2.	RESULTADOS	62
CAPÍTULO 6 : CONCLUSÕES		69
ANEXO 1 : LISTAGENS DE RESULTADOS		73
BIBLIOGRAFIA		85

CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO

1.1. METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO ADOPTADA

Em linhas gerais, o planejamento da expansão de redes telefônicas tem o objetivo de encontrar a estratégia de menor custo para atender a demanda durante um certo período, satisfazendo ao mesmo tempo determinadas restrições e requisitos tecnológicos. A abordagem técnica correta para perseguir este objetivo é formular um problema matemático que, contemplando as restrições, procure encontrar o compromisso ótimo entre os principais custos envolvidos, quais sejam: expansão da rede de assinantes, construção de centrais e interligação de centrais.

É conveniente trabalhar com períodos de planejamento suficientemente grandes para permitir estudos de mudanças tecnológicas, mas não tão grandes a ponto de debilitar a importância dos sistemas existentes e esvanecer informações necessárias ao longo do período. Um horizonte da ordem de vinte anos, por satisfazer os requisitos acima, foi escolhido como o período de maior interesse.

O problema matemático, formulado para encontrar a estratégia de expansão a custo mínimo de uma rede telefônica urbana, tem dimensão gigantesca e reveste-se de grande complexidade. Por exemplo, o planejamento da implantação de novos centros de fios em uma cidade com 300 pontos de controle, 400 dutos, e 5 estágios de planejamento, gera um problema com aproximadamente 10.000 variáveis contínuas e 200 variáveis discretas. Um problema desta dimensão, mais pela quantidade de variáveis discretas do que pelas contínuas, é impossível de ser resolvido no estado atual de desenvolvimento das técnicas de solução e recursos computacionais.

As dificuldades decorrentes da dimensão são muitas vezes contornadas através de um compromisso, onde se relaxa a fidelidade dos modelos para reduzir o grau de exigências computacionais.

Na concepção de planejamento adotada, optou-se por manter o rigor dos modelos matemáticos e promover a decomposição do problema através de uma hierarquização dos objetivos. Isto permitiu que se trabalhasse com

problemas menores, sem comprometer a qualidade da solução.

A primeira decomposição efetuada consiste em separar o problema de localização de centros de fios do problema de interligá-los.

Na etapa de localização de centros de fios, a hierarquização de objetivos corresponde a responder sequencialmente às questões de onde, quando, e como crescer. Questiona-se ainda a viabilidade de se colocar concentradores na rede. Assim, tem-se os seguintes subproblemas: *localização de estações telefônicas* (onde?), *definição de cronograma de instalação das estações* (quando?), *evolução dinâmica de cortes de área* (como?) e *alocação de concentradores*, os quais podem ser otimizados separadamente, com interações segundo a figura 1.1

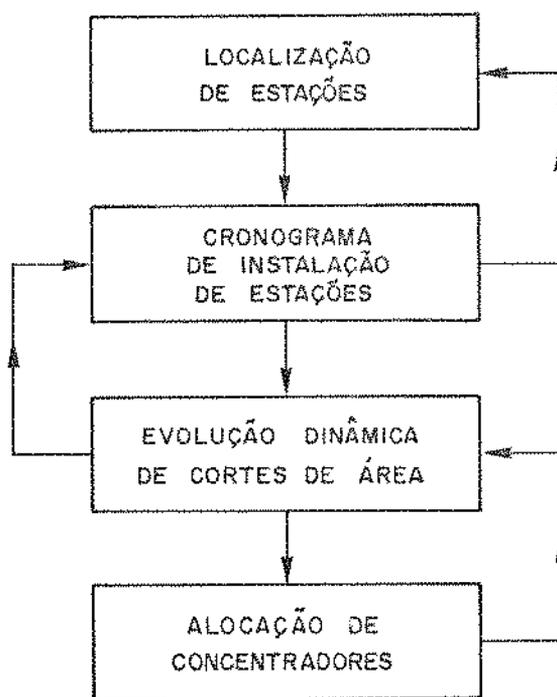


Figura 1.1 - Interação na otimização dos subproblemas

A seguir é feita uma explanação sucinta sobre a abordagem de cada subproblema.

A. Localização de Estações [1]

O procedimento consiste em, a partir do ano inicial do período de planejamento, determinar a configuração da rede no ano horizonte. Enfoca-se estaticamente a rede, projetando uma fotografia do ano horizonte a partir da atual, sem se preocupar com os estágios intermediários.

Assim, determina-se a localização das novas estações, bem como a ampliação das existentes, de forma a assegurar o atendimento da demanda prevista para o ano horizonte do planejamento a um custo mínimo de equipamentos de comutação e infraestrutura e de rede primária.

Verifica-se que quanto maior o número de centrais comutadoras numa rede urbana, menor é a rede de cabos necessária para interligar seus assinantes; porém, é maior o custo fixo de construção dos centros de fios. É o compromisso entre estes custos que se busca na otimização do subproblema em voga.

B. Definição do Cronograma [2]

Conhecida a quantidade, a capacidade e a localização das novas estações, e/ou ampliações das antigas, vem, então, o problema de quando instalá-las/ampliá-las, ao longo do período de planejamento. Esta questão é resolvida através da comparação entre as várias alternativas possíveis. O compromisso é o de atender a demanda da rede em cada estágio de planejamento, com um custo mínimo.

Os custos e alternativas de implantação são calculados e analisados ao longo de todos os estágios de planejamento. Trata-se, portanto, de um processo dinâmico para determinar, dentre as alternativas possíveis, o cronograma ótimo.

C. Evolução Dinâmica de Cortes de Área

Trata-se de, a partir da rede existente no ano base do plane-

jamento e do cronograma de implantação/ampliação das estações, proceder à sua evolução, realizando os cortes de área (redefinição da filiação dos assinantes) ao longo do período de planejamento.

O procedimento reestrutura as zonas de filiação a cada estágio, partindo da configuração da rede no estágio anterior, e visando atingir a rede alvo do ano horizonte. É, portanto, um processo dinâmico.

O presente trabalho aborda a sistemática concebida para otimização deste subproblema, bem como seu desenvolvimento computacional e os resultados obtidos.

D. Alocação de Concentradores [2]

Atua-se sobre a configuração da rede para cada estágio, estudando a introdução de concentradores na mesma, através de uma análise de custos que consiste, basicamente, na comparação entre o custo do concentrador e a economia de rede primária introduzida por este equipamento. Deste modo, indica-se onde e quantos concentradores instalar a fim de que o custo global da rede diminua.

Apesar de se agir sobre todos os estágios de planejamento, atua-se estaticamente sobre cada um deles. Assim, os estágios de planejamento são considerados independentemente, sem memória dos concentradores alocados no estágio anterior.

Tomando-se um exemplo com um horizonte de planejamento de 16 anos dividido em quatro subperíodos, apresenta-se na figura 1.2 um diagrama dinâmico da interação dos subsistemas que se acabou de descrever. Inicialmente, partindo da rede de 1984, tira-se uma fotografia otimizada da rede do ano 2000, decidindo a implantação de seis estações (*otimização da localização*). Em seguida, determina-se que a estação 2 será implantada em 1987, a 4 em 1990, etc. (*otimização do cronograma*); tal é expresso no canto inferior direito dos retângulos referentes aos estágios. Segue-se, definindo as zonas de filiação das estações em cada um dos estágios (*otimização da*

evolução dos cortes de área). Por fim, verifica-se para cada estágio a conveniência de se instalar concentradores.

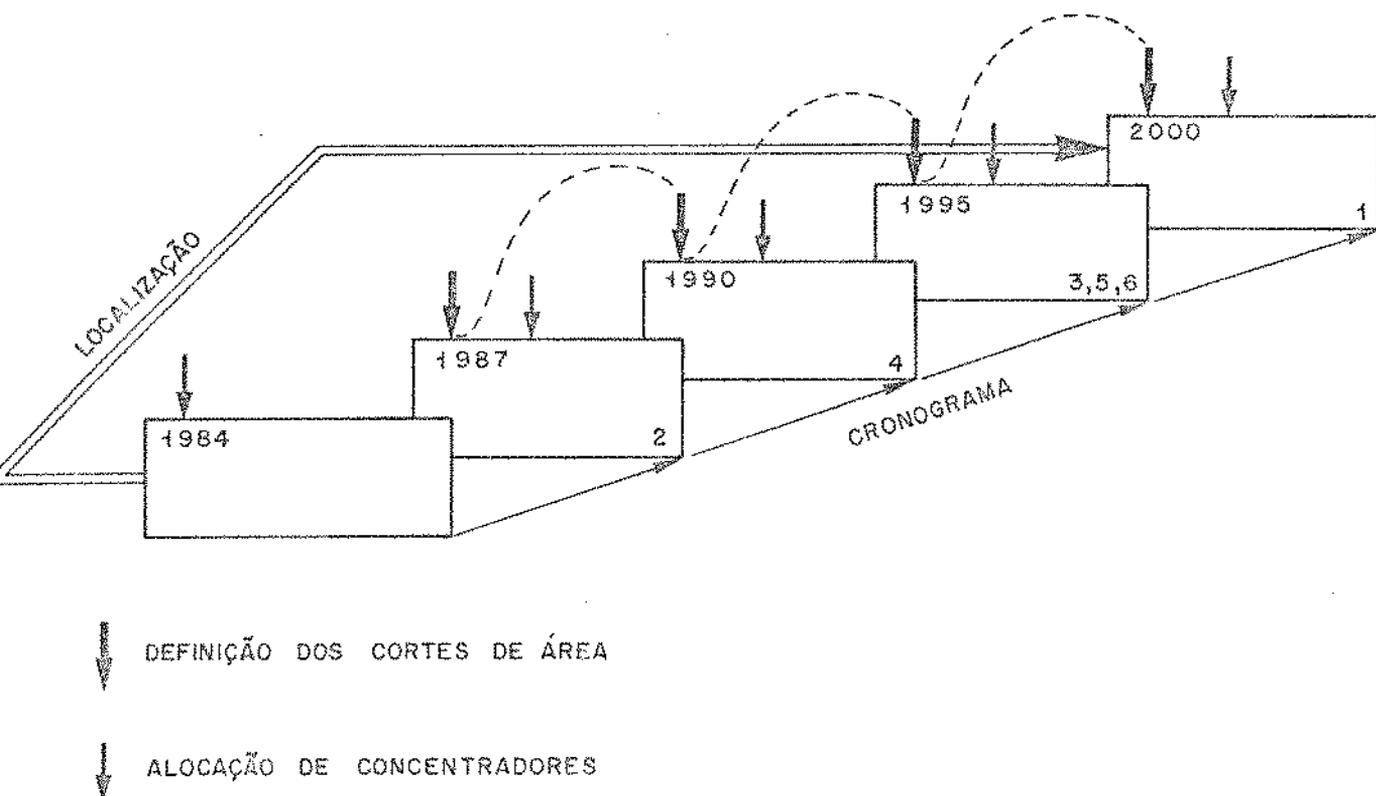


Figura 1.2 - Exemplo de interação dos subproblemas no tempo

1.2. CONCEITOS IMPORTANTES

A seguir são definidos alguns termos técnicos utilizados ao longo deste texto ou auxiliares no seu entendimento [3].

Central - central local de comunicação telefônica à qual se ligam linhas de assinantes.

Estação telefônica - conjunto constituído do prédio e de uma ou mais centrais telefônicas nele instaladas.

Centro de fios - corresponde a um ponto de convergência de assinantes, geralmente com capacidade de comutação; pode ser uma estação, um estágio de linhas remoto (ELR) ou um concentrador de linha.

Zona de filiação, zona de influência ou *área de serviço de um centro de fios* - é a área geográfica determinada pelos assinantes que são atendidos por este centro de fios. Em termos do modelo de grafos, corresponde aos nós ligados a este centro de fios e arcos que tenham origem e destino em tais nós.

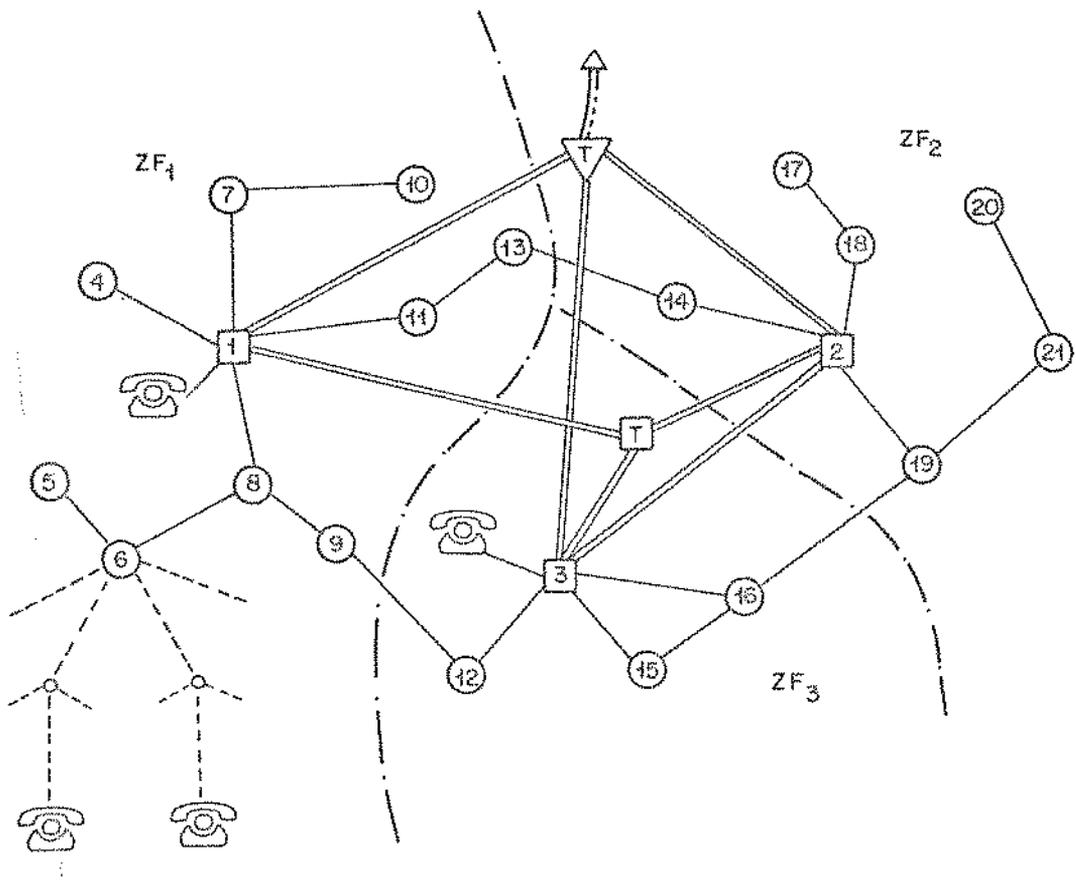
Ponto de controle, cabinet ou *armário de distribuição* - dispositivo destinado a suportar e abrigar blocos de conexão que possibilitam a interligação dos cabos da rede primária com os cabos da rede secundária. São os nós da rede no modelo de grafos.

Rede de troncos - rede de cabos que interliga as centrais locais.

Rede primária - rede de cabos, em geral subterrâneos, que liga os pontos de controle às centrais locais. Será, às vezes, mencionada no texto simplesmente como rede.

Rede secundária - rede de cabos, em geral aérea, que liga os assinantes aos pontos de controle.

A figura 1.3 ilustra os conceitos já apresentados.



- [1] - CENTRAL LOCAL DE COMUTAÇÃO j
- [T] - CENTRAL TANDEM
- ▽ - CENTRAL TRÂNSITO
- (1) - PONTO DE CONTROLE i
- o - CAIXA DE DISTRIBUIÇÃO
- ☎ - ASSINANTE
- ZF_j - ZONA DE FILIAÇÃO DA CENTRAL j
- - REDE PRIMÁRIA
- - - - REDE SECUNDÁRIA
- ==== REDE DE TRONCOS
- REDE INTERURBANA
- - - - FRONTEIRAS DAS ZONAS DE FILIAÇÃO

Figura 1.3 - Representação da rede urbana

Duto - tubulação subterrânea que permite a instalação de cabos telefônicos, ligando os armários de distribuição entre si.

Arcos de fronteira - são arcos que têm origem em uma zona de filiação e destino em outra.

Ano base, ano presente, ano atual ou estágio inicial de planejamento - é o ano em que se inicia o período de planejamento.

Ano horizonte ou ano meta - é o ano em que se encerra o período de planejamento.

Período de planejamento - intervalo de tempo abrangido pelo estudo.

Subperíodos de planejamento - cada uma das subdivisões que são feitas no período de planejamento. Os subperíodos não precisam ter a mesma duração e seu número está ligado à precisão que se espera do estudo e à disponibilidade dos dados.

Estágio de planejamento - limite entre os subperíodos de planejamento, incluindo o ano base e o ano meta. O número de estágios de planejamento é igual ao número de subperíodos mais um.

A figura 1.4 ilustra alguns dos conceitos recém-apresentados.

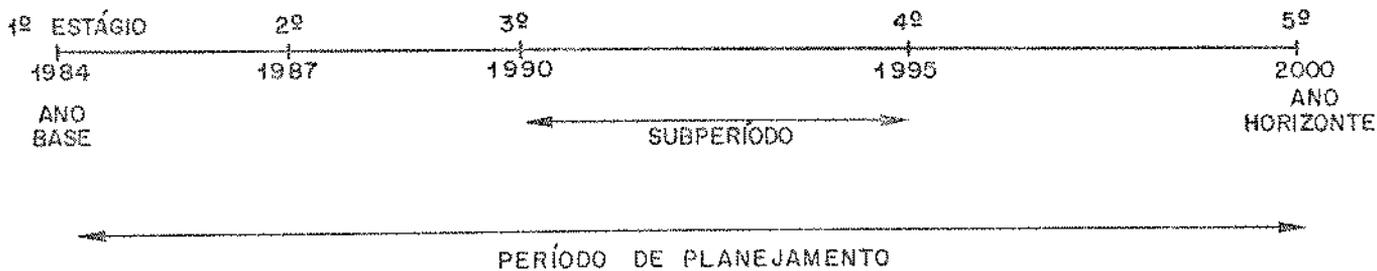


Figura 1.4

Árvore - é um grafo conexo e sem ciclos. Em Programação Linear corresponde a uma solução básica.

Família de um nó n - é um conjunto de nós de uma árvore cujos assinantes ao fluírem para a estação a que estão filiados passam por n . Tal é exemplificado na figura 1.5, onde o nó 17 não tem famílias e o nó 20 tem três famílias: (F_1) nós 18 e 19, (F_2) nó 21, (F_3) nós 22, 23 e 24.

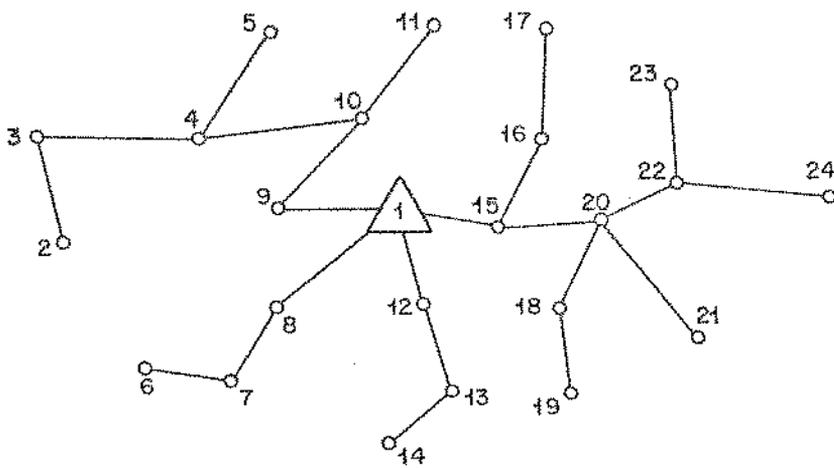


Figura 1.5

CAPÍTULO 2 : O PROBLEMA DA EVOLUÇÃO DE CORTES DE ÁREA

2.1. ABORDAGEM

O problema da definição dos cortes de área de uma rede telefônica urbana, conforme já foi comentado, é uma das etapas do planejamento a longo prazo da expansão desta rede. Este problema se impõe mais seriamente quando, ao longo de um certo período de planejamento, é introduzida na rede uma nova estação, devido ao crescimento da demanda de assinantes e ao esgotamento da capacidade das estações já existentes. É, então, necessário realizar filiações/refiliações de assinantes (cortes de área) de modo mais econômico possível.

O problema pode ser formulado como um problema de transporte clássico da programação linear ou como um programa de fluxo de custo mínimo. Estes modelos se distinguem pelos detalhes que levam em conta. Uma comparação entre ambos e as razões que levaram à escolha do segundo são apresentadas por Araújo em [4].

Deste modo, decidiu-se pela representação da rede telefônica como um grafo, onde os nós são os centros de fios e pontos de controle e os arcos correspondem aos trechos da rede primária que interligam os pontos de controle entre si ou às estações.

É desejável que a rede atual evolua à rede alvo do ano meta (determinada na etapa de localização das estações) de forma não abrupta, isto é, de modo que haja o maior aproveitamento dos investimentos feitos na rede até o momento.

Assim, idealizou-se o procedimento evolutivo como um Programa de Fluxo de Custo Mínimo (PFCM), resolvido por um algoritmo especializado da *programação linear* (simplex revisado para grafos), em que se considerava a rede externa disponível em cada estágio do planejamento. Ou seja, a filiação dos assinantes era definida por um critério de custo mínimo, sendo que o fluxo de assinantes nos trechos da rede já existentes no estágio anterior tinha custo nulo até o esgotamento da capacidade disponível. Por mostrar-se

muito conservadora, devido ao seu comprometimento com a rede do ano base, foi deixada de lado esta concepção, que tinha sobretudo a indesejável característica de levar a quase totalidade dos pontos de controle a repartir seus assinantes. Em linhas gerais, esta repartição consistia na filiação dos novos assinantes de cada ponto de controle a uma estação nova, enquanto os assinantes já existentes no estágio anterior mantinham-se ligados à estação à que estavam filiados. Portanto, não havia delimitação nítida das zonas de filiação; pelo contrário, eram geradas inúmeras áreas de conflito.

Isto levou o procedimento evolutivo a compor-se de duas fases: na primeira procura-se avançar no sentido de atingir a rede do ano meta e numa fase posterior procura-se adaptar o resultado à rede existente no estágio anterior.

A primeira fase, que foi chamada *Fase de Evolução à Rede Alvo* (FERA), procede à filiação ótima dos assinantes (concentrados por ponto de controle) às estações existentes ou às eventuais estações novas que se incorporam à rede no subperíodo compreendido entre o estágio em estudo e o estágio anterior, sem considerar a rede primária disponível neste último.

A outra fase, denominada *Fase de Adaptação à Rede Atual* (FARA), encarrega-se da ligação dos assinantes às estações, dentro de cada zona de filiação definida pela FERA, considerando a disponibilidade de rede externa no estágio anterior.

Tanto a fase de evolução quanto a de adaptação são aplicadas a cada estágio em que está dividido o horizonte de planejamento. Ambas são otimizantes e são modeladas como um PFCM.

Nos sub-ítem 2.2 e 2.3 a FERA e a FARA são apresentadas de modo detalhado.

2.1.1. DADOS NECESSÁRIOS

Para implementar o procedimento que foi descrito é necessário dispor dos seguintes dados:

- rede primária de dutos, incluindo as expansões possíveis

para atender à demanda do ano meta;

- localização e capacidade das estações;
- cronograma de entrada em operação das estações novas e das eventuais ampliações e/ou desativações das estações existentes no ano base;
- demanda de terminais por ponto de controle para cada estágio do horizonte de planejamento^(*);
- disponibilidade de cabos na rede primária do ano base; e
- custo do par-metro de cabo.

2.2. FERA : FASE DE EVOLUÇÃO À REDE ALVO

2.2.1. CONCEPCÃO

Nesta fase procura-se a filiação dos assinantes às estações para cada estágio do horizonte de planejamento considerado separadamente. O processo de filiação é feito de maneira ótima, alocando os pontos

(*) Para um período de, por exemplo, vinte anos, esta informação depende de métodos de previsão confiáveis. Apesar da importância, a discussão de métodos e modelos de previsão está fora dos objetivos deste trabalho; supõe-se existentes, e determinísticas, as informações sobre demanda.

de controle às estações por um critério de minimização do custo total de cabos, e respeitando as capacidades das estações. Assim, a FERA fornece as zonas de filiação para cada estação.

Deve ser salientado que na FERA não há preocupação em aproveitar a rede existente no estágio anterior; equivale a dizer que os assinantes antigos e novos concorrem igualmente para se filiarem às estações. A justificativa para tal concepção é que a FERA é um passo que se pretende desprender do passado, ou seja, ela persegue uma configuração de rede em que os assinantes se ligariam às estações mais próximas possíveis. Se a FERA contemplasse o aproveitamento dos cabos existentes, estaria sendo dado um passo por demais conservador, visto que os assinantes já presentes no estágio anterior dificilmente seriam refiliados (resultando zonas de filiação conflitantes) e com isso estar-se-ia construindo uma rede inadequada do ponto de vista técnico (ou seja, quando considerados outros fatores, tais como: gerência e manutenção da rede e entroncamento das estações).

Como a FERA foi modelada como um PFCM e este requer arcos orientados para trabalhar, todos os arcos da rede original são duplicados nesta fase do procedimento. Entretanto, para efeito de representação serão usados arcos não orientados.

2.2.2. RESTRIÇÃO AOS CORTES DE ÁREA BRUSCOS

Como a FERA não trabalha com a disponibilidade de cabos do estágio anterior, é possível que quando da entrada de novas estações na rede ocorram grandes cortes de área, dado que estas estações já iniciariam sua operação com um elevado número de assinantes. Tal inconveniente pode ser evitado proibindo-se que as estações já existentes no estágio anterior tenham um decréscimo no número de assinantes a ela filiados. Assegura-se, assim, cortes de área suaves.

Na realidade, esta proibição ao decréscimo do número de assinantes das estações antigas é uma variável de controle que o planejador pode manipular, estipulando qualquer percentagem de decréscimo para as diferentes estações, e até mesmo um acréscimo. Esta restrição é o principal condicionamento da FERA.

Seja o seguinte exemplo. Na rede hipotética da figura 2.1 as estações 1 e 2 são antigas e têm respectivamente 11 mil e 14 mil assinantes filiados no estágio i . A capacidade final de comutação das estações 1 e 2 é de 20 mil assinantes cada e a da estação 3, que está planejada para entrar em operação no estágio $i+1$, é de 10 mil assinantes (figura 2.2).

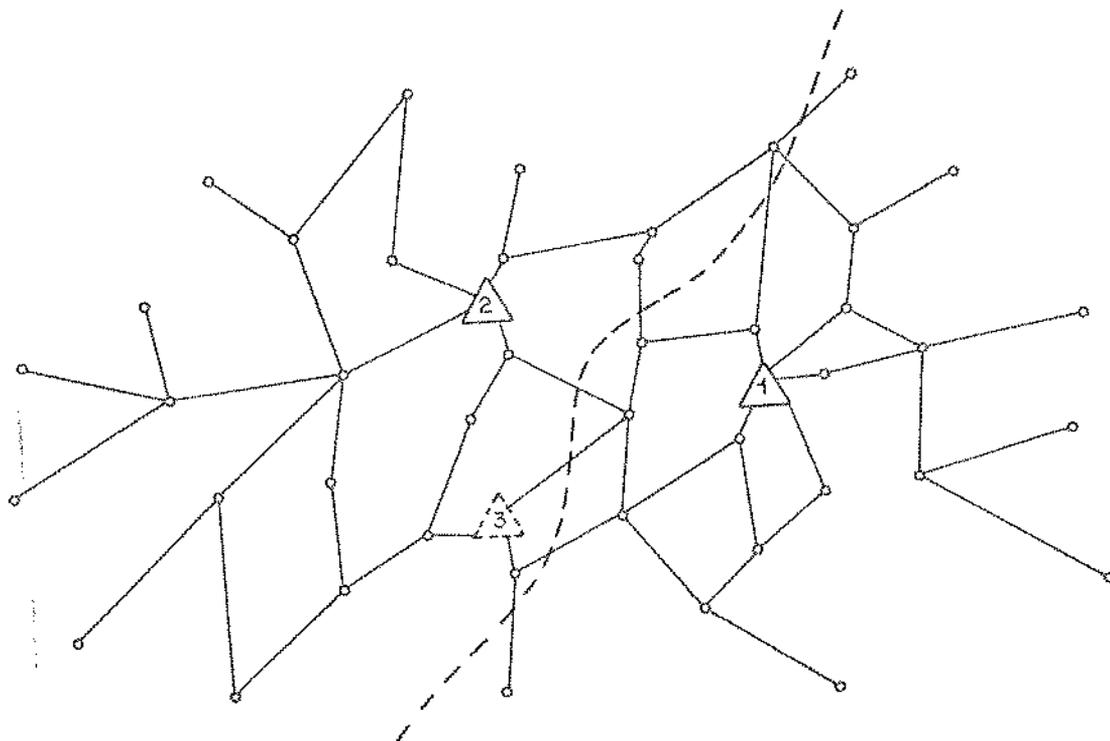


Figura 2.1 - Rede exemplo

O nó NF - nó de fechamento - é introduzido na rede para fazer o balanceamento entre as capacidades das estações e as demandas dos pontos de controle e encontra-se ligado a essas através de arcos orientados - arcos de fechamento. Como demanda do nó de fechamento é associada a diferença entre a capacidade total das estações da rede e a demanda total da rede; pelos arcos de fechamento escoam fluxos em direção às estações para completar a capacidade de atendimento das mesmas. Portanto, estes fluxos indicam a ociosidade das estações no estágio em estudo.

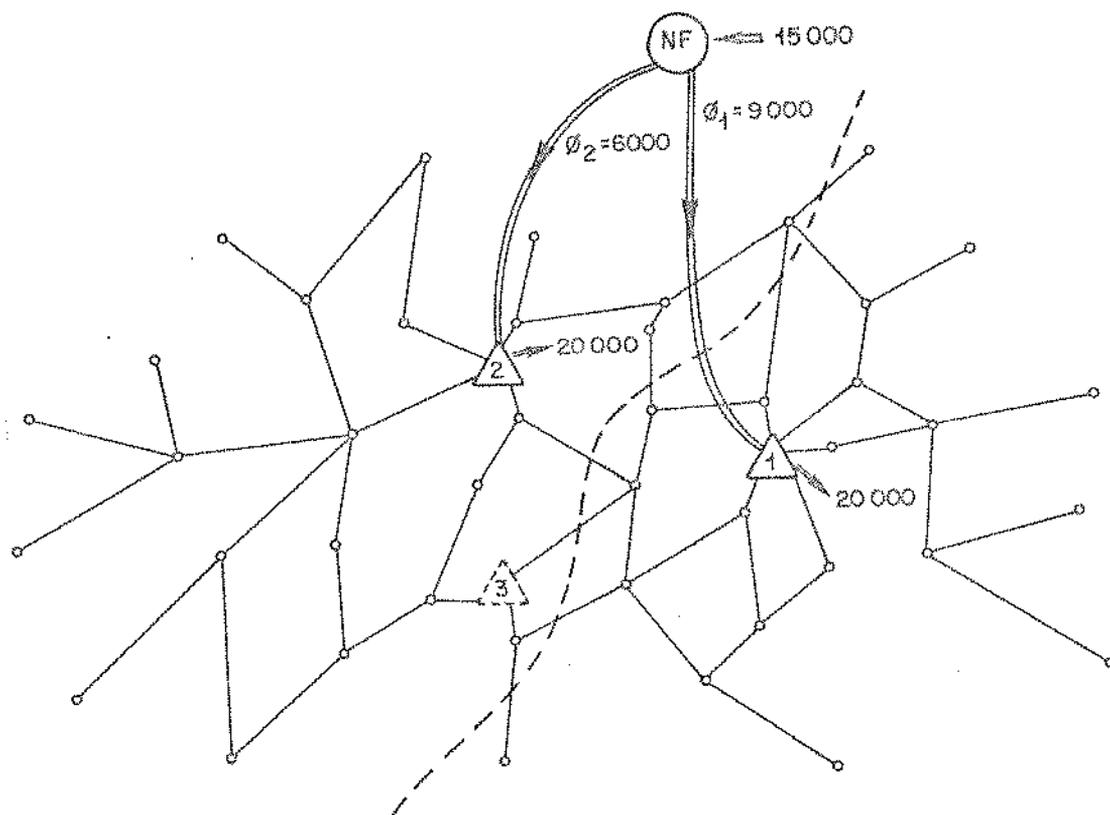


Figura 2.2 - Rede no estágio i

O fluxo de assinantes no arco (NF, 1) é de 9 mil (ϕ_1) e no arco (NF, 2) é de 6 mil (ϕ_2), que completam as capacidades das estações. Tais números aparecem como resultado da ação da FERA para o estágio i .

Suponha-se que para o estágio $i+1$ houve um aumento de sete mil assinantes na rede. A estação 3 deve entrar com 10 mil de capacidade e não será permitido que as estações 1 e 2 reduzam seu número de assinantes em relação ao estágio i (11 mil e 14 mil respectivamente). Para isto basta fazer a capacidade máxima dos arcos de fechamento do estágio $i+1$ igual à capacidade ociosa das estações (expressa entre parênteses na figura 2.3) no estágio i .

A figura 2.3 mostra a rede preparada para a iteração da FERA correspondente ao estágio $i+1$. A capacidade de comutação é de 50 mil e a demanda é 32 mil assinantes.

O resultado da FERA para o estágio $i+1$ pode ser o apresentado na figura 2.4, onde os 7 mil novos assinantes e a entrada da estação

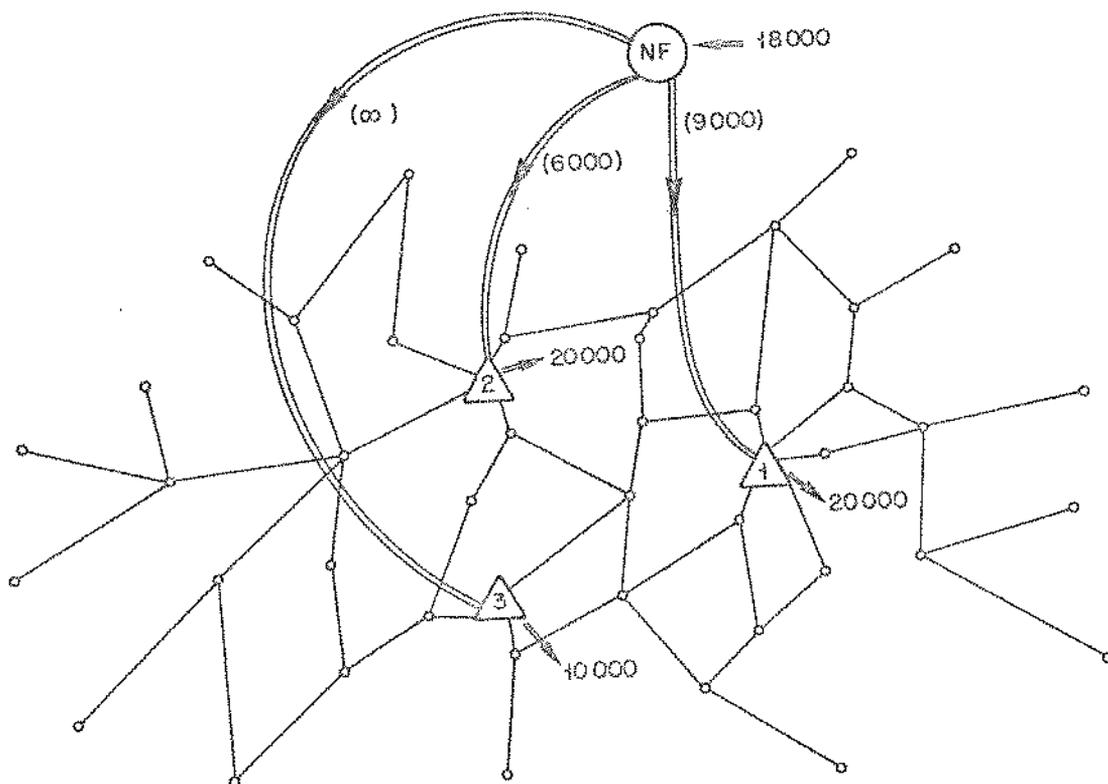


Figura 2.3 - Rede preparada para a FERA do estágio $i+1$

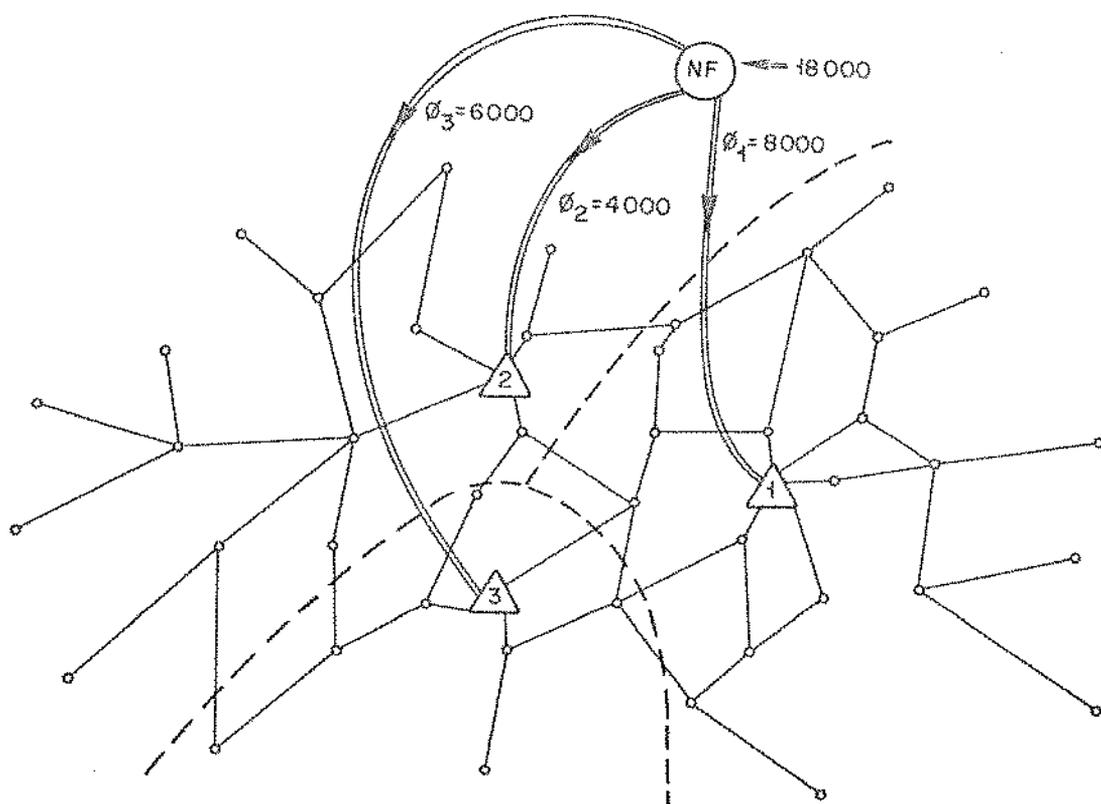


Figura 2.4 - Resultado possível da FERA do estágio $i+1$

3 provocaram cortes de área tais que filiaram-se 4 mil assinantes àque-la, 12 mil à estação 1 e 16 mil à estação 2.

2.2.3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Conforme já se comentou, foi escolhido um modelo de fluxo de custo mínimo para formulação do problema. Este modelo utiliza diretamente a rede primária.

O problema consiste em fazer circular um fluxo na rede de modo a atender a demanda a um custo mínimo, respeitando as capacidades das estações. Pode-se formulá-lo assim:

$$\text{MINIMIZAR } \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} c_{ij} \phi_{ij} \quad (2.1)$$

sujeito a

$$\sum_{i \in I} \phi_{ij} + a_j - \sum_{k \in I} \phi_{jk} \leq b_j, \quad \forall j \in J \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in I} \phi_{ij} + a_j - \sum_{k \in I} \phi_{jk} = 0, \quad \forall j \in (I - J) \quad (2.3)$$

$$\phi_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in I \quad (2.4)$$

onde

I : conjunto dos n nós da rede;

J : conjunto das p estações da rede;

c_{ij} : custo por assinante do par de fios ligando o nó i ao nó j ;

a_j : número de assinantes do ponto de controle j ;

b_j : capacidade da estação j ; e

ϕ_{ij} : número de assinantes (pares) que passam no arco (i, j) .
É a variável do problema.

Com respeito às restrições, pode-se observar que (2.2) garante que as capacidades das estações são respeitadas; (2.3) é a lei de conservação dos fluxos nos nós: o fluxo entrante mais a produção do nó é igual ao fluxo saínte.

A sistemática adotada na resolução do PFOI é apresentada por Xavier [5] no capítulo V.

2.2.4. PONTO DE CONTROLE REPARTIDO

Quando a FERA é aplicada a um estágio do período de planejamento, é possível que alguma estação atinja sua capacidade máxima. Neste caso, condições matemáticas de otimalidade forçam algum ponto de controle a repartir seus assinantes entre a estação saturada e uma outra adjacente e ociosa. Do ponto de vista de engenharia de projeto, isto não é preocupante: basta alocar todos os assinantes do ponto de controle repartido para a estação ociosa ou ampliar marginalmente a estação saturada. Decidir sobre a filiação do ponto de controle repartido é, entretanto, necessário para concretizar a delimitação das zonas de influência e, logo, para a preparação da rede para a Fase de Adaptação à Rede Atual.

Esta questão é delicada e seu tratamento será alvo de uma abordagem mais rica no Capítulo 3, além de merecer algumas pinceladas no tocante à implementação computacional no Capítulo 4.

2.3. FARA : FASE DE ADAPTAÇÃO À REDE ATUAL

2.3.1. CONCEPÇÃO

Nesta fase toma-se as zonas de filiação definidas pela FERA e

procede-se a um rearranjo das ligações assinantes-estação, procurando aproveitar a rede de cabos existente; não são realizados novos cortes de área.

O rearranjo das ligações dos assinantes às estações, dentro de cada zona de filiação, é realizado através da resolução de um PFCM, à semelhança da FERA, levando em conta as capacidades dos arcos.

A FARA foi pensada e implementada de duas formas alternativas. Em uma delas, a redinha correspondente a uma zona de filiação é isolada, procede-se à renumeração sequencial de seus nós e arcos^(*) - armazenando através de apontadores as informações que serão usadas posteriormente -, quadruplica-se seus arcos e resolve-se o PFCM associado a essa redinha; o procedimento é repetido para as demais zonas de filiação. A outra concepção para a FARA consiste na quadruplicação de todos os arcos da rede, criação de um cordão de isolamento entre as várias zonas de filiação - pela definição do custo dos arcos de fronteira como sendo infinito - e resolução do PFCM associado a essa rede.

Basicamente, a diferença entre as duas concepções está em que na primeira são resolvidos tantos PFCM quantas forem as estações, ao passo que na segunda concepção somente um PFCM é resolvido. Uma análise comparativa da implementação computacional de ambas é apresentada no capítulo 4. Ao longo do presente capítulo, a FARA será, por simplificação e sem prejuízo, enfocada apenas na segunda concepção.

Tomando uma zona de filiação fornecida pela FERA e nela um arco qualquer de custo c , mostra-se, a seguir, como levar em conta a disponibilidade de rede no estágio anterior.



Figura 2.5 - Arco original

(*) A execução do PFCM requer que os nós e arcos estejam numerados sequencialmente, o que não ocorre para cada redinha separadamente, exigindo, assim, sua renumeração.

Conforme já foi mencionado no sub-item anterior, o PFCM requer arcos orientados para trabalhar e como os arcos de uma rede telefônica (figura 2.5) são não orientados, cada um deles foi duplicado para a realização da FERA (figura 2.6).



Figura 2.6 - Arco duplicado

Supondo que nos arcos já existam d pares lançados que possam ser reaproveitados pelos assinantes, sem incorrer em custo adicional de rede, tal reaproveitamento pode ser modelado pela quadruplicação dos arcos da rede e a adoção de capacidades sobre os mesmos, conforme a figura 2.7, onde os arcos μ_2 e μ_4 têm custo c e capacidades infinitas e

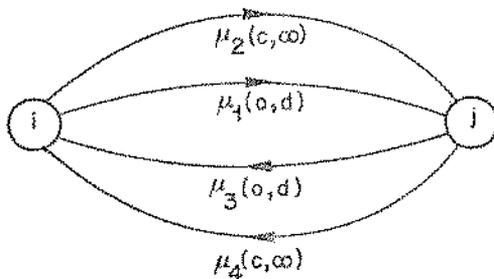


Figura 2.7 - Arco quadruplicado

os arcos μ_1 e μ_3 são livres de custo até a capacidade d . É interessante atribuir artificialmente a estes últimos um ϵ -custo, próximo de zero, para que se verifiquem as equações de (2.5) a (2.8).

Chamando respectivamente de ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 os fluxos nos arcos μ_1 , μ_2 , μ_3 e μ_4 , resultantes da resolução do PFCM para a rede com arcos quadruplicados, as seguintes condições de otimalidade são válidas:

$$\phi_1 > 0 \implies \phi_3 = \phi_4 = 0 \quad (2.5)$$

$$\phi_3 > 0 \implies \phi_1 = \phi_2 = 0 \quad (2.6)$$

$$\phi_2 > 0 \implies \phi_1 = d \quad (2.7)$$

$$\phi_4 > 0 \implies \phi_3 = d \quad (2.8)$$

Resolver o PFCM correspondente à FARA é procurar atender à demanda de assinantes dos pontos de controle de cada zona de filiação associada a uma estação, procurando minimizar o gasto em cabos na rede. Assim sendo, o PFCM procurará primeiramente alocar os assinantes às estações utilizando os arcos de custo ϵ , ou seja, os arcos que têm disponibilidade de pares (μ_1 ou μ_3), e só depois de atingida sua capacidade d é que a alocação se fará pelos arcos custosos (μ_2 ou μ_4), cujo uso define a necessidade de lançamento de novos cabos.

Com base nas zonas de filiação delimitadas na FERA do estágio em estudo, e após a quadruplicação dos arcos da rede, o PFCM procede ao rearranjo das ligações assinantes-estação, de modo a aproveitar a rede de cabos existente (disponibilidade).

Ao fim da FARA, a disponibilidade de pares nos arcos pode ser recalculada em função dos resultados obtidos, segundo a expressão (2.9).

$$d_{ij} = \max \{ \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 ; d \}, \quad (2.9)$$

onde ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 e ϕ_4 são os fluxos nos arcos μ_1 , μ_2 , μ_3 e μ_4 já definidos anteriormente.

Esta nova disponibilidade deverá ser usada pela FARA do estágio seguinte, onde o procedimento exposto se repete.

Vale ressaltar que d_{ij} não é a capacidade ociosa dos dutos, mas a quantidade total de pares já lançados. Cada FARA executada supõe a rede descarregada, ou seja, os pares todos disponíveis para os assinantes, quer novos quer antigos. Uma outra observação é quanto aos pon-

tos de controle repartidos : esse fenômeno, obviamente, não ocorre na FARA, pois as zonas de filiação estão bem delimitadas, isto é, estanques, pela existência do cordão de isolamento composto pelos arcos colocados a custo infinito.

2.3.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A Fase de Adaptação à Rede Atual, similarmente à FERA, pode ser formulada assim:

$$\text{MINIMIZAR } \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} c_{ij} \phi_{ij} \quad (2.1)$$

sujeito a

$$\sum_{i \in I} \phi_{ij} + a_j - \sum_{k \in I} \phi_{jk} \leq b_j, \quad \forall j \in J \quad (2.2)$$

$$\sum_{i \in I} \phi_{ij} + a_j - \sum_{k \in I} \phi_{jk} = 0, \quad \forall j \in (I - J) \quad (2.3)$$

$$\phi_{ij} + \phi_{ji} \leq d_{ij}, \quad \forall i, j \in I \quad (2.10)$$

$$c_{ij} = \infty, \quad \forall i, j / ZF(i) \neq ZF(j) \quad (2.11)$$

$$\phi_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \in I \quad (2.4)$$

onde

$I, J, c_{ij}, a_j, b_j, \phi_{ij}$ já foram definidos em 2.2.3;

d_{ij} : disponibilidade de pares no arco (i, j) ; e

$ZF(i)$: zona de filiação do nó i .

Esta formulação difere daquela apresentada para a FERA pelo acréscimo das restrições (2.10), que define capacidade para os arcos da rede, e (2.11), que cria um cordão de isolamento entre as zonas de filiação.

Cumprе comentar que as condições de otimalidade expressas em (2.5) e (2.6) permitem reescrever a restrição (2.10) assim :

$$\phi_{ij} \leq d_{ij} \quad (2.10a)$$

$$\phi_{ji} \leq d_{ij} \quad (2.10b)$$

o que, associado à eliminação da desigualdade na restrição (2.2) em função da introdução do nó e dos arcos de fechamento, possibilita que o problema formulado seja resolvido pelas técnicas clássicas de otimização em grafos.

CAPÍTULO 3 : PONTO DE CONTROLE REPARTIDO

3.1. ORIGEM

Com a resolução do PFCM correspondente à FERA de um determinado estágio do período de planejamento, é possível que alguns nós estejam ligados a mais de uma estação, o que se traduz na filiação dos assinantes de um mesmo nó a estações diferentes. A repartição dos nós pode acontecer devido ao esgotamento da capacidade de uma estação (*estação saturada*) ou à ativação da restrição de decréscimo de uma estação existente no estágio anterior (*estação decrescente*). O detalhamento de cada caso será feito no subitem seguinte.

Do ponto de vista teórico, é fácil mostrar que a saturação de uma estação leva a um ponto de controle repartido. Para isto, é preciso lembrar o conceito de semi-grau exterior [6] e visualizar que, para uma rede com n nós, a soma dos semi-graus exteriores dos nós em uma solução básica (*) é igual ao número de arcos desta, qual seja $n - 1$ [7]. Quando uma estação satura, seu arco de fechamento passa a não ter fluxo e deixa a base. Deste modo, o nó de fechamento da rede fica com um grau exterior a menos e, para que a somatória dos semi-graus exteriores da rede mantenha-se constante, algum nó ganhará um semi-grau exterior a mais. Desde que, à exceção do nó de fechamento, todos os nós da árvore têm semi-grau exterior *um* (no caso de pontos de controle) ou *zero* (no caso de estações), o nó em questão tornar-se-á repartido.

3.2. TIPOS DE REPARTIÇÕES E SEU TRATAMENTO

Na imensa maioria das vezes, a repartição de um ponto de con-

(*) A literatura especializada evidencia a equivalência entre *árvore* e *solução básica* de um grafo.

trole se dá entre uma estação ociosa e uma estação saturada ou decrescente. Entretanto, há possibilidade de acontecerem repartições envolvendo situações mais complexas. Cada um dos casos é detalhado nos sub-ítemns seguintes.

3.2.1. CASO 1 : ESTAÇÃO SATURADA

Este caso ocorre quando a resolução do PFCM atribui um ponto de controle (e as eventuais famílias a ele penduradas) a uma estação que, pelo esgotamento de sua capacidade, não consegue atender a todos os assinantes daquele, sendo os excedentes atribuídos à estação ociosa mais próxima.

Um exemplo ilustrativo deste caso é apresentado na figura 3.1, que mostra o ponto de controle *NR* repartindo os 1.300 assinantes que para ele convergem. Seria mais econômico que a totalidade destes as

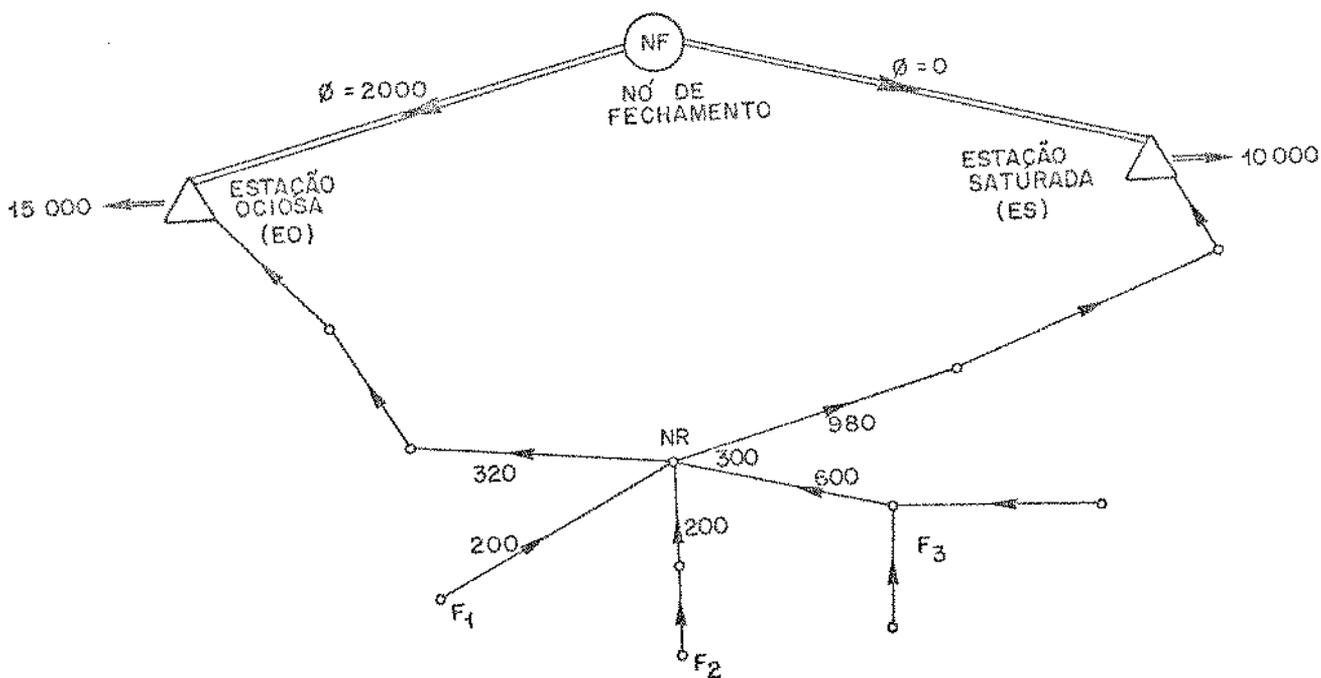


Figura 3.1

assinantes fossem alocados para a estação *ES*. Porém, por hipótese, *ES* está saturada e só é capaz de atender a 980 desses assinantes; os restantes 320 são atendidos pela estação adjacente *EO*. Como *ES* está saturada, o fluxo no seu arco de fechamento é zero; já *EO* tem uma capacidade ociosa de 2.000 assinantes, expressa no fluxo em seu arco de fechamento. O ponto de controle *NR* tem 300 assinantes e 3 famílias ligadas nele: F_1 , F_2 e F_3 , respectivamente com 200, 200 e 600 assinantes.

Obedecendo à restrição de saturação da estação *ES* é necessário definir a filiação de *NR* e suas famílias, de modo a preparar a rede para a FARA. Para efetuar a repartição, cria-se ao lado de *NR* um nó artificial *NX* (sem assinantes), ligado a ele por um arco fictício de custo nulo.

A definição da repartição é feita tomando a combinação entre o número de assinantes de F_1 , F_2 , F_3 e *NR* que mais se aproxima por baixo de 980. Esta escolha visa preservar a indivisibilidade dos pontos de controle dependurados em *NR*. A decisão de repartição aqui tomada foi

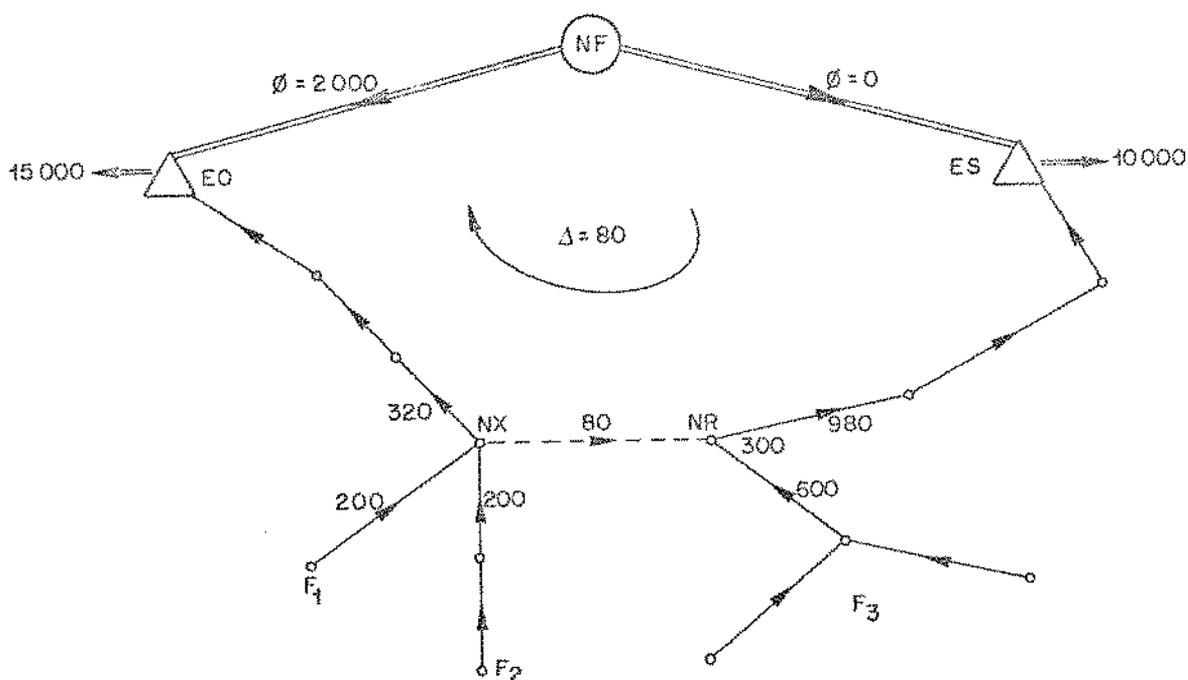


Figura 3.2

atribuir NR e F_3 à ES (totalizando 900 assinantes), trazendo 80 assinantes de NX através do arco fictício introduzido (Figura 3.2). Vale ressaltar que qualquer outra combinação seria mais custosa ou inviável.

A seguir, força-se a entrada na base do arco de fechamento de ES , em lugar do arco artificial, passando um fluxo Δ (no sentido horário) de 80 assinantes. Com isto volta-se a uma estrutura de árvore que pode ser utilizada pela FARA, visto que o fluxo no arco (NX , NR) se anula.

A rede, finalmente, fica com a configuração da figura 3.3.

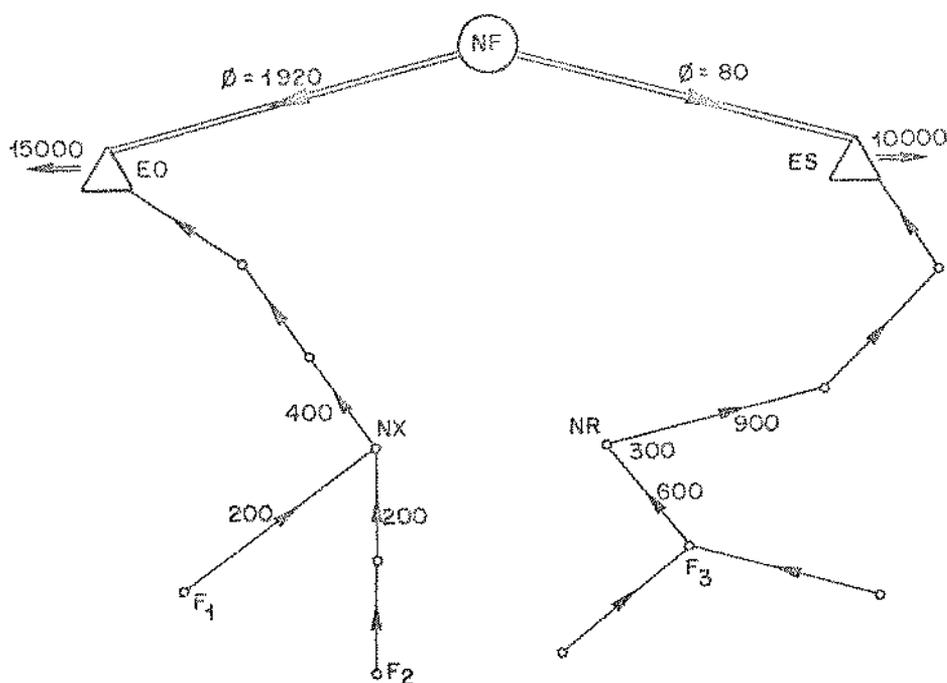


Figura 3.3

3.2.2. CASO 2 : SATURAÇÃO DE DUAS ESTAÇÕES

Este é um caso particular do caso anterior e, apesar de raro,

deve ser previsto. Ele ocorre frente a uma repartição típica do caso anterior, em que uma estação (*ES*) saturou e os assinantes restantes de um ponto de controle foram encaminhados para uma estação adjacente não saturada (*EO*). Pode ocorrer, porém, que *EO* esteja muito próxima da saturação, por sua capacidade ociosa ser muito pequena. Uma situação exemplo está retratada na figura 3.4.

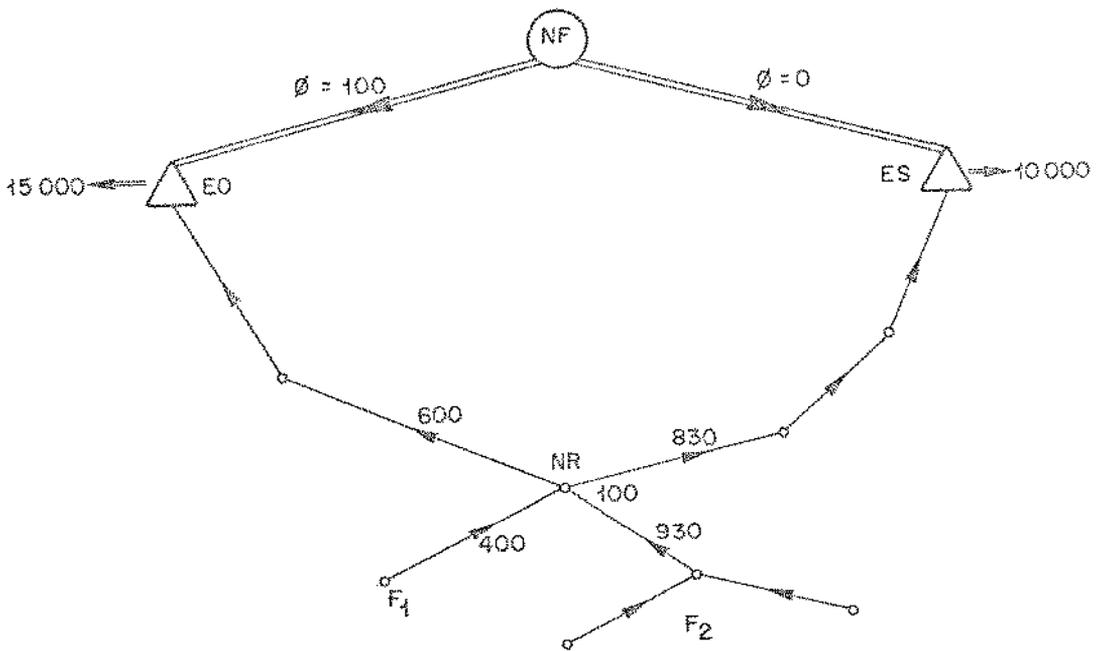


Figura 3.4

Ao se tentar realizar a divisão do ponto de controle repartido (*NR*) de modo otimizado, seriam tomadas as decisões de repartição segundo a figura 3.5.

Porém, ao se tentar passar um fluxo de $\Delta = 330$ no ciclo acima, a estação *EO* saturaria com 230 assinantes em excesso. Tendo em conta que a repartição acima procura minimizar Δ , conclui-se que a repartição de *NR* é inviável sem saturar *EO*.

Como ilustração, imagine-se uma repartição na qual fosse forçado um mínimo aumento na capacidade de *ES*. A melhor solução é mostrada na figura 3.6. Observe-se que nesta situação, *ES* ficaria com 100 assinantes em excesso.

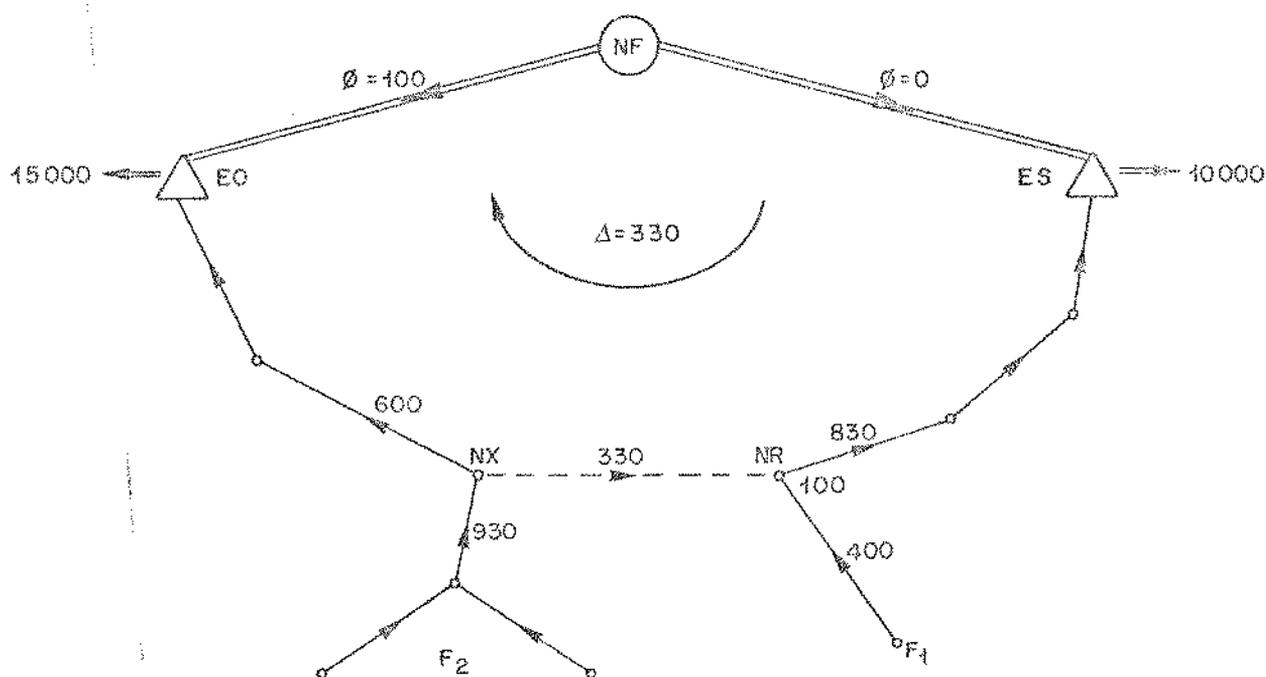


Figura 3.5

Concluindo, mostrou-se que, neste caso, a repartição de *NR* só é possível saturando uma das duas estações. Quando detetada esta situação, o planejador deve interferir com alguma decisão, que, dentre outras, pode ser um aumento da capacidade de *ES* e/ou *EO*, ou reprimir a demanda de *NR* e suas famílias. Para o exemplo dado, verificou-se que o aumento de capacidade em *ES* capaz de dessaturá-la é menor que em *EO* (100 comparado com 230).

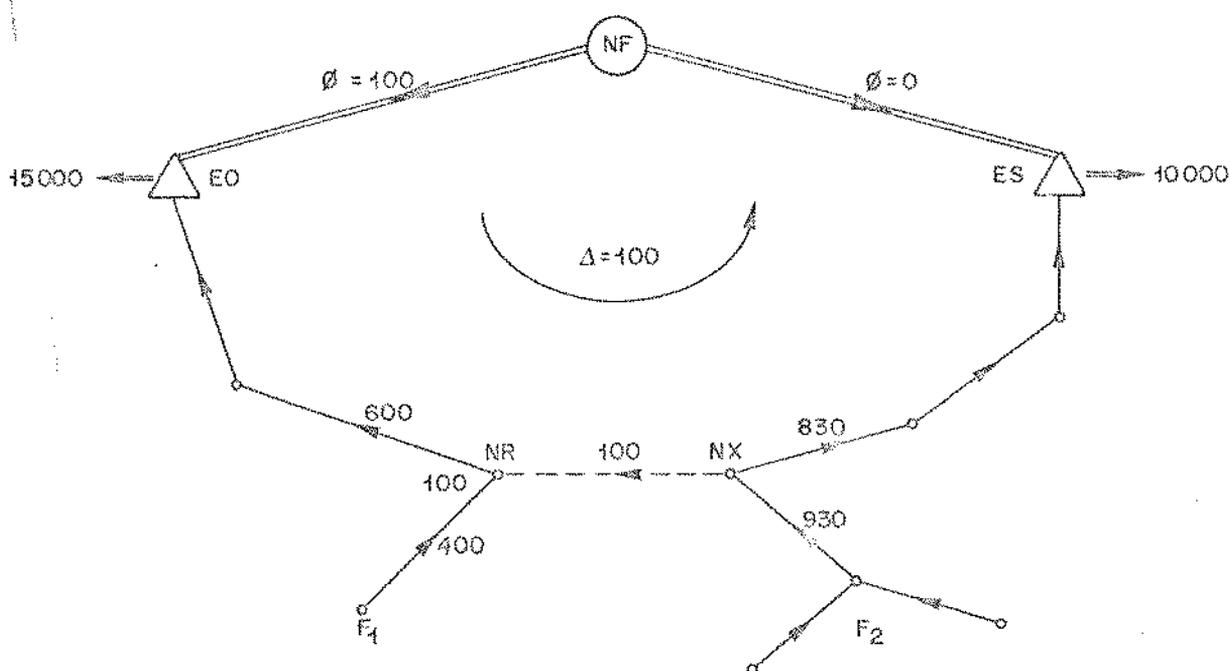


Figura 3.6

3.2.3. CASO 3 : ESTAÇÃO DECRESCENTE

Este é o caso em que uma estação tende a diminuir o número de assinantes, mas a restrição imposta na FERA não o permite. Assim, o fluxo no arco de fechamento atinge a saturação, isto é, sua capacidade máxima. Diz-se que a estação *ED* satura por baixo e não por cima (como *ES* nos casos anteriores). Aqui, para efetuar a repartição otimizada, as regras se alteram. Seja o exemplo seguinte.

Na figura 3.7 o fluxo no arco de fechamento (*NE*, *ED*) atingiu a sua capacidade ($\phi = 2.000$), por *ED* tender a diminuir o número de seus assinantes. A melhor repartição é feita combinando os assinantes de F_1 , F_2 , F_3 e *NR* de modo que o fluxo de *NR* para *ED* mais se aproxime por cima de 980. (Ou seja, busca-se respeitar a restrição de capacidade no arco de fechamento da estação decrescente).

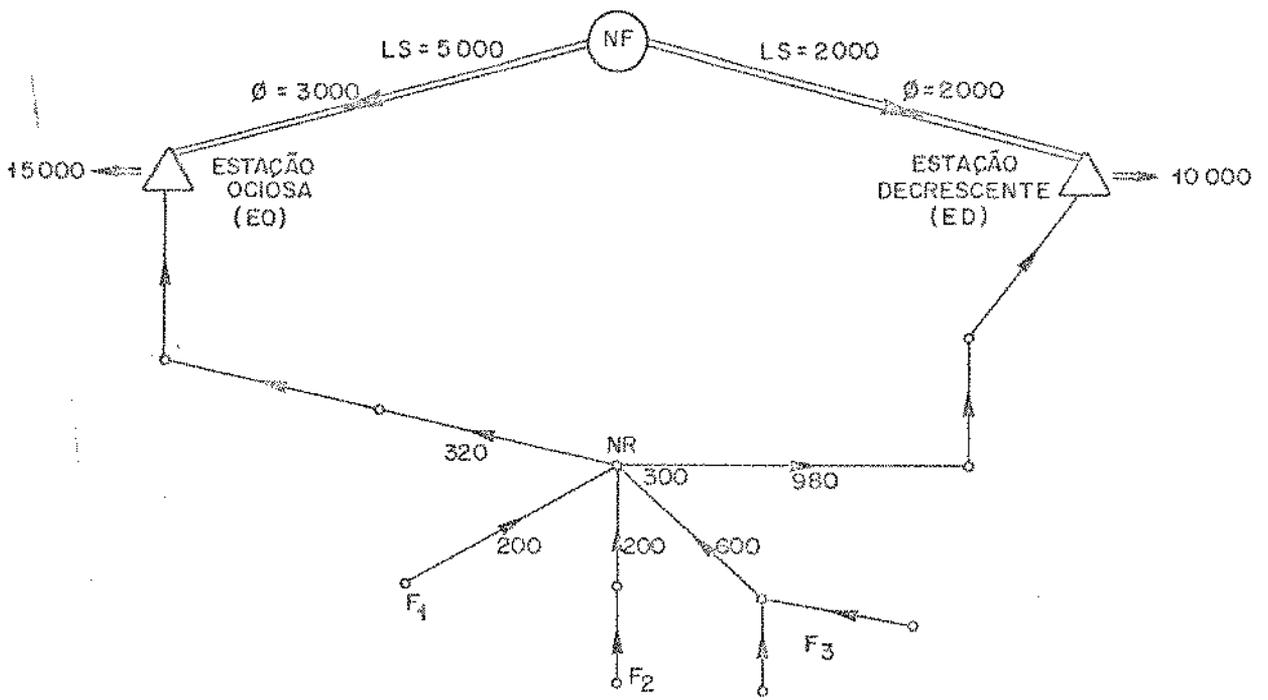


Figura 3.7

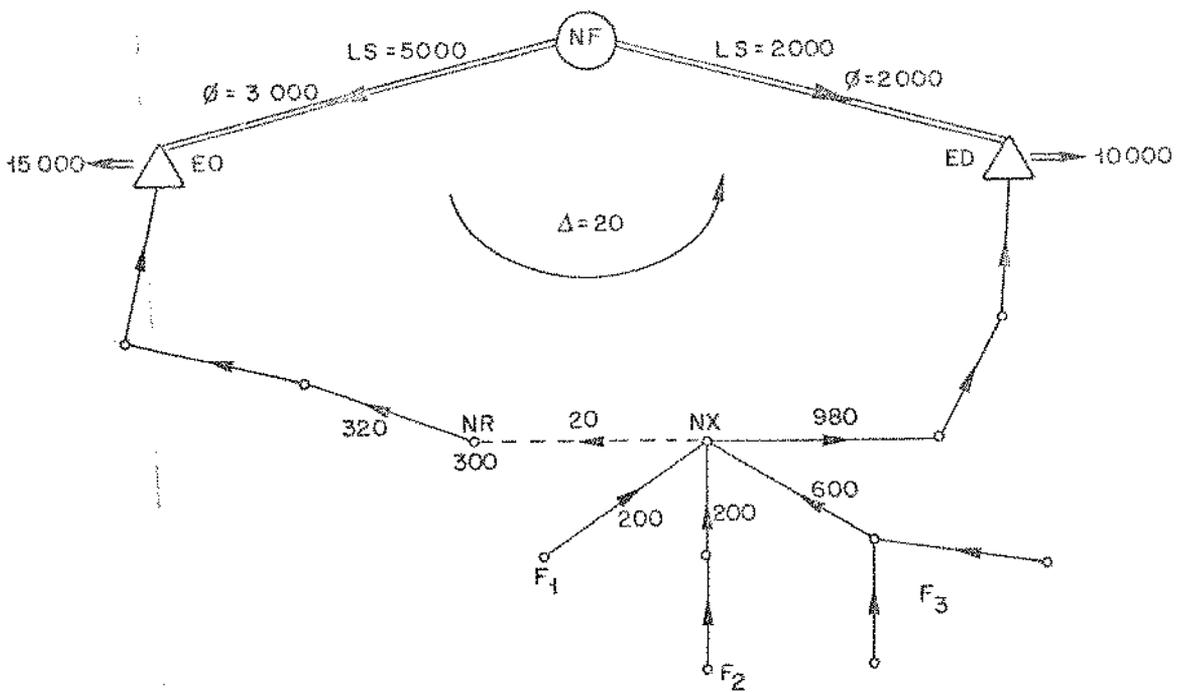


Figura 3.8

Na figura 3.8, nota-se que para a melhor repartição, atribui-se o nó artificial à estação decrescente e nele dependura-se as famílias F_1 , F_2 e F_3 , totalizando 1.000 assinantes, que é o número superiormente mais próximo a 980. Daí, ter que fluir 20 assinantes pelo arco (NX, NR) de modo a acertar o balanço de assinantes.

A fim de reconstruir a árvore (note que o arco de fechamento (NF, ED) é não básico) circula-se um fluxo $\Delta = 20$ assinantes no sentido anti-horário; o arco (NR, NX) deixa a base e o ciclo se rompe. Com isto ED ganhou 20 assinantes de EO .

A rede após a repartição pode ser vista na figura 3.9.

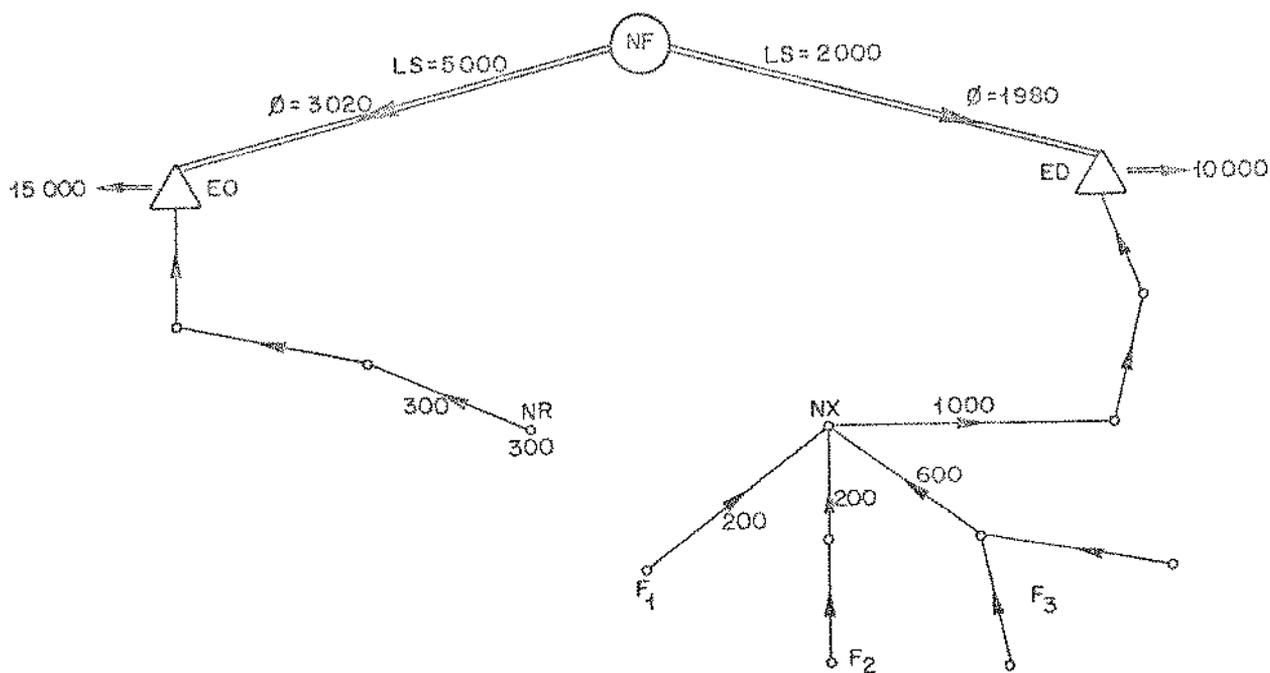


Figura 3.9

3.2.4. CASO 4 : ESTAÇÃO DECRESCENTE E SATURAÇÃO DE ESTAÇÃO

A figura 3.10 mostra um exemplo típico do caso anterior, onde *ED* tende a perder assinantes do estágio anterior devido à presença de *EO*, que lhe absorve assinantes a fim de diminuir o custo da rede. O ponto de controle *NR* se divide porque o arco de fechamento (*NF*, *ED*) satura ($\phi = 1.000$).

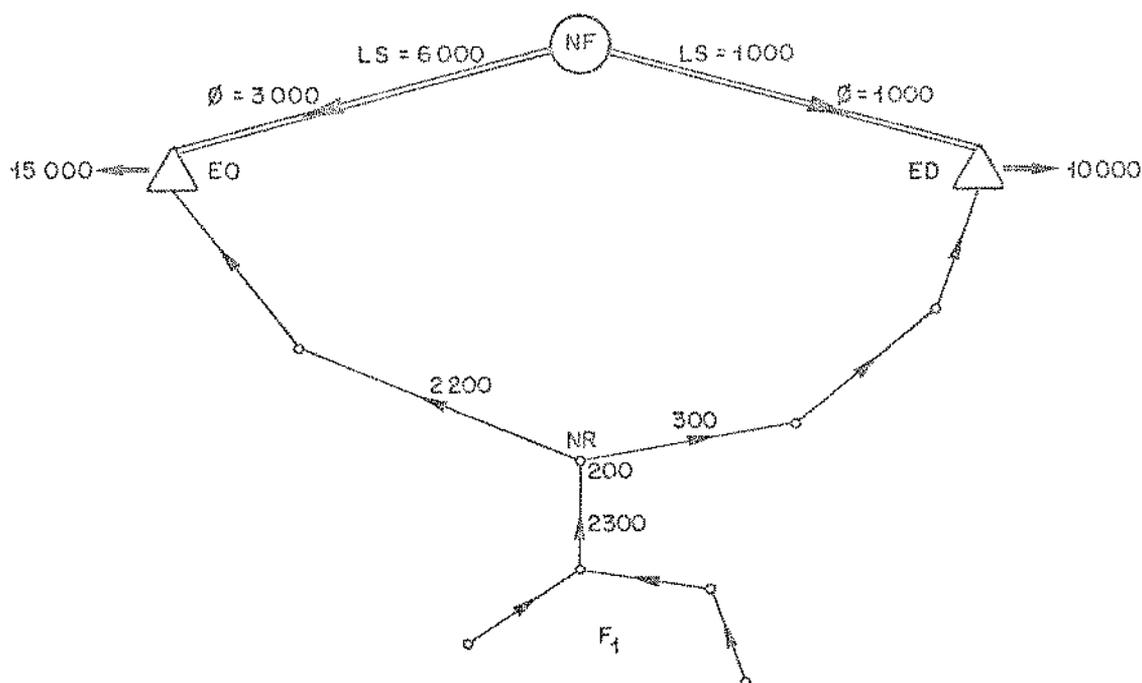


Figura 3.10

Aplicando as regras de separação otimizada dos assinantes de *NR* já descritas no sub-item anterior, tem-se a situação da figura 3.11 como sendo a melhor possível.

Ocorre, porém, que a capacidade ociosa de *ED* é de 1.000 assinantes, ao passo que o fluxo Δ calculado é de 2.000 no sentido anti-horário, o que leva a ultrapassar a capacidade de *ED* em 1.000 assi-

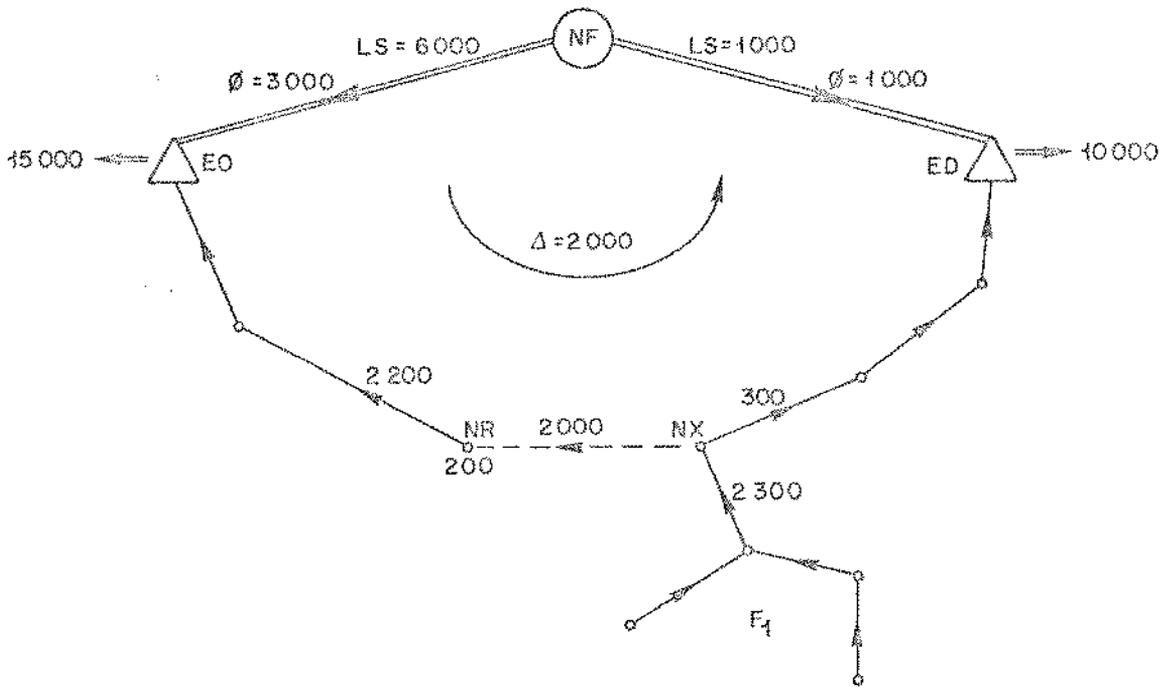


Figura 3.11

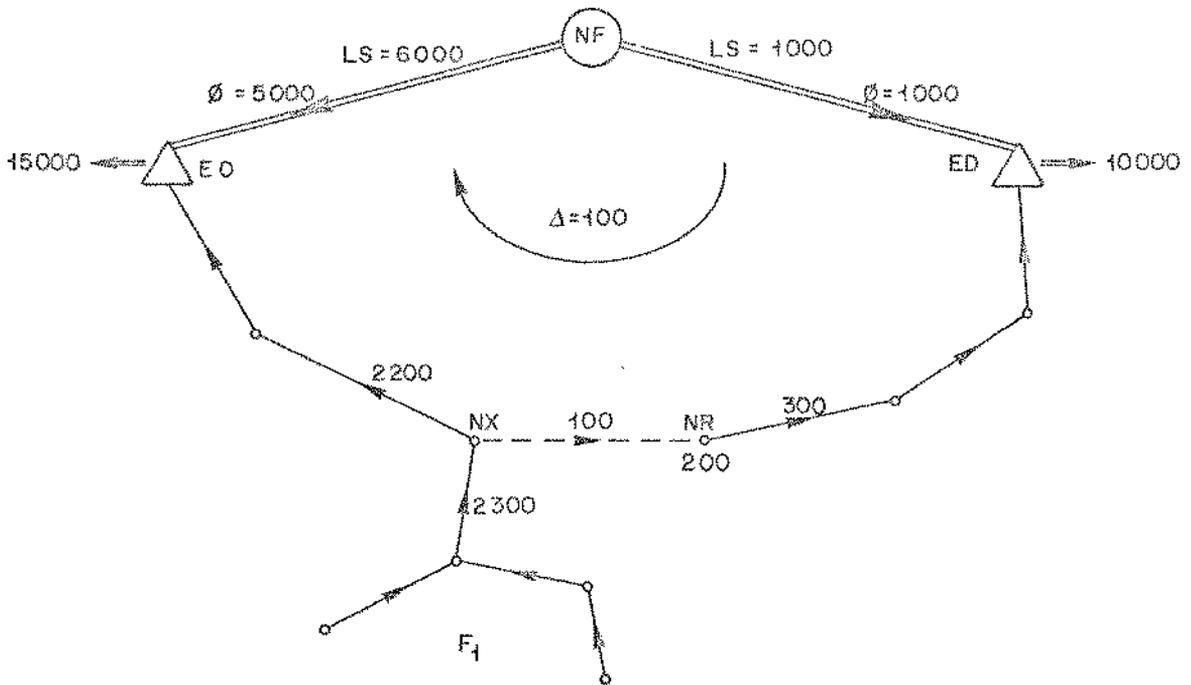


Figura 3.12

nantes. (Com isto o arco de fechamento teria um fluxo negativo de 1.000 assinantes). O tratamento mais conveniente (e adotado) para este caso consiste em permitir que seja violada a restrição de limite de capacidade de no arco de fechamento de ED , com esta estação perdendo um mínimo de assinantes para EO . Assim, no exemplo, procura-se encaminhar para ED o número de assinantes inferiormente mais próximo de 300. Para isso, NX deve ser atribuído à EO e F_1 pendurada em NX . Tal é apresentado na figura 3.12, com o resultado final da repartição exposto na figura 3.13.

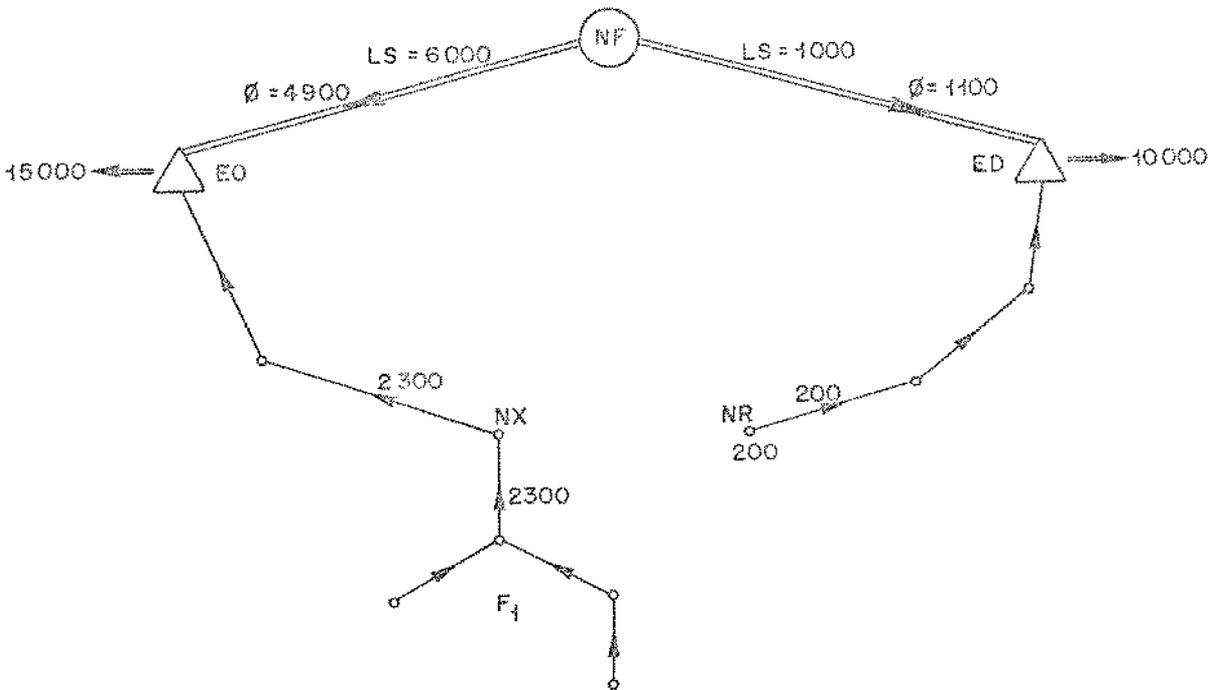


Figura 3.13

3.2.5. CASO 5 : PONTO DE CONTROLE TRI-REPARTIDO

Essa é uma situação incomum, mas possível de ocorrer. Trata-se de um ponto de controle sendo atendido por duas estações saturadas e uma terceira, ociosa. A figura 3.14 apresenta um exemplo ilustrativo deste caso.

Detetada a tri-repartição do ponto de controle, o tratamento utilizado consiste, inicialmente, em determinar dentre os dois arcos emergentes de NR em direção às estações saturadas aquele com menor fluxo, e tirá-lo da base, substituindo-o pelo arco de fechamento da estação correspondente. No exemplo, o arco que sai de NR em direção a ES_2 possui menor fluxo que o similar em direção a ES_1 , e, portanto, deve ceder lugar ao arco de fechamento de ES_2 na base. Isto equivale a fazer circular no sentido horário um fluxo de 150 assinantes no ciclo formado pelo arcos entre ES_2 e EO , conforme indicado na figura 3.15.

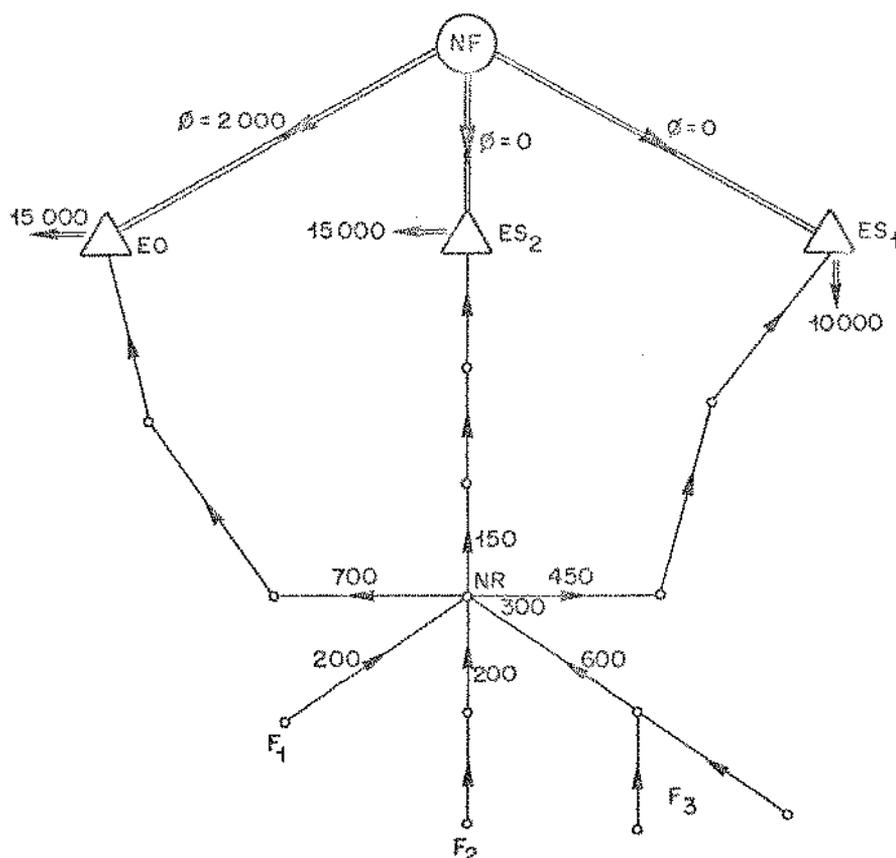


Figura 3.14

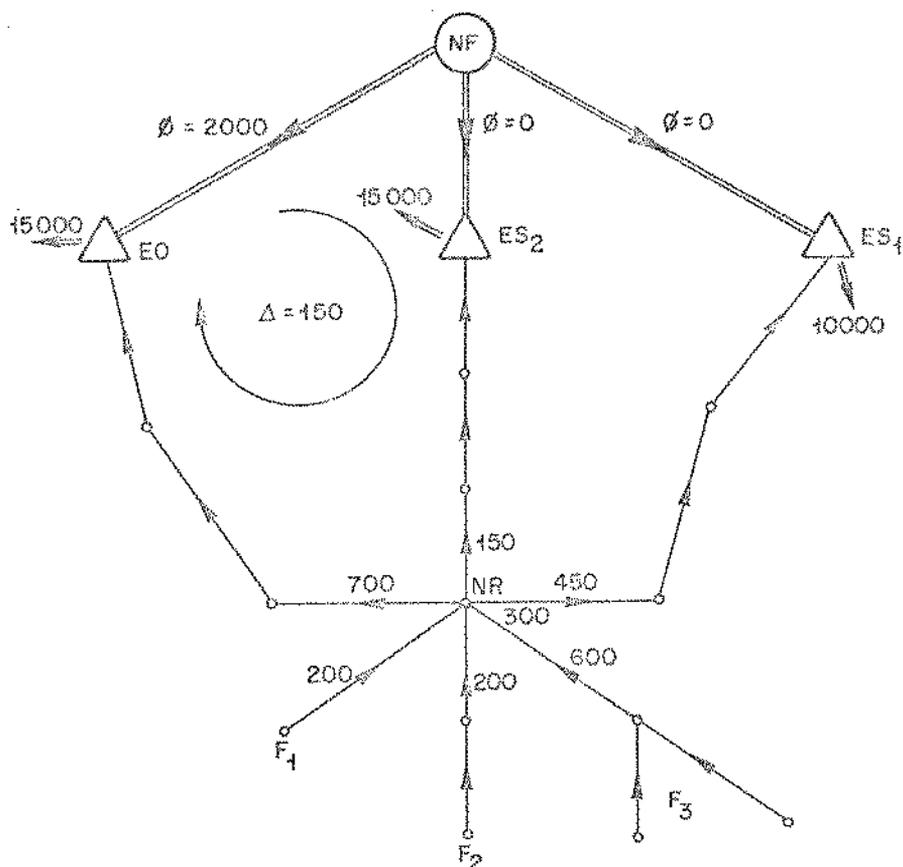


Figura 3.15

O resultado, segundo ilustra a figura 3.16, é a desaturação de ES_2 , com o que tem-se um caso simples de repartição com estação saturada (ES_1), cujo tratamento foi abordado em 3.2.1.

É correto pensar que, em termos econômicos, a estação a dessaturar deveria ser a mais distante de NR . Entretanto, pelo fato do aumento de custo não ser significativo e pela pouca frequência deste caso, optou-se pelo critério de menor fluxo emergente de NR , pois este oferece menor risco de a estação ociosa vir a saturar com a tentativa de execução da repartição.

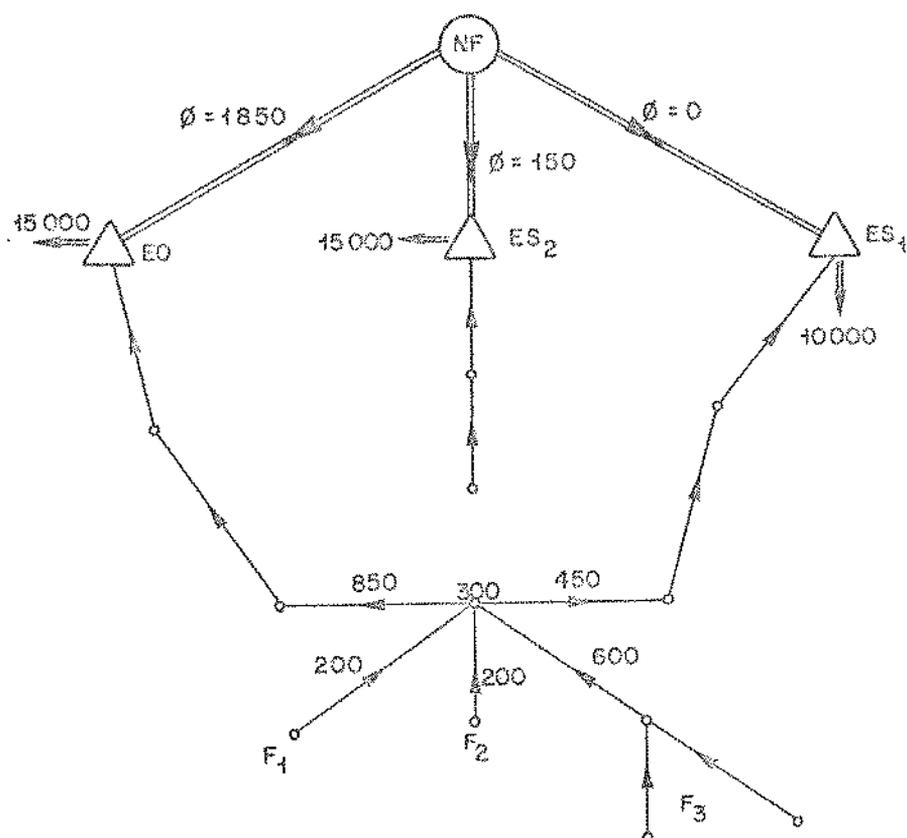


Figura 3.16

3.2.6. CASO 6 : REPARTIÇÃO DA PRÓPRIA ESTACÃO OCIOSA

Esta situação pode ocorrer quando uma estação decrescente, para completar o mínimo de assinantes que lhe é imposto (através da restrição de capacidade no seu arco de fechamento), precisa atender a assinantes que utilizam uma estação ociosa como nó de passagem.

Um exemplo ilustrativo é apresentado na figura 3.17, onde *ED* é uma estação com capacidade de 30.000 assinantes forçada a atender pelo menos 20.000, já que a capacidade de seu arco de fechamento é de 10.000. Para atingir os 20.000 assinantes, *ED* carece de 2.000 assinantes, que usam *EO* como nó de passagem.

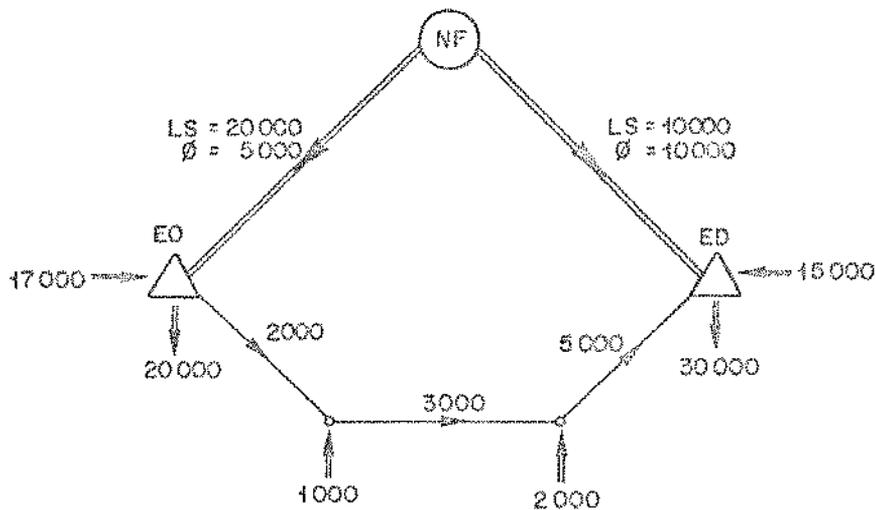


Figura 3.17

Este caso exige a intervenção do planejador, a fim de definir bem as zonas de filiação para a FARA, tomando a decisão de permitir que *ED* reduza um pouco o seu número de assinantes (no exemplo, 2.000 seria suficiente) ou mesmo introduzindo alguns arcos, que canalizassem os 2.000 assinantes necessários a *ED*, sem passar por *EO*.

Pode-se afirmar que repartições desta natureza se devem a uma evolução desorganizada da rede e/ou um planejamento falho da mesma em subperíodos anteriores, especialmente quanto à localização dos centros de fios.

3.2.7. CASO 7 : REPARTIÇÃO DA PRÓPRIA ESTAÇÃO SATURADA

A saturação de uma estação que faça parte do caminho mais econômico (ou mesmo único), através do qual assinantes não atendidos por ela fluam para outra estação, leva a este caso.

A figura 3.18 oferece um exemplo, onde *ES* tem capacidade para

20.000 assinantes, e recebe 22.000. Os 2.000 excedentes fazem de *ES* um nó de passagem, e encaminham-se para a estação ociosa, *EO*.

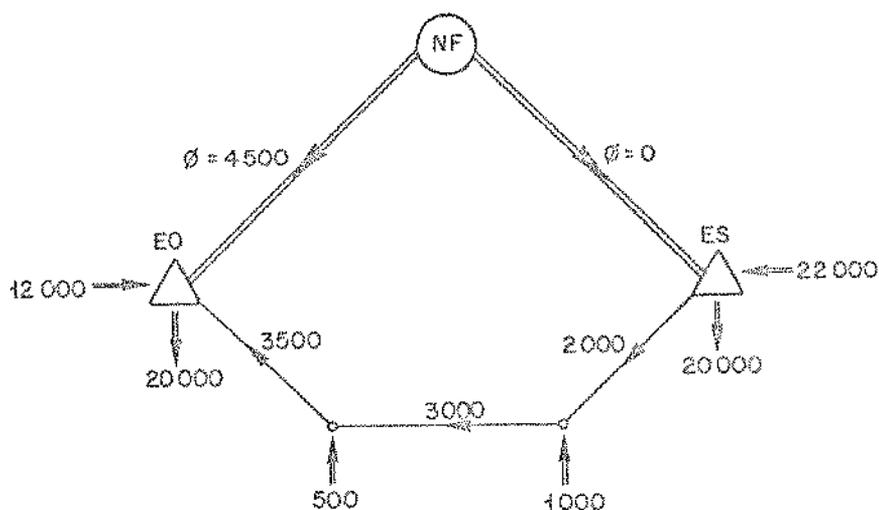


Figura 3.18

Repete-se aqui a necessidade de intervenção do planejador para que a FARA possa trabalhar com as zonas de influência de cada estação bem definidas. As opções mais prováveis são o aumento da capacidade de *ES* (em pelo menos 2.000 assinantes, no exemplo) ou a criação de arcos alternativos que permitam o escoamento para *EO*, sem passagem pelo nó em que está localizada *ES*, do excesso de assinantes desta estação.

Também a presença deste caso pode ser atribuída a falhas no planejamento da rede nos estágios anteriores.

3.2.8. CASO 8 : DUPLA REPARTIÇÃO ENTRE A ESTACÃO SATURADA E A ESTACÃO OCIOSA

Este caso esdrúxulo acontece pela repartição de dois pontos

de controle com uma estação em comum, e pode ser melhor entendido com o auxílio do exemplo da figura 3.19, onde, primeiramente, NR_1 dividiu seus assinantes entre ES e E' , até então ociosa; posteriormente, E' veio a saturar com parte dos assinantes de NR_2 , cujo excedente encaminhou-se para EO . Portanto, trata-se de duas repartições : uma entre E' (saturada) e EO e outra entre ES e E' (ociosa).

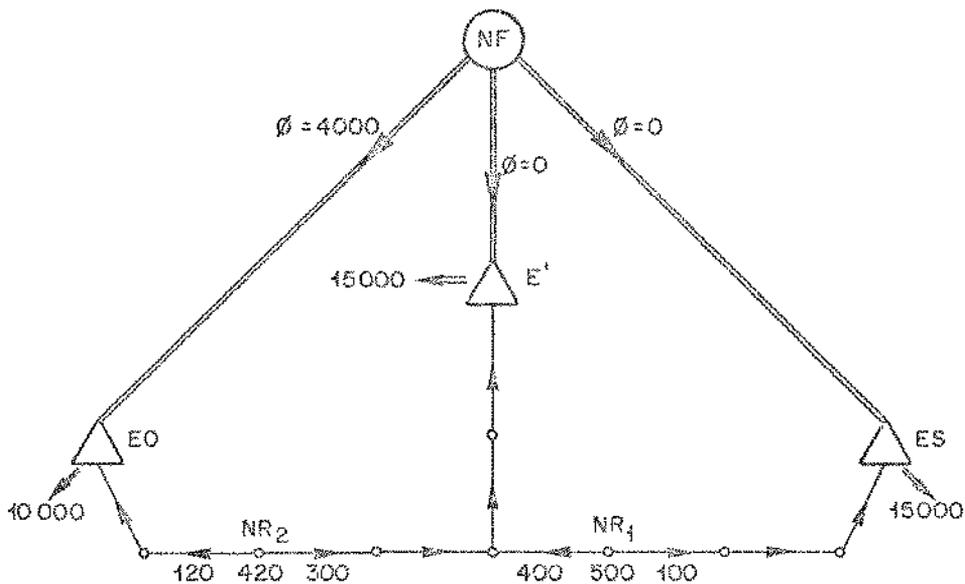


Figura 3.19

O tratamento para este caso consiste em realizar primeiro a repartição entre E' e EO , segundo o procedimento exposto em 3.2.1, cujo resultado é visto na figura 3.20. Assim, a estação E' dessatura-se e passa a ter uma capacidade ociosa de 300 assinantes. Com isto, pode ser feita a repartição de NR_2 entre ES e E' , também segundo a orientação de 3.2.1. O resultado final é exposto na figura 3.21.

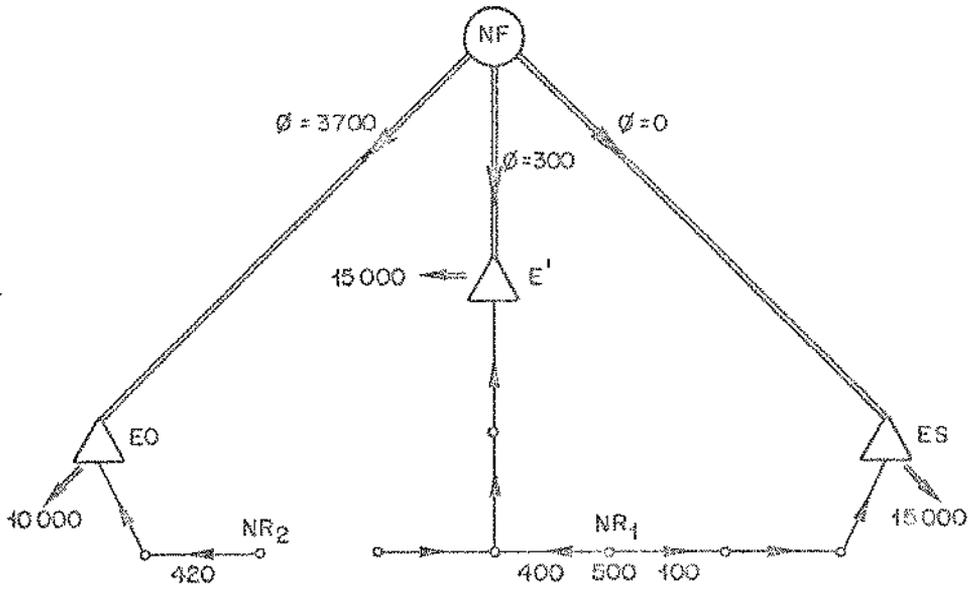


Figura 3.20

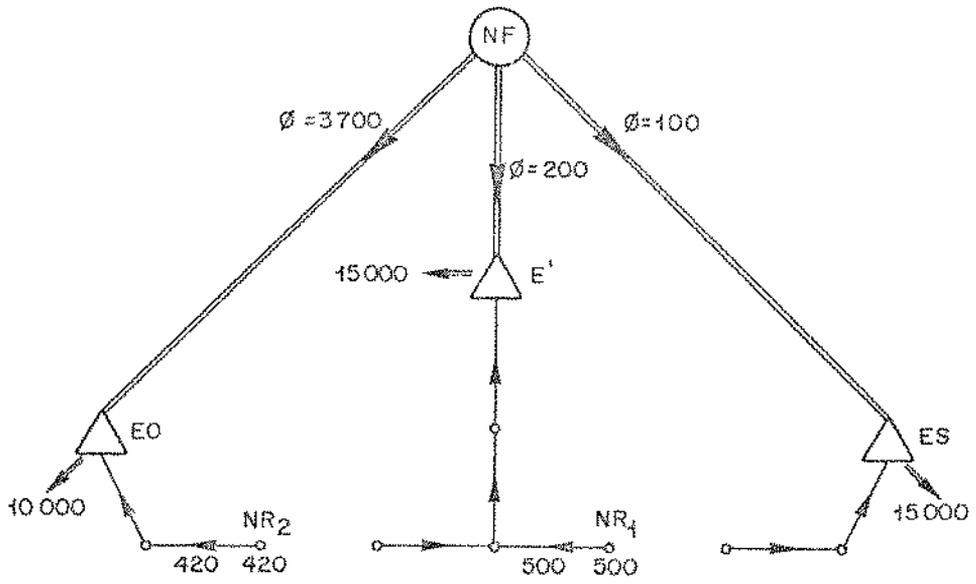


Figura 3.21

CAPÍTULO 4 : IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação computacional do procedimento aqui apresentado deu origem ao Programa de Evolução Otimizada da Rede (PEOR), desenvolvido em FORTRAN IV em duas versões, que variam pela concepção da FARA. Estas versões bem como alguns resultados são abordados a seguir.

4.1. ESTRUTURAÇÃO DO PEORI

Na 1ª versão do Programa de Evolução Otimizada da Rede (PEORI), após a execução da FERA para o estágio em estudo, segue a resolução de tantos PFCM quantas forem as estações presentes no estágio, compondo a FARA.

De uma maneira sumária, o PEORI estrutura-se de acordo com o diagrama da figura 4.1, onde:

I = estágio

$JMAX$ = número de estágios do período de planejamento

J = estação

$JMAX(I)$ = número de estações do estágio I

$FERA(I)$ = FERA do estágio I

$FARA(I)$ = FARA do estágio I

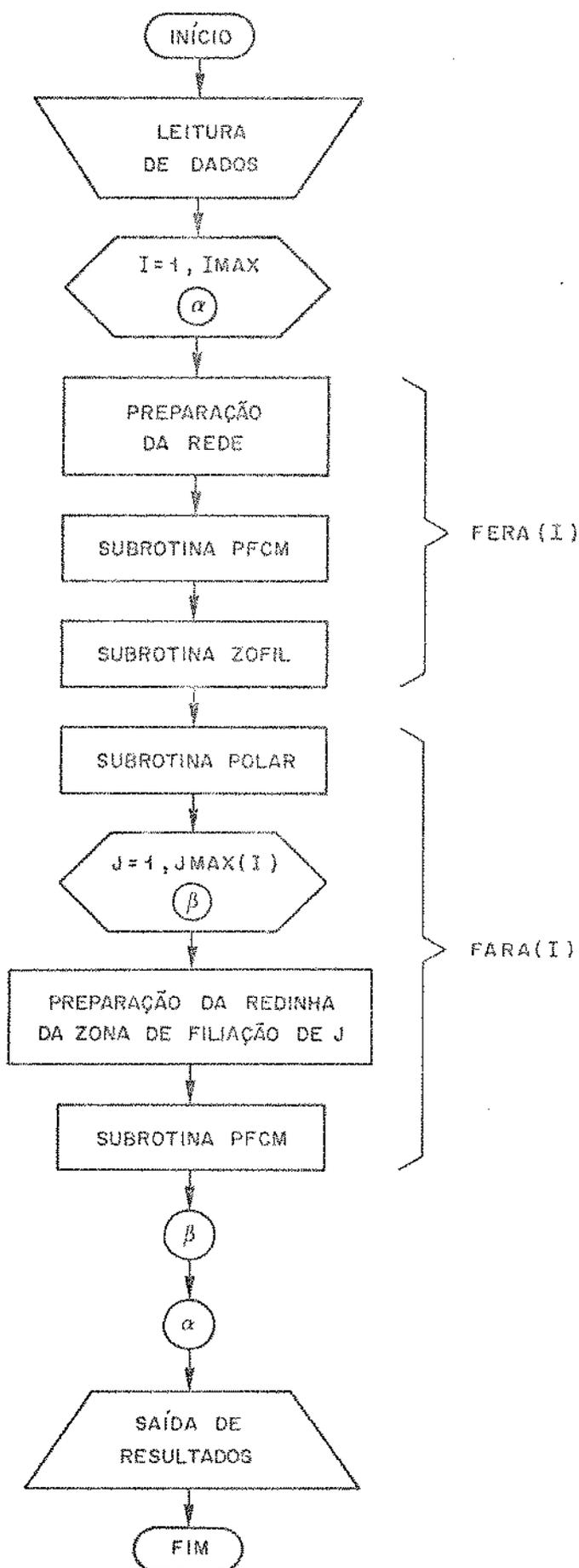


Figura 4.1 - Diagrama do PEORI

4.1.1. DESCRIÇÃO DAS SUBROTINAS

Subrotina PFCM

É a principal ferramenta do PEOR; resolve um problema de fluxo de custo mínimo, ou seja, dada uma rede com demandas nos nós a serem satisfeitas num estágio qualquer e várias estações com capacidade de comutação, o algoritmo satisfaz as demandas através da alocação dos assinantes às estações, respeitando as capacidades destas e dos cabos, e procurando minimizar o gasto com cabos na rede. Trata-se de uma especialização para grafos do método simplex revisado da programação linear, dotado de sofisticacões computacionais que permitem trabalhar com eficiência em redes de grande porte [8]. Contém internamente outras dez subrotinas e é usada na Fase de Evolução à Rede Alvo e na Fase de Adaptação à Rede Atual.

Subrotina ZOFIL

É a subrotina chamada em cada FERA, com a finalidade de detectar os possíveis pontos de controle repartidos e efetuar sua realocação otimizada. Compõe-se de outras duas subrotinas e foi desenvolvida em duas versões: conversacional e automatizada, tratadas em 4.3.

Subrotina POLAR

Para execução da FARA com um PFCM para cada estação, é conveniente computacionalmente que a lista de arcos esteja ordenada sequencialmente por nó origem e que se saiba quantos arcos saem de cada nó da rede. A subrotina POLAR executa estas operações e deve ser chamada após ZOFIL, pois esta introduz novos nós (nós artificiais) na rede, afetando a ordenação de seus arcos. Tal ação é implementada através da criação de dois apontadores auxiliares: APO, que referencia o arco ordenado ao antigo arco; e APONT que indica quantos arcos saem de cada nó origem.

Com a rede da figura 4.2 e as tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, apresenta-se um exemplo da utilização dos apontadores APO e APONT.

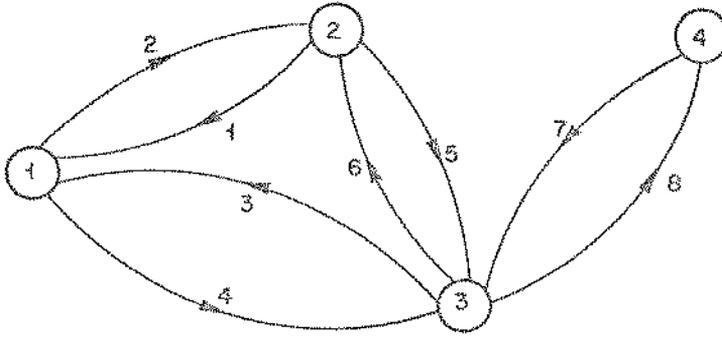


Figura 4.2 - Rede exemplo para subrotina POLAR

ARCO	NO	ND
1	2	1
2	1	2
3	3	1
4	1	3
5	2	3
6	3	2
7	4	3
8	3	4

NO = nó origem
ND = nó destino

Tabela 4.1 - Lista de arcos

ARCO	NO	ND	APO
1	1	2	2
2	1	3	4
3	2	1	1
4	2	3	5
5	3	1	3
6	3	2	6
7	3	4	8
8	4	3	7

Tabela 4.2 - Lista de arcos depois de POLAR

NÓ	1	2	3	4
APONT	2	2	3	1

Tabela 4.3 - Apontador APONT

4.1.2. PREPARAÇÃO DA REDE PARA A FERA E A FARA

A preparação da rede na FERA consiste na duplicação de seus arcos, fazendo-os orientados; e na criação dos arcos de fechamento e do nó de fechamento, artifício usado para fazer o balanceamento entre as capacidades das estações e as demandas dos pontos de controle.

Por seu lado, a preparação das redinhas da FARA compreende o isolamento e a renumeração sequencial dos nós e arcos de cada zona de filiação separadamente; a criação dos apontadores APARC, APNO e ONPA, com a finalidade de referenciar arcos e nós renumerados das redinhas com os arcos e nós da rede ordenada pela subrotina POLAR; e a quadruplicação dos arcos da rede original (ou duplicação dos arcos da FERA), de forma a modelar como um grafo o aproveitamento da rede externa disponível (conforme apresentado em 2.3.1).

Uma ilustração do uso dos apontadores é feita na figura 4.3, onde inicialmente a rede original é ordenada pela subrotina POLAR, que cria o apontador APO para guardar a topologia da mesma; referenciando o nó da redinha ao nó da rede ordenada, está APNO, que é um apontador de nó, sendo ONPA o seu contrário; APARC é um apontador de arco e referencia o arco da redinha ao arco da rede ordenada. Como exemplo, após a execução da FARA para uma zona de filiação, o FLUXO de assinantes no arco 12 da redinha deve ser referenciado para efeitos de relatório como FLUXO (APO(APARC(12))).

4.2. ESTRUTURACÃO DO PEOR2

A 2ª versão do Programa de Evolução Otimizada da Rede (PEOR2)

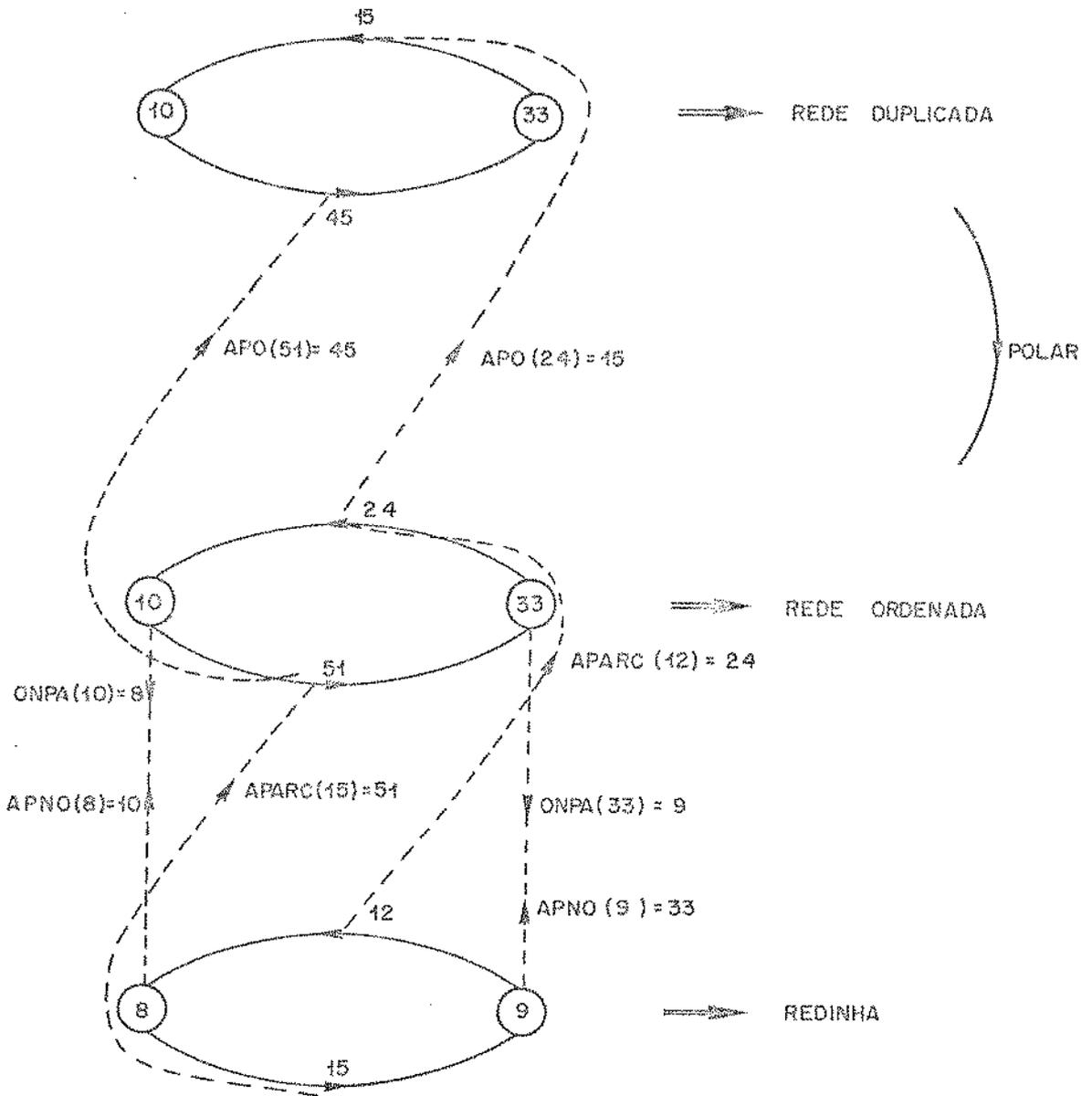


Figura 4.3 - Apontadores da FARA

conta com uma FARA na qual é criado um cordão de isolamento entre as várias zonas de filiação, através do artifício de colocar os arcos de fronteira com custo infinito, e a resolução do PFCM associado à rede resultante.

O diagrama da figura 4.4 mostra, de forma simplificada, a estrutura do PEOR2, sendo:

I = estágio

$IMAX$ = número de estágios do período de planejamento

$FERA(I)$ = FERA do estágio I

$FARA(I)$ = FARA do estágio I

4.2.1. DESCRIÇÃO DAS SUBROTINAS

O PEOR2 conta com as subrotinas PFCM e ZOBIL, já descritas em 4.1.1.

4.2.2. PREPARAÇÃO DA REDE PARA A FERA E A FARA

A preparação da rede na FERA não sofre qualquer alteração em relação ao PEOR1, ou seja, corresponde à duplicação da mesma e à criação do nó e dos arcos de fechamento.

Na FARA, a preparação da rede compreende a quadruplicação dos arcos da rede original (ou duplicação dos arcos da rede de trabalho da FERA); a definição do resultado do PFCM da FERA como solução inicial do PFCM da FARA; e a colocação dos arcos de fronteira a custo infinito. O aproveitamento da solução ótima do PFCM da FERA para inicialização do PFCM da FARA tem o efeito de reduzir o tempo de processamento consumido nesta fase. Tal aproveitamento é feito tomando-se um a um todos os ar-

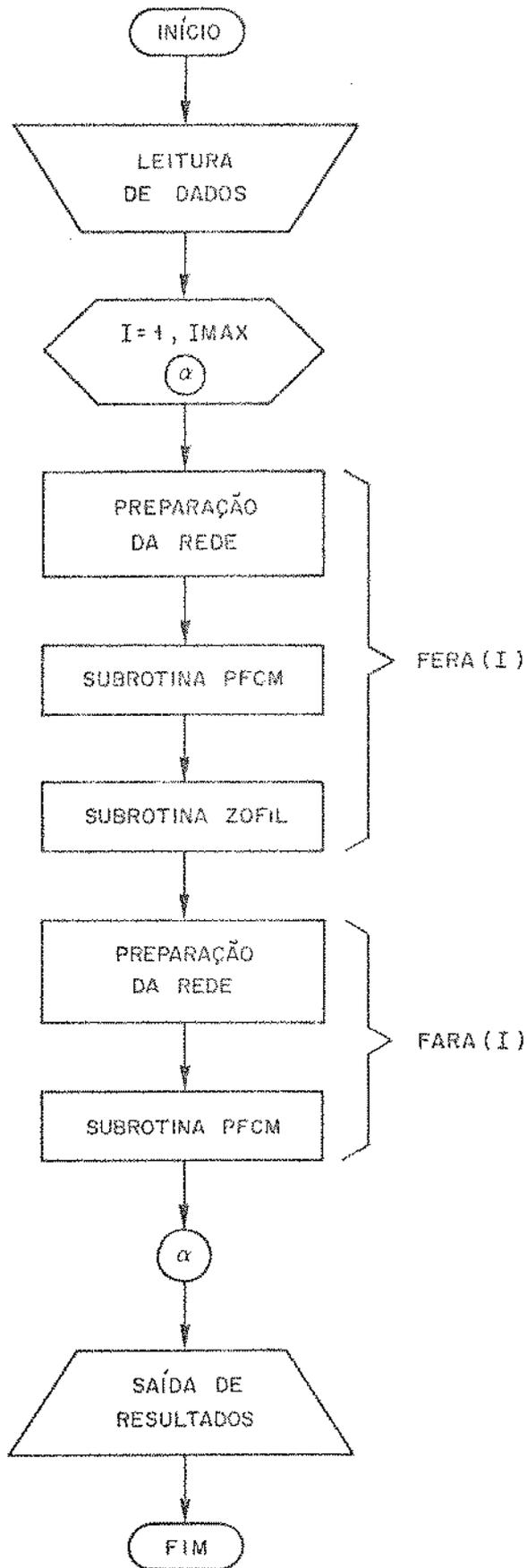


Figura 4.4 - Diagrama do PEOR2

cos da FERA (toda a rede duplicada, portanto) e verificando a existência de fluxo no mesmo. Em caso afirmativo, atribui-se este fluxo aos arcos de trabalho da FARA que têm mesmo nó origem e no destino que o arco tomado na FERA, ocupando, primeiramente, o arco de custo zero até a sua capacidade e, em seguida, o arco de custo real com o excedente; em caso negativo, nada há a fazer. Seja o exemplo seguinte: o arco (i, j) da figura 4.5 tem ao fim da FERA um fluxo de 1.200 assinantes; na FARA, o arco (i, j) interior tem custo nulo e capacidade para 420 assinantes, e o arco (i, j) exterior tem custo c e capacidade ilimitada (figura 4.6); deste modo a ocupação se fará com 420 assinantes no arco interior e 780 assinantes no arco exterior (figura 4.7).

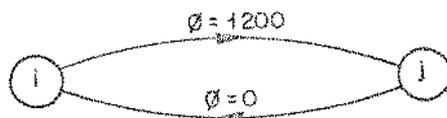


Figura 4.5 - Resultado da FERA

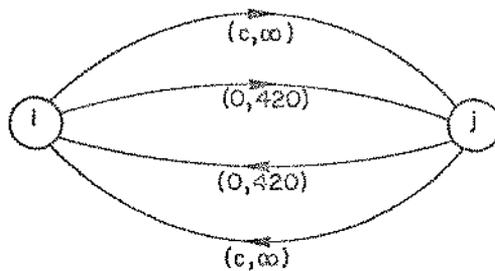


Figura 4.6 - Configuração para a FARA

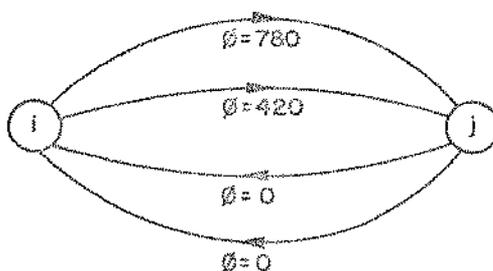


Figura 4.7 - Inicialização para a FARA

4.3. A SUBROTINA DE REPARTIÇÃO DE PONTOS DE CONTROLE

Conforme já se comentou, a subrotina ZOFIL é a responsável pela decisão quanto à filiação dos pontos de controle repartidos. Sua estrutura é mostrada no diagrama simplificado da figura 4.8,

onde :

I = estágio do período de planejamento

J = estação

$JMAX(I)$ = número de estações do estágio I

É interessante fazer alguns comentários relacionados com o diagrama:

- observa-se que a detecção de pontos de controle repartidos é feita verificando-se a presença de estações saturadas e/ou decrescentes;

- na identificação do tipo de repartição, quando o programa deteta algum dos casos em que é necessária a intervenção do planejador, é enviada uma mensagem contendo informações sobre a situação e a execução é

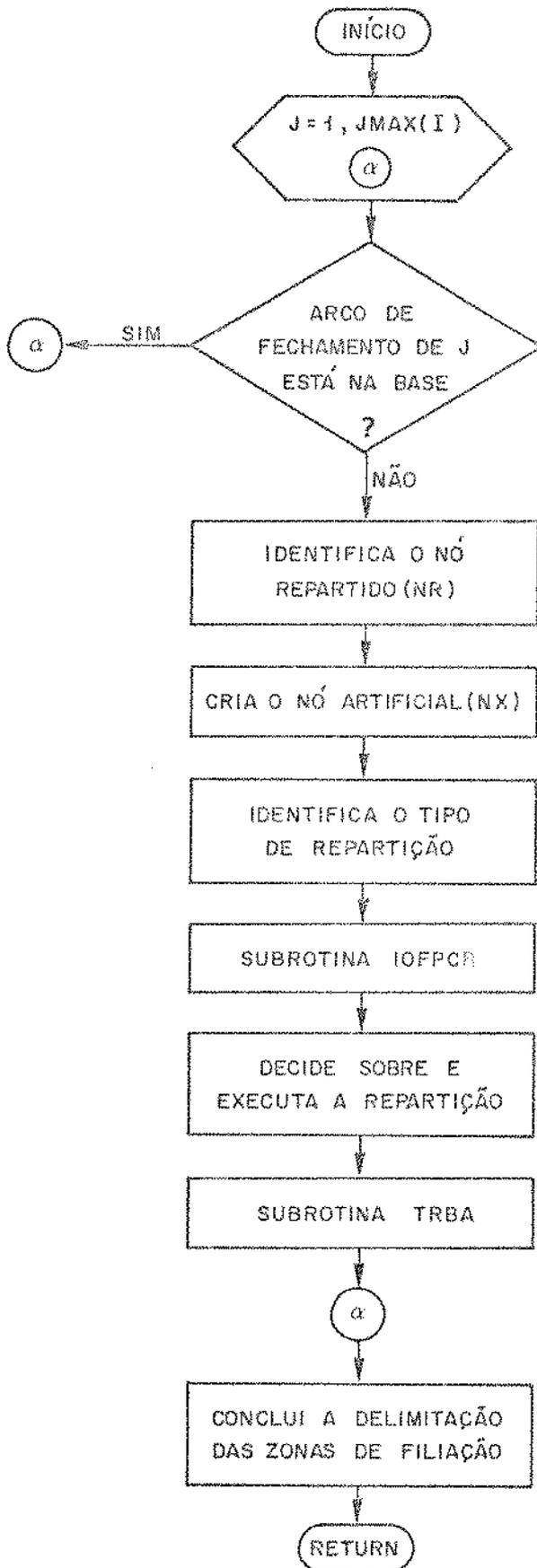


Figura 4.8 - Diagrama simplificado da subrotina ZOFIL

interrompida para que o usuário faça uma análise e tome alguma decisão externa ao programa;

- a subrotina IOFPCR tem, basicamente, a função de reconhecer, ordenar e marcar as famílias dependuradas no ponto de controle repartido;

- por sua vez, a subrotina TRBA é responsável pela introdução do nó artificial na rede e por uma iteração de troca de base.

4.3.1. DECISÃO E EXECUÇÃO DA REPARTIÇÃO

Esta parte do programa foi desenvolvida na forma conversacional e em "batch".

Na versão conversacional, o programa oferece ao usuário todas as informações referentes à repartição, e este, tendo em vista o exposto em 3.2, decide e fornece os dados necessários à execução da mesma.

Na versão em "batch", é usado um algoritmo de enumeração completa das alternativas de repartição, ao fim do qual se tem a repartição viável mais econômica. Considerando que acima de 95% dos casos de repartições ocorridas em testes com redes reais têm não mais que duas famílias dependuradas no ponto de controle repartido, e que o número de alternativas de repartição é dado pela equação (4.1), onde, no expoente, nf é o número de famílias e o 1 adicionado corresponde ao próprio ponto de controle repartido, verifica-se que na imensa maioria dos casos o universo de repartições possíveis é menor ou igual a 8. Isto aliado à simplicidade do processo de definição da melhor alternativa tornam a enumeração completa satisfatória em termos de tempo de processamento.

$$n^o \text{ alt.} = 2^{nf+1} \quad (4.1)$$

À exceção daqueles casos de repartição que exigem a intervenção do planejador, todos os demais recaem nos casos 1 (*estação saturada*) ou 3 (*estação decrescente*), cujo tratamento consiste em determinar o sentido e o menor valor do fluxo Δ capaz de dessaturar a estação saturada ou o arco de fechamento da estação decrescente. Com base neste raciocínio, a etapa da subrotina ZOFIL que cuida da decisão e execução da repartição pode ser resumida, em sua versão em "batch", pelo diagrama da figura 4.9.

A subrotina ENUME é a geradora de alternativas de repartição e trata-se de um algoritmo de enumeração inteira zero-um que faz a atribuição do ponto de controle repartido e suas famílias segundo a seguinte convenção: se *um*, atribuído à estação saturada ou decrescente; se *zero*, atribuído à estação ociosa. Um exemplo do funcionamento de ENUME é dado a seguir, com o auxílio das figuras 4.10 e 4.11, que mostram um caso de repartição com estação saturada e o resultado da repartição otimizada, respectivamente. Para este caso existem $2^3 = 8$ possibilidades de repartição, geradas pela subrotina ENUME, conforme apresenta a tabela 4.4. A melhor opção é a de número 4, que atribui F_1 à estação ociosa e NR e F_2 à estação saturada. É fácil concluir que são ineficazes as alternativas cujos fluxos correspondentes estão no sentido anti-horário.

Nº DA ALT.	ATRIBUIÇÃO			Δ
	NR	F_1	F_2	
1	1	1	1	500 a
2	1	1	0	350 a
3	1	0	0	250 h
4	1	0	1	100 h
5	0	0	1	300 h
6	0	0	0	450 h
7	0	1	0	150 a
8	0	1	1	300 a

a - sentido anti-horário

h - sentido horário

Tabela 4.4 - Alternativas de repartição geradas por ENUME

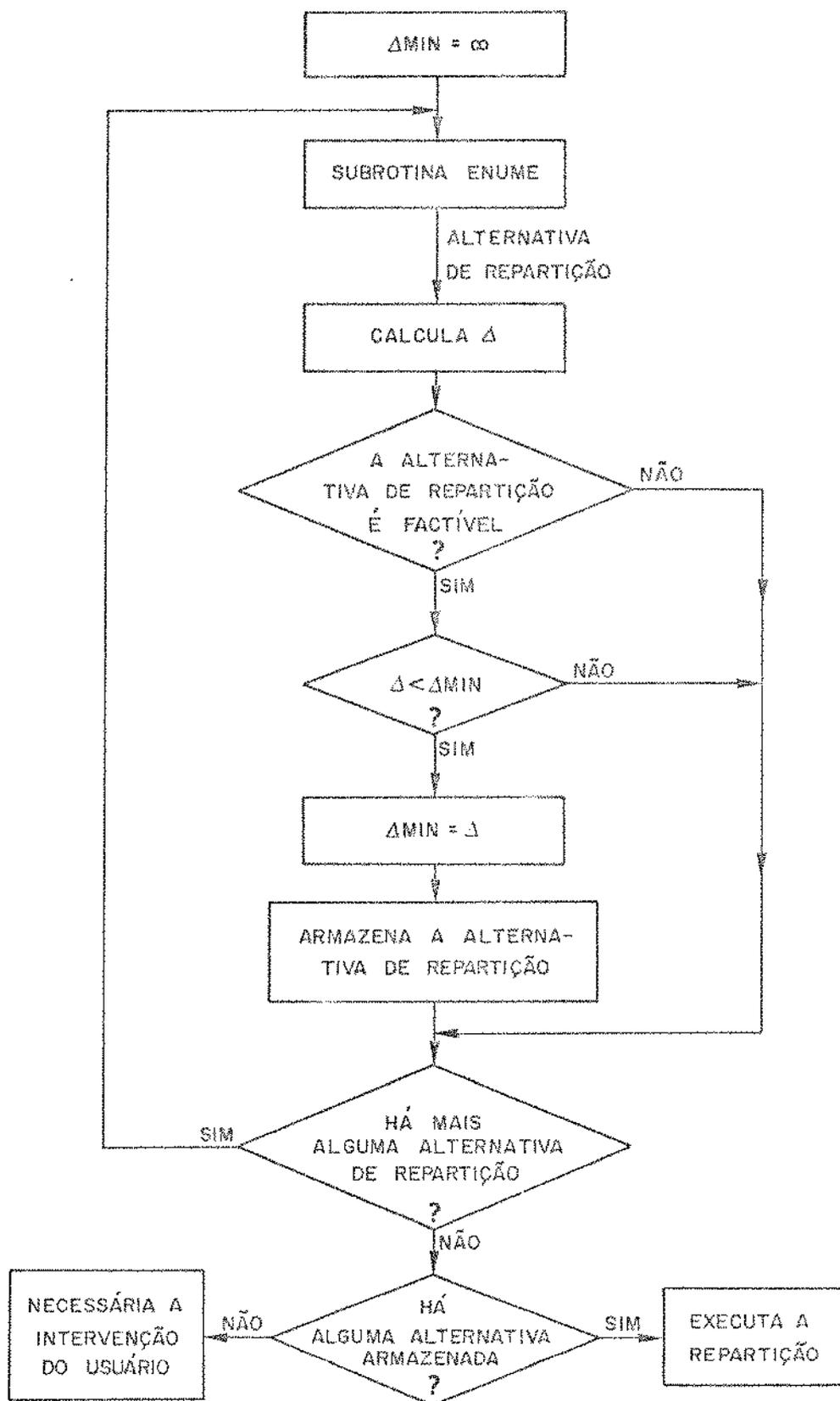


Figura 4.9 - Diagrama da etapa de decisão e execução da repartição em "batch"

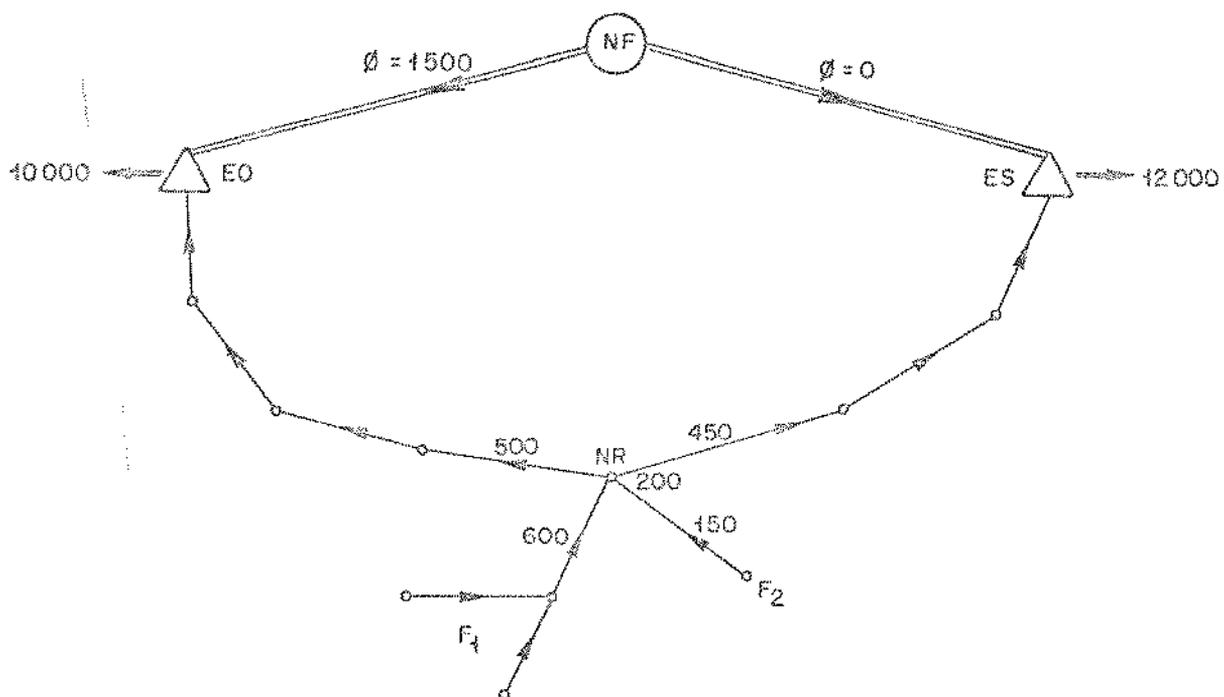


Figura 4.10 - Rede exemplo para a subrotina ENUME

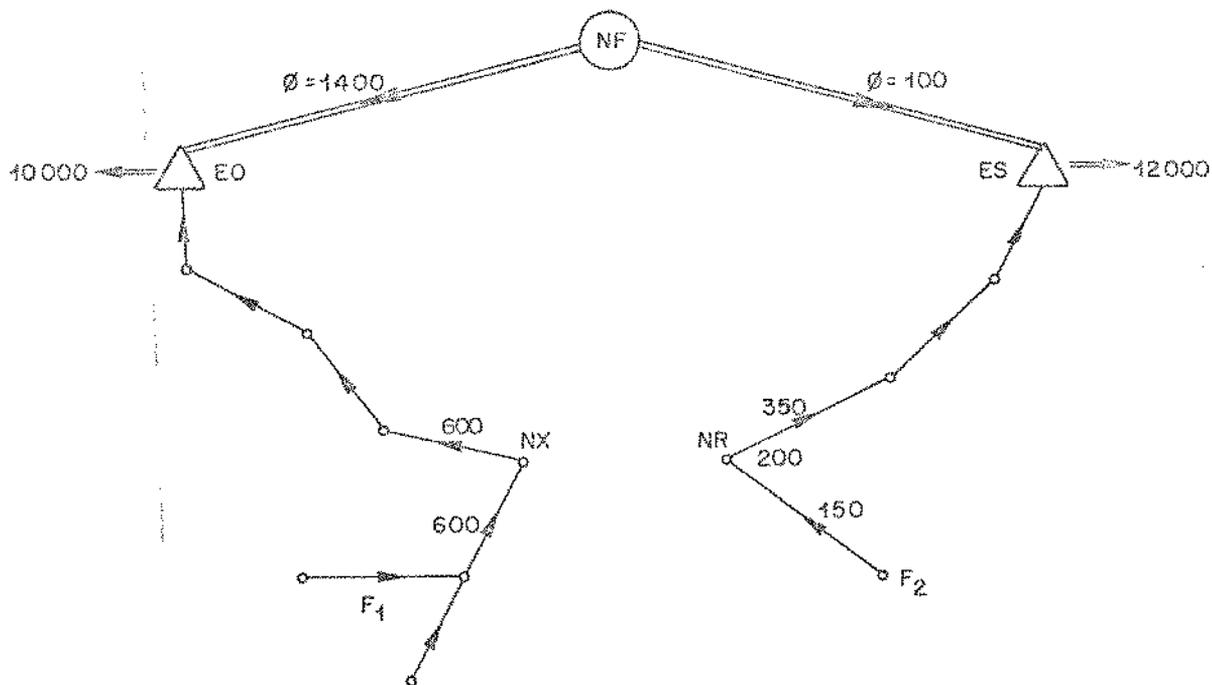


Figura 4.11 - Resultado da repartição

4.4. INFORMAÇÕES DE SAÍDA

O programa PEOR oferece em seus relatórios, para cada um dos estágios do período de planejamento, as seguintes informações:

- zona de filiação de cada estação;
- fluxo de assinantes em cada arco da rede;
- custo da evolução da rede;
- quantidade de pares novos lançados em cada zona de filiação;
- porcentagem de aproveitamento da rede externa para cada zona de filiação e para a rede;
- raio médio dos assinantes em cada zona de filiação;
- porcentagem de refiliação dos assinantes para cada zona de filiação e para a rede; e
- relatório dos pontos de controle repartidos.

4.5. EXPERIÊNCIAS E RESULTADOS

O programa PEOR já foi aplicado às redes de diversas cidades brasileiras, tendo sido experimentado exaustivamente em uma delas, Curitiba. Uma amostra das experiências realizadas e os respectivos resultados estão na tabela 4.5, onde o tempo de CPU refere-se à utilização do programa no computador PDP-10 da Digital e o índice de aproveitamento de rede é indicado para cada estágio (a partir do segundo), bem como em seu valor médio.

Observando-se os tempos de processamento consumidos pelas duas versões do programa, verifica-se que para redes de pequeno porte a 2ª

REDE	Nº DE NÓS	Nº DE ARCOS	Nº DE ESTÁGIOS	Nº DE ESTAÇÕES NOS ESTÁGIOS	TEMPO DE CPU (seg.)		APROV. DE REDE (%) NOS ESTÁGIOS
					PEOR1	PEOR2	
João Monlevade MG	61	69	8	1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2	4,27	3,14	64, 66, 68, 83, 87, 89, 93
Novo Hamburgo RS	82	90	3	1, 1, 2	2,26	1,22	65, 63
Belém - PA	344	377	5	5, 7, 9, 11, 12	33,83	32,92	67, 70, 76, 83
Curitiba - PR	586	744	4	9, 10, 16, 16	122,05	162,26	86, 73, 76

Tabela 4.5 - Amostra das experiências com redes reais

versão (onde resolve-se apenas um PFCM na FARA) mostrou-se mais atraente, enquanto na rede de porte médio a vantagem ficou para a 1ª versão (em cuja FARA resolve-se um PFCM para cada zona de filiação). Antes de qualquer análise comparativa é preciso lembrar que as variações nos tempos devem-se apenas às diferenças na implementação da Fase de Adaptação à Rede Atual, já que a Fase de Evolução à Rede Alvo é concebida de forma igual em ambas as versões, e acrescentar que uma averiguação sobre a distribuição do tempo de CPU entre as duas fases resultou na constatação de que a FERA é responsável pela maior parcela - por exemplo, na aplicação a Curitiba a soma dos tempos da FERA para o 2º, 3º e 4º estágios perfaz em torno de 90 segundos.

Uma inspeção na subrotina PFCM leva à conclusão de que o tempo gasto na resolução do problema de fluxo de custo mínimo é aproximadamente proporcional ao quadrado do número de nós da rede. Assim, tomando como referência a rede de Curitiba, supondo que os nós estão distribuídos em igual número entre as zonas de filiação e considerando como 14 (média entre 10, 16 e 16 - número de estações para o 2º, 3º e 4º estágios, respectivamente) o número de zonas de filiação, tem-se que a relação entre os tempos dispendidos pela FARA do PEOR2 e a FARA do PEOR1 seria próximo de $r_1 = (586)^2 / 14 \times (586/14)^2 = 14$. Entretanto, ao se calcular esta relação à partir das informações da tabela 5.4, obtém-se $r_2 = (162 - 90) / (122 - 90) = 2,25$. Aproximações à parte, o distanciamento entre os dois valores ocorre porque, de

um lado, o uso da subrotina POLAR seguido da preparação das redinhas na FARA do PEOR1 é muito trabalhosa e custosa computacionalmente, e de outro, a inicialização da FARA do PEOR2 com a solução ótima da FERA elimina a necessidade da FASE I do PFCM, o que diminui o esforço computacional e, conseguinte, o tempo de CPU.

Visando contribuir para esta análise, foi experimentada na própria rede de Curitiba uma outra versão para a FARA, em que apenas um PFCM correspondente a toda a rede fosse resolvido, porém, sem a inicialização com a solução ótima da FERA, ou seja, usando a FASE I da subrotina PFCM para gerar uma solução básica inicial. Obteve-se um tempo de 477,77 segundos, donde a relação entre os tempos desta outra versão de FARA e a do PEOR1 é $r_3 = (478 - 90) / (122 - 90) = 12,12$, que já é um valor bastante próximo de r_1 , podendo-se pressupor que a diferença fique por conta do tempo investido no ordenamento e rearrumação da rede que acontece na FARA do PEOR1.

De qualquer forma, as duas versões implementadas para o programa PEOR se justificam: a primeira por demandar menor tempo de processamento em redes de médio e grande porte e a segunda por sua maior robustez, o que a faz potencialmente mais adequada para comportar uma pós-otimização sobre os resultados da FERA e da FARA - conforme discutido no capítulo 6 -, além, é claro, de seu melhor desempenho em redes de pequeno porte.

Considerando os resultados discutidos, conclui-se que, na tentativa de reduzir o tempo computacional dispendido pelo PEOR (nas duas versões), o esforço maior deve ser dedicado à FERA. Ainda assim, parece promissor utilizar na inicialização dos PFCM da FARA do PEOR1 um procedimento análogo àquele empregado na mesma fase do PEOR2.

Quanto ao aproveitamento de rede, pode-se verificar que este índice assume seu menor valor nas redes de João Monlevade (64%, 2º estágio), Novo Hamburgo (63%, 3º estágio) e Curitiba (73%, 3º estágio) quando da implantação de novas estações.

CAPÍTULO 5 : APLICAÇÃO A UMA REDE REAL5.1. DADOS DA REDE

A aplicação que é mostrada neste capítulo refere-se a um dos cenários estudados para a rede telefônica da cidade de Curitiba (Cenário Analógico), cujos dados encontram-se documentados em [9].

A rede é de porte médio e conta com 586 nós e 744 arcos. O período de planejamento considerado vai de 1985 a 2000, dividido em 3 subperíodos, com estágios em 1985, 1990, 1995 e 2000. No ano base existem 9 estações, e até o ano horizonte está prevista a instalação de outras 7. Na tabela 5.1 são identificados os nós em que se localizam as estações, suas capacidades (número de terminais) e o cronograma de implantação das mesmas.

Nº DO NÓ	CAPACIDADE	IMPLANTAÇÃO	Nº DO NÓ	CAPACIDADE	IMPLANTAÇÃO
001	70.000	*	501	45.000	*
116	40.000	*	049	30.000	1990
439	40.000	*	332	30.000	1995
348	40.000	*	398	30.000	1995
282	45.000	*	382	30.000	1995
207	60.000	*	264	30.000	1995
541	30.000	*	519	30.000	1995
385	30.000	*	583	30.000	1995

* existente

Tabela 5.1 - Localização, capacidade e cronograma de implantação das estações

Por sua vez, a tabela 5.2 apresenta o número total de assinantes da rede para cada estágio.

ESTÁGIO	1985	1990	1995	2000
DEMANDA	218.133	289.625	355.735	410.669

Tabela 5.2 - Demanda da rede

São informações também conhecidas : o custo do par-km de cabo (Cr\$ 15.000,00 - referente a dez/81); as demandas dos pontos de controle; o número de pares de fios existentes em cada arco da rede no ano base; e a topologia da rede, que é, juntamente com a indicação da localização das estações, mostrada na figura 5.1.

Vale observar que a estação 001 se destaca das demais por se situar na região mais central da cidade - e, portanto, bastante malhada - e por estar praticamente saturada já no ano base e, ainda, que foi imposta, para todas as estações, a restrição de impedimento ao decréscimo do número de assinantes atendidos.

5.2. RESULTADOS

O Anexo I apresenta quase que apenas a parcela da listagem de resultados que embasou os comentários que se seguem, dado ao elevado número de páginas que a compõem.

Uma síntese do efeito do crescimento da demanda da rede combinado com a implantação de novas estações sobre a delimitação das zonas de filiação pode ser visualizada nos indicadores da tabela 5.3, onde observa-se que as estações novas 049 e 332 foram ampliando a cada estágio a região geográfica sob sua influência, juntamente com a demanda atendida, enquanto a estação 001, antiga, apesar de manter praticamente constante o número de assinantes atendidos, sofreu uma redução na área geográfica sob sua influên

▲ Estações existentes

⊙ Estações novas

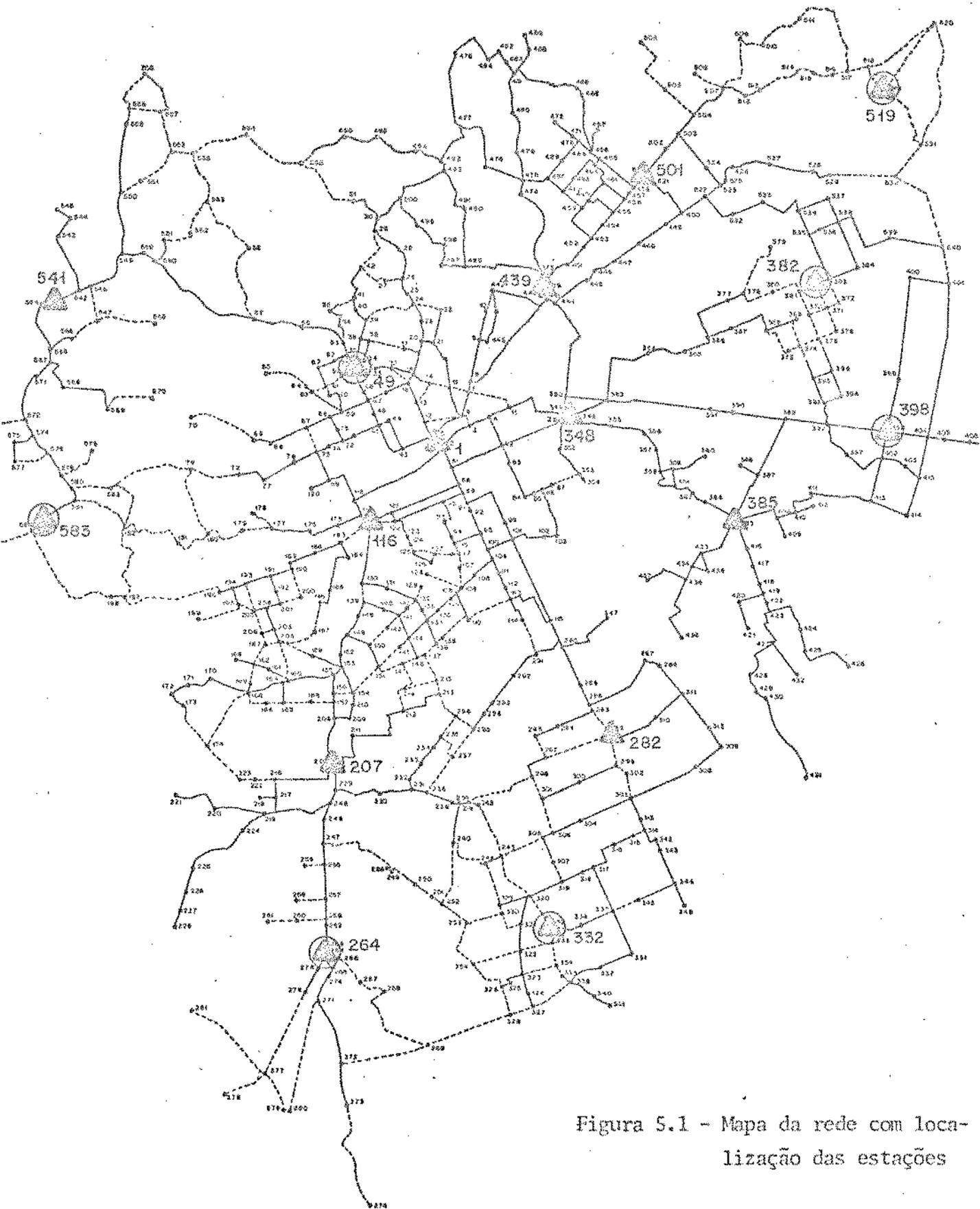


Figura 5.1 - Mapa da rede com localização das estações

	ESTÁGIO	ESTAÇÃO 001	ESTAÇÃO 049	ESTAÇÃO 332
NÚMERO	1990	71	41	—
DE	1995	53	41	27
NÓS	2000	49	50	33
NÚMERO	1990	69.879	11.072	—
DE	1995	69.438	16.788	11.851
ASSINANTES	2000	69.385	25.246	19.164

Tabela 5.3 - Indicadores das zonas de filiação das estações 1, 49 e 332

cia. Comparando as figuras 5.2, 5.3 e 5.4, que mostram a delimitação das zonas de filiação definidas pelo programa para o 2º, 3º e 4º estágio, respectivamente, percebe-se que tais mudanças na influência geográfica aconteceram de forma análoga para todas as estações segundo sua condição de novas ou antigas. Ainda sobre a tabela 5.3, há que se ressaltar que o pequeno decréscimo de assinantes sofrido pela estação 001 ao longo dos estágios se dá por força de repartições de pontos de controle envolvendo esta estação.

As informações estatísticas referentes à rede exemplo estão espalhadas ao longo do Anexo I. É interessante concentrá-las para análise, o que é feito na tabela 5.4. A média de aproveitamento é de 78%, sendo que o menor índice (73%) ocorre no 3º estágio, em face da implantação de seis novas estações, que leva a mudanças significativas na distribuição do fluxo de assinantes. O aproveitamento de rede para a estação 001 (76%, 70% e 67% para o 2º, 3º e 4º estágio, respectivamente), cujas características de localização foram anteriormente ressaltadas, deve ser considerado juntamente com a quantidade de pares-km novos introduzidos em sua zona de filiação (qual seja, 11%, 1% e 0% do total de cabos utilizados na redinha correspondente, para os estágios 2, 3 e 4, respectivamente, pois, deste modo, notar-se-á, especialmente para os dois últimos estágios, que o aproveitamento só não é maior por não haver necessidade.

Ainda na tabela 5.4, nota-se que a introdução de seis novas estações no 3º estágio reduz a distância média dos assinantes às estações (raio médio) em cerca de 370 metros e leva a uma refiliação de 15,6% dos assinantes existentes no 2º estágio.

INFORMAÇÕES	ESTÁGIO	1990	1995	2000
DISPONIBILIDADE = σ_3 (Pares-Km)		452.255	741.633	898.584
PARES REUTILIZADOS = σ_2 (Pares-Km)		355.602	504.975	658.870
PARES NOVOS = σ_1 (Pares-Km)		289.378	156.949	109.073
APROVEITAMENTO DE REDE = $(\sigma_2 + \sigma_1) / (\sigma_3 + \sigma_1)$		86%	73%	76%
AUMENTO DE REDE = σ_1 / σ_3		64%	21%	12%
RAIO MÉDIO (Km)		2,227	1,861	1,870
AUMENTO DE ASSINANTES		32%	22%	15%
ASSINANTES REFILIADOS		-	15,6%	3,9%

Tabela 5.4 - Informações estatísticas da rede

▲ Estações existentes

⊙ Estações implantadas durante o horizonte de planejamento

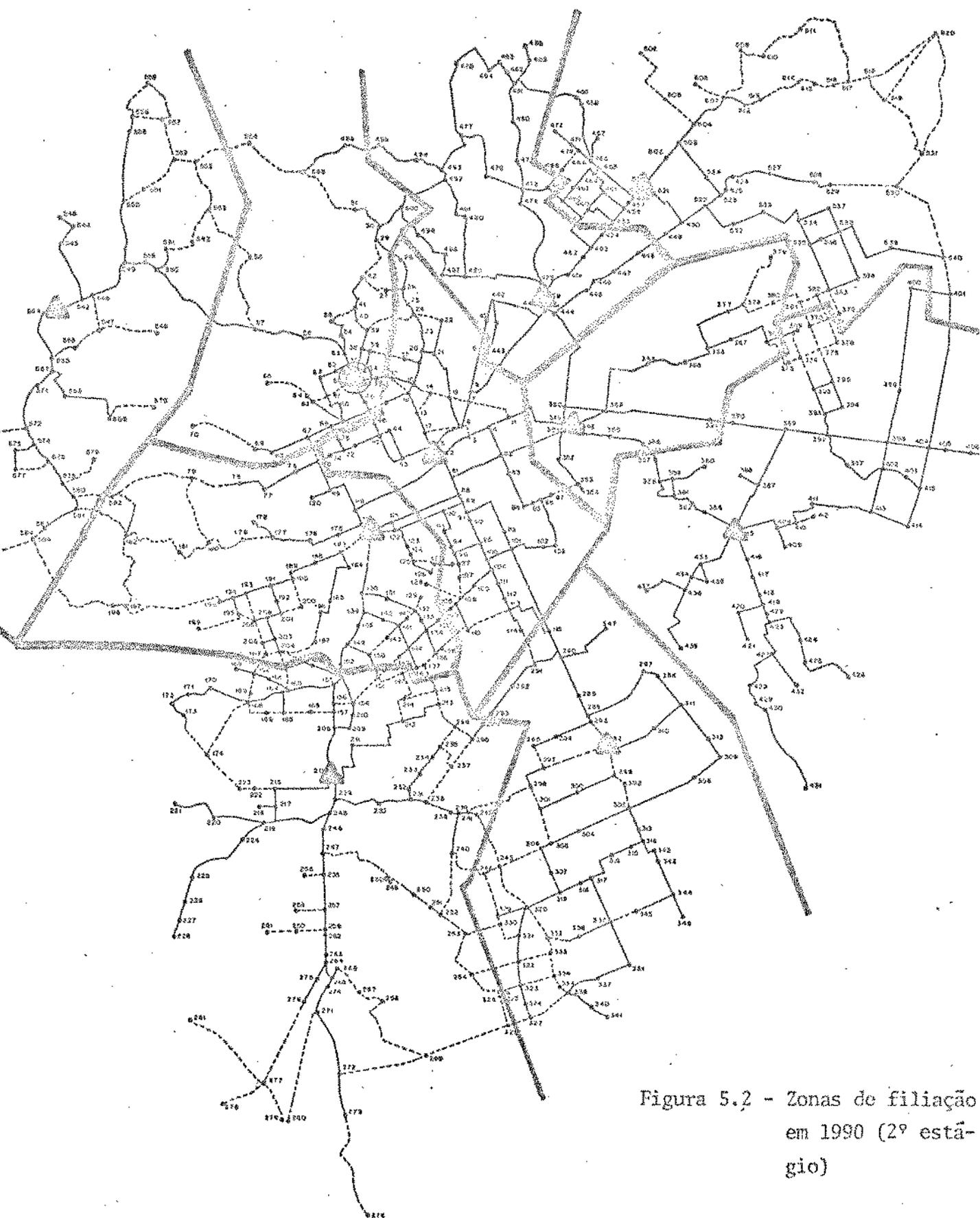


Figura 5.2 - Zonas de filiação em 1990 (2º estágio)

▲ Estações existentes

⊙ Estações implantadas durante o horizonte de planejamento

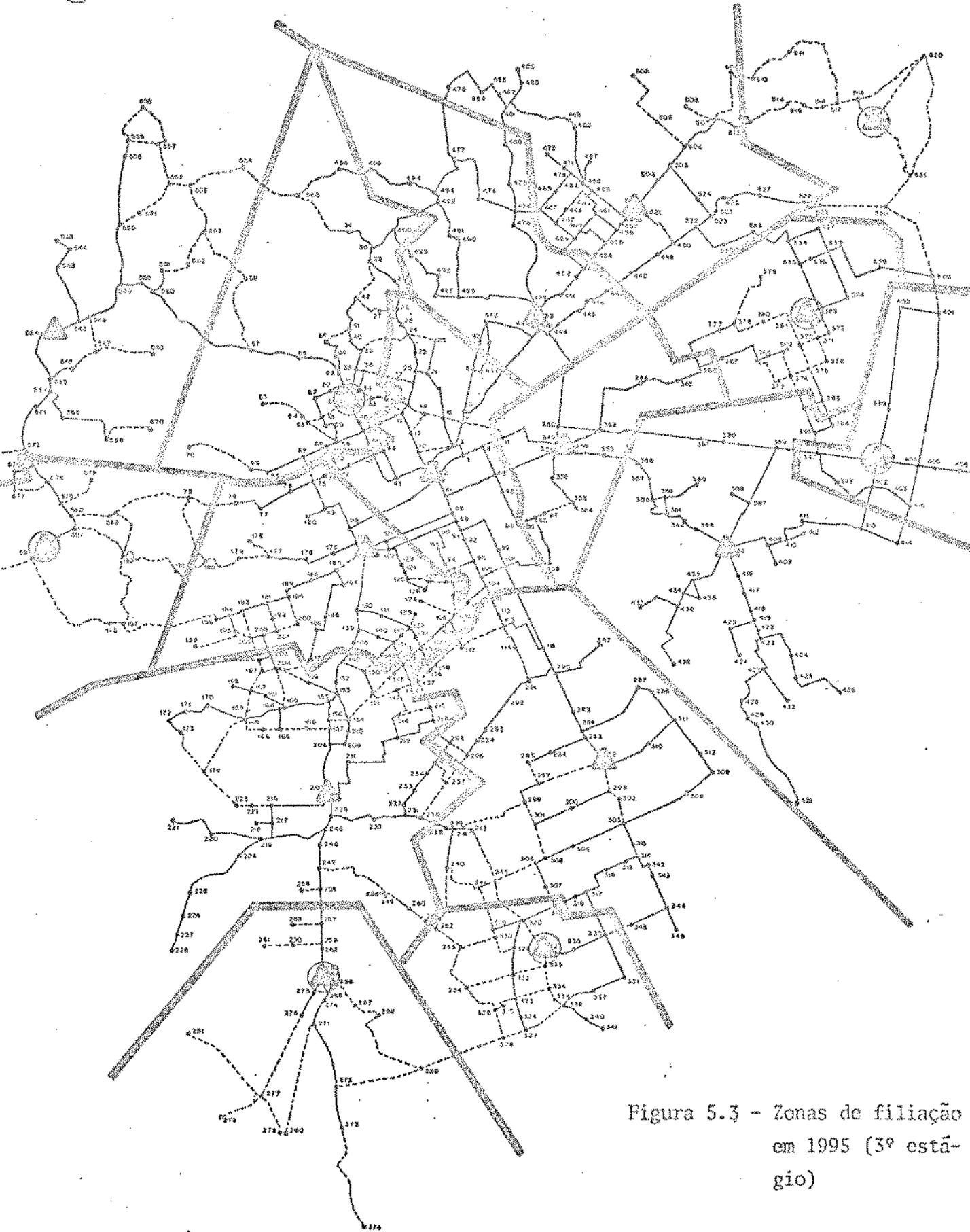


Figura 5.3 - Zonas de filiação em 1995 (3º estágio)

▲ Estações existentes

⊙ Estações implantadas durante o horizonte de planejamento

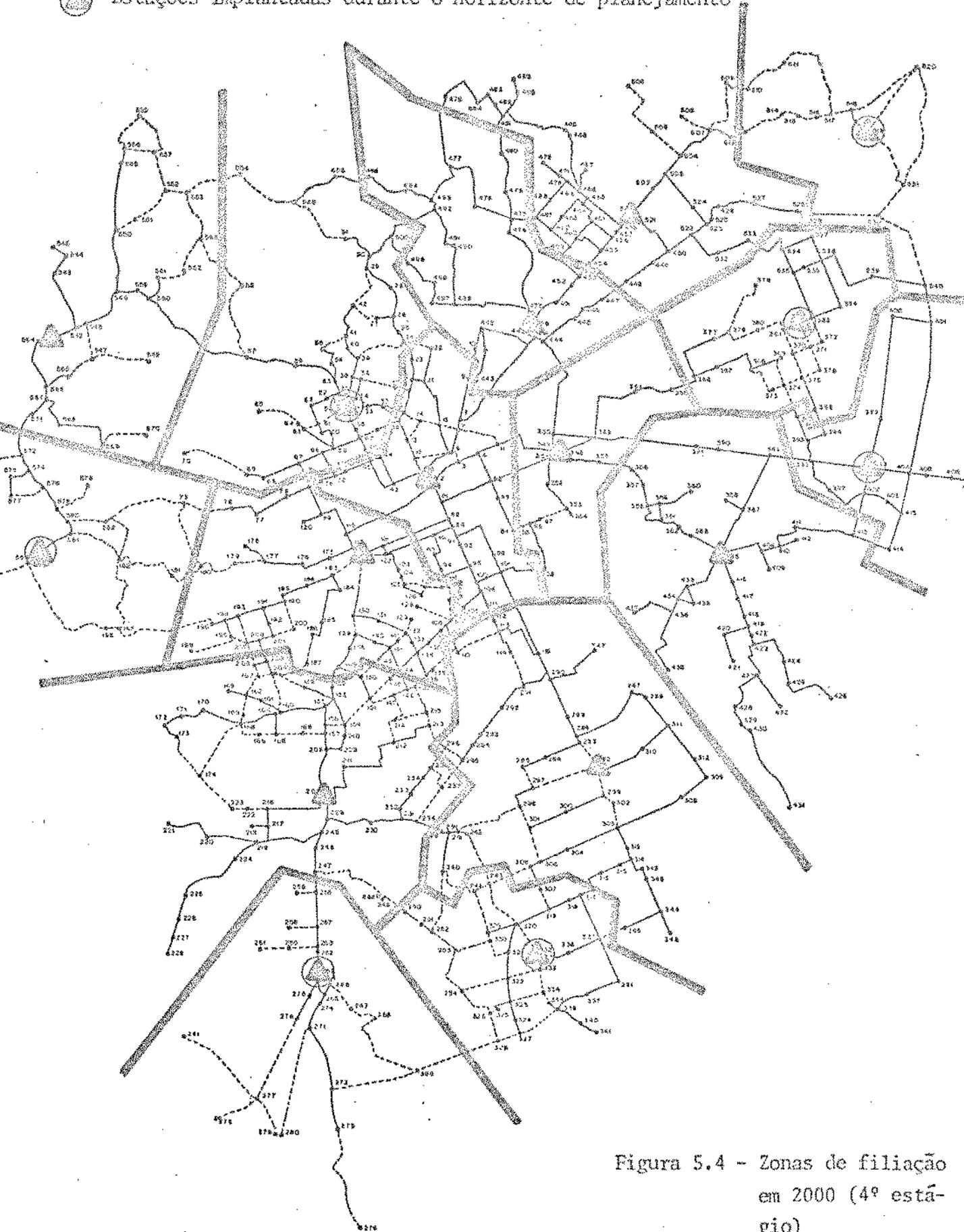


Figura 5.4 - Zonas de filiação em 2000 (4º estágio)

CAPÍTULO 6 : CONCLUSÕES

A metodologia apresentada constitui-se num processo dinâmico de otimização de cortes de área, necessários quando, em consequência do crescimento da demanda da rede telefônica, houver introdução de novas estações e/ou ampliação das já existentes. Ela trabalha com a rede primária, considera as demandas por ponto de controle e procede à evolução da rede durante o período de planejamento levando em conta para cada estágio os pares existentes no estágio anterior.

Duas fases compõem o procedimento em cada estágio. A Fase de Evolução à Rede Alvo é um passo não conservador, que procura realizar os cortes de área por um critério de custo mínimo de cabos, respeitando as capacidades das estações e desprezando a rede já instalada, o que a caracteriza como um passo corajoso e com claro compromisso com o futuro, isto é, que visa o ano meta do planejamento a longo prazo. Por seu lado, a Fase de Adaptação à Rede Atual efetua um rearranjo das ligações assinantes-estação dentro de cada zona de filiação definida na Fase de Evolução, procurando aproveitar a custo nulo a rede existente no estágio anterior. Trata-se assim de um passo conservador, nos limites das zonas de filiação.

O programa PEOR, fruto da implementação computacional do procedimento evolutivo exposto, é aplicável a qualquer tipo de rede multicentral com equipamentos analógicos ou digitais e vem sendo experimentado nas redes telefônicas de diversas cidades brasileiras, tendo se mostrado eficiente quanto ao tempo de processamento e adequado e flexível no tocante ao modelo matemático.

Existem outros programas que podem ser utilizados na determinação de cortes de área. O PLAFUN [10], elaborado na Telerj, é um localizador de estações que fornece as zonas de influência destas e trabalha com quadrículas, similarmente ao programa EPICURE [11], desenvolvido no CNET-França. O PEOR é uma ferramenta construída especificamente para realizar os cortes de área de forma otimizada e leva em conta aspectos mais refinados da rede urbana - quais sejam : reaproveitamento de cabos e individualização dos pontos de controle e segmentos de rede. Assim sendo, seu desenvolvimen-

to representa uma significativa contribuição ao planejamento a longo prazo de redes urbanas de telefonia.

Finalmente, cabe discutir algumas sugestões para o aperfeiçoamento do trabalho apresentado. Incrementos podem ser feitos visando reduzir o tempo de CPU consumido pelo PEOR, bem como para tentar aumentar o aproveitamento da rede primária disponível.

Nas duas concepções do PEOR, pode-se prever uma acentuada redução do tempo de processamento se for introduzida uma modificação no processo de inicialização do PFCM da FERA a partir do 3º estágio. O novo processo consistiria na utilização da base correspondente à solução ótima da FERA de um estágio como base inicial para a mesma fase no estágio seguinte, sendo os fluxos nos arcos definidos segundo a nova configuração de rede, isto é, levando em conta as alterações das capacidades das estações e das demandas dos pontos de controle, e a eventual implantação de novas estações e a localização destas. Portanto, o processo seria análogo àquele usado na inicialização do PFCM da FARA do PEOR2, que, a propósito, poderia ser adaptado para também inicializar os PFCM da FARA do PEOR1, contribuindo para diminuir o tempo de processamento dispendido nesta versão do PEOR.

Ainda visando benefícios relativos a tempo de CPU do programa, é interessante incorporar ao mesmo o procedimento experimentado na aceleração das trocas de base descrito em [12]. Este procedimento fundamenta-se no fato de que, no modelo adotado, o grafo correspondente à rede telefônica contém arcos nos dois sentidos em todos os seus segmentos, com o que pode ocorrer mais de uma troca de variável básica dentro de um mesmo ciclo. Isto sugere que, ao invés de se realizar a troca de base convencional - onde a cada iteração uma variável sai da base, cedendo lugar a outra, o que corresponde no PFCM a uma reestruturação da árvore e a uma atualização dos fluxos nos arcos do ciclo formado pela variável que entra na base -, seja efetuada uma *multi-iteração*, que consiste em realizar de uma só vez as trocas de base que podem se suceder em um mesmo ciclo, isto é, com apenas uma reestruturação da árvore e uma atualização dos fluxos nos arcos do ciclo. Em redes de médio e grande porte, a implementação deste procedimento gera melhorias da ordem de 65% quando considerada a disponibilidade e de 50% quando não considerada [12].

Conforme já foi comentado anteriormente, na concepção do PEOR, os arcos pertencentes às fronteiras definidas na FERA não são conside

rados no aproveitamento de rede realizado na FARA. Com vistas a conseguir elevar o índice deste aproveitamento, parece compensador estudar numa pós-otimização sobre os resultados daquelas fases, a utilização dos arcos de fronteira que se mostrem atraentes quanto à redução do custo geral da rede. Tomando as informações da tabela 6.1, referentes ao estudo da rede telefônica de Curitiba abordado no capítulo 5, pode-se avaliar a potencialidade

INFORMAÇÕES	ESTÁGIO		
	1990	1995	2000
DISPONIBILIDADE (Pares-Km) = σ_3	452.255	741.633	898.584
PARES REUTILIZADOS (Pares-Km) = σ_2	355.602	504.975	658.870
PARES NOVOS (Pares-Km) = σ_1	289.378	156.949	109.073
TOTAL DE PARES UTILIZADOS (Pares-Km) = $\sigma_2 + \sigma_1$	644.980	661.924	767.943
TOTAL DE PARES OCIOSOS (Pares-Km) = $\sigma_3 - \sigma_2$	96.653	236.658	239.714
PARES OCIOSOS NAS FRONTEIRAS (Pares-Km) = f	25.092	54.748	63.902
APROVEITAMENTO DE REDE $(\sigma_2 + \sigma_1) / (\sigma_3 + \sigma_1)$	86%	73%	76%
MÁXIMO APROVEITAMENTO POSSÍVEL = $(\sigma_2 + \sigma_1 + f) / (\sigma_3 + \sigma_1)$	90%	80%	83%
$\frac{\text{PARES OCIOSOS NAS FRONTEIRAS}}{\text{PARES NOVOS}} = f / \sigma_1$	9%	35%	59%
$\frac{\text{PARES NOVOS}}{\text{TOTAL DE PARES UTILIZADOS}} = \sigma_1 / (\sigma_2 + \sigma_1)$	45%	24%	14%
AUMENTO DE REDE = σ_1 / σ_3	64%	21%	12%
AUMENTO DE ASSINANTES	32%	22%	15%

Tabela 6.1 - Informações estatísticas da rede estudada no capítulo 5

do aproveitamento das fronteiras no aumento da utilização da rede disponível. Atentando-se para as informações sobre o aproveitamento de rede e o

máximo aproveitamento possível, conclui-se que na melhor das expectativas (isto é, caso se conseguisse aproveitar todos os pares disponíveis nos arcos de fronteira sem incorrer em desperdícios nas novas fronteiras) ter-se-ia um acréscimo em torno de 4%, 7% e 7% no aproveitamento total de rede para o 2º, 3º e 4º estágio, respectivamente. Estes percentuais justificam que se invista numa fase de pós-otimização, tanto mais quando se considera que o aproveitamento total dos pares disponíveis nos arcos de fronteira representam aproximadamente 9%, 35%, e 59% do total de pares novos introduzidos na rede no 2º, 3º e 4º estágio, respectivamente.

ANEXO 1

LISTAGENS DE RESULTADOS

ESTACAO 1 - ESTAGIO 2

NUMERO DE NOS 71

CAPACIDADE 70000 CAPAC. OCIOSA 122 CAPAC. UTIL. 69878

NOS E DEMANDAS

NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.
1	-70000	2	4122	3	6012	4	4062	5	4324
6	3521	7	1939	8	6	9	1062	11	0
12	3271	13	1165	14	392	15	1910	16	472
17	294	18	451	19	478	20	247	21	429
22	430	23	560	24	523	25	147	26	289
28	167	32	644	37	479	43	4655	44	617
45	626	46	1570	71	418	72	388	73	444
74	217	86	2733	81	3199	82	1460	83	291
84	449	85	337	86	0	87	244	88	2713
89	445	90	635	91	960	92	1036	93	511
94	151	95	643	96	243	97	252	98	282
99	1140	100	708	101	793	102	651	103	527
104	300	105	486	106	193	107	231	108	212
109	367	110	370	111	564	112	188	113	581
114	397								

ESTATISTICAS DA ESTACAO 1

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 10036

PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 79766

DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 107680

PARES OCIOSOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 27914

NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = SIG4 = 69500

NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = SIG5 = 69878

PORC. DE PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 11 %

PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 76 %

PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = 0.11 %

RAIO MEDIO (KM) = 1.2951413

ESTACAO 49 - ESTAGIO 2

NUMERO DE NOS 41

CAPACIDADE 30000 CAPAC. OCIOSA 18928 CAPAC. UTIL. 11072

NOS E DEMANDAS

NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.
37	151	29	272	30	0	31	435	33	242
34	265	35	213	36	227	38	256	39	152
40	260	41	204	42	532	47	115	48	562
49	-29770	50	203	51	0	52	158	53	244
54	154	55	410	56	176	57	235	58	672
59	176	60	170	61	233	62	275	63	266
64	195	65	110	66	1375	67	387	68	275
69	136	70	265	476	214	500	337	554	134
586	0								

ESTATISTICAS DA ESTACAO 49

PARES NOVOS = S161 (PARES.KM) = 11346

PARES REUTILIZADOS = S162 (PARES.KM) = 6465

DISPONIBILIDADE = S163 (PARES.KM) = 8925

PARES OCIOSOS = (S163-S162)/S165 = 440

NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = S164 =

NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = S165 = 11072

PORC. DE PARES NOVOS = S161/(S161+S162) = 57 %

PORC. DE APROVEITAMENTO = (S162+S161)/(S163+S161) = 97 %

PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (S165-S164)/S164 = 100.00 %

RAIO MEDIO (KM) = 1.7912297

** RELATORIO PARA - ESTAGIO 3 **

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 289378

PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 395602

DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 452255

PARES OCIOSOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 96653

NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = SIG4 = 218133

NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = SIG5 = 289625

PORC. PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 44 %

PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 86 %

PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = 32 %

RAIO MEDIO (KM) = 2.2267505

ASSINANTES REFILIADOS = *

ASSINANTES REFILIADOS = *

CUSTO DA REDE (MIL-CR\$) = 4340667

* informação não disponível

ESTACAO 1 - ESTAGIO 3

NUMERO DE NOS 52

CAPACIDADE 70000 CAPAC. OCIOSA 562 CAPAC. UTIL. 69438

NOS E DEMANDAS

NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.
1	-70000	2	4360	3	6259	4	4294	5	4499
6	3641	7	2150	8	0	9	1189	12	3476
13	1242	14	424	15	2056	16	521	17	306
18	496	19	536	20	278	21	459	22	454
23	630	24	582	25	188	26	384	37	548
43	4379	44	665	45	688	71	471	72	463
73	715	80	2973	81	3508	82	1563	83	305
84	473	88	3047	89	455	90	669	91	1070
92	1154	93	561	94	286	95	659	96	270
99	1213	100	748	101	765	102	710	104	342
105	523	443	1836						

ESTATISTICAS DA ESTACAO 1

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 1062

PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 78932

DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 111892

PARES OCIOSOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 32960

NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = SIG4 = 65576

NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = SIG5 = 69438

PORC. DE PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 1 %

PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 70 %

PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = +0.63 %

RATIO MEDIO (KM) = 1.1520345

ESTACAO 49 - ESTAGIO 3

NUMERO DE NOS 49

CAPACIDADE 30000 CAPAC. OCEGSA 13212 CAPAC. UTIL. 16788

NOS E DEMANDAS

NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.
27	309	28	247	29	377	30	0	31	836
32	684	33	285	34	293	35	238	36	254
38	300	39	179	40	333	41	261	42	1048
46	1839	47	117	48	649	49	-29761	50	226
51	0	52	177	53	300	54	190	55	608
58	252	59	329	58	1229	59	267	60	190
61	254	62	366	63	388	64	254	65	279
68	1784	67	598	496	240	500	516	558	0

ESTATISTICAS DA ESTACAO 49

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 3065

PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 10766

DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 20988

PARES OCEGOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 2222

NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = SIG4 = 11972

NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = SIG5 = 16788

PORC. DE PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 30 %

PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 92 %

PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = 51.55 %

RAIO MEDIO (KM) = 1.5903179

ESTACAO 332 - ESTAGIO 3

NUMERO DE NOS 26

CAPACIDADE 30000 CAPAC. OCIOSA 18149 CAPAC. UTIL. 11851

NOS E DEMANDAS

NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.
252	687	253	0	254	0	319	0	320	545
321	479	322	452	323	451	324	1117	325	671
326	337	327	0	328	0	329	451	330	0
331	0	332	-29410	333	0	334	0	335	1628
336	553	337	501	338	372	339	330	340	1003
341	1682								

ESTATISTICAS DA ESTACAO 332

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 15028
 PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 7959
 DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 13820
 PARES OCIOSOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 5861
 NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = SIG4 = 0
 NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = SIG5 = 11851
 PORC. DE PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 65 %
 PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 79 %
 PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = 100.00 %
 RAO MEDIO (KM) = 1.9378120

*** RELATORIO FARA - ESTAGIO 3 ***

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 156949
 PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 504975
 DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 741634
 PARES DEIXADOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 236459
 NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = SIG4 = 289625
 NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = SIG5 = 355735
 PORC. PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 23 %
 PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 73 %
 PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = 22 %
 RAO MEDIO (KM) = 1.6697265
 ASSIMANTES REFILIADOS = 35660
 ASSIMANTES REFILIADOS = 15.6467 %
 CUSTO DA REDE (MIL-RE\$) = 2334237

ESTACAO 1 - ESTADIO 4

NUMERO DE NOS 45

CAPACIDADE 70000 CAPAC. OCIOSA 815 CAPAC. UTIL. 69385

NOS E DEMANDAS

NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.
1	-70000	2	4550	3	6404	4	4439	5	4594
6	3712	7	2429	8	0	9	1239	11	0
12	3601	13	1281	14	445	15	2134	16	566
18	526	19	578	20	292	21	472	22	464
23	672	43	4567	44	684	45	729	71	587
72	512	74	284	80	3747	81	3732	82	1878
83	315	84	486	88	3265	89	463	90	682
91	1154	92	1221	93	588	94	214	95	664
96	285	99	1244	100	769	101	771	102	759
104	374	105	550	111	723				

ESTATISTICAS DA ESTACAO 1

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 77

PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 74821

DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 111500

PARES OCIOSOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 36759

NO. ASS. DO ESTADIO ANTERIOR = SIG4 = 69435

NO. ASS. DO ESTADIO PRESENTE = SIG5 = 69385

PORC. DE PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 0 %

PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 67 %

PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTADIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = -0.06 %

RATO MEDIO (KM) = 1.0794679

ESTACAO 49 - ESTAGIO 4

NUMERO DE NOS 50

CAPACIDADE 30000 CAPAC. OCIOSA 4754 CAPAC. UTIL. 25246

NOS E DEMANDAS

NO	DEH.	NO	DEH.	NO	DEH.	NO	DEH.	NO	DEH.
17	312	24	612	25	213	26	466	27	270
28	311	29	474	30	0	31	1483	32	710
33	277	34	307	35	248	36	269	37	591
38	300	39	100	40	308	41	317	42	1532
46	2011	47	110	48	690	49	29759	50	244
51	0	52	189	53	338	54	200	55	777
56	336	57	435	58	1402	59	326	60	212
61	282	62	444	63	406	64	292	65	589
66	2082	67	873	68	533	69	318	70	563
73	964	496	240	500	601	554	254	586	0

ESTATISTICAS DA ESTACAO 49

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 16456
 PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 29306
 DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 31511
 PARES OCIOSOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 2125
 NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = SIG4 = 16700
 NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = SIG5 = 25246
 PORC. DE PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 35 %
 PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 95 %
 PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = 50,32 %
 RAIU MERTO (KM) = 1.819682

ESTACAO 332 - ESTAGIO 4

NUMERO DE NOS 33

CAPACIDADE 30000 CAPAC. OCIOSA 10836 CAPAC. UTIL. 19164

NOS E DEMANDAS

NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.	NO	DEM.
243	777	244	0	250	376	251	360	252	1079
253	0	254	0	307	261	317	0	310	854
319	0	320	702	321	567	322	536	323	536
324	1726	325	682	326	342	327	0	328	0
329	626	330	0	331	0	332	-28851	333	0
334	0	335	2228	336	603	337	510	338	429
339	333	340	1035	341	3443				

ESTATISTICAS DA ESTACAO 332

PARES NOVOS = SIG1 (PARES.KM) = 12676

PARES REUTILIZADOS = SIG2 (PARES.KM) = 25540

DISPONIBILIDADE = SIG3 (PARES.KM) = 35310

PARES OCIOSOS = (SIG3-SIG2)/SIG3 = 9770

NO. ASS. DO ESTAGIO ANTERIOR = SIG4 = 11851

NO. ASS. DO ESTAGIO PRESENTE = SIG5 = 19164

PORC. DE PARES NOVOS = SIG1/(SIG1+SIG2) = 33 %

PORC. DE APROVEITAMENTO = (SIG2+SIG1)/(SIG3+SIG1) = 79 %

PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTAGIO = (SIG5-SIG4)/SIG4 = 61,71 %

RAIO MEDIO (KM) = 1.9942257

** RELATÓRIO FARA - ESTÁGIO 4 **
 =====

PARES NOVOS = S101 (PARES.KM) = 169073
 PARES REUTILIZADOS = S102 (PARES.KM) = 658870
 DISPONIBILIDADE = S103 (PARES.KM) = 826584
 PARES GEIOSOS = (S103-S102)/S103 = 239714
 NO. ASS. DO ESTÁGIO ANTERIOR = S104 = 355733
 NO. ASS. DO ESTÁGIO PRESENTE = S105 = 410669
 PORC. PARES NOVOS = S101/(S101+S102) = 14 %
 PORC. DE APROVEITAMENTO = (S102+S101)/(S103+S101) = 76 %
 PORC. AUMENTO DE ASS. NO ESTÁGIO = (S105-S104)/S104 = 15 %
 RATO MÉRIO (KM) = 1.8699842
 ASSINANTES REFIILADOS = 13951
 ASSINANTES REFIILADOS = 3.8841 %
 CUSTO DA REDE (MIL-CR\$) = 1634098

 NO. DE ASS. DAS ESTACÕES A PARTIR DO ESTÁGIO 2
 =====

1	69878	69438	69385
116	28266	28534	32243
439	23182	24183	29055
348	23472	23512	33817
282	30410	30941	31069
207	36017	36244	37846
541	18134	18423	19985
385	29511	29833	29435
501	19703	22976	28164
49	11072	16788	25246
332	0	11851	19164
398	0	10139	19034
382	0	6024	10215
264	0	9679	13458
519	0	6798	9551
583	0	8552	13002

BIBLIOGRAFIA

- [1] Yamakami, A.; Tavares, H.M.; Nakagawa, J.M.. Manual Técnico do Programa LOCUS - Localização de Centrais Urbanas, Relatório Técnico RT-12, Contrato UNICAMP - TELEBRÁS 033/80, abr. 1983.
- [2] Martini, M.R.B.. Planejamento de Centros de Fios : Programas CRONOS, PALCO e RELUZ, Tese de Mestrado, UNICAMP - FEC - DEE, out. 1983.
- [3] Telebrás. Glossário de Termos Técnicos de Telecomunicações, Prática Telebrás 201-100-001, 1978.
- [4] Araújo, E.O.. Localização de Centrais Telefônicas numa Rede Urbana, Tese de Mestrado, UNICAMP - FEC - DEE, jun. 1981.
- [5] Xavier, R.C.. Problema de Localização de Centrais Telefônicas Urbanas : uma Nova Abordagem, Tese de Mestrado, UNICAMP - IMECC, nov. 1983.
- [6] Authiê, G.. Otimização em Grafos, Pub. Interna Convênio UNICAMP-METRÔ, 1976.
- [7] Bazaraa, M.S.; Jarvis, J.J.. Linear Programming and Network Flows, John Wiley, 1977.
- [8] Kennington, J.L.; Helgason, R.V.. Algorithms for Network Programming, John Wiley, 1980.
- [9] Telebrás. "Estudo de Digitalização de uma Rede Urbana", Seminário de Digitalização - Palestras, Pub. Interna do Centro Nacional de Treinamento - CNTr, Brasília, 63-89, nov./dez. 1982.
- [10] Telerj. PIAFUN - Plano Fundamental - Manual do Usuário, Pub. Interna, 1980.

- [11] Scamps, A.. "The Program EPICURE - Location of New Exchanges", Computer Aided Planning for Local Networks, Pub. Centre National d'Etudes des Telecommunications, Information Generale IG/RCC/RTR/50, Vol. 1, 1979.
- [12] Nakagawa, J.M.; Yamakami, A.; Tavares, H.M.F.. Refinamentos Computacionais no Algoritmo PFCM para Aplicação no Planejamento de Redes Telefônicas, Relatório Técnico RT-28, Contr. UNICAMP - TELEBRÁS 033/80, abr. 1984.