

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Este exemplar corresponde à versão original
da tese defendida por Anilton Salles Garcia
e aprovada pela Comissão Julgadora em
02 de outubro de 1987

PLANEJAMENTO DO ENTRONCAMENTO EM
REDES TELEFÔNICAS URBANAS EM
PROCESSO DE DIGITALIZAÇÃO

ANILTON SALLES GARCIA

Orientador: Prof.Dr. HERMANO M.F.TAVARES

Tese apresentada à Faculdade
de Engenharia Elétrica, da
Universidade Estadual de Cam-
pinas - UNICAMP - como parte
dos requisitos exigidos para
obtenção do título de DOUTOR
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Outubro 1987

À:

Rosângela

José Anilton

Henrique

AGRADECIMENTOS

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram pa
ra a realização deste trabalho. Muito especialmente a:

- . Sr. Anirio e D. Maria Loyola, por tudo.
- . Prof. Hermano pela paciência e dedicação na tarefa de orientação deste trabalho.
- . TELESF pela cessão dos dados e, em particular ao Engº Mitsuo Shibata pela participação em inúmeras discussões técnicas.
- . TELERJ pela cessão dos dados.
- . Engº Luiz A. C. Aquino.
- . Engº Carlos R. Tiba.
- . CPqD/TELEBRÁS pelo apoio financeiro e institucional. Em particular a Engª Marta R.de B. Martini.
- . Raul, Secundino e demais amigos da FEE/UNICAMP.
- . Prof. Renato Borges Guerra pela colaboração no desenvolvimento do sistema PORULP.
- . Engº Ariovaldo Veiga de Almeida pela ajuda computacional no sistema PORULP.
- . UFES e DEI. Em particular aos Profs. Lucia B. Bazzarella e Eder Machado pelo constante apoio e incentivo.
- . Maria José e Vilma Angélica pelo apoio administrativo no Contrato UNICAMP/TELEBRÁS - Redes Digitais.
- . Eliana pelo paciente trabalho de datilografia.
- . Francisco pela aplicação na confecção dos desenhos.
- . Aos amigos de Vitória pelos constantes incentivos das sextas-feiras.
- . Aos amigos do DES/ELEBRA pela receptividade e paciência na etapa final do trabalho.

RESUMO

A crescente utilização de comutação e transmissão digital em áreas telefônicas locais multiestações, requer o desenvolvimento de novas metodologias para o tratamento da rede de troncos.

Um dos aspectos abordados neste trabalho trata da otimização do roteamento de troncos em horizontes de longo prazo, levando-se em conta os aspectos de segurança da transmissão. São apresentados o desenvolvimento do modelo matemático utilizado, onde são destacados os procedimentos de construção das funções de custo e os aspectos computacionais envolvidos. A definição das compras dos equipamentos de transmissão ao longo do tempo, de acordo com a modularidade dos mesmos, é obtida tendo como critério a minimização do valor presente dos custos. Como exemplo de aplicação foi utilizado um dos Cenários tecnológicos adotado no estudo do planejamento da rede de Curitiba, onde são destacados os principais resultados obtidos.

Um segundo aspecto tratado neste trabalho, ligado à digitalização de redes telefônicas locais, refere-se ao estudo "cross section" da quantificação dos enlaces de fibras ópticas na rede de troncos, baseado na construção dos planos de comutação e transmissão. É apresentado o modelo matemático correspondente, onde os efeitos das não linearidades decorrentes da modularidade dos sistemas ópticos são tratados através da utilização de procedimentos heurísticos na construção da função objetivo. Também são apresentados os aspectos computacionais do modelo e uma análise detalhada dos resultados de sua aplicação para as redes de troncos digitais do Rio de Janeiro e São Paulo.

Finalmente, são feitas algumas propostas de melhorias para os procedimentos desenvolvidos e indicadas sugestões para continuidade deste trabalho.

ABSTRACT

The introduction of digital switching and transmission in multi-exchange local networks calls for the development of new methodologies for the planning of trunking network.

The first aspect considered in this work is the optimization of the trunk routing network taking into account security constraints in a long term horizon. The mathematical model, an heuristic procedure for the construction of the objective function, and computational aspects are all discussed. The minimization takes into account the present values of investments. Purchasing schedule for transmission equipments in accordance with their modularity is the main output of this study. A case study considers technological scenarios for the network in the metropolitan area of Curitiba.

Another aspect of this work draws from the digitalization of the trunking network. An optimized "cross section" study of the fiber-optic link is carried out, based on the construction of switching and transmission planes. Modularity of optical systems equipments is taken into account, what results in a non-linear (and non-convex) objective function. An heuristic procedure was devised to deal with there features. The applications consider the cities of Rio de Janeiro and São Paulo. Computational aspects and detailed analysis of results are presented.

Finally, suggestions for improvements and future researchs are discussed.

Este trabalho foi parcialmente realizado através do Convênio UNICAMP/TELEBRÁS - 024A/83 e contou com apoio financeiro da UFES, para manutenção do Salário, e CNPq, pela concessão da bolsa.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	01
I.1 - SITUAÇÃO DO PROBLEMA	02
I.2 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	05
 CAPÍTULO II - CONSIDERAÇÕES SOBRE O PLANEJAMENTO DA REDE DE TRONCOS.....	 07
II.1 - INTRODUÇÃO.....	08
II.2 - UMA VISÃO GLOBAL DO PLANEJAMENTO DE REDES TELEFÔNICAS LOCAIS.....	08
II.3 - A ETAPA DE OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO.....	11
II.4 - A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO...	12
II.5 - ESTUDO DO ROTEAMENTO COM SEGURANÇA.....	17
II.6 - A ESTRUTURA DE CUSTOS E PENALIZAÇÕES.....	20
II.7 - FLEXIBILIDADES DO MODELO.....	26
II.8 - A ESTRUTURA COMPUTACIONAL.....	26
 CAPÍTULO III- OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO DE TRONCOS EM HORIZONTES DE LONGO PRAZO.....	 30
III.1 - INTRODUÇÃO.....	31
III.2 - OBTENÇÃO DO ROTEAMENTO "ALVO" NO ANO HORIZONTE.....	34
III.3 - A EVOLUÇÃO DO ROTEAMENTO AO LONGO DO TEMPO.....	40
III.4 - A DEFINIÇÃO DA COMPRA DOS MEIOS DE TRANSMISSÃO.....	46
 CAPÍTULO IV - ASPECTOS COMPUTACIONAIS DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO EM HORIZONTES DE LONGO PRAZO..	 54
IV.1 - INTRODUÇÃO.....	55
IV.2 -A ESTRUTURA COMPUTACIONAL.....	55
IV.2.1-A DEFINIÇÃO DOS CAMINHOS POR ONDE AS DEMANDAS DEVEM SER ROTEADAS...	56
IV.2.2-DETERMINAÇÃO DAS ROTAS FACTÍVEIS E CONSTRUÇÃO DE UMA SOLUÇÃO BÁSICA INICIAL.....	58

IV.2.3-OBTENÇÃO DO ROTEAMENTO ALVO NO	
ANO HORIZONTE.....	60
IV.2.4-EVOLUÇÃO DO ROTEAMENTO AO LONGO	
DO TEMPO.....	62
IV.2.5-A DEFINIÇÃO DAS COMPRAS.....	65
IV.2.6-ELABORAÇÃO DOS RELATÓRIOS DE SAÍ	
DA.....	66
IV.3 - A ORGANIZAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROGRAMA	66
IV.4 - UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO	
APRESENTADO PARA OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMEN	
TO EM HORIZONTES DE LONGO PRAZO.....	69

CAPÍTULO V - A DEFINIÇÃO DOS TRECHOS DE FIBRAS ÓPTICAS PARA	
O ENTRONCAMENTO DIGITAL.....	81
V.1 - INTRODUÇÃO.....	82
V.2 - DESCRIÇÃO GERAL DO PROBLEMA.....	82
V.3 - A GERAÇÃO DOS TRONCOS: CÁLCULO SIMPLIFI	
CADO DO ENTRONCAMENTO DIGITAL.....	84
V.4 - A GERAÇÃO DOS CAMINHOS E A DEFINIÇÃO DAS	
ROTAS.....	88
V.4.1-DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS NO PLA-	
NO DE TRANSMISSÃO EM PCM.....	88
V.4.2-DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS UTILI -	
ZANDO O PLANO DE TRANSMISSÃO EM	
FIBRAS ÓPTICAS.....	89
V.4.3-CONSIDERAÇÃO SOBRE OS CUSTOS DAS	
ROTAS.....	93
V.5 - A OTIMIZAÇÃO INICIAL.....	96
V.6 - UM PROCEDIMENTO HEURÍSTICO PARA CORRE	
ÇÃO DO CARREGAMENTO NOS ARCOS DO PLANO	
DE TRANSMISSÃO EM FIBRAS ÓPTICAS.....	100
V.6.1-HEURÍSTICA PARA APROXIMAÇÃO DO	
CUSTO SIMPLIFICADO COM O CUSTO	
REAL.....	100
V.6.2-A CONSIDERAÇÃO DAS DISPONIBILIDA-	
DES NOS SISTEMAS DE 2ª ORDEM.....	105

CAPÍTULO VI - A ESTRUTURA COMPUTACIONAL PARA QUANTIFICAÇÃO DOS ENLACES DE FIBRAS ÓPTICAS.....	109
VI.1- INTRODUÇÃO.....	110
VI.2- A ORGANIZAÇÃO COMPUTACIONAL.....	110
VI.2.1-DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS PARA ESCOAMENTO DAS DEMANDAS.....	111
VI.2.2-CÁLCULO DO ENTRONCAMENTO DIGITAL SIMPLIFICADO E INICIALIZAÇÃO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO.....	113
VI.2.3-CONSTRUÇÃO DAS HEURÍSTICAS DE CUSTOS E OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO.....	115
VI.2.4-EMISSÃO DOS RELATÓRIOS DE ROTEAMENTO E DE AQUISIÇÃO DE EQUIPAMENTOS.....	117
VI.3- APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA.....	118
VI.3.1 -ESTUDO DO PLANEJAMENTO DA REDE DIGITAL DO RIO DE JANEIRO.....	118
VI.3.2 -ESTUDO DO PLANEJAMENTO DA REDE DIGITAL DE SÃO PAULO.....	130
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	143
VII.1- INTRODUÇÃO.....	144
VII.2- ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	144
VII.3- PROPOSTAS DE MELHORIAS NAS METODOLOGIAS APRESENTADAS.....	145
VII.4- SUGESTÕES DE CONTINUIDADE PARA ESTE TRABALHO.....	147
APÊNDICE I - PROGRAMAÇÃO LINEAR POR PARTES.....	149
APÊNDICE II - O MÉTODO DE LIMITE SUPERIOR GENERALIZADO PARA PROBLEMAS COM CRITÉRIO LINEAR POR PARTES.	160
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	170

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1. SITUAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de planejamento da Rede de Troncos em áreas locais multi-estações data de algumas décadas atrás. Entretanto, a aplicação de métodos científicos e a utilização de computadores eletrônicos na sua resolução teve origem no final da década de 50/início da década de 60. Nesta época, os equipamentos de comutação telefônica eram de tecnologia analógica (eletromecânicos).

A necessidade de se produzir equipamento com uma certa capacidade (em termos de número de assinantes, em termos de escoamento de tráfego telefônico) e com dimensões físicas aceitáveis, fez com que algumas particularidades fossem introduzidas tanto a nível de equipamentos como a nível de rede de troncos. Dentre elas podem ser destacadas:

- Centrais com acessibilidade limitada: um determinado órgão de entrada da central tem acesso a apenas um número limitado de órgãos de saída, que são convenientemente agrupados ("Grading").

- utilização de centrais com função Tandem, procurando um equilíbrio entre os custos de equipamentos de comutação e os custos de equipamentos de transmissão (juntadores, cabos...).

Além disso, em função do tipo de equipamento, outras particularidades eram naturalmente introduzidas ao problema. Por exemplo, regras de encaminhamento das chamadas.

Nesta fase era adotado um enfoque de curto prazo onde se procurava: otimizar a rede de circuito de junção e determinar o encaminhamento do tráfego, satisfazendo a uma dada qualidade de serviço (perda máxima admissível). Destacam-se, por exemplo, os trabalhos desenvolvidos por RAPP; WILKINSON; WALSTROM; MORENO, [7] [32]-[8] [9] [12], dentre outros. Um "approach" inicial para abordagem dos aspectos dinâmicos foi apresentado por YAGED [39].

Em função do grande número de variáveis e restrições envolvidas, o enfoque maior era dado ao problema de Cálculo de Entroncamento (etapa de Dimensionamento de rotas) e o roteamento era

feito utilizando-se os caminhos mínimos entre as estações telefônicas.

Com a utilização de tecnologia de comutação digital, a partir da década de 70, aumentou a complexidade do problema em função, dentre outras razões, das não linearidades provocadas pelas modularidades dos equipamentos. Houve, então, a necessidade de se considerar, por exemplo:

- . o desmembramento do problema em dois planos (analógico e digital).

- . oferecimento de maior número de rotas entre as estações para fins de roteamento.

- . a evolução programada dos nós de comutação da rede: comutação analógica → comutação digital.

- . aspectos de segurança de transmissão no problema de roteamento.

- . o dimensionamento de circuitos de junção, levando em conta as modularidades dos sistemas digitais.

Este processo de evolução tecnológica foi alvo de intensa investigação científica onde podem ser destacados os trabalhos desenvolvidos por MCCALLUN; ROBIN & TREVES; COMBOT & EPSTEIN; REIS; ELSNER; SERREAULT & MINOUX; MINOUX & SERREAULT; COMBOT & TSUI & WEIH MAYER; LACOMBE; TIBA & SOLON & UEHARA; OKADA; SHIBATA; HINTON; OKAZAKI; BURITI & PELLETIER; COMBOT & HORN & SALENGH & VANDERSTRAETEN [17] [31] [40] [15] [47] [19] [18] [41] [42] [10] [43] [16] [44] [45] [46] [48].

Algumas aplicações práticas foram realizadas a partir das idéias anteriormente desenvolvidas, onde se destacam os trabalhos desenvolvidos por MITCHEL; LABANDEIRA; CLOSE, [49] [50] [51], dentre outros.

Apesar do grande esforço de investigação observado, pouca atenção foi dada ao estudo do roteamento levando-se em conta os aspectos de segurança da transmissão e à evolução otimizada

do roteamento ao longo do tempo e, conseqüentemente, ao estudo evolutivo do roteamento levando-se em conta os aspectos de segurança da transmissão.

Uma das etapas desenvolvidas neste trabalho trata especificamente da evolução otimizada do roteamento ao longo do tempo. O programa computacional desenvolvido admite as seguintes possibilidades de abordagem do problema:

- a. roteamento das demandas utilizando-se os p- caminhos mais curtos entre as estações.
- b. roteamento das demandas levando-se em consideração aspectos de segurança da transmissão.
- c. roteamento das demandas utilizando-se as alternativas a e b simultaneamente.

cujas idéias básicas e primeiros resultados foram apresentados por GARCIA, A.S & RIBEIRO, R.V; GARCIA, A.S & TAVARES, H & RIBEIRO, R. & BIM, T; GARCIA, A.S & TAVARES, H. & RIBEIRO, R & GUERRA, R, [52] [20] [25].:

Um outro aspecto ainda pouco explorado diz respeito à utilização de meios de transmissão digital de alta hierarquia (Fibra óptica, 480 canais, 34 Mb/s) na rede de troncos em áreas locais multi-estações. Este problema, decorrente da crescente utilização dos meios de comutação e transmissão digitais, apresenta um elevado grau de complexidade devido as não linearidades provocadas pelas modularidades dos equipamentos. A diferença entre este caso e o caso anterior (transmissão analógica x transmissão digital em PCM 30 canais, 2 Mb/s) é que os efeitos das modularidades aparecem num mesmo ambiente: transmissão digital. Há, portanto, a necessidade do tratamento conjunto dos equipamentos de transmissão em PCM 30 canais, 2 Mb/s, e Fibras ópticas 480 canais, 34 Mb/s (1 sistema 34 Mb/s comporta 16 sistemas 2 Mb/s).

Uma outra etapa deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia computacional que trata, a partir de procedimentos heurísticos, do problema de entroncamento/roteamento

digital onde são consideradas simultaneamente as transmissões em 2 Mb/s e 34 Mb/s.

Apesar das limitações ainda existentes neste trabalho, principalmente no que se refere aos aspectos de evolução ao longo do tempo, nota-se claramente que ele ocupa uma lacuna até então existente no planejamento da rede de troncos em ambientes com crescente taxa de digitalização dos meios de comutação e transmissão.

I.2. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

No capítulo II é apresentada a metodologia utilizada no planejamento da rede de troncos em áreas locais multi-estações, onde são destacados:

- . a formulação matemática do problema de roteamento de troncos, mostrada a partir de uma rede exemplo.

- . a consideração dos aspectos de segurança da transmissão, abordados neste trabalho via penalizações convenientes na função objetivo do modelo.

- . os aspectos computacionais do problema de roteamento com segurança.

A primeira contribuição deste trabalho diz respeito ao estudo evolutivo do roteamento de troncos, levando-se em conta os aspectos de segurança da transmissão.

A metodologia desenvolvida para otimização do roteamento em horizontes de longo prazo, definindo a estratégia de evolução do roteamento e o cronograma de custo mínimo (menor valor presente custo anual) para as compras de equipamentos de transmissão, é apresentada no Capítulo III. Fazem parte também deste capítulo, os procedimentos heurísticos para construção das funções objetivo, tanto para o roteamento "Alvo" do ano horizonte quanto para a evolução do roteamento.

O detalhamento dos aspectos computacionais desta metodologia com a descrição de todos os módulos do programa é mostrado no Capítulo IV. Como exemplo de aplicação, é apresentada uma rodada do programa para um Cenário Tecnológico utilizado no planejamento da rede telefônica local da cidade de Curitiba. Os principais dados de entrada, notadamente os dados de evolução da rede de troncos, e uma síntese dos principais resultados computacionais também estão incluídos nesta parte do trabalho.

A segunda contribuição deste trabalho refere-se ao estudo "cross section" da rede de troncos digital, onde há a competição, em custo, entre as transmissões em PCM 30 canais (2 Mb/s) e Fibras ópticas com 480 canais (34 Mb/s).

Os aspectos de modelagem e formulação deste problema, bem como a explicação dos procedimentos heurísticos utilizados para contornar as não linearidades decorrentes da modularidade dos sistemas de transmissão em 34 Mb/s (1 sistema de 34 Mb/s = 4 sistemas de 8 Mb/s = 16 sistemas de 2 Mb/s) são apresentados e discutidos no Capítulo V.

A estrutura computacional do programa que quantifica os enlaces de fibras ópticas no entroncamento digital, com a discussão de cada um dos módulos que a compõe, é apresentada no capítulo VI. São também mostradas algumas combinações das heurísticas desenvolvidas, aplicadas às redes de troncos digitais das cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, bem como uma análise detalhada sobre os resultados obtidos para a rede do Rio de Janeiro.

No capítulo VII deste trabalho são apresentadas as principais conclusões sobre as metodologias desenvolvidas e propostas algumas alterações objetivando a melhoria das mesmas. Também são indicadas algumas sugestões para continuidade deste trabalho no sentido de melhor adequá-lo à tendência futura de redes digitais de serviços integrados.

Finalmente, nos apêndices I e II, é mostrada uma outra contribuição embutida neste trabalho que consiste na Extensão do Método Generalized Upper Bound (GUB) para problemas com critério linear por partes. São detalhados todos os aspectos matemáticos decorrentes desta extensão.

CAPÍTULO II

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PLANEJAMENTO DA

REDE DE TRONCOS

II.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentamos, de uma maneira simplificada, a Metodologia adotada no Planejamento da Rede de Troncos em áreas locais multi-estações. Para uma melhor compreensão dos capítulos seguintes tratamos com mais detalhes a etapa de Otimização do Roteamento e a consideração dos aspectos de segurança da transmissão.

II.2. UMA VISÃO GLOBAL DO PLANEJAMENTO DE REDES TELEFÔNICAS LOCAIS

O planejamento da expansão de redes telefônicas urbanas, devido à complexibilidade dos aspectos a considerar tais como digitalização dos meios de comutação e transmissão, relação entre os resultados de curto, médio e longo prazo, dentre outros, requer o seu desmembramento em etapas, que devem interagir entre si e, por exemplo, podem obedecer o seguinte procedimento:

a) Localização de centros de fios

Para fins de planejamento, esta etapa é constituída de 3 passos distintos que permitem:

. estabelecer uma estrutura de localização de novos centros de fios e/ou ampliação das estações existentes, para um determinado Ano Horizonte de Planejamento (AHP), definindo a capacidade e a tecnologia a ser utilizada em cada Centro de Fios [01] [02] [03].

. determinar um cronograma de implantação para as novas estações e/ou ampliações, procedendo à evolução da rede do estágio atual para a "FOTOGRAFIA" do Ano Horizonte de Planejamento [04].

. determinar a evolução da rede em termos de cortes de área (Zonas de Influência) das estações, em função do cronograma estabelecido [05].

b) Cálculo do Entroncamento

Com os resultados obtidos na etapa de localização, pode-se determinar uma Matriz de Interesse de Tráfego (Matriz de Tráfego) entre as estações para os vários períodos de planejamento [06].

O cálculo do Entroncamento consiste em determinar a necessidade de troncos para atender a esta demanda de tráfego, satisfazendo algumas condições, tais como:

- . qualidade de serviço das ligações existentes (perda máxima admissível).

- . plano de encaminhamento das chamadas telefônicas.

- . restrições técnicas das ligações (atenuações mínima e máxima, resistência ôhmica máxima).

- . características dos meios de transmissão (atenuação e resistência ôhmica por quilômetro, custos).

- . rede (nós e arcos) de troncos envolvida

Obtém-se, então, uma Matriz de Demanda de Troncos (matriz de troncos) que traduz a necessidade de circuitos analógicos e canais PCM para as demandas de tráfego analógico e digital, respectivamente, [07] [08] [09] [10] [11] [12].

c) Otimização do roteamento

Esta etapa consiste em identificar como realizar o atendimento das várias demandas de troncos, através das correspondentes ROTAS FACTÍVEIS, utilizando as disponibilidades dos meios de transmissão, em cada arco da rede de troncos, a custo mínimo. Pode se constituir em um processo estático onde se obtém o roteamento ótimo para a demanda de troncos em um dado período, ou um processo dinâmico onde se procura evoluir de uma situação de referência para uma situação alvo no ano horizonte de planejamento.

O diagrama da Figura 2.1 ilustra o procedimento descrito para o planeamento da rede de troncos.

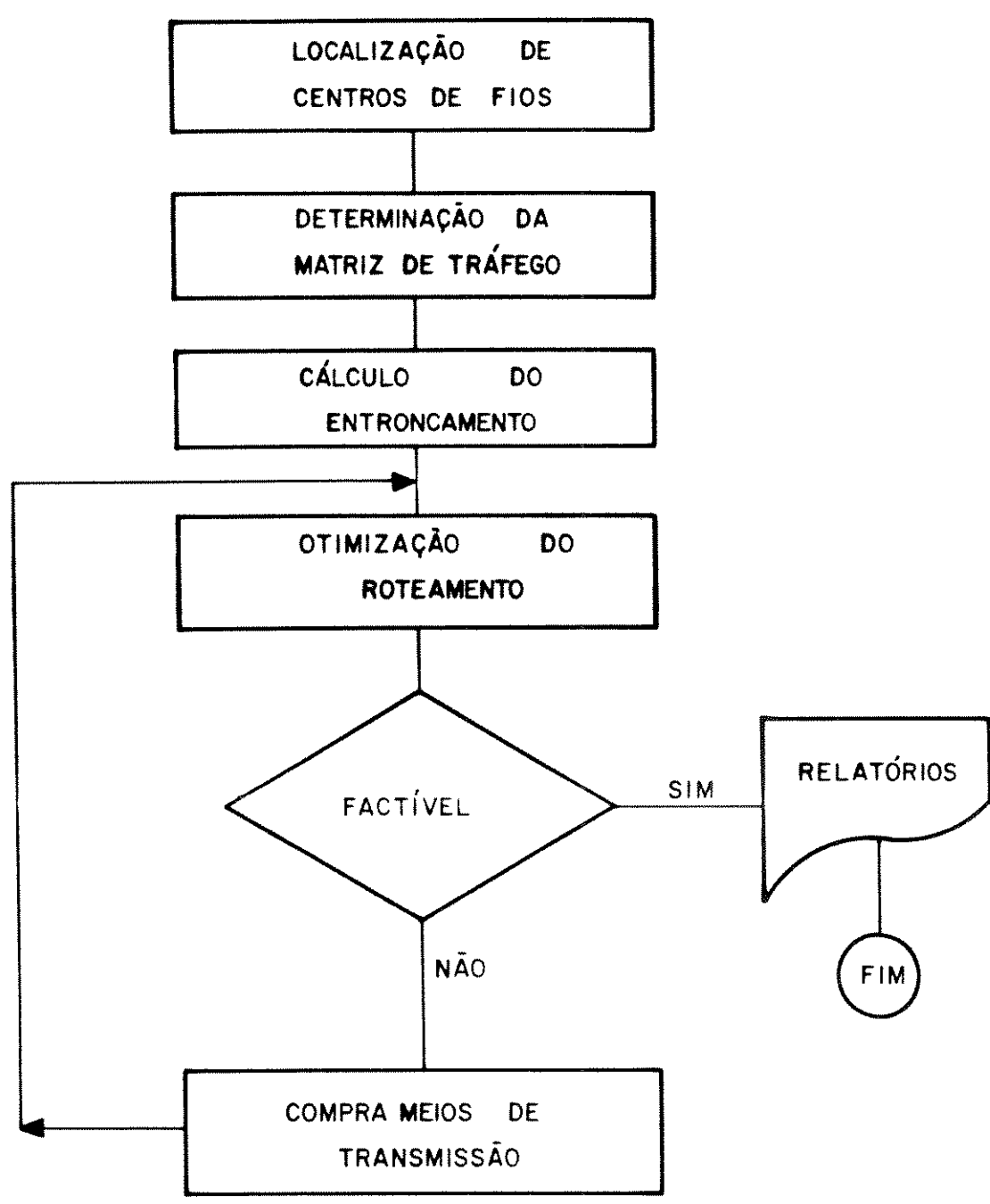
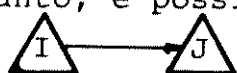


Figura 2.1 - Esquema Clássico adotação no planeamento da rede de troncos

II.3. A ETAPA DE OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO

Na determinação da Matriz de Troncos, as Centrais existentes em uma estação são "agrupadas" em função das características do entroncamento na entrada e saída, constituindo os grupamentos de origem/destino de tráfego. A Matriz de troncos gerada corresponde à necessidade de circuitos telefônicos entre os vários grupamentos.

A cada ligação entre um par de grupamentos (G_i , G_j) associamos um produto p e uma demanda de troncos correspondente d^p . Portanto, é possível existirem vários produtos entre duas estações



. Para áreas telefônicas multi-estações o número de produtos a ROTEAR pode aumentar consideravelmente, tornando o problema de grandes dimensões. Como os vários produtos competem pelas mesmas facilidades existentes em cada arco da rede de troncos, a otimização do roteamento se caracteriza como um problema de Fluxo Multiproduto.

No tratamento da rede de troncos, os nós representam as estações telefônicas e os pontos de passagem (quando houver), e os arcos, as galerias de dutos. Os custos associados são proporcionais à distância no caso analógico, e ao número de pontos de regeneração no caso digital.

O atendimento das demandas, com menor custo, requer que se adote técnicas de caminhos mínimos entre cada par de estações. A associação dos caminhos obtidos com os meios de transmissão disponíveis, gera o conjunto de ROTAS por onde as demandas devem ser escoadas. O problema é determinar, dentro deste conjunto de rotas, aquelas que atendam às características técnicas de atenuação (mínima e máxima) e resistência ôhmica (máxima) de cada ligação (G_i , G_j), definindo as ROTAS FACTÍVEIS para cada demanda.

O problema de Otimização do Roteamento consiste, portanto, em promover o escoamento das demandas, utilizando como recursos comuns as disponibilidades dos meios de transmissão existentes em cada arco da rede de troncos, de modo a minimizar o custo total de transmissão (compra de meios, equipamentos e operação da rede).

II.4. A FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ROTEAMENTO

É comum abordar problemas deste tipo utilizando-se uma formulação NÓ-ARCO, onde a clássica matriz de incidência descreve adequadamente a rede [13]. Entretanto, devido às dimensões que pode assumir um problema de fluxo multiproduto, optamos por uma formulação Arco-caminho [14] para descrição da rede.

Como visto anteriormente, para cada produto p , entre dois grupamentos (G_i, G_j), está associado um conjunto de rotas factíveis, denotado por $R(p)$; cada rota r é caracterizada por um caminho k e um meio de transmissão m . A parcela da demanda d^p escoada pela rota $r \in R(p)$ é denominada FLUXO x_r , que expressa a quantidade de circuitos (pares de fios, sistemas PCM...) utilizados em cada rota.

Da forma como foi exposto, duas restrições são colocadas ao problema de roteamento:

- . utilização dos meios de transmissão disponíveis nas galerias.

- . satisfação das demandas de circuitos telefônicos entre os grupamentos.

É fácil notar que o atendimento à segunda restrição pode indicar a necessidade de compra de meios de transmissão para as galerias.

Para maior facilidade no entendimento do problema, a estrutura das restrições e a construção da formulação serão apresentadas através de um exemplo, a rede da figura 2.2, com as seguintes características:

- . existência de dois tipos de cabos (C_1, C_2) para escoamento das demandas.

- . o centro de fios A comporta dois tipos de centrais de características técnicas diferentes, devendo ser desdobrado em dois grupamentos A1 e A2 para fins de geração de produtos.

. a tecnologia de comutação e transmissão utilizada é analógica.

- . $\triangle$ indica um Centro de fios
- . $\bigcirc$ indica um ponto de passagem
- . g_i indica a galeria i

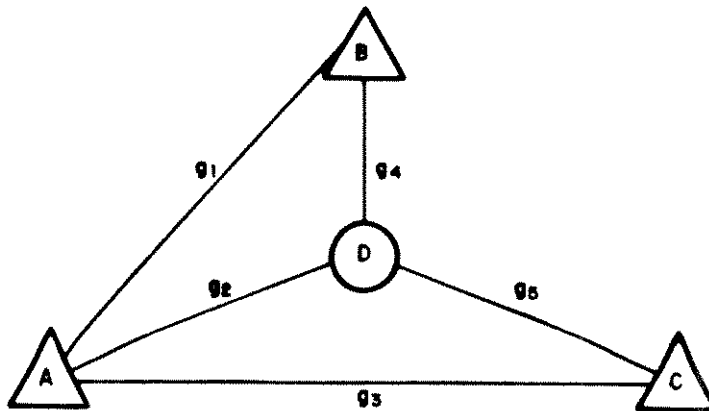


Figura 2.2 - Rede de exemplo

Na formulação adotada para o problema, cada arco do sistema de restrições corresponde à associação de uma galeria da rede e um meio de transmissão, gerando a rede da figura 2.3.

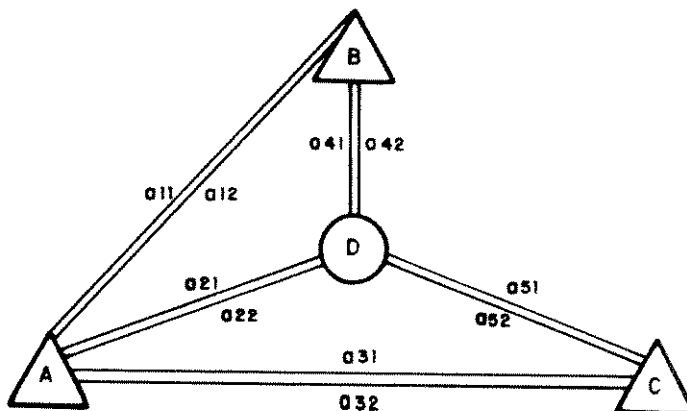


Figura 2.3 - Rede utilizada na formulação

onde a_{im} indica o arco correspondente à galeria i e meio m .

A tabela I abaixo indica os caminhos existentes entre cada par de centros de fios.

DE - PARA	Nº DO CAMINHO	GALERIAS
A - B	1	1
A - B	2	2,4
A - C	3	3
A - C	4	2,5
B - C	5	4,5

Tabela I - Descrição dos caminhos

A Tabela II constitui um inventário de todas as rotas factíveis admitidas no exemplo.

PRODUTOS p	GRUPAMENTOS (G_i, G_j)	CAMINHOS K	ROTAS FACTÍVEIS	
			Rota= r Cabo= c	ARCOS
1	A_1, B	1	1 C_1	a_{11}
			2 C_2	a_{12}
2	A_2, B	2	3 C_1	a_{21} e a_{41}
			4 C_1	a_{11}
		2	5 C_2	a_{12}
			6 C_1	a_{21} e a_{41}
3	A_1, C	3	7 C_2	a_{22} e a_{42}
			8 C_1	a_{31}
4	A_2, C	3	9 C_1	a_{31}
			10 C_2	a_{32}
		4	11 C_1	a_{21} e a_{51}
5	B, C	5	12 C_1	a_{41} e a_{51}

Tabela II - Rotas Factíveis

Há, evidentemente, rotas não factíveis como, por exemplo, aquela que transporta o produto 1 pelo caminho 2 utilizando o cabo C_2 . Há também arcos que nunca são utilizados, como o arco a_{52} que corresponderia ao cabo C_2 lançado na galeria 5.

Vê-se também que diferentes rotas competem pelos mesmos arcos, por exemplo, os fluxos 11 e 3 competem pelo arco a_{21} .

Note que a 4ª coluna da TABELA II descreve os conjuntos $R(p)$; por exemplo $R(2) = \{4,5,6,7\}$

As informações contidas na tabela II são adequadas para descrever as restrições de utilização de cobre nas galerias. Para tanto, consideremos uma MATRIZ A onde cada linha é um arco e cada coluna é uma rota factível, a qual está associada um caminho e um meio de transmissão, e suponhamos conhecida s_a , a disponibilidade ou sobra de pares no arco a. Para o exemplo em questão, a matriz A tem a seguinte forma:

ARCOS/LINHAS													
Nº=a	EXPLICAÇÃO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	a_{11}	1			1					1			
2	a_{12}		1			1							
3	a_{21}			1			1					1	
4	a_{22}							1					
5	a_{31}								1	1			
6	a_{32}										1		
7	a_{41}			1			1						1
8	a_{42}							1					
9	a_{51}											1	1

Figura 2.4 - Matriz A arco-caminho

A matriz A, chamada arco-caminho, é tal que o elemento A_a^r da linha a coluna r se caracteriza por:

$$A_a^r = \begin{cases} 1 & \text{se o arco "a" participa da rota factível "r"} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Se y_a representa o número de pares de fios comprados para o arco a , então o fluxo x_r em cada rota factível deve satisfazer:

$$Ax \leq s + Y \quad (2.1)$$

com : $x = \{x_r\}, r = 1 \text{ a } 12$ Vetor de fluxos
 $s = \{s_a\}, a = 1 \text{ a } 9$ Vetor de disponibilidade
 $y = \{y_a\}, a = 1 \text{ a } 9$ Vetor das compras

ou, com a introdução das variáveis de folga t :

$$Ax - y + t = s$$

$$[A \begin{smallmatrix} I \\ -I \end{smallmatrix} + I] \begin{bmatrix} x \\ y \\ t \end{bmatrix} = s \quad (2.2)$$

As restrições de atendimento da demanda de circuitos telefônicos são mais simples, e para o produto 2, por exemplo, se escreve:

$$x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = d^2$$

e de maneira mais geral

$$\sum_{r \in R(p)} x_r = d^p \quad (2.3)$$

O problema de roteamento envolve custo de compra e de ligação de pares de fios (operação). Numa perspectiva linear [15] [16], a função f de custos se escreve:

$$f = \sum_{r=1}^{12} \partial_r x_r + \sum_{a=1}^9 \gamma_a y_a \quad (2.4)$$

com: ∂_r - em Cz\$/par é custo da ligação no fluxo x_r
 γ_a - em Cz\$/par é custo da compra para o arco a .

Define-se, então um modelo de programação matemática do tipo:

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimizar } f = \sum_{r=1}^{12} \alpha_r x_r + \sum_{a=1}^9 \gamma_a y_a \\ \text{s.a} \\ \left[\begin{array}{c|c|c} A & I & \\ \hline & & -I \end{array} \right] \begin{bmatrix} x \\ t \\ y \end{bmatrix} = s \\ e^p x^p = d^p \quad p = 1 \text{ a } 5 \\ x \geq 0 \quad t \geq 0 \quad y \geq 0 \end{array} \right.$$

$$\text{onde } e^p = [1 \ 1 \ \dots \ 1] \\ x^p = \{x_r\} \quad r \in R(p)$$

e cuja estrutura é própria à utilização do método Generalized Upper Bound (GUB), adaptado ao planejamento do roteamento em redes telefônicas urbanas [17].

II.5. ESTUDO DO ROTEAMENTO COM SEGURANÇA

Dentro da metodologia adotada para o planejamento a longo prazo de redes urbanas, em que se procura evoluir para uma situação alvo no ano horizonte, torna-se indispensável a consideração dos efeitos da digitalização da rede.

No problema de roteamento, o crescimento da utilização dos equipamentos de comutação digital induzem, naturalmente, a necessidade de meios de transmissão digital para enfeixamento de troncos. As características concentradoras destes meios, principalmente os de ordem superior (fibras ópticas, etc), exigem uma melhoria dos níveis de confiabilidade das comunicações. Esta melhoria pode ser alcançada introduzindo-se aspectos de segurança da transmissão na rede de entroncamento.

No que se refere ao problema de roteamento, existem duas formas de se considerar os aspectos de segurança [18].

- . Estabelecimento de uma rede de reserva

- . Efetuar um multiroteamento para as demandas de troncos envolvidos.

Face ao elevado investimento inicial, exigido na construção de uma rede de reserva, além de provocar grandes ociosidades, optou-se, neste estudo, por efetuar o multirroteamento das demandas. O grau de multirroteamento é dado pelo número de caminhos diferentes por onde a demanda é escoada e pelo nível de segurança desejado. Se forem adotados, no mínimo, dois caminhos, com 50% de segurança, tem-se um caso de bi-rroteamento, onde o ideal seria alocar uma parcela ($d^P/2$) em cada caminho [19].

Há duas propostas básicas de modificações no modelo de roteamento (P) para incorporar os aspectos de segurança:

a) forçar o aparecimento do multirroteamento, fixando restrições adicionais.

b) sugerir o aparecimento do multirroteamento através de penalizações na função objetivo.

Soluções multirroteadas factíveis podem apresentar custos exagerados (proposta a); este aspecto fez com que se adotasse uma estrutura de custos linear por partes para a função objetivo (proposta b).

Esta abordagem via função objetivo, além de atingir níveis de segurança muito próximos do desejado, permite considerar em cada período de planejamento, o roteamento para a demanda total da rede, levando em conta o acervo já existente. Este tipo de abordagem, sem limitações quanto a variações no roteamento já implantado, pode provocar alterações significativas na estrutura atual.

O tratamento do problema de segurança da transmissão por multirroteamento requer, de início, a determinação de caminhos disjuntos entre cada par de estações que compõe a rede, por onde as demandas devem ser escoadas. A idéia de escoar uma demanda d^P com um grau n de multirroteamento faz com que se procure alocar em cada caminho disjunto uma quantidade a mais próxima possível de (d^P/n), buscando atingir o nível de segurança desejado.

A metodologia adotada para otimização do Roteamento com segurança apresenta, devido a formulação arco-caminho adotada no

tratamento da rede, uma estrutura de restrições do tipo GUB. O nível de segurança estabelecido, é alcançado através de penalizações convenientes na função objetivo.

O modelo matemático, GUB com critério linear por partes, desenvolvido, representa uma melhoria em relação aos procedimentos computacionais utilizados na resolução do problema clássico de roteamento, uma vez que é possível considerar:

. o roteamento da expansão de demanda verificada de um período de planejamento para outro, sem alterações na estrutura já implantada. Os programas existentes tratam o problema desta forma.

. o roteamento para a demanda total da rede, em cada período de planejamento, respeitando-se as parcelas de variações admitidas no roteamento já implantado.

O procedimento utilizado na consideração dos aspectos de segurança do problema de roteamento pode ser resumido nos seguintes passos:

- (1) determinação de caminhos disjuntos entre cada par de estações
- (2) identificação de como a demanda atual é roteada.
- (3) identificar, dentre os caminhos disjuntos determinados, aqueles já pertencentes à atual estrutura do roteamento.
- (4) estabelecer, para os caminhos por onde a demanda atual é roteada e que não pertencem ao elenco de caminhos disjuntos, uma estrutura de custos e penalizações que permita a diminuição dos fluxos nele roteados e dificulte a passagem de unidades adicionais.
- (5) adotar critérios de custos e penalizações para roteamento da demanda nos caminhos disjuntos, visando alcançar o nível de segurança estabelecido.

II.6. A ESTRUTURA DE CUSTOS E PENALIZAÇÕES

A partir dos passos mencionados no item anterior, elaboramos duas rotinas (CUSTO 1, CUSTO 2) para construção da estrutura de custos e penalizações que, em princípio, são individualizados por rota.

Na rotina CUSTO 1, primeira etapa da estrutura de custos e penalizações, as rotas são consideradas independentes. A estrutura de custos para as rotas pertencentes aos caminhos disjuntos, é montada em função do custo de ligar os circuitos (custo operacional) e das penalizações adotadas na procura do nível de segurança estabelecido; para as demais, é função das parcelas de variações admitidas no roteamento em cada caminho.

Na rotina CUSTO 2, segunda etapa da estrutura de custo e penalizações, as interdependências entre rotas diferentes, pertencentes a um mesmo caminho e transportando o mesmo produto, são tratadas, de modo a verificar se o roteamento obtido ao final da primeira etapa satisfaz as parcelas de variações admitidas em cada caminho e o nível de segurança estabelecido [20].

Para maior facilidade de entendimento, as funções de custo construídas nas rotinas CUSTO1 e CUSTO2 serão mostradas utilizando-se como exemplo as seguintes características:

- . produto p com demanda d^p de 100 circuitos.
- . dois caminhos disjuntos, k_1 e k_2 , utilizados no atendimento da demanda.
- . existência de duas rotas factíveis em cada caminho gerando, portanto, duas rotas, r_1 e r_2 , no caminho k_1 e duas rotas, r_3 e r_4 , no caminho k_2 .

As funções de custo das rotas montadas na rotina CUSTO1 são mostradas nas figuras 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8.

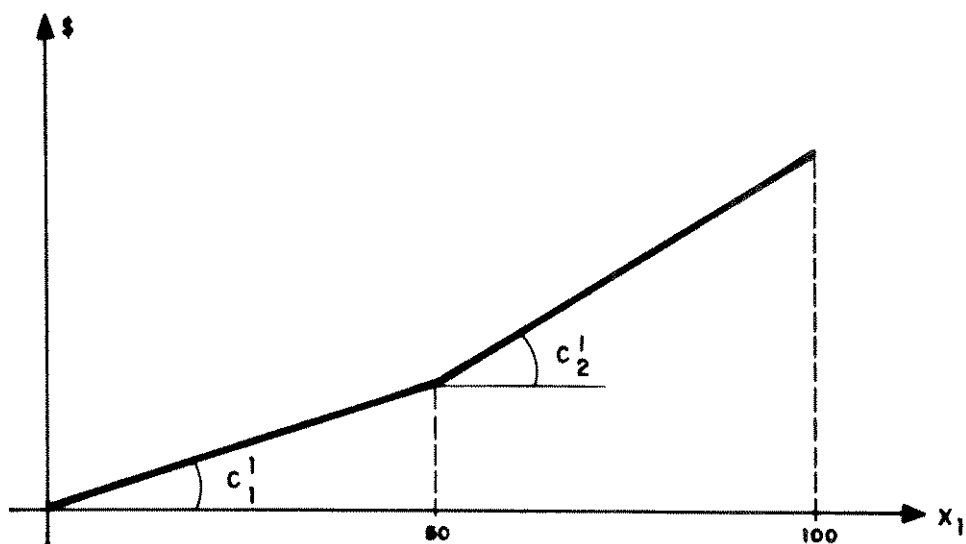


Figura 2.5 - Função de custo para a rota r_1 montada pela rotina CUSTO1

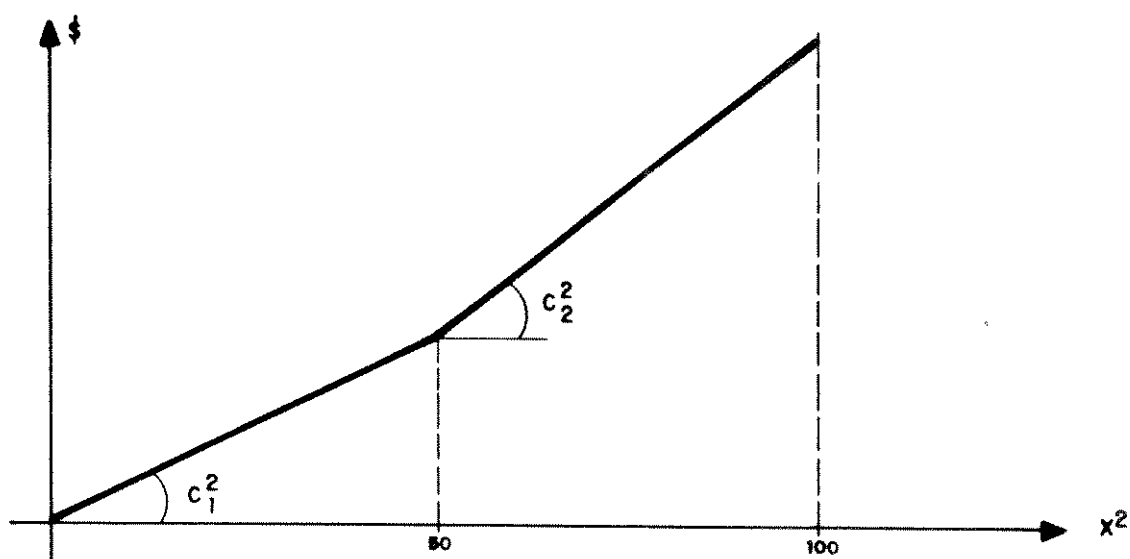


Figura 2.6 - Função de custo para a rota r_2 montada pela rotina CUSTO1

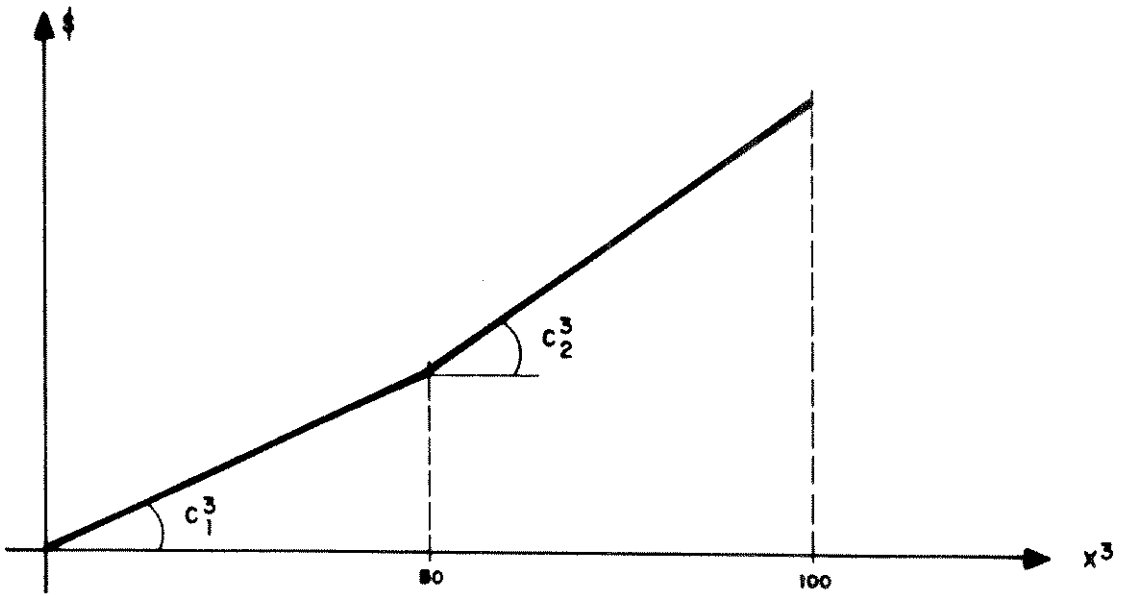


Figura 2.7 - Função de custo para a rota r_3 montada pela rotina CUSTO1

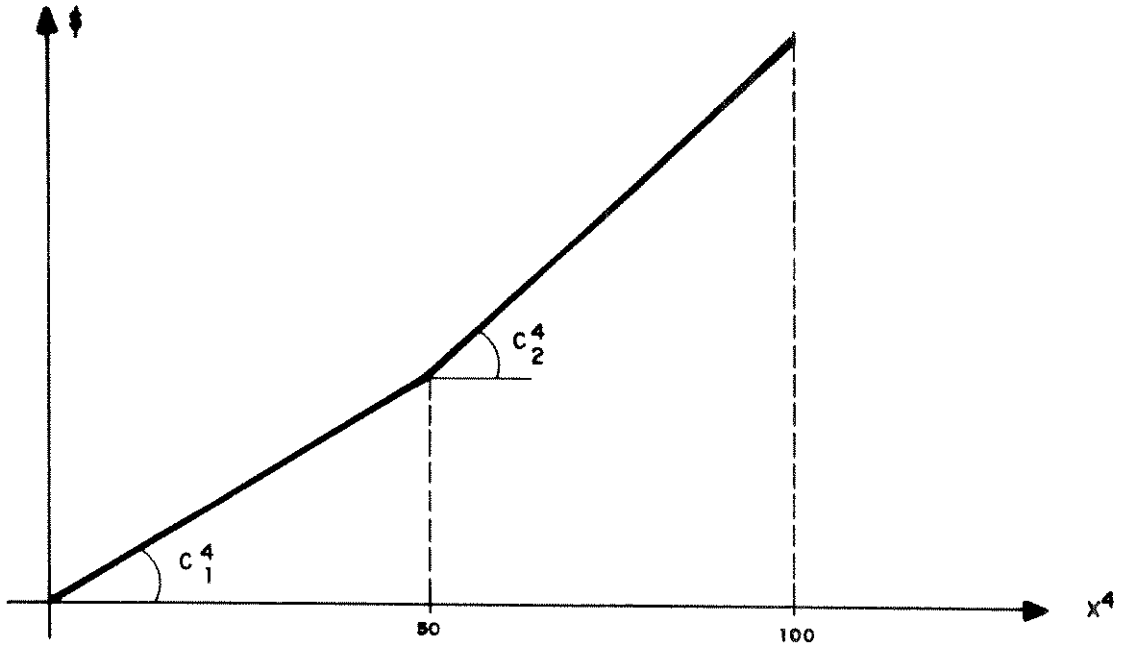


Figura 2.8 - Função de custo para a rota r_4 montada pela rotina CUSTO1.

onde:

C_1^j - indica o custo de ligar enlaces na rota r_j

C_2^j - indica a penalização adotada na rota r_j

x_j indica o fluxo na rota j após o método GUB linear por partes com os custos da rotina CUSTO1.

Com as funções de custo montadas desta forma, é executado o programa de otimização correspondente ao método GUB para problemas com critério linear por partes.

Se, após esta etapa, forem obtidos os seguintes resultados:

$$x_1 = 40$$

$$x_2 = 30$$

$$x_3 = 20$$

$$x_4 = 10$$

verifica-se que no caminho k_1 (rotas r_1 e r_2) está sendo roteada uma parcela da demanda maior do que a desejada para o bi-roteamento.

Com base nos fluxos obtidos, a rotina CUSTO2 monta as funções de custo para a segunda etapa do procedimento computacional, gerando as funções de custo das figuras 2.9, 2.10.

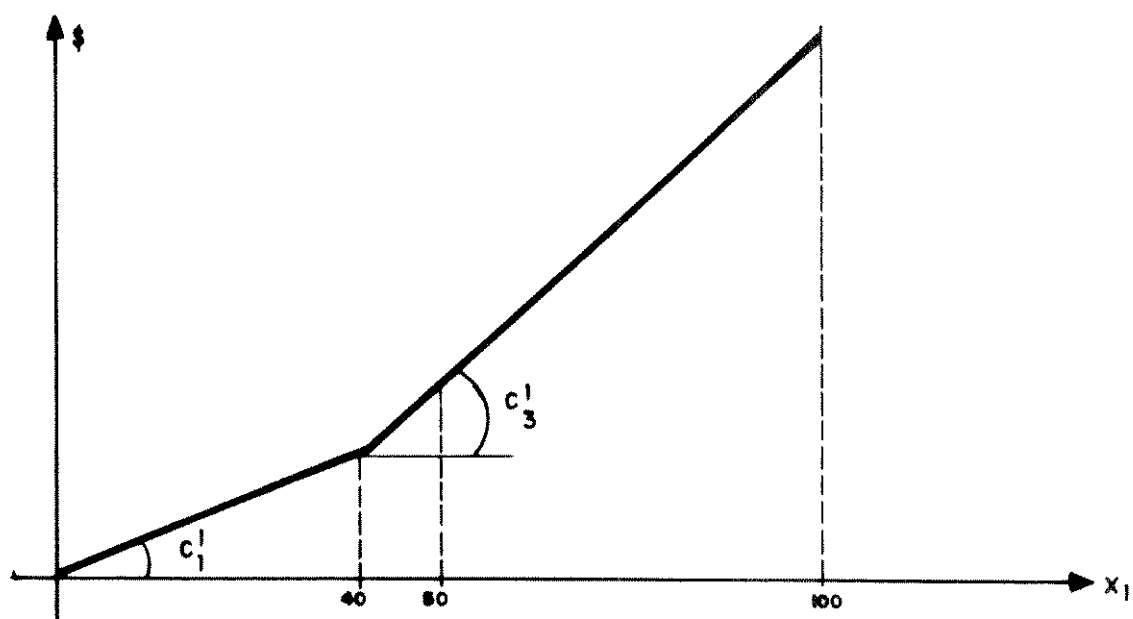
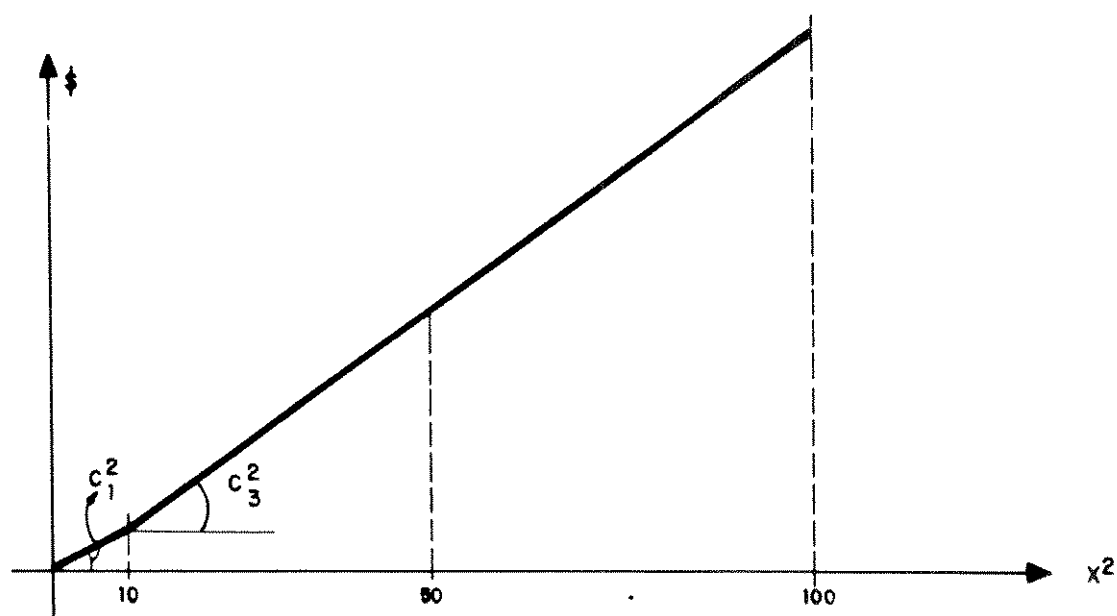


Figura 2.9 - Função de custo para rota r_1 montada pela rotina CUSTO2.



Função 2.10 - Função de custo para a rota r_2 montada pela rotina CUSTO2

onde C_j^j indica a penalização adicional na rota j .

Para as rotas r_3 e r_4 são adotadas as mesmas funções de custo das figuras 2.7 e 2.8.

É importante observar que o exemplo anterior ilustra apenas uma das situações possíveis.

Na montagem das funções de custo para as rotas r_1 e r_2 na rotina CUSTO2, foi adotado como critério básico efetuar a diminuição de fluxo no caminho correspondente, partindo das rotas de maior custo. Na prática, isto corresponde a uma análise rigorosa do tipo pós-otimização.

As demandas analógicas e digitais são roteadas de maneira independente. Para ambas são válidas todas as considerações descritas anteriormente. Há apenas uma diferenciação no que se refere aos custos das variáveis de compra em cada arco, que são lineares para o caso analógico e lineares por partes para o caso digital.

O modelo matemático para o problema de otimização do roteamento com segurança pode, em função do exposto, ser colocado na forma:

$$(PR) \left\{ \begin{array}{ll} \text{MIN } F = \sum_{j=1}^{NR} f_j (x_j) + \sum_{a=1}^M a_a (y_a) & (i) \\ \text{S.a:} & \\ [A \quad +I \quad -I] \begin{bmatrix} x \\ t \\ y \end{bmatrix} = s & (ii) \\ e^p \quad x^p = d^p \quad p= 1 \dots NPROD & (iii) \end{array} \right.$$

com:

- NR - número total de rotas
- M - número total de arcos da matriz arco-caminho
- A - matriz arco caminho (M, NR)
- I - matriz identidade (M,M)
- R(p)- conjunto de rotas factíveis do produto p

NPROD - número total de produtos

$f_j(x_j)$ e $g_a(y_a)$ - funções convexas lineares por partes

$$e^P = [1, 1, \dots, 1]$$

$$x^P = \{x_r\}, \quad r \in R(p)$$

Este tipo de modelo requer, para sua resolução, a extensão de conceitos de programação linear, método simplex, para funções objetivos lineares por partes [21] [22] [23] [24].

II.7. FLEXIBILIDADE DO MODELO

Alguns aspectos não contemplados na forma clássica de resolução do problema de roteamento podem, a partir da formulação descrita pelas expressões (i), (ii) e (iii), ser incorporados ao modelo. Dentre estas particularidades destacamos:

a) diminuição da demanda de troncos entre alguns agrupamentos origem/destino, de um período de planejamento para outro.

Este aspecto do problema, importante no estudo evolutivo do roteamento a longo prazo [25], pode ocorrer devido a introdução na rede de novos centros de fios e/ou ampliação das estações existentes, que definem uma nova estrutura de zonas de filiação para as estações.

b) emenda de cabos para o atendimento da demanda de um certo produto ao longo de um caminho físico.

c) competição entre as transmissões analógica e digital por um certo tipo de cabo, para algumas demandas.

II.8. A ESTRUTURA COMPUTACIONAL

O procedimento computacional desenvolvido, sistema PORRUS (Programa de Otimização do Roteamento em Redes Urbanas com Segurança), é constituído de um conjunto de subrotina agrupadas

convenientemente em uma ESTRUTURA MODULAR. Este tipo de organização do programa permite ao usuário criticar os resultados intermediários e, se necessário, realizar vários testes com um determinado módulo.

Os dados de entrada utilizados no programa são:

- Localização dos centros de fios
- Rede de troncos: descrita em termos de nós (estações + pontos de passagem) e dados relativos às galerias de dutos como, por exemplo, comprimento e disponibilidade de meios de transmissão.
- Demanda de troncos e/ou sistemas PCM entre os vários grupamentos origem/destino.
- Meios de transmissão utilizados: suas características em termos de atenuação, resistência ôhmica e custos.
- Características das ligações entre os vários grupamentos origem/destino.

Os dados relativos à rede permitem determinar os caminhos (mínimos, disjuntos de soma mínima, p-caminhos mais curtos) entre cada par de estações e que serão adotados na otimização do roteamento. Em função dos caminhos obtidos, da topologia da rede existente e da infra-estrutura implantada, é permitido ao usuário definir outros caminhos a serem utilizados. Esta etapa constitui o MÓDULO I do programa.

A partir dos dados de entroncamento e dos resultados obtidos no MÓDULO I, há a necessidade de se definir os meios factíveis para o atendimento das várias demandas. Determina-se desta forma, as rotas factíveis para cada produto e a separação das demandas analógicas e digitais que serão roteadas. Esta etapa, MÓDULO II, fornece como resultados:

- . Matriz de restrições para o módulo de otimização.
- . Uma solução básica inicial factível
- . Arquivos intermediários utilizados nos demais módulos do programa.

O procedimento de otimização, MÓDULO III, tem como rotina principal o método GUB linear por partes. A estrutura de custos e penalizações da função objetivo é montada em duas etapas (CUSTO 1 e CUSTO 2) onde se procura alcançar o nível de segurança estabelecido.

No MÓDULO IV do programa são emitidos os relatórios finais, um relativo ao roteamento de cada produto e outro que fornece o carregamento, em termos de utilização, de cada arco da rede de troncos.

O diagrama de blocos da figura 2.11 resume o procedimento computacional descrito.

É fácil mostrar que a montagem da matriz arco-caminho é próxima ao processo de geração de colunas do algoritmo Dantzig - Wolfe [53].

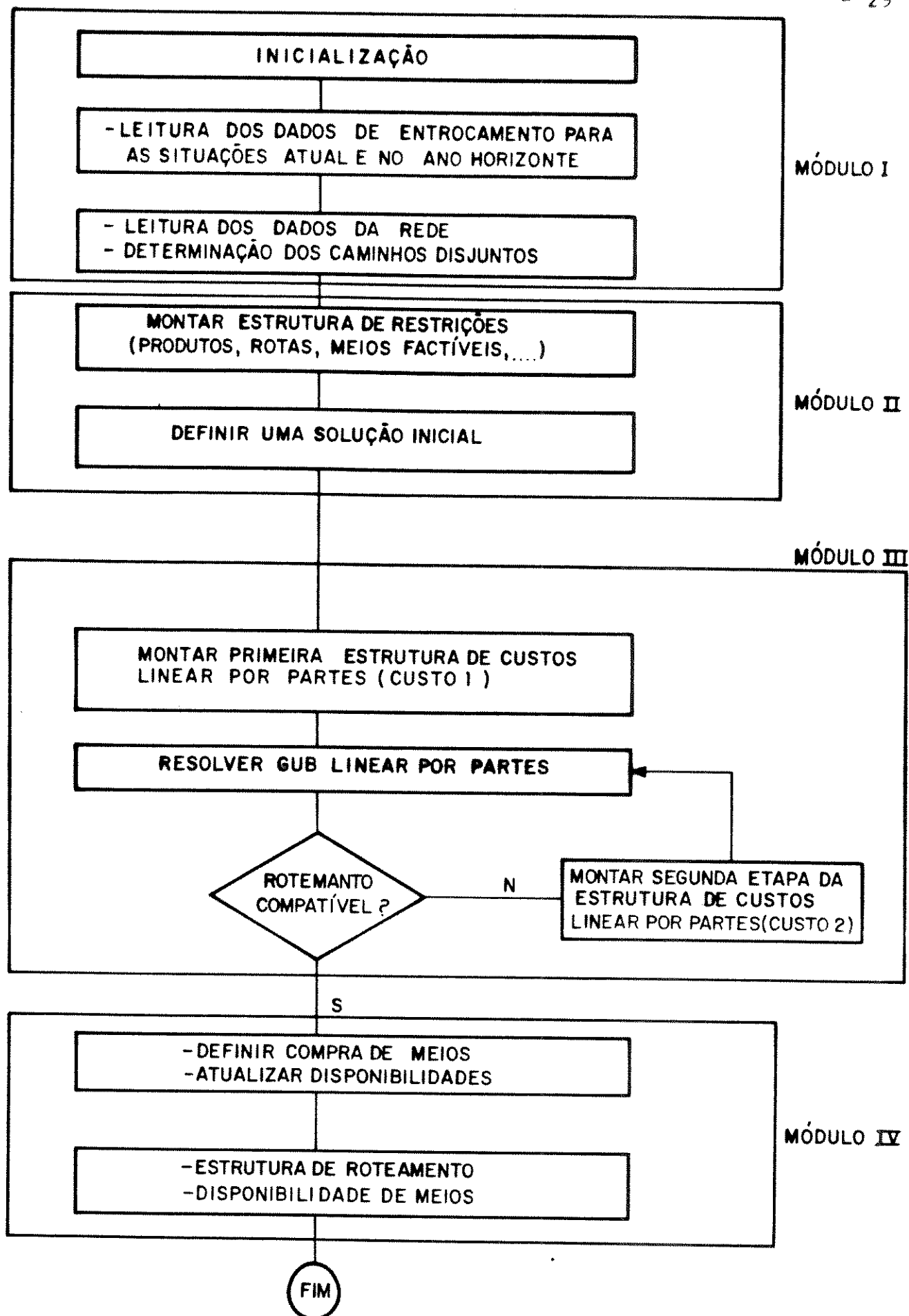


Figura 2.11-Diagrama de blocos do programa de determinação do roteamento com segurança

CAPÍTULO III

OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO DE TRONCOS EM
HORIZONTES DE LONGO PRAZO

III.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentamos o desenvolvimento de uma metodologia para otimização do roteamento de troncos em horizontes de longo prazo, que pode ser utilizada em evoluções analógicas digitais ou mistas (parte analógica, parte digital).

O desenvolvimento de novas tecnologias para comutação/transmissão telefônicas, e sua utilização na rede de troncos, requer a utilização de ferramentas computacionais, auxiliares ao planejamento, capazes de sugerir estratégias de evolução que minimizem o custo da solução global para cada CENÁRIO TECNOLÓGICO estabelecido.

Como mostrado no capítulo anterior, o problema de roteamento pressupõe como dados de entrada, dentre outros, a localização dos centros de fios e a demanda de troncos. O nível (percentual) de digitalização, o tipo de equipamento utilizado e o cronograma de implantação dos mesmos indicam, neste trabalho, o CENÁRIO TECNOLÓGICO em estudo.

A metodologia desenvolvida, PORULP (Programa de Otimização do Roteamento em redes Urbanas a Longo Prazo), constitui-se numa forma original de abordagem deste problema. Para cada CENÁRIO proposto, é adotado o seguinte procedimento computacional na obtenção da melhor solução:

I - Obter a configuração ótima do roteamento para o Ano Horizonte de Planejamento (AHP), que pode ou não considerar os aspectos de segurança da transmissão.

II - Promover a evolução do roteamento ao longo dos vários períodos de planejamento tomando como referência:

- . o roteamento ALVO do ano horizonte.
- . a estrutura do roteamento implantada no período anterior.

III- Obter o cronograma de custo mínimo para as compras dos equipamentos de transmissão considerando:

- . as necessidades em cada período (pares de fios, regeneradores, etc...) de cada arco da rede.
- . as modularidades dos equipamentos.
- . os dutos disponíveis em cada galeria.

O processo de otimização do roteamento, tanto no ano horizonte quanto na estratégia de evolução, tem como base as mesmas hipóteses adotadas na formulação do problema de roteamento com segurança apresentada no CAPÍTULO II:

- . utilização da formulação arco-caminho para o tratamento da rede, gerando uma estrutura de restrições do tipo Limite Superior Generalizado (GUB).
- . estabelecimento de uma função de custos convexa, linear por partes para o procedimento de Otimização.

Por se tratar de algo inovador, em relação aos procedimentos existentes para o planejamento da rede de troncos, apresentamos um detalhamento dos aspectos computacionais para a estratégia de evolução do roteamento e determinação do cronograma de compra de equipamentos de transmissão. No processo de evolução, adotamos procedimentos heurísticos na construção das funções de custos do problema de roteamento e um tratamento de Programação Dinâmica para a compra dos equipamentos.

O diagrama de blocos da figura 3.1 ilustra os passos da metodologia desenvolvida:

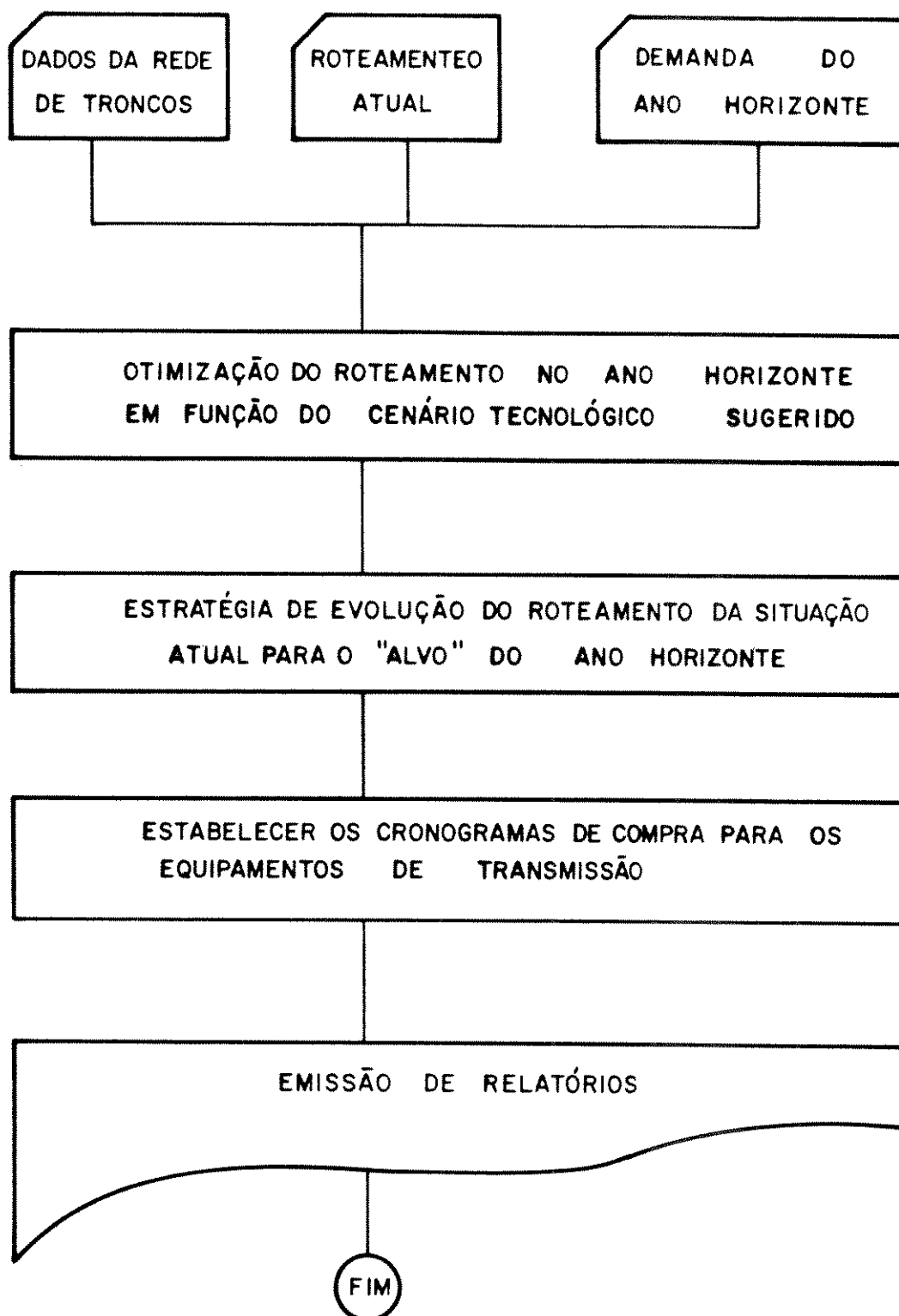


FIGURA 3.1 - Diagrama de Blocos do Sistema PORULP

III.2. OBTENÇÃO DO ROTEAMENTO "ALVO" NO ANO HORIZONTE

O roteamento "ALVO" do ano horizonte depende, de início, da definição quanto a consideração ou não dos aspectos de segurança da transmissão. Em ambos os casos, a obtenção dos caminhos é fundamental para a definição das ROTAS FACTÍVEIS de cada produto nos roteamentos analógico e digital. Se o problema for tratado sem considerar os aspectos de segurança da transmissão utiliza-se, entre cada par de estações, os p-caminhos mais curtos; se a segurança for considerada, há a necessidade de se determinar caminhos disjuntos de soma mínima entre as estações (dois para o caso de bi-roteamento).

Para fins de construção do modelo matemático representativo do problema e do acoplamento entre os roteamentos analógico e digital, são assumidas as seguintes hipóteses:

- H1: Roteamento entre grupamentos de Centrais digital ↔ digital, digital ↔ analógico, são efetuados por meios de transmissão digital.
- H2: Roteamento entre grupamentos de Centrais analógicas é, em princípio, atendido por meio analógico. Quando as restrições técnicas de atenuação e resistência ôhmica não forem satisfeitas, esta demanda é convertida em sistema PCM e agrupada à MATRIZ de Sistemas PCM.
- H3: Se o cabo empregado na transmissão digital for do tipo "especial" e utilizado de forma exclusiva, os roteamentos analógico e digital são independentes. O único acoplamento entre eles se dá no momento de efetuar as compras, uma vez que eles competem pelos mesmos dutos disponíveis nas galerias.
- H4: Se o roteamento digital utiliza os mesmos cabos de pares do roteamento analógico, a prioridade de uso da disponibilidade do cabo é para a transmissão analógica. Havendo sobra, esta é colocada como disponibilidade para a transmissão digital.

Definidos os caminhos e adotadas as hipóteses acima descritas, os dados de entroncamento são trabalhados possibilitando obter a MATRIZ de Restrições e os custos a serem utilizados em cada período de planejamento.

A determinação do roteamento "ALVO" do ano horizonte depende, portanto, da construção da estrutura de custos da função objetivo e que deverá levar em conta:

- . a consideração ou não dos aspectos de segurança da transmissão no roteamento do ano horizonte.
- . o roteamento já implantado.
- . as parcelas de variações admitidas no roteamento de cada produto.
- . a infraestrutura implantada em cada arco da rede, na definição das compras dos equipamentos de transmissão digitais.
- . a identificação se uma determinada rota, indicada para o Ano Horizonte, pertence ou não ao roteamento do ano inicial.

Para melhor compreensão, vamos apresentar as estruturas de custos mais usuais para cada caso, separadamente.

CASO 1: o roteamento "ALVO" leva em conta os aspectos da Segurança da transmissão:

Uma determinada rota indicada para o ano horizonte pode ou não pertencer à estrutura de roteamento já implantado.

Em caso afirmativo seu custo deve assumir a forma da figura 3.2

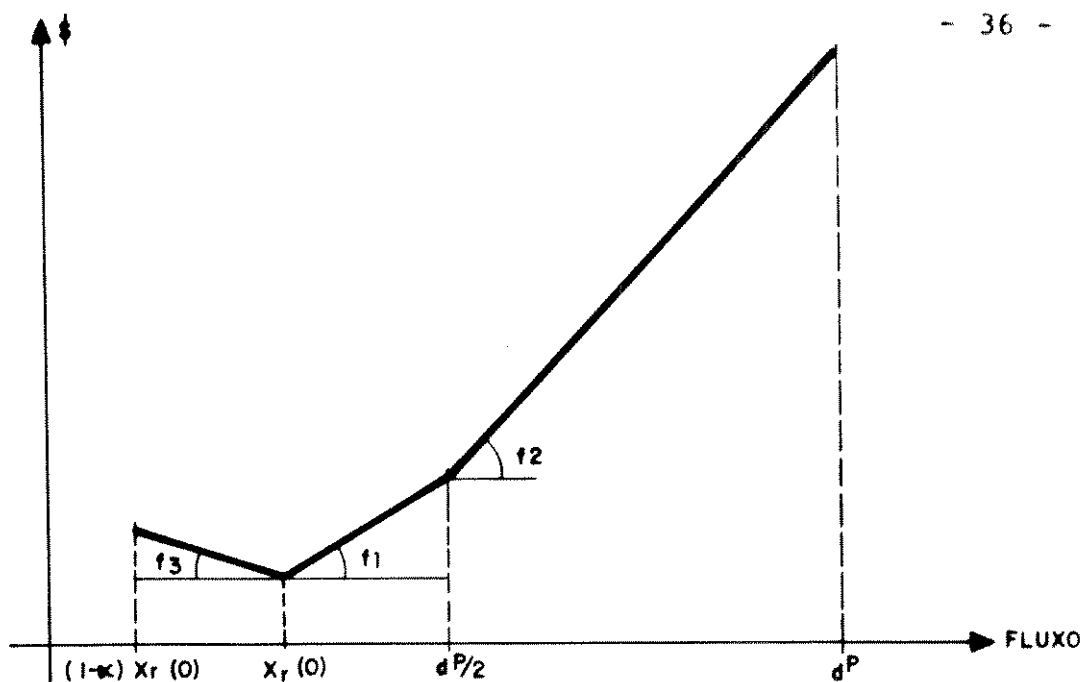


Figura 3.2 - Custo para uma rota indicada para o Ano Horizonte e já implantada

onde:

$x_r(0)$ - fluxo da rota r no ano inicial de planejamento

d^P - demanda do produto p no ano horizonte

α - parcela de variação admitida no roteamento já implantado

f_1 - custo de operação da rota (Cz\$/canal ou Cz\$/ Sistema PCM)

f_2 - custo de penalização (Cz\$/canal ou Cz\$/ sistema PCM)

f_3 - custo de desligar enlaces (Cz\$/canal ou Cz\$/sistema PCM)

Caso contrário, o custo da rota assume a forma da figura 3.3

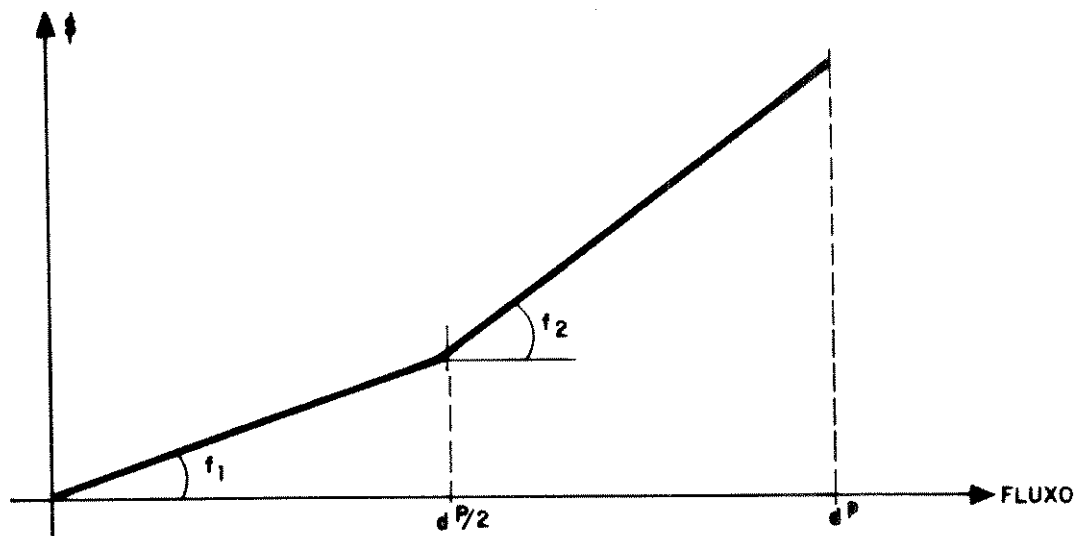


Figura 3.3 - Custo para uma rota indicada para o Ano Horizonte e ainda não implantada.

Pode ocorrer ainda que uma determinada rota pertencente à atual estrutura de roteamento não seja indicada para o ano horizonte. Neste caso o custo assume a forma da figura 3.4

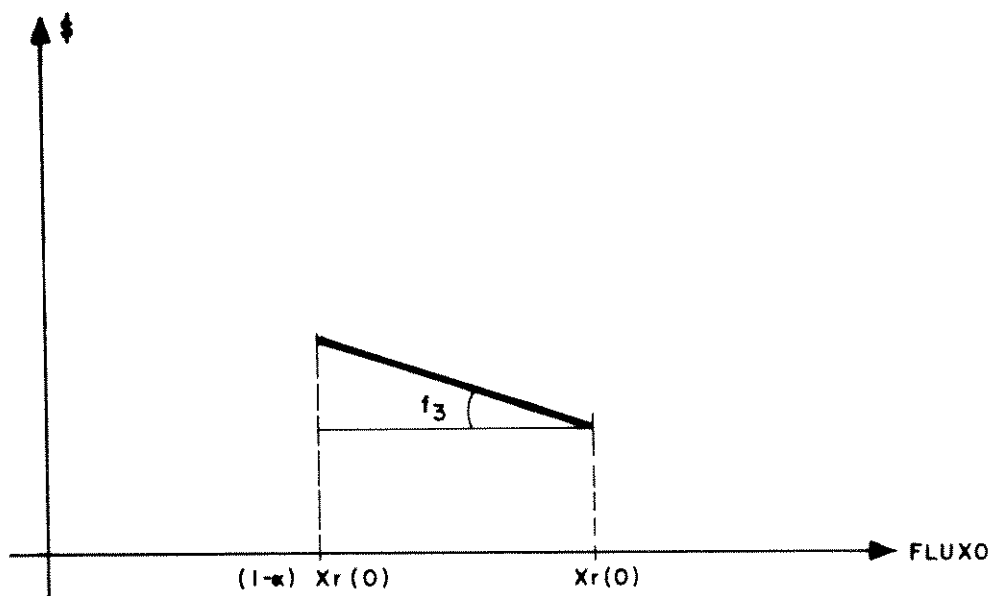


Figura 3.4 - Custo para uma rota já implantada e não indicada para o ano.horizonte

Como as compras indicam as necessidades de equipamentos de transmissão em cada arco, não considerando as modularidades dos mesmos, os custos adotados serão lineares para o caso analógico e linear por partes para o caso digital, assumindo a forma da figura 3.5.

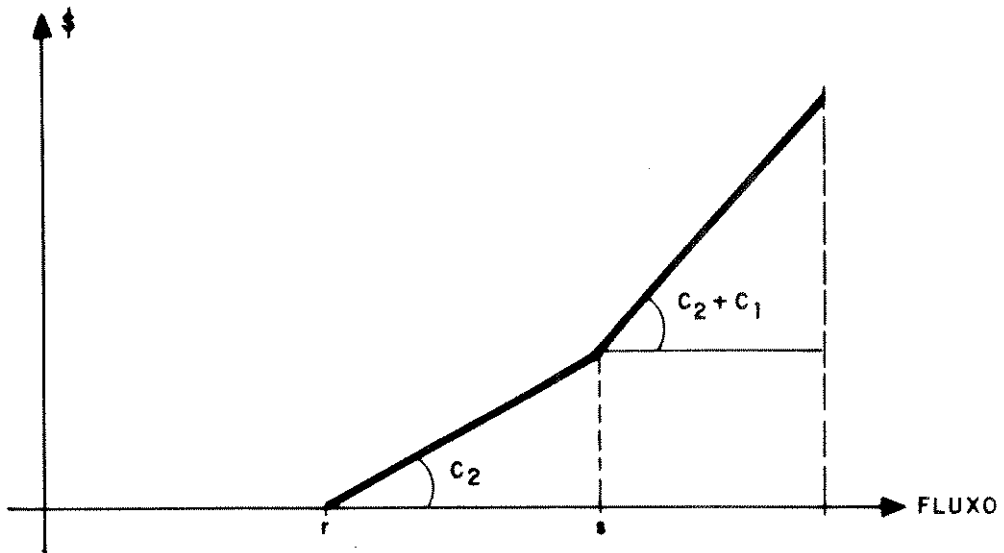


Figura 3.5 - Custo da variável de compra no caso digital

onde:

- r - quantidade de regeneradores existentes em cada ponto de regeneração da galeria.
- s - disponibilidade de pares de fios da galeria.
- C_1 - custo médio de um par de fios de um determinado tipo de cabo.
- C_2 - custo por regenerador utilizado na galeria.

Para obtenção do grau de segurança estabelecido, biroteamento no nosso modelo, onde se procura rotear em cada caminho disjuncto, uma parcela a mais próxima possível de $\frac{d^p}{2}$, torna-se necessário uma segunda etapa na montagem dos custos, onde os custos das rotas são ajustados de modo a se garantir as condições do biroteamento.

CASO 2: O roteamento "ALVO" não leva em conta os aspectos de segurança da transmissão.

Se uma determinada rota, indicada para o ano horizonte, já faz parte da estrutura atual do roteamento, seu custo assume a forma da figura 3.6.

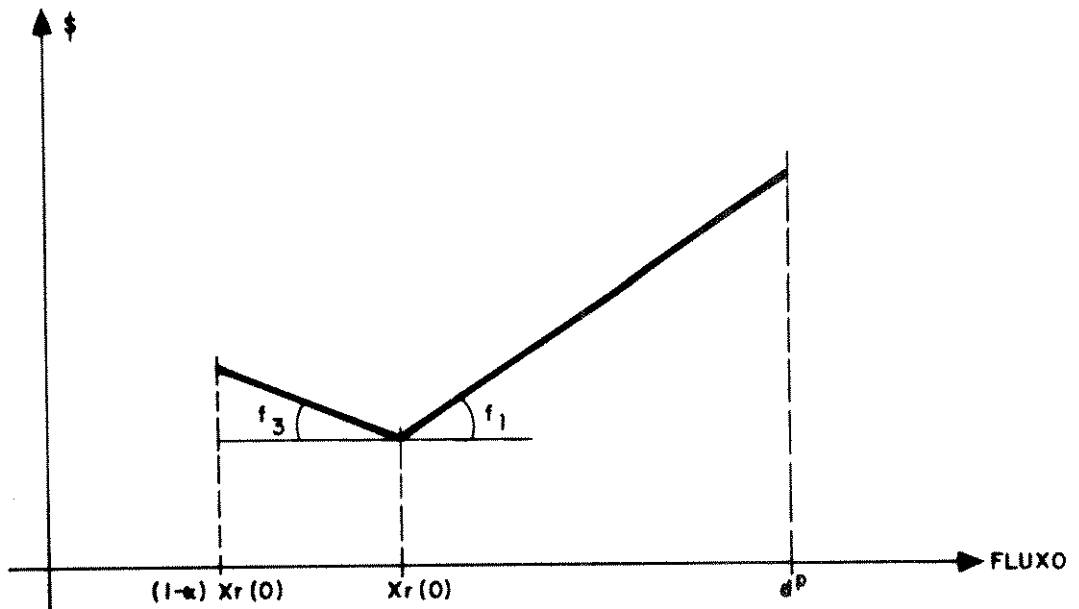


Figura 3.6 - Custo para uma rota indicada para o ano horizonte e já implantada

Caso contrário o custo assume a mesma forma da figura 3.4.

Para as variáveis de compra são válidas as mesmas considerações adotadas no caso anterior.

A determinação do roteamento "ALVO" do ano horizonte consiste, portanto, na resolução de um problema com restrições do tipo GUB e função objetivo convexa, linear por partes e aditivamente separável, construída de acordo com o procedimento heurístico descrito.

III.3. A EVOLUÇÃO DO ROTEAMENTO AO LONGO DO TEMPO

Obtido o roteamento "ALVO" do Ano Horizonte de Planejamento, torna-se necessário definir uma ESTRATÉGIA DE EVOLUÇÃO que procure, a partir da infraestrutura implantada no instante inicial do estudo, aproximar-se tanto quanto possível da situação de referência estabelecida. O roteamento ótimo em um determinado período K depende, dentre outros, dos seguintes dados:

- . roteamento "ALVO" do ano horizonte.
- . estrutura de roteamento implantada no período (K-1).
- . parcelas de variações admitidas no roteamento já implantado.
- . demanda a ser efetivamente roteada.

Além disso, para uma melhor compreensão do procedimento proposto, é importante destacar alguns aspectos incorporados ao modelo:

a) ao se obter o roteamento em cada período, é suposta a compra de equipamentos de transmissão (pares de fios, p.ex) indicada pelo programa, independente da sua modularidade. Isto faz com que a disponibilidade diminua durante a evolução, podendo tornar-se nula.

b) a rede de troncos sofre acréscimo de nós (implantação de novas estações) e arcos (construção de novas galerias) ao longo dos vários períodos de planejamento. Isto gera o aparecimento de novas demandas a serem roteadas e, possivelmente, o surgimento de novos caminhos entre centros de fios. Há conseqüentemente, o aumento do número de linhas (novas galerias) e/ou colunas (novos caminhos) do sistema de restrições. Este fenômeno é considerado quando da montagem das restrições para cada período.

c) o roteamento "ALVO" do ano horizonte pode conter algumas rotas relacionadas com caminhos não implantados em um certo período anterior. Com isso outras rotas podem, neste período, escoar um fluxo maior que o previsto para o ano horizonte. A adoção de parâmetros de flexibilidade na rede permite corrigir estas distorções.

Para que a ESTRATÉGIA DE EVOLUÇÃO possa contemplar todos os aspectos mencionados, optamos pela construção de procedimentos heurísticos para promover alterações convenientes, a cada período, na função objetivo do modelo. O processo de evolução consiste, portanto, de rodadas sucessivas do método GUB Linear por Partes (GUBLPP) adotado na formulação matemática do problema de roteamento.

É importante mencionar que a determinação do roteamento ótimo para um dado período, segue o procedimento clássico de tratamento do problema onde se realizam separadamente.

- roteamento da demanda de troncos (canais) para o caso analógico.
- roteamento da demanda de sistemas PCM para o caso digital.

Para processar as alterações na função objetivo, durante a evolução, de um período $(K-1)$ para um período K , e tendo como referência o "ALVO" do ano horizonte, adotamos a seguinte classificação para as rotas e as correspondentes estruturas de custos para os casos mais usuais:

a) Rotas de interesse: são as rotas que compõem a solução do problema na situação "ALVO" do ano horizonte e que já estão definidos no período K .

Se a rota já existe no período $(K-1)$, seu custo deve assumir a forma da figura 3.7.

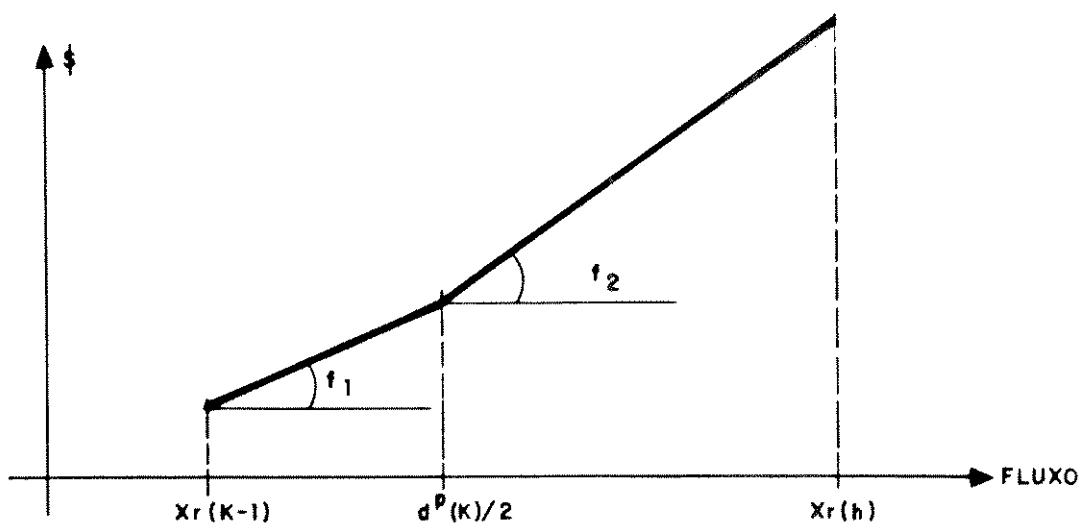


Figura 3.7 - Custo para rotas de interesse já existentes no período (K-1)

enquanto que para uma rota indicada a partir do período (K) seu custo será de acordo com a figura 3.8.

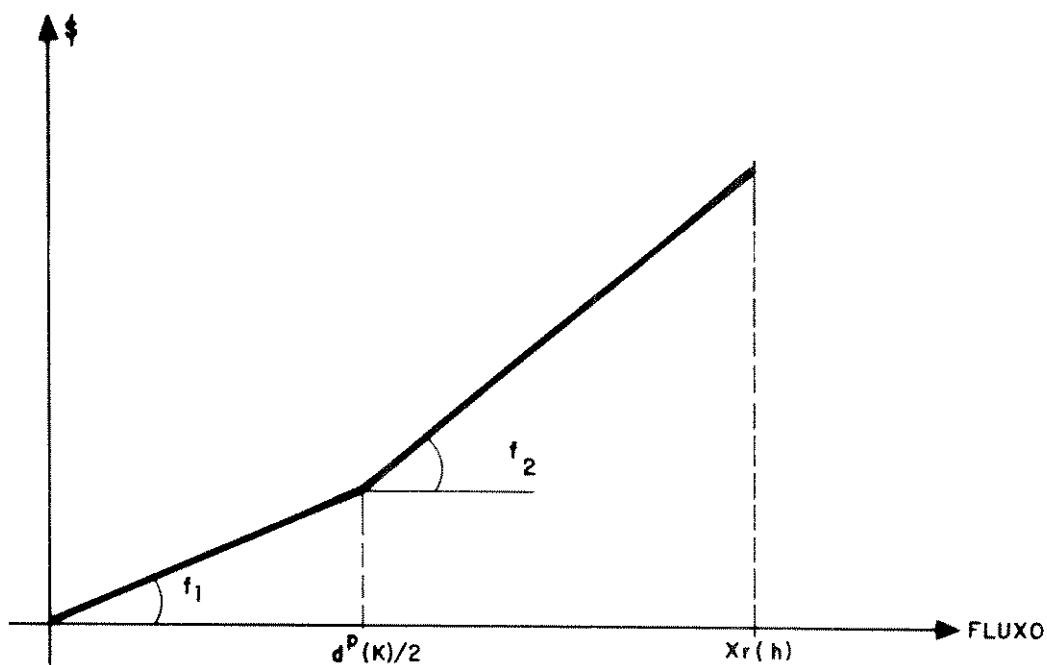


Figura 3.8 - Custo para rotas de interesse indicadas a partir do período K.

com:

- $x_r (k-1)$ - Fluxo da rota r no período $(K-1)$
- $d^p (k)$ - Demanda do produto p a ser roteado no período K
- $x_r (h)$ - Fluxo da rota r na situação "ALVO" do ano horizonte
- f_1 - Custo de operação da rota
- f_2 - fator de penalização adotado

b) Rotas de não interesse: são aquelas que existem num certo período de planejamento, mas não compõe a solução do problema na situação "ALVO" do ano horizonte. Neste caso o custo deve assumir a forma da figura 3.9.

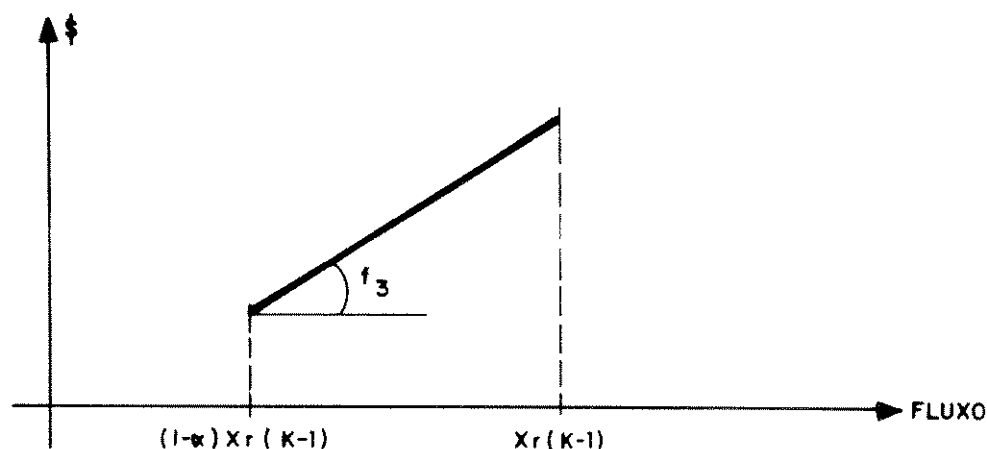


Figura 3.9 - Custo para rotas de não interesse

com:

- f_3 - incentivo à diminuição do fluxo na rota.
- α - parcela de variação admitida no roteamento já implantado

As evoluções analógica e digital são tratadas, em termos da construção da função objetivo, de maneira idêntica, a menos das variáveis de compra que no caso digital assume a forma da figura 3.10.

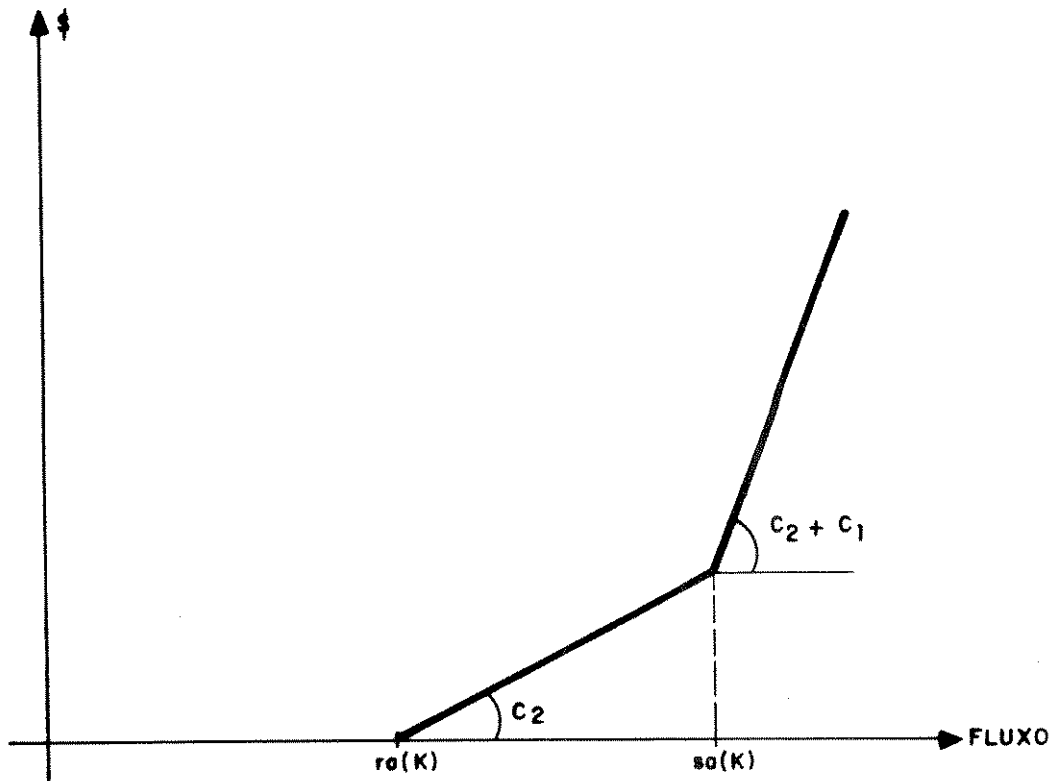


Figura 3.10 - Custo, adotado na evolução, para as variáveis de compra. (Caso digital)

onde:

$r_a(k)$ - quantidade de regeneradores existentes em cada ponto de regeneração da galeria a no período k.

$s_a(k)$ - disponibilidade de pares de fios.

C_1 - custo médio de um par de fios de um determinado tipo de cabo.

C_2 - custo por regenerador utilizado na galeria a.

O processo de evolução, portanto, executa duas tarefas fundamentais a cada período:

I - atualizar as disponibilidades, em cada arco, para os

roteamentos analógico e digital.

II - montar a estrutura de custos, de acordo com o procedimento heurístico apresentado.

O diagrama de blocos da figura 3.11 ilustra o procedimento de evolução.

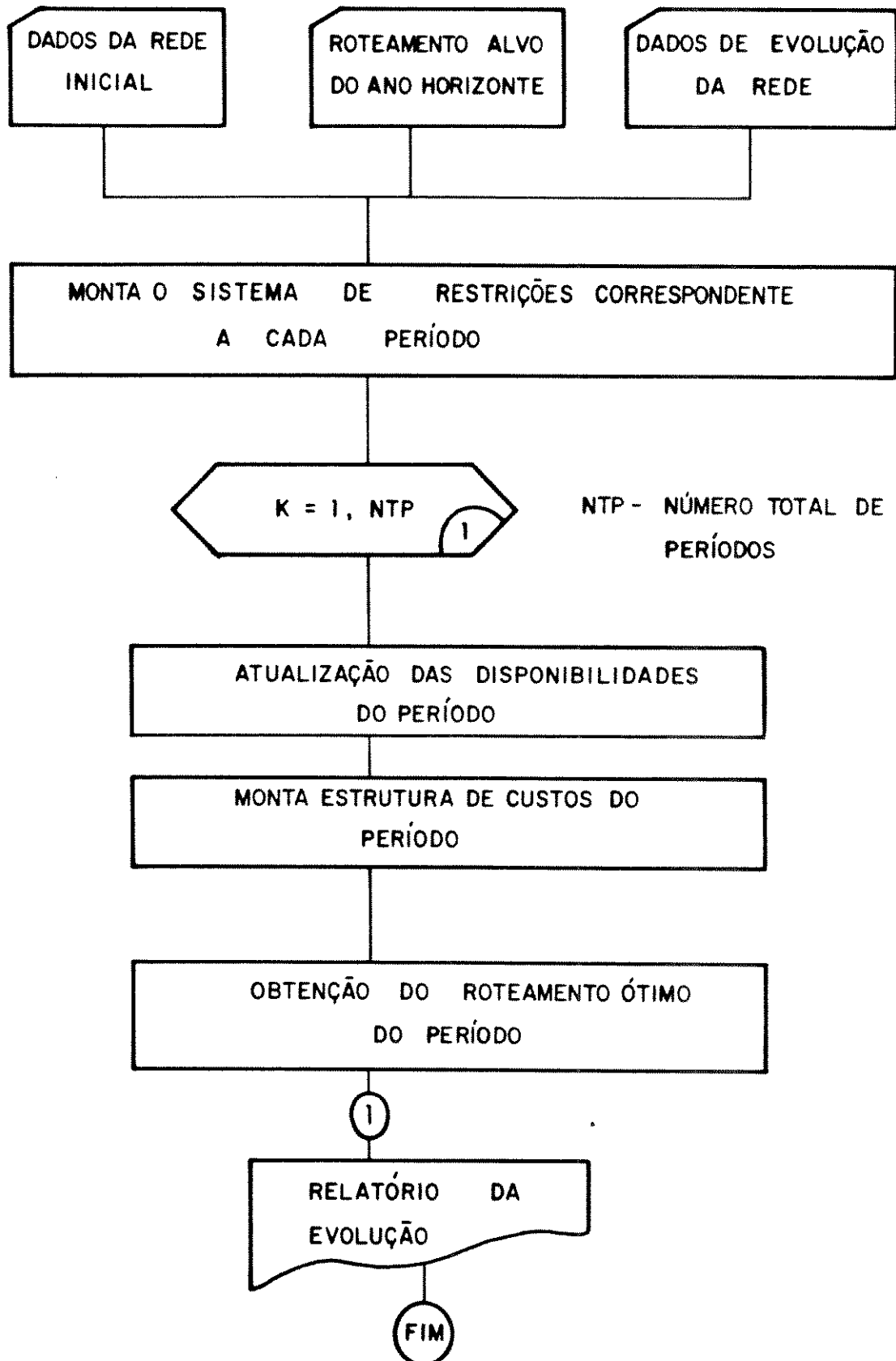


FIGURA 3.11- Diagrama de Blocos do Processo de Evolução

III.4. A DEFINIÇÃO DA COMPRA DOS MEIOS DE TRANSMISSÃO

O procedimento utilizado para estabelecer a ESTRATÉGIA DE EVOLUÇÃO do roteamento ao longo do tempo fornece, para cada período, a NECESSIDADE de meios de transmissão em cada galeria da rede. O atendimento desta necessidade deve ser feito, entretanto, a partir de algumas premissas que são indispensáveis a uma melhor compreensão do problema, tais como:

- . os cabos são comprados de acordo com as Modularidades oferecidas.
- . cada cabo utiliza um duto da galeria.
- . existe um número limitado de dutos em cada galeria.

Houve necessidade, portanto, de se desenvolver um procedimento para elaborar o cronograma de compra dos meios de transmissão que atenda as condições acima mencionadas e que minimize o valor presente do custo de compra durante todo o horizonte de planejamento. Dois aspectos necessitam ser destacados:

- . o procedimento adotado resolve um problema de Otimização para cada galeria.
- . as compras em cada galeria são consideradas independente das demais.

Tal metodologia é constituída de um conjunto de etapas que permitem:

a) calcular, de modo otimizado (menor custo para um certo número de pares de fios), por galeria, o número de dutos necessário para cada compra de um certo tipo de meio de transmissão, de acordo com as modularidades disponíveis.

b) determinar, por galeria e por tipo de cabo, o cronograma de compra de menor valor presente. Em função, principalmente, da limitação do número de dutos disponíveis em cada galeria, torna-se indispensável a obtenção de cronogramas de compra alternativos que podem ser utilizados para melhorar a tomada de decisão.

c) identificar, a partir dos cronogramas de compra alternativos para cada tipo de cabo, as diversas composições de compras, utilizando quantidades variáveis de dutos. Isto permite que seja adotada como solução aquele cronograma que melhor atenda aos critérios de custos e disponibilidade de dutos.

O estabelecimento de uma taxa de juros i , função do tempo, provocará uma distribuição das compras nos vários períodos de planejamento, de modo a minimizar o valor presente dos custos envolvidos.

O cronograma de compras para um determinado meio de transmissão, caracteriza-se por ser um problema estagiado no tempo e que deve em cada período:

- . satisfazer a necessidade acumulada de meios de transmissão em cada galeria.
- . quantificar o número de dutos utilizados por galeria, para cada meio de transmissão, a partir da "decisão" sobre a compra a ser efetuada.

Estas particularidades do problema, sugerem um modelo de Programação Dinâmica [26] como método de resolução.

A definição das variáveis:

x_k^j - número de pares de fios do meio j existente na galeria, no período k .

u_k^j - número de pares do meio j , comprado no período k

d_k^j - número de dutos utilizados com o meio j até o período k .

a_k^j - número de dutos preenchidos com o meio j no período k .

NP - número de períodos dentro do horizonte de planejamento.

i_k - fator de desconto, função do período. Quando i é constante, é dado por:

$$i_k = \left(\frac{1}{1+i} \right)^{k-1} \quad (3.1)$$

permite obter as seguintes relações de recursividade:

$$x_k^j = x_{k-1}^j + u_k^j \quad (3.2)$$

$$d_k^j = d_{k-1}^j + \partial_k^j \quad (3.3)$$

com:

$$x_k^j \text{ INF} \leq x_k^j \leq x_k^j \text{ SUP} \quad (3.4)$$

$$D_k^j \text{ INF} \leq d_k^j \leq D_k^j \text{ SUP} \quad (3.5)$$

$x_K^{j \text{ INF}}$ - valor acumulado da necessidade de pares do meio j no período k .

$x_K^{j \text{ SUP}}$ - valor calculado em função dos dados do problema

$D_K^{j \text{ INF}}$ - $[x_K^{j \text{ INF}} / \text{Maior modularidade do meio } j]$

$D_K^{j \text{ SUP}}$ - valor calculado em função dos dados do problema

Tomando g_j como sendo a função que faz corresponder a cada valor de u_k^j o número de dutos associado à combinação de módulos de custo mínimo C_k^j , determina-se, em geral, a combinação com menor número de dutos; isto ocorre porque há uma "economia de escala" à medida que a modularidade do meio cresce. Como decorrência pode-se verificar que:

$$\partial_k^j = g_j(u_k^j) \quad (3.6)$$

$$\partial_k = \sum_j \partial_k^j \quad (3.7)$$

onde, ∂_k representa o número de dutos utilizados com meios de transmissão comprados no período k.

Se $C_k^j(u_k^j)$ representa o custo mínimo associado à compra u_k^j , a formulação do problema (P^j) pode ser dada por:

$$\begin{array}{l}
 P^j \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Minimizar} \quad \Phi^j = \sum_{k=1}^{NP} i_k C_k^j(u_k^j) \\
 \text{S.a} \\
 \\
 x_k^j = x_{k-1}^j + u_k^j \\
 d_k^j = d_{k-1}^j + \partial_k^j \\
 \partial_k^j = g_j(u_k^j) \\
 \\
 x_k^j \leq x_k^j \text{ SUP} \\
 d_k^j \leq d_k^j \text{ SUP}
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

e a utilização de técnicas de Programação Dinâmica permite determinar a sequência de decisões (cronograma de compras), a partir de um estado inicial até um estado final.

Na resolução do problema (P^j) foi adotado um procedimento do tipo "forward" [27], por oferecer vantagem na análise do problema, com as seguintes características:

ESTÁGIO	Período k.
ESTADO	. quantidade de pares de fios do meio j existentes, x_k^j . dutos utilizados d_k^j
DECISÃO	compra u_k^j

CRITÉRIO Minimizar o valor presente dos custos.

Pode-se então definir:

VETOR DE ESTADOS $x_k^j = (x_k^j, d_k^j)$

VETOR DE DECISÕES $u_k^j = (u_k^j, \alpha_k^j(u_k^j))$

e representar, esquematicamente, o problema conforme a figura 3.12.

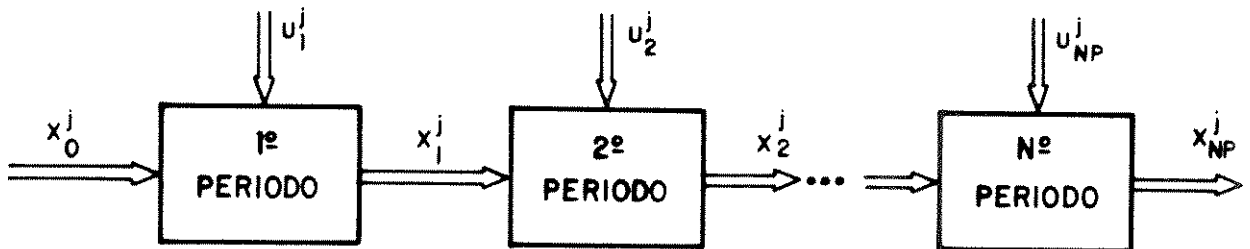


Figura 3.12 - Representação esquemática do modelo de programação dinâmica.

A equação de transição é dada por:

$$x_k^j = x_{k-1}^j + u_k^j \quad (3.14)$$

e o problema de encontrar a sequência $(u_1^j, u_2^j, u_3^j, \dots)$ que minimiza o custo de compra pode ser escrito como:

$$P^j \left\{ \begin{array}{l} \text{Minimizar } \Phi^j = i_1 C_1(u_1^j) + i_2 C_2(u_2^j) + i_3 C_3(u_3^j) + \dots + \\ \quad u_1, u_2, u_3, \dots + i_{NP} C_{NP}(u_{NP}^j) \\ \\ \text{S.a} \quad x_k^j = x_{k-1}^j + u_k^j \quad K=1, \dots, NP \\ \\ \quad \alpha_k^j \leq x_k^j \leq \beta_k^j \quad K=1, 2, \dots, NP \end{array} \right.$$

com:

$$\alpha_k^j = (x_k^j \text{ INF}, D_D^j \text{ INF})$$

$$\beta_k^j = (x_k^j \text{ SUP}, D_k^j \text{ SUP})$$

$$x_0^j = (x_0^j, d_0^j) \text{ conhecido}$$

A resolução de (P^j) , caracterizada por determinar a sequência de decisões $(U_1^j, U_2^j, \dots, U_{NP}^j)$, é obtida por uma técnica de decomposição [28] que consiste em "estagiar" (P^j) através de subproblemas que levam em conta o "custo do passado" e incorporam gradativamente, e, de modo otimizado, o "custo do presente".

Como é classico em Programação Dinâmica a decisão ótima U_k^{j*} em cada estágio é função do estado:

$$U_k^{j*} = U_k^{j*}(x_k^j) \quad (3.15)$$

Obtida a solução de (P^j) , denominado FASE I do problema, que consiste em determinar os cronogramas de compra de meios de transmissão em cada galeria, é preciso resolver um problema de alocação de dutos, denominado FASE II, que permite identificar as diversas composições de compra utilizando quantidades variáveis de dutos.

A cada valor de d_{NP}^j , número de dutos utilizados com o meio j no final do horizonte de planejamento, corresponde um "estado final" x_{NP}^{j*} tal que:

$$\Phi^j(d_{NP}^j) = F_{NP}(x_{NP}^{j*}) = F_{NP}(x_{NP}^{j*}, d_{NP}^j) = \min_{x_{NP}^j} F_{NP}(x_{NP}^j, d_{NP}^j) \quad (3.16)$$

e, conseqüentemente, a decisão U_{NP}^{j*} fornecida pelo subproblema (NP) através da relação (3.15).

Uma vez conhecidos x_{NP}^{j*} e U_{NP}^{j*} , a recuperação da trajetória ótima do problema [29] é obtida utilizando-se a equação de transição (3.14).

É importante observar que embora os problemas (P^j) sejam independentes, os diversos meios de transmissão comprados concorrem pelos mesmos dutos disponíveis em uma dada galeria.

Definidas as compras de meios de transmissão, é preciso determinar, para cada galeria, as combinações dos cronogramas de compra que apresentam menores custos, para cada número de dutos possíveis de serem utilizados no ano horizonte. A solução deste problema, denominado "Problema de Alocação de Dutos", é obtida combinando as soluções dos problemas (P^j) adotando-se a de menor custo, a partir da seguinte formulação:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{MINIMIZAR } \Phi = \sum_{j=1}^{NM} \Phi^j(d^j) & (3.17) \\ \text{S.a} \quad \sum_{j=1}^{NM} d^j = D & (3.18) \\ d^{j\text{MIN}} \leq d^j \leq d^{j*} & (3.19) \end{array} \right.$$

com:

$d^{j\text{MIN}}$ - número mínimo de dutos para o qual o problema (P^j) ainda é factível.

d^{j*} - número de dutos associado à solução de custo mínimo do problema (P^j)

NM - número de meios de transmissão

$$D = \sum_{j=1}^{NM} d^{j*} \quad (3.20)$$

Na realidade, a equação 3.18 é dispensável; é mantida para maior clareza.

A solução ótima deste problema é óbvia dada por:

$$\Phi = \sum_{j=1}^{NP} \Phi^j(d^{j*}) \quad (3.21)$$

que equivale utilizar um número total D de dutos no ano horizonte

Em estudos de planejamento, a indicação de soluções alternativas é, em geral, de grande utilidade. Mesmo apresentando custos mais elevados em relação à solução ótima, alguma solução alternativa pode tornar-se mais interessante sob ponto de vista de outros critérios. O número de dutos D, por exemplo, pode ser maior do que aqueles efetivamente existentes na galeria. O conhecimento de soluções alternativas permite, por exemplo, decidir quanto à ampliação ou não do número de dutos em uma determinada galeria.

Este tipo de "tomada de decisão", que é tipicamente um "problema de alocação de recursos" [30], também pode ser resolvido por técnicas de Programação Dinâmica.

Adotando a seguinte caracterização:

ESTÁGIO - meio de transmissão j

ESTADO - número de dutos y^j

DECISÃO - número de dutos d^j alocado para cada meio de transmissão j

a solução final do problema é obtida resolvendo uma sequência de subproblemas (um por cada estágio j) do tipo:

$$(F^j) \left\{ \begin{array}{l} F^j(y^j) = \underset{d^j}{\text{MINIMO}} \{ \phi^j(d^j) + F^{j-1}(y^{j-1}) \} \quad (3.21) \\ \text{s.a} \quad y^j = y^{j-1} + d^j \quad (3.22) \\ d^{j\text{MIN}} \leq d^j \leq d^{j*} \quad (3.25) \\ y^j \leq D \end{array} \right.$$

e determinando a "recuperação da trajetória" ótima para cada valor de $y^{NM} \leq D$.

CAPÍTULO IV

ASPECTOS COMPUTACIONAIS DO PROBLEMA
DE OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO EM
HORIZONTES DE LONGO PRAZO

IV.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o detalhamento computacional da metodologia desenvolvida no capítulo anterior, com explicações detalhadas sobre as partes principais do procedimento. É mostrada a estrutura dos dados de entrada/saída e os principais resultados obtidos para uma rede exemplo baseada nos dados da cidade de Curitiba.

IV.2. A ESTRUTURA COMPUTACIONAL

O problema central, objeto deste procedimento computacional é a otimização do roteamento diferenciando-se, porém, dos métodos clássicos, pela consideração dos aspectos da evolução ao longo do tempo. A estrutura computacional do procedimento aqui apresentado possui, conseqüentemente, muitas semelhanças com os métodos clássicos de otimização do roteamento.

O programa desenvolvido tem uma ESTRUTURA MODULAR, podendo a execução dos vários módulos ser feita de maneira independente. Isto permite ao usuário analisar/criticar os resultados parciais obtidos, melhorando, desta forma, a qualidade da solução final encontrada. A critério do usuário, o programa pode ser executado como um único módulo.

A estrutura computacional do programa é construída da seguinte forma:

- . MÓDULO I: definição dos caminhos por onde as demandas devem ser roteadas.
- . MÓDULO II: determinação das ROTAS FACTÍVEIS e construção de uma solução básica inicial.
- . MÓDULO III: obtenção do roteamento alvo do Ano Horizonte de planejamento.
- . MÓDULO IV: evolução do roteamento ao longo do tempo.

. MÓDULO V : quantificação das compras dos equipamentos de transmissão.

. MÓDULO VI: confecção dos relatórios de saída.

IV.2.1. A DEFINIÇÃO DOS CAMINHOS POR ONDE AS DEMANDAS DEVEM SER ESCOADAS

Este módulo é constituído de duas etapas distintas, havendo entre elas a possibilidade de interação com o usuário.

A primeira etapa, denominada KAMINH, permite determinar, a partir de modelos de grafos:

- os caminhos disjuntos de soma mínima para consideração dos aspectos de segurança da transmissão (rotina CAMIDJ)
- os p-caminhos mais curtos entre as estações, utilizando um algoritmo de caminhos ϵ -mínimos (rotina PCAMIN)

Os caminhos determinados nesta etapa levam em conta apenas o critério de distâncias físicas (comprimento das galerias de dutos), não considerando outros aspectos da rede como, por exemplo, disponibilidade de facilidades de transmissão. Pode haver, portanto, interesse do usuário em propor "caminhos adicionais" a serem considerados no roteamento que, mesmo correspondendo a maiores distâncias físicas, podem eventualmente provocar diminuição do custo total da solução adotada.

Com a construção feita desta forma, é possível que um dado caminho pertença a mais de uma proposta (caminhos disjuntos, p-caminhos ou escolha do usuário).

A segunda etapa deste módulo (GECAM) tem como função organizar os dados relativos aos caminhos, fazendo com que um caminho seja considerado uma única vez no atendimento de uma dada demanda.

A estrutura computacional do módulo tem a forma da figura 4.1.

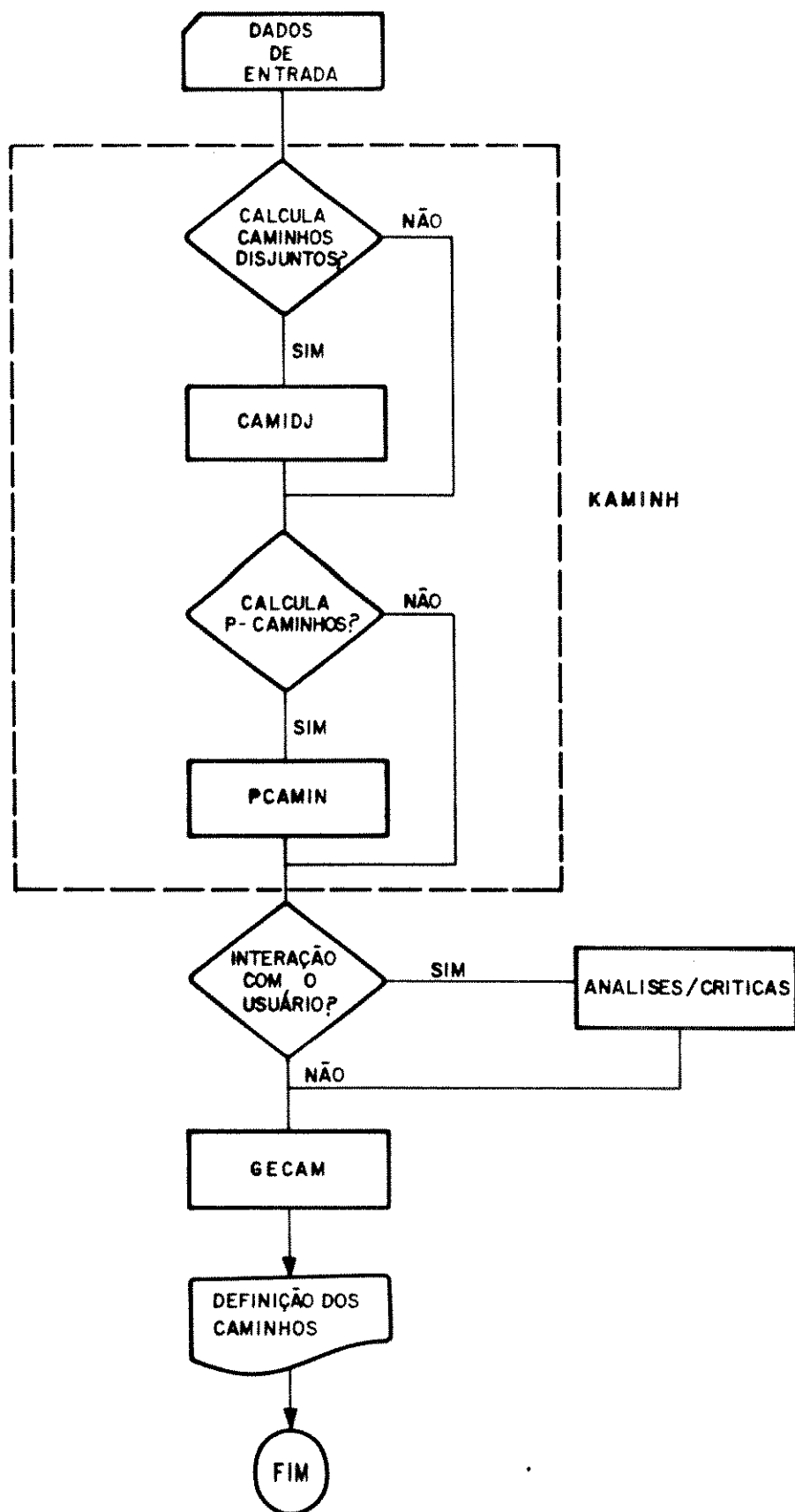


Figura 4.1 - Diagrama de Blocos de Determinação dos caminhos.

Os dados de entrada deste módulo referem-se à Rede de Troncos, contendo informações sobre a evolução da rede em termos de implantação de novas estações e/ou novas galerias de dutos.

IV.2.2. DETERMINAÇÃO DAS ROTAS FACTÍVEIS E CONSTRUÇÃO DE UMA SOLUÇÃO BÁSICA INICIAL

Este módulo, denominado Fase de Inicialização, tem por finalidade:

- . Identificar as ROTAS FACTÍVEIS (associação de um caminho físico com um meio de transmissão) para o atendimento das demandas nos vários períodos de planeamento.

- . Obter uma solução básica inicial para o Roteamento Alvo do Ano Horizonte de Planeamento.

- . Preparar os dados relativos à evolução do roteamento nos vários períodos de planeamento.

Nesta etapa é determinada apenas a solução básica inicial para o Ano Horizonte, de acordo com a proposta formulada em [17]. A solução básica inicial dos períodos intermediários será tratada no Módulo IV do procedimento computacional aqui descrito.

A estrutura computacional deste módulo é resumida no Diagrama de blocos da figura 4.2.

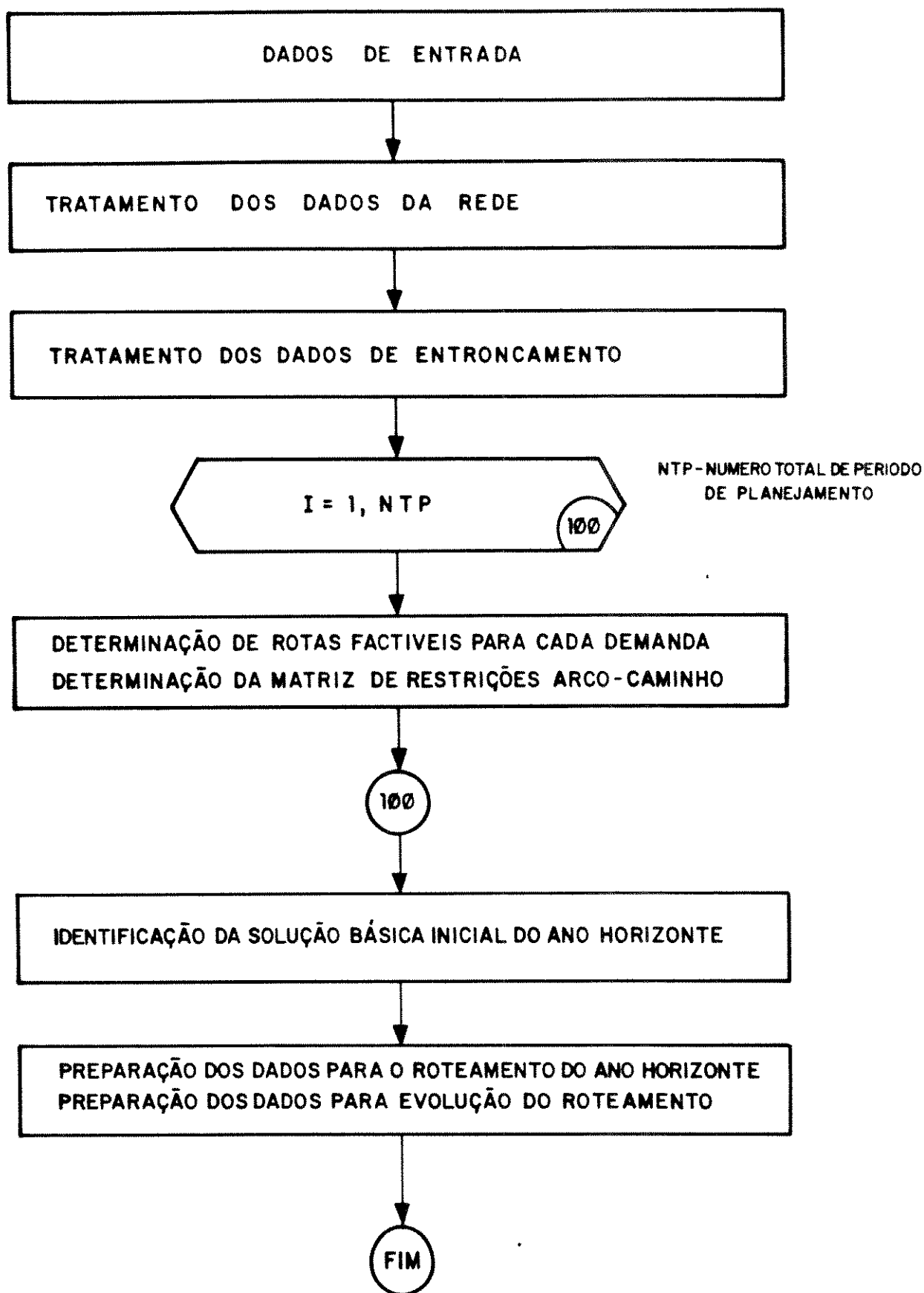


Figura 4.2 - Diagrama de Blocos da Fase de Inicialização

. DADOS DE ENTRADA: conjunto de arquivos contendo informações sobre:

- Rede de Troncos: estado atual e evolução
- Caminhos a serem utilizados
- Características técnicas (atenuação e resistência ôhmica admissíveis) das ligações entre as estações.
- Características dos meios de transmissão possíveis de serem utilizados.
- Demanda de troncos para os vários períodos de planejamento.

. DADOS DE SAÍDA: conjunto de arquivos contendo informações relativas a:

- Solução inicial do roteamento no Ano Horizonte.
- Montagem das funções de custo para a otimização inicial do Ano Horizonte.
- Matriz de restrições para os diferentes períodos.
- Evolução da Rede de Troncos (Nós e Arcos) ao longo dos vários períodos de planejamento.

IV.2.3. OBTENÇÃO DO ROTEAMENTO ALVO DO ANO HORIZONTE

A determinação do Roteamento Alvo no Ano Horizonte depende, fundamentalmente, da consideração ou não dos aspectos de segurança da transmissão. Considerando que a evolução (ampliação e/ou implantação de novas facilidades) das redes locais será realizada com a utilização de tecnologia digital, torna-se indispensável a consideração da segurança da transmissão.

A metodologia apresentada busca este objetivo em duas etapas:

. Na primeira, considera as rotas como sendo independentes. Isto gera uma proposta de roteamento baseada apenas na composição de custos (ROTINA CUSTO1).

. Na segunda, considerando a interdependência entre as rotas busca, a partir da solução obtida anteriormente e de alte-

rações convenientes na função de custos, alcançar o grau de segurança estabelecido (ROTINA CUSTO2).

O diagrama de blocos da figura 4.3 resume este procedimento:

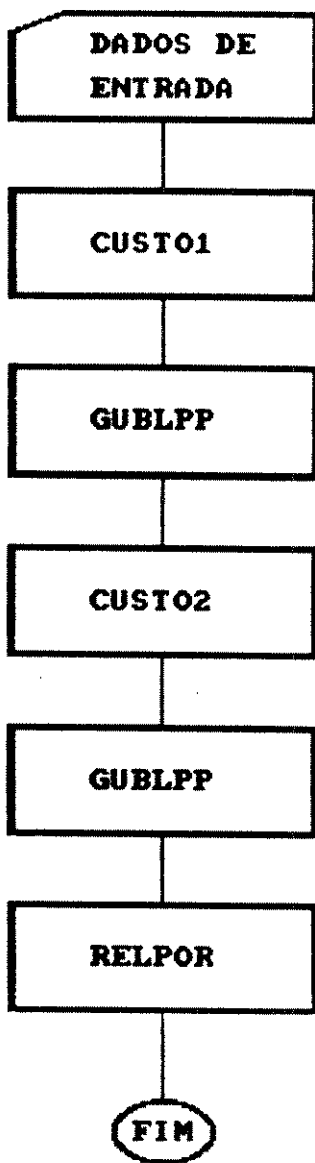


Figura 4.3- Diagrama de Blocos da Otimização do Roteamento no Ano Horizonte.

onde:

- . DADOS DE ENTRADA: são os dados gerados no Módulo II.
- . ROTINA CUSTO1: rotina que constrói a função de custo para a fase inicial da otimização do roteamento.
- . PROGRAMA GUBLPP: programa que corresponde a representação computacional do Método GUB (Generalized Upper Bound) para

problemas com critério linear por aprtes.

. ROTINA CUSTO2: rotina que monta a função de custos procurando, através de penalizações, alcançar os objetivos propostos.

. PROGRAMA RELPOR: programa que gera os relatórios de saída para o roteamento do Ano Horizonte.

IV.2.4. EVOLUÇÃO DO ROTEAMENTO AO LONGO DO TEMPO

Tomando por base:

. a atual estrutura do roteamento

. a infraestrutura disponível

. a evolução da rede de troncos em termos de nós (implantação de novas estações) e arcos (abertura de novas galerias de dutos).

. o roteamento Alvo do ano horizonte

é determinada uma Política de Evolução do roteamento ao longo do tempo, garantindo o atendimento econômico da demanda dos vários períodos de planejamento.

A consideração dos aspectos dinâmicos do problema de roteamento constitui, juntamente com o tratamento da segurança da transmissão, o mais importante avanço deste procedimento (PROGRAMA EVOL) em relação às metodologias existentes para estudo do problema de roteamento.

O diagrama da figura 4.4. ilustra a estrutura computacional do programa EVOL.

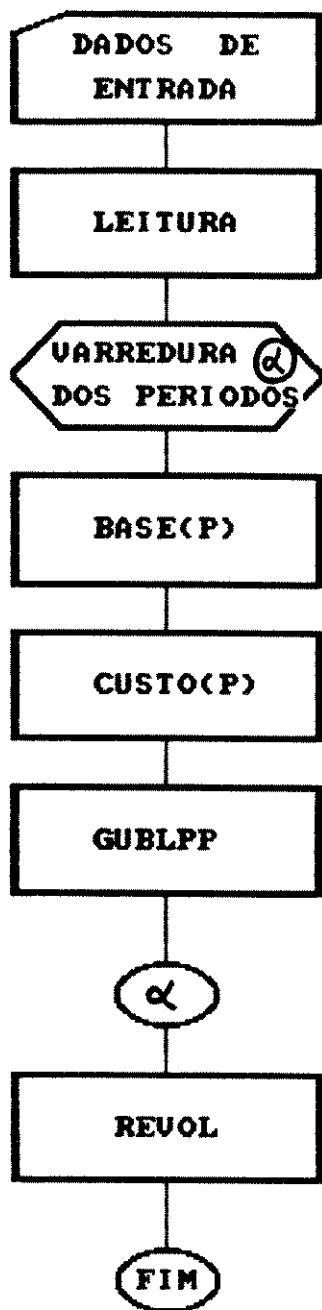


Figura 4.4 - Diagrama de Blocos da Evolução do Roteamento

. DADOS DE ENTRADA:

a) Dados gerados no Módulo de Inicialização referentes a:

- Evolução da Rede
- Evolução das Demandas
- Evolução da Matriz de Restrições

b) Dados relativos ao roteamento alvo do ano horizonte

. ROTINA LEITUR: tem por finalidade ler e organizar os dados de entrada para utilização nas rotinas seguintes.

. ROTINA BASE (P): monta a solução básica inicial para a otimização do roteamento do período P e atualiza as disponibilidades dos arcos da rede, incorporando à infraestrutura disponível no Ano Base as compras indicadas nos períodos subsequentes.

. ROTINA CUSTO (P): monta as funções de custo para o processo de otimização do período P, levando-se em conta os parâmetros definidos no capítulo anterior: rotas de interesse, rotas de não interesse, parcela de variação admitida no roteamento já implantado.

. PROGRAMA GUBLPP: representação computacional do Método GUB linear por partes.

. ROTINA REVOL: é executada após o término do "Loop" dos períodos, com as seguintes finalidades:

- elaborar um relatório contendo a NECESSIDADE de meios de transmissão em cada galeria de dutos, em todos os períodos de planejamento.
- montar um relatório indicando como as demandas (ligações) são roteadas em cada período.

IV.2.5. A DEFINIÇÃO DAS COMPRAS

Neste módulo são definidas, para cada galeria de dutos, as compras de meios de transmissão que, além de satisfazer as necessidades de cada período, minimizam o valor presente dos custos.

. Na definição das compras são consideradas as modularidades dos meios de transmissão e o número de furos (ou dutos) a ser utilizado. Na resolução deste problema foi utilizada uma técnica de Programação Dinâmica do tipo "Forward" para maior facilidade de análise dos resultados. A estrutura computacional deste programa tem a forma abaixo:

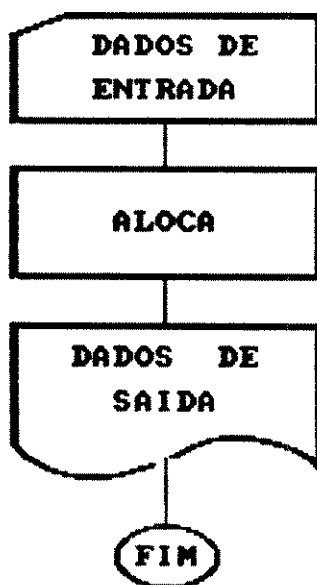


Figura 4.5 - Diagrama de Blocos da Compra de meios de transmissão

- . DADOS DE ENTRADA: são informações relativas a:
 - . necessidades de meios de transmissão em cada galeria nos vários períodos de planejamento, geradas no módulo de evolução.
 - . modularidades dos meios de transmissão utilizados.
 - . taxas de juros utilizadas para investimento nos vá-

rios períodos de planejamento.

. PROGRAMA ALOCA: programa computacional do Algoritmo de Programação Dinâmica utilizado para definição das compras de meios de transmissão em cada galeria de dutos.

. DADOS DE SAÍDA: arquivo de dados contendo informações sobre as compras em cada galeria que será utilizado no Módulo de Relatórios de Saída do programa.

IV.2.6. ELABORAÇÃO DOS RELATÓRIOS DE SAÍDA

Além dos relatórios parciais, auxiliares ao planejamento, neste módulo é elaborado um Relatório Final indicando as várias alternativas de compra para cada galeria da rede. Em cada solução proposta são indicados o valor presente da mesma e o número de furos (dutos) utilizados. Este relatório é montado utilizando o programa RELACO.

IV.3 A ORGANIZAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROGRAMA

Pelo exposto no item anterior, pode-se observar que a grande maioria dos arquivos utilizados são gerados internamente no programa. Os arquivos de entrada são de fácil montagem e fazem parte do dia a dia de um engenheiro de telecomunicações da área de entroncamento/roteamento. Tais arquivos são listados a seguir:

. REDE.DAT - descreve a rede de troncos a ser utilizada ao longo do horizonte de planejamento. Contém informações sobre a rede atual e sua evolução, indicando períodos de implantação de novas estações telefônicas e/ou novas galerias de dutos.

. TIPOS.DAT - fornece informações sobre as características técnicas das ligações envolvidas (atenuação máxima e mínima, resistência ôhmica máxima) e dos meios de transmissão utilizados (atenuação/Km, resistência ôhmica/Km, custo/Km).

. MTRONC.DAT - indica as demandas de troncos no vários períodos de planejamento, a partir do ano inicial.

. MÓDULO.DAT - contém as modularidades dos meios de transmissão utilizados e os respectivos custos (CZ\$/Km).

. TAXA.DAT - informa as taxas de juros que serão utilizadas nos vários períodos de planejamento.

Desprezando as interações com o usuário, pode-se resumir o procedimento computacional descrito pelo diagrama de blocos da figura 4.6.

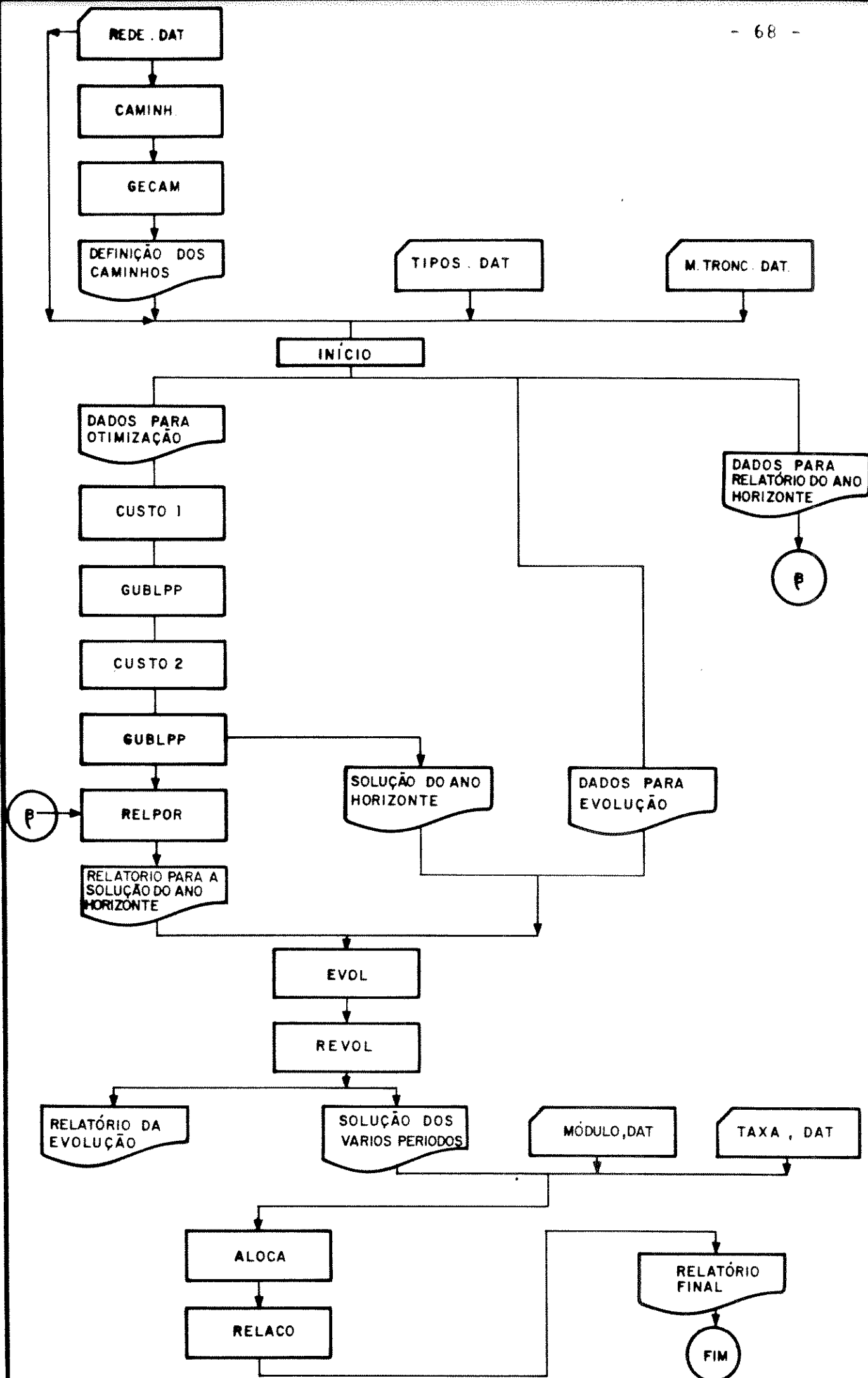


Figura 4.6 - Diagrama de Blocos do Sistema PORULP

É importante observar que todos os relatórios anteriores ao Relatório Final indicam NECESSIDADES de meios de transmissão. Apenas no programa RELACO são considerados os efeitos da modularidade dos meios de transmissão e das taxas de juros utilizadas nos vários períodos de planejamento.

IV.4. UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO APRESENTADO PARA OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO EM HORIZONTES DE LONGO PRAZO

Na aplicação do procedimento computacional desenvolvido para otimização do roteamento em horizontes de longo prazo, foi adotado um dos "Cenários Tecnológicos" utilizados no estudo do planejamento da rede da cidade de Curitiba.

A descrição da rede de troncos em termos de nós e arcos e sua evolução ao longo do tempo, são mostrados nas figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

Quanto aos dados relativos à otimização, a rede apresenta as seguintes características:

DADOS	DADOS DE EVOLUÇÃO DA REDE			
	ANO BASE	PERÍODO I	PERÍODO II	PERÍODO III
- nº de Estações	11	14	15	16
- nº de Arcos	15	24	27	29
- nº de Produtos	-	54	68	71
- nº de Rotas	-	146	160	165
- nº máx. linhas na matriz de acoplamento(arco-cam)	32	47	50	52

Tabela 4.1 - Dados de Evolução da Rede de Troncos de Curitiba

Estes resultados são obtidos após a aplicação dos Módulos I e II, onde os dados de entrada são:

- . Rede de Troncos dos vários períodos de planejamento.
- . Demanda de Troncos nos vários períodos de planejamento.
- . Características Técnicas das ligações telefônicas e dos meios de transmissão utilizados.

Após a aplicação dos Módulos III e IV obtém-se a Necessidade de Equipamentos (Pares de Fios no exemplo explorado) para cada galeria da rede de troncos. A Tabela 4.2 a seguir ilustra como estas informações são organizadas.

RELATORIO DO EVOL

NUMERO DE PERIODOS : 3

GALERIA: 1

MEIO : 24NP

		FLUXO	FOLGA	COMPRA
PERIODO:	1	0.0	0.0	0.0
PERIODO:	2	0.0	0.0	0.0
PERIODO:	3	0.0	0.0	0.0

MEIO : 24PUP

		FLUXO	FOLGA	COMPRA
PERIODO:	1	1800.0	0.0	0.0
PERIODO:	2	1860.0	0.0	60.0
PERIODO:	3	1915.0	0.0	55.0

MEIO : 22PUP

		FLUXO	FOLGA	COMPRA
PERIODO:	1	295.0	0.0	295.0
PERIODO:	2	1015.0	0.0	720.0
PERIODO:	3	1394.0	0.0	379.0

TABELA 4.2.

As grandezas Fluxo, Folga e Compra têm o seguinte significado:

FLUXO - Indica a parcela da demanda total da rede que utiliza a galeria em questão.

FOLGA - representa a disponibilidade final da galeria. Quando houver, significa que a disponibilidade inicial da galeria vai suportar o fluxo ao longo do tempo.

COMPRA - traduz a quantidade de pares necessária, na galeria, para atendimento das demandas ao longo do tempo.

A compra indicada para cada galeria ao longo do tempo e as modularidades dos meios de transmissão utilizados, constituem os dados de entrada para o Módulo V que determina o cronograma de compras que minimiza o valor presente dos custos. Neste exemplo usam-se os seguintes dados de modularidade e custos (CZ\$/Km).

MODULOS TIPOS	200	300	400	600	900	1200
24 NP	18980	22110	26200	32220	41850	-
24 PUP	20780	24210	28700	35280	45280	-
22 PUP	22440	27000	33000	42000	56000	-

A Tabela 4.3 a seguir mostra o cronograma de compras para a Galeria 1, indicando o valor presente dos custos, a quantidade de dutos (furos) utilizados na galeria e a evolução das compras nos vários períodos de planejamento.

GA/FRTA 1

VALOR PRESENTE= 215/84.5 NRO TOTAL DE FUROS= 4 COMP(KM)= 2.400

PERIODO 1

CUSTO= 64800.0 NRO DE FUROS UTILIZADOS= 1

CABO	DEMANDA	COMPRA	N DE CABOS	QUANT DE CABOS P/ MODULO
24AWG	0	0	0	NAO HA COMPRA
24PUP	0	0	0	NAO HA COMPRA
22PUP	295	300	1	1 300

PERIODO 2

CUSTO= 184272.0 NRO DE FUROS UTILIZADOS= 3

CABO	DEMANDA	COMPRA	N DE CABOS	QUANT DE CABOS P/ MODULO
24AWG	0	0	0	NAO HA COMPRA
24PUP	60	200	1	1 200
22PUP	1015	900	1	1 900

PERIODO 3

CUSTO= 53856.0 NRO DE FUROS UTILIZADOS= 4

CABO	DEMANDA	COMPRA	N DE CABOS	QUANT DE CABOS P/ MODULO
24AWG	0	0	0	NAO HA COMPRA
24PUP	115	0	0	NAO HA COMPRA
22PUP	1394	200	1	1 200

Tabela 4.3

Quando existirem soluções alternativas para uma dada galeria, utilizando quantidades diferentes (menores) de dutos, estas são listadas objetivando ampliar o elenco de decisões do planejador. A Tabela 4.4 a seguir indica a existência de uma solução alternativa para a Galeria 1.

Após listar num relatório os cronogramas de compra com as respectivas soluções alternativas, é elaborado um Relatório Síntese da evolução das compras de cabos com os custos correspondentes, indicados na Tabela 4.5.

Finalmente, o Módulo VII da Metodologia apresentada elabora os Relatórios Gerenciais para operação da rede e análise dos resultados por parte do planejador. Por fugir ao escopo deste trabalho, os mesmos não são aqui apresentados.

**SOLUCAO ALTERNATIVA- 1 GALERIA : 1

VALOR PRESENTE= 226660.3 NRO TOTAL DE FUROS= 3 COMP(KM)= 2.400

PERIODO 1

CUSTO= 100800.0 NRO DE FUROS UTILIZADOS= 1

CABO	DEMANDA	COMPRA	N DE CABOS	QUANT DE CABOS P/ MODULO
24AWG	0	0	0	NAO HA COMPRA
24PUP	0	0	0	NAO HA COMPRA
22PUP	295	600	1	1 600

PERIODO 2

CUSTO= 184272.0 NRO DE FUROS UTILIZADOS= 3

CABO	DEMANDA	COMPRA	N DE CABOS	QUANT DE CABOS P/ MODULO
24AWG	0	0	0	NAO HA COMPRA
24PUP	60	200	1	1 200
22PUP	1015	900	1	1 900

PERIODO 3

CUSTO= 0.0 NRO DE FUROS UTILIZADOS= 3

CABO	DEMANDA	COMPRA	N DE CABOS	QUANT DE CABOS P/ MODULO
24AWG	0	0	0	NAO HA COMPRA
24PUP	115	0	0	NAO HA COMPRA
22PUP	1394	0	0	NAO HA COMPRA

Tabela 4.4

RELATORIO DE COMPRA DE CABOS

PERIODO 1

CUSTO=3637482.75

CABO COMPRIMENTO(KM) DO CABO P/MODULO

24AWG	2.900	1.200	0.000	0.000	1.520
	200	300	400	600	900

24PUP	13.140	6.200	1.200	7.000	14.160
	200	300	400	600	900

22PUP	0.000	9.400	4.820	17.800	17.520
	200	300	400	600	900

PERIODO 2

CUSTO=2678079.75

CABO COMPRIMENTO(KM) DO CABO P/MODULO

24AWG	0.000	2.800	0.000	0.000	0.000
	200	300	400	600	900

24PUP	32.700	4.320	3.120	2.800	1.200
	200	300	400	600	900

22PUP	26.760	4.500	11.700	4.100	5.520
	200	300	400	600	900

PERIODO 3

CUSTO=1297832.00

CABO COMPRIMENTO(KM) DO CABO P/MODULO

24AWG	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	200	300	400	600	900

24PUP	25.400	0.000	5.120	0.000	0.000
	200	300	400	600	900

22PUP	9.400	0.000	3.300	7.220	0.000
	200	300	400	600	900

Tabela 4.5

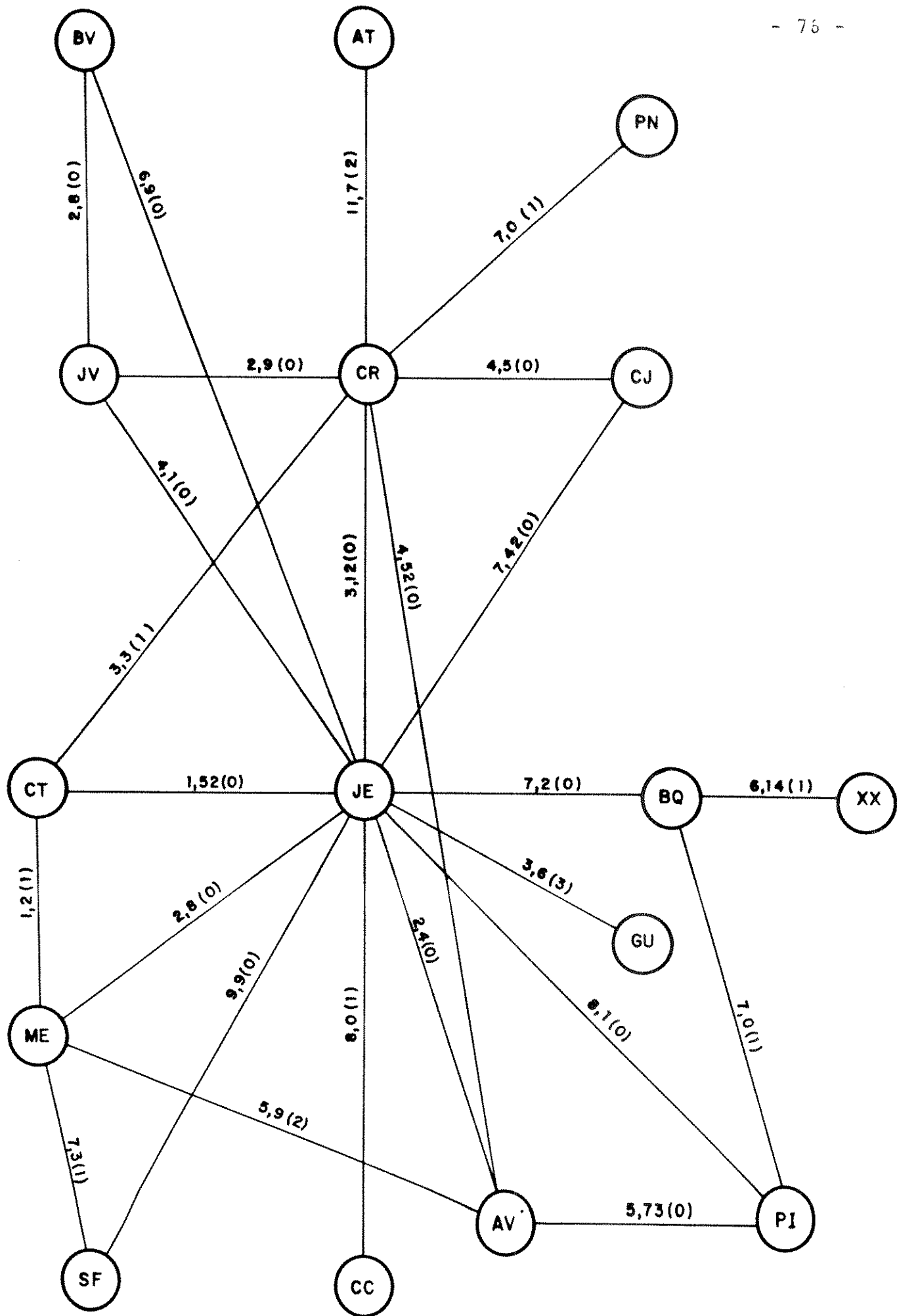


Figura 4.7 - Rede de Troncos de Curitiba: Distâncias entre Estações

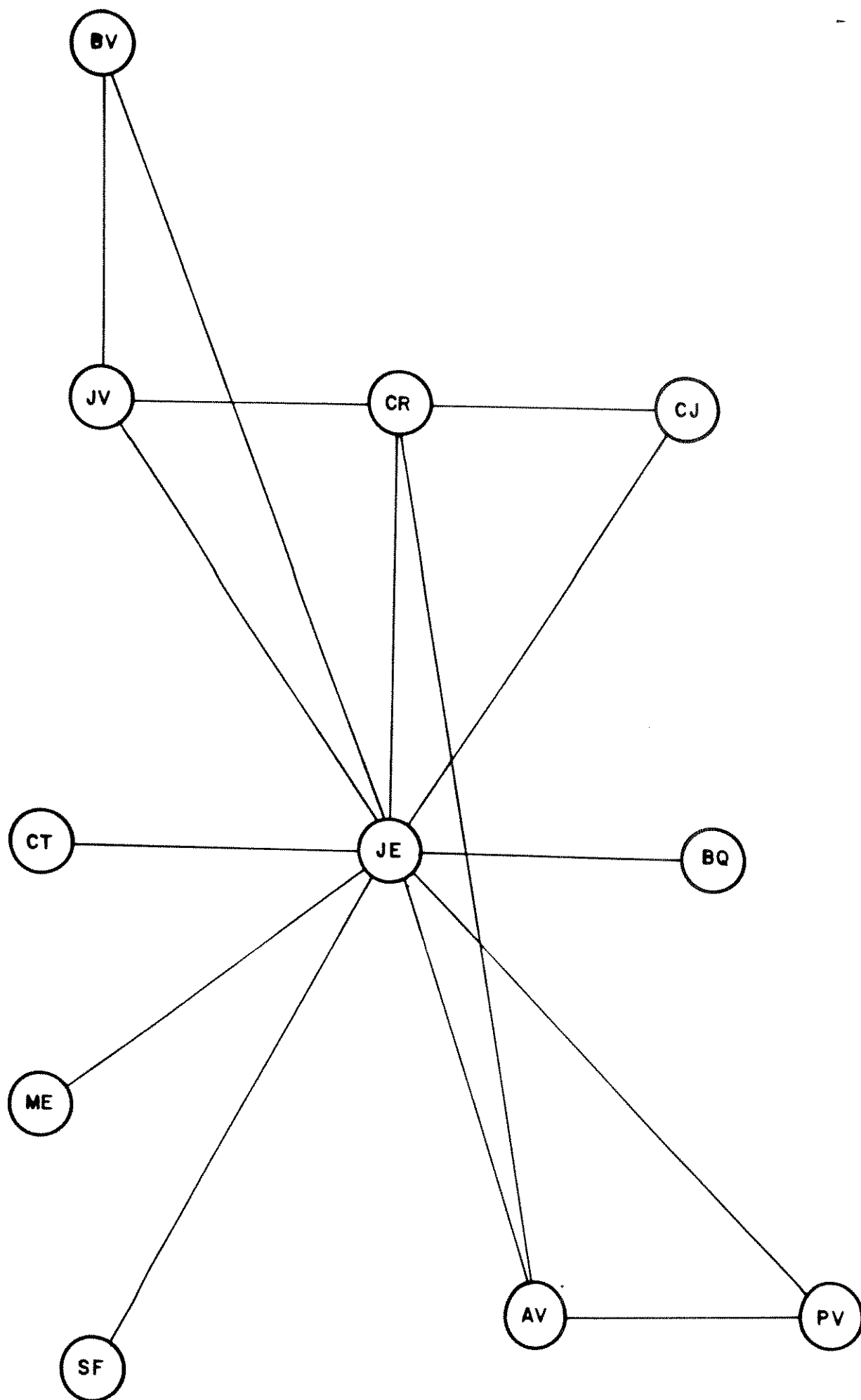


Figura 4.8 - Rede de Troncos de Curitiba no ano de 1.985

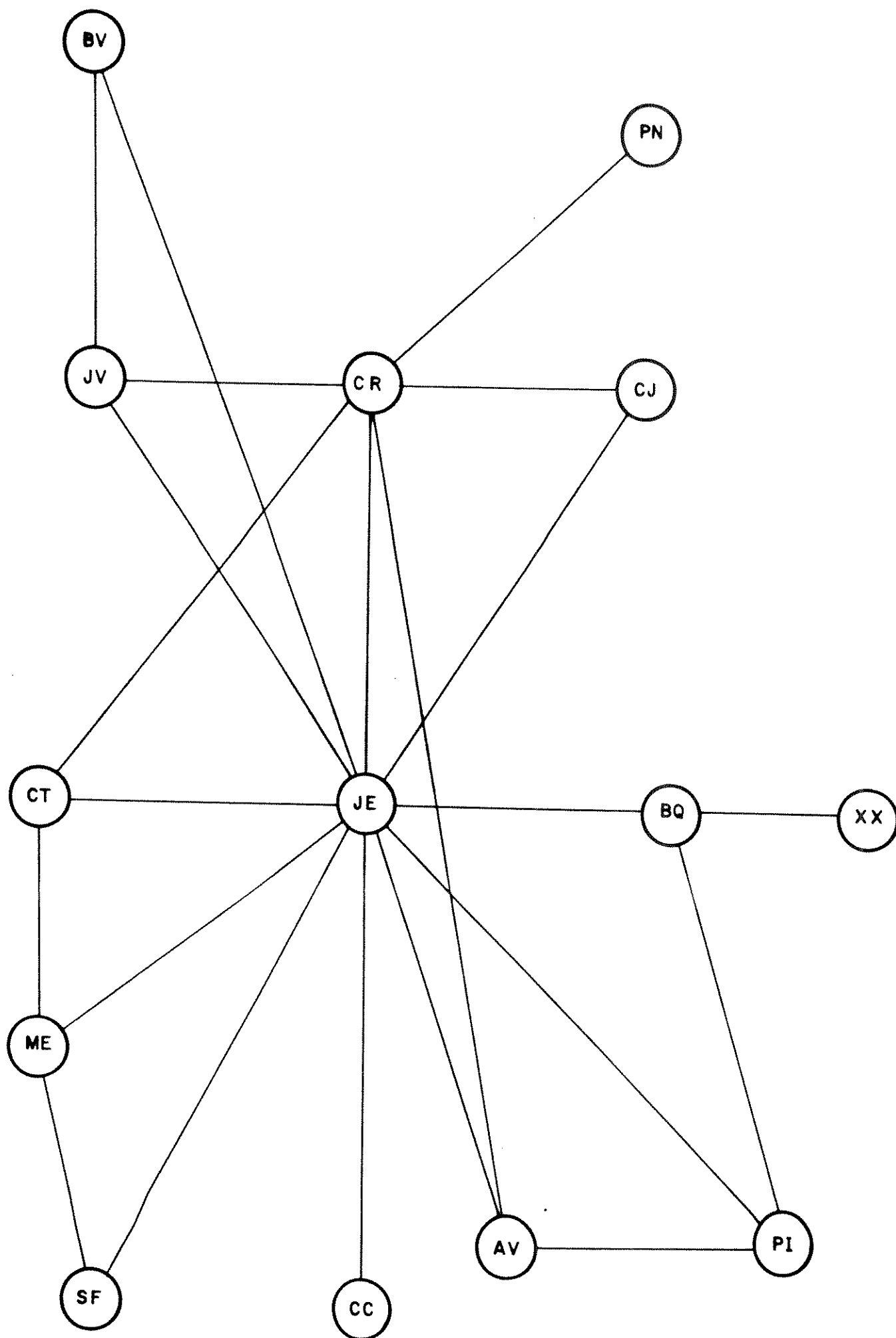


Figura 4.9 - Rede de Troncos de Curitiba - Ano 1990

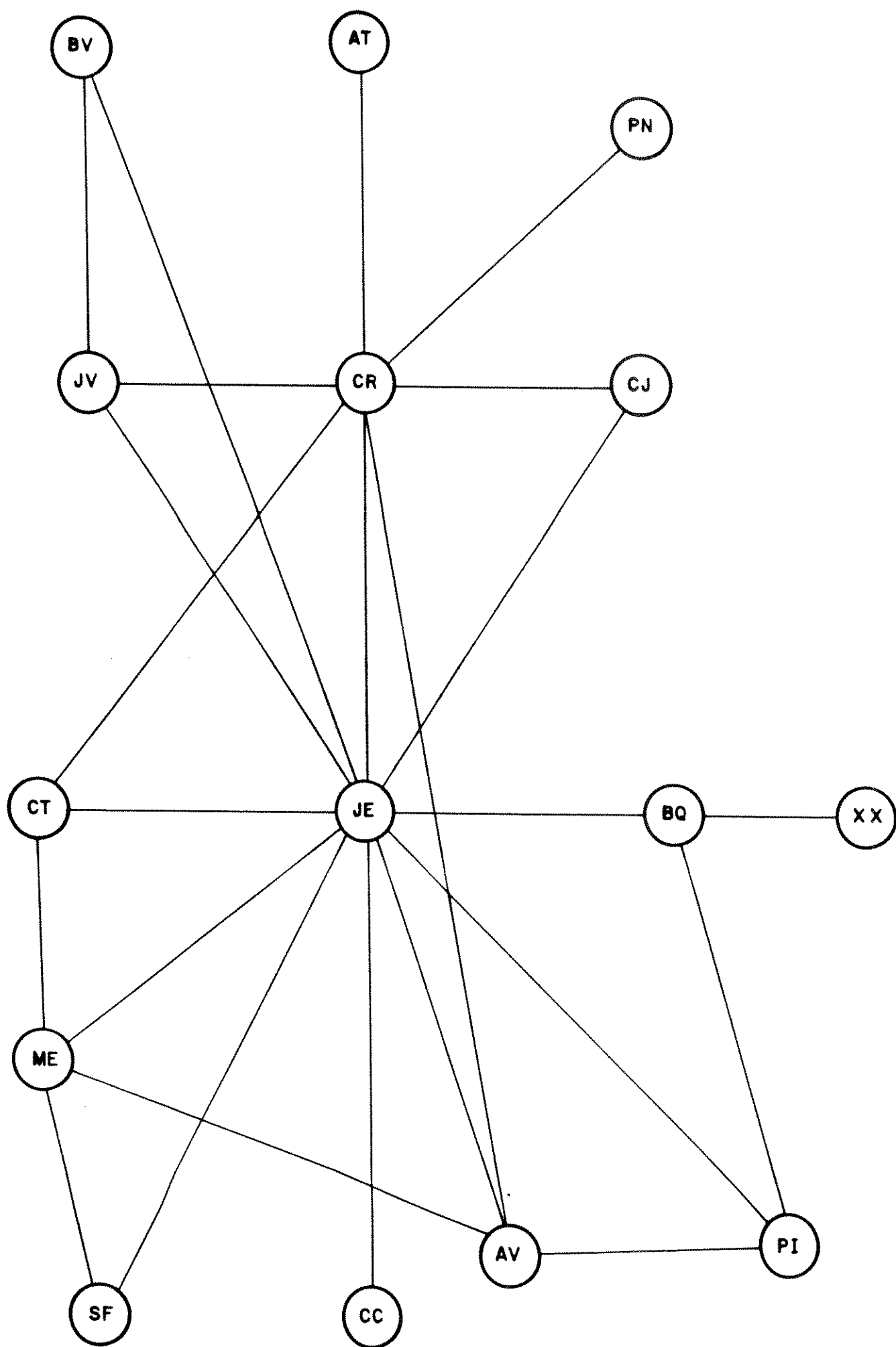


Figura 4.10 - Rede de Troncos de Curitiba - Ano 1.995

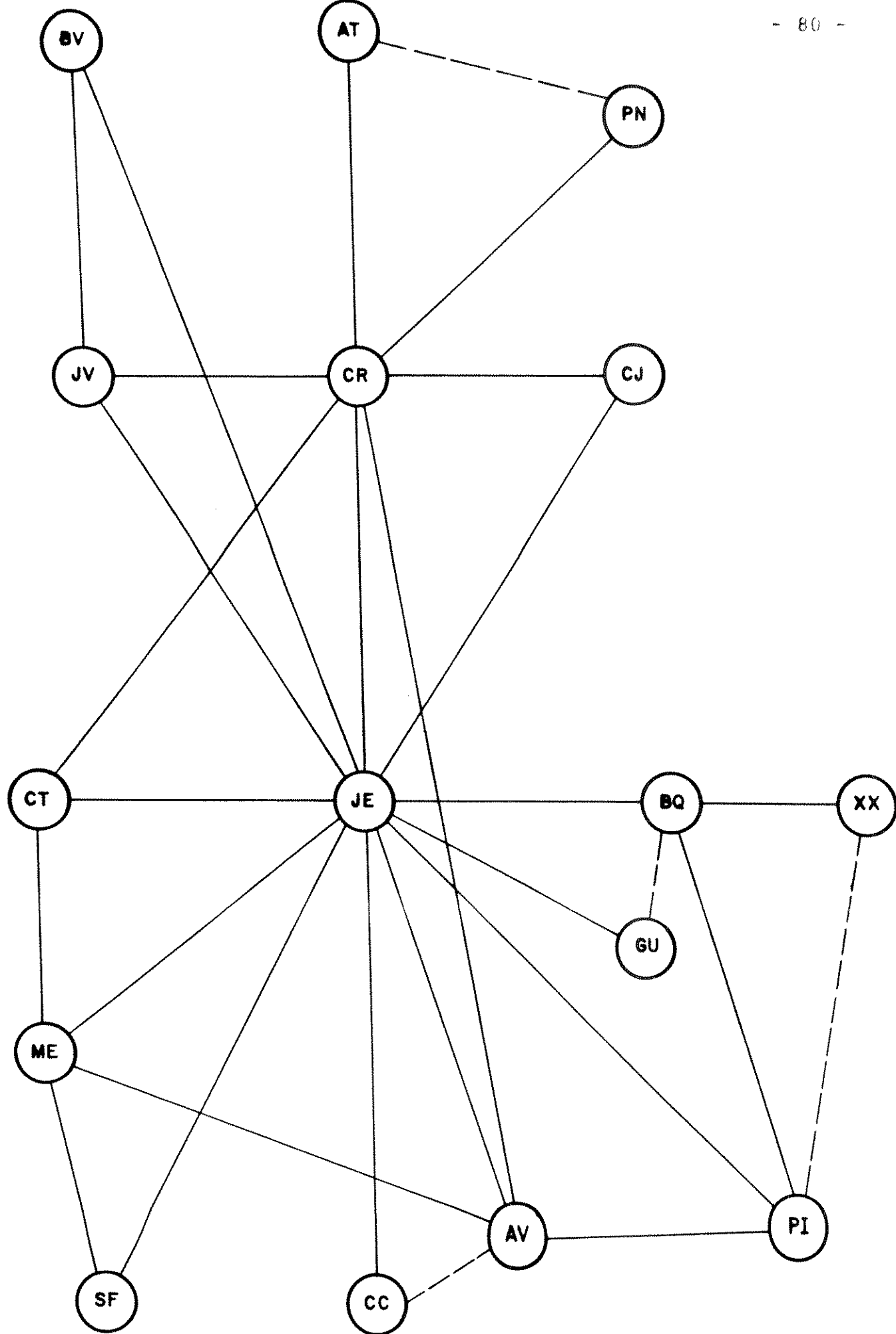


Figura 4.11 - Rede de Troncos de Curitiba - Ano 2.000

CAPÍTULO V

A DEFINIÇÃO DOS TRECHOS DE FIBRAS ÓPTICAS

PARA O ENTRONCAMENTO DIGITAL

V.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de uma metodologia que permite tratar o problema de planejamento da rede de troncos digital. A otimização do roteamento é obtida, a partir do cálculo simplificado do Entroncamento, levando-se em conta as facilidades de transmissão existentes na rede. Com isso, pretende-se, a partir da concepção dos PLANOS DE COMUTAÇÃO E TRANSMISSÃO, definir a TOPOLOGIA do Sistema de transmissão digital, quantificando os enlaces de fibras ópticas (rede de transmissão de alta hierarquia).

É feita uma descrição geral do problema, apresentada a idéia dos planos de comutação e transmissão e o detalhamento dos passos que compõem a metodologia adotada.

V.2. DESCRIÇÃO GERAL DO PROBLEMA

A expansão da demanda por serviços telefônicos em áreas locais será, em geral, atendida com a utilização de tecnologia digital. Haverá, portanto, uma crescente digitalização dos equipamentos de comutação e transmissão. Este "novo" ambiente tecnológico requer o desenvolvimento de novas metodologias para planejamento da rede de troncos, principalmente no que se refere ao CÁLCULO DO ENTRONCAMENTO e quantificação dos ENLACES de fibras ópticas.

Em função dos tipos de ligações verificadas, a rede de comutação pode ser dividida em dois planos [31].

- . PLANO DE COMUTAÇÃO ANALÓGICO (PCA), quando os equipamentos de origem/destino são analógicos.
- . PLANO DE COMUTAÇÃO DIGITAL (PCD), quando o equipamento de origem e/ou destino é digital.

A rede de transmissão, em função da utilização de transmissão em fibras ópticas com 34 Mb/s pode ser dividida em três planos:

- . Plano de Transmissão Analógica (PTA)

- . Plano de Transmissão em PCM com 2 Mb/s, 30 canais (PTP)
- . Plano de Transmissão em Fibras Ópticas com 34 Mb/s, 480 canais (PTF).

Uma vez que a principal preocupação da metodologia aqui apresentada é a rede de Entroncamento digital, todo esforço de análise será concentrado nos Planos de Transmissão Digital, PTP e PTF. A figura abaixo ilustra, de maneira simplificada, como pode ser visualizado o roteamento nos planos de transmissão digital:

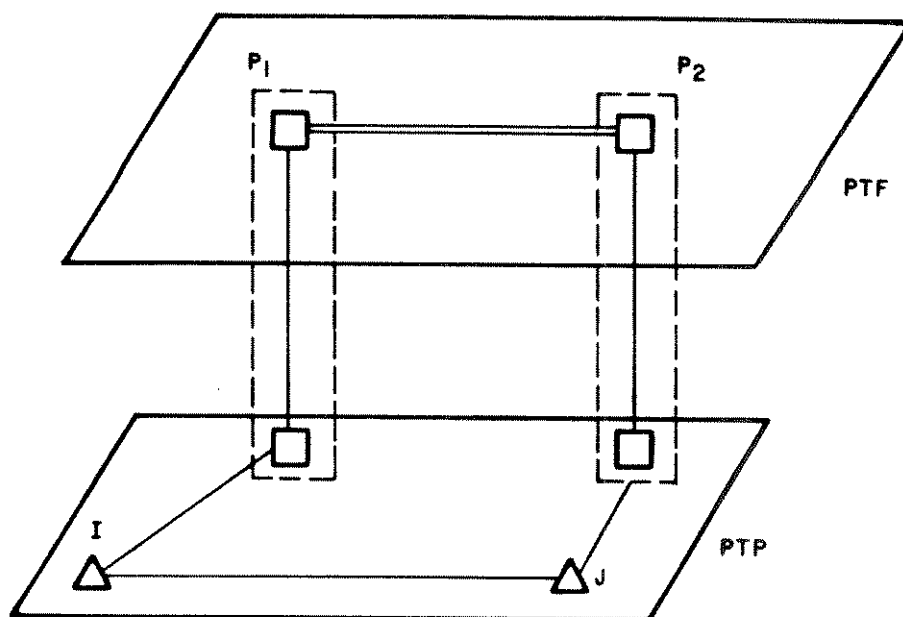


Figura 5.1 - A idéia do Roteamento nos Planos de Transmissão Digitais.

onde: I, J - Estações de origem e destino de tráfego.

P_1 , P_2 - Pontos de mudanças de hierarquia da transmissão, chamadas portas

—— - Transmissão em PCM com 30 canais..

==== - Transmissão em fibras ópticas com 480 canais.

A partir das considerações anteriores, o problema de planejamento da Rede de Troncos Digitais foi dividido, para fins de construção computacional, nas seguintes etapas:

- . Cálculo do Entroncamento Digital Simplificado.

. Obtenção das rotas nos Planos PTP e PTF: para definição das rotas no plano PTF é necessário IDENTIFICAR a localização das PORTAS (Pontos de mudança de hierarquia da transmissão) e, como consequência, os trechos possíveis para utilização de fibras ópticas.

. Determinação do roteamento otimizado levando-se em conta a existência dos planos de transmissão digitais, PTP, PTF, e as facilidades já implantadas na rede. Nesta etapa obtém-se o CARREGAMENTO dos arcos de fibras ópticas.

. Definição das compras de equipamentos de transmissão utilizadas na solução final do problema.

Embora não desenvolvido neste trabalho, espera-se que associando os dados de demanda com informações obtidas no quadro final do processo de otimização (variáveis duais referentes aos arcos, por exemplo) se possa ganhar sensibilidade para:

- Identificar possíveis candidatos a Centrais Tandem no Plano de Comutação Digital, PCD.
- Avaliar a possibilidade de se aumentar o número de PORTAS (explosão das portas inicialmente sugeridas).

V.3. A GERAÇÃO DOS TRONCOS: CÁLCULO SIMPLIFICADO DO ENTRONCAMENTO DIGITAL

No tratamento da comutação digital foi desenvolvido um procedimento computacional para CÁLCULO DO ENTRONCAMENTO que leva em conta os seguintes aspectos:

. Todas as ligações entre as estações são feitas por ROTAS DIRETAS.

. É admitida acessibilidade plena para as ligações digitais.

Admitindo-se o SISTEMA DE PERDAS para escoamento das chamadas, é comum adotar o MODELO DE ERLANG com as seguintes caracte-

ísticas:

- As chamadas ocorrem de acordo com uma Distribuição de Poisson com taxa λ e são independentes.
- Os tempos de ocupação dos troncos de saída tem uma Distribuição Exponencial Negativa com taxa μ e são independentes entre si.

Para sistemas com N troncos, ERLANG determinou a probabilidade de perda de chamada (Grau de serviço) segundo a fórmula:

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

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

conhecida como a Fórmula B de ERLANG.

Frequentemente o que se deseja é a expressão inversa, ou seja, conhecido "a" e fixado $B(N, a)$, determinar o número de troncos necessários. A obtenção desta expressão não é uma tarefa simples, ([07], [32]) e utilizam-se curvas e tabelas que relacionam a, N e $B(N, a)$ [33].

Utilizando tais tabelas obtém-se, para sistemas com grau de serviço de 1% ($B(N, a) = 1\%$), o gráfico da figura abaixo que traduz a conversão ERLANG $\rightarrow$ TRONCO.

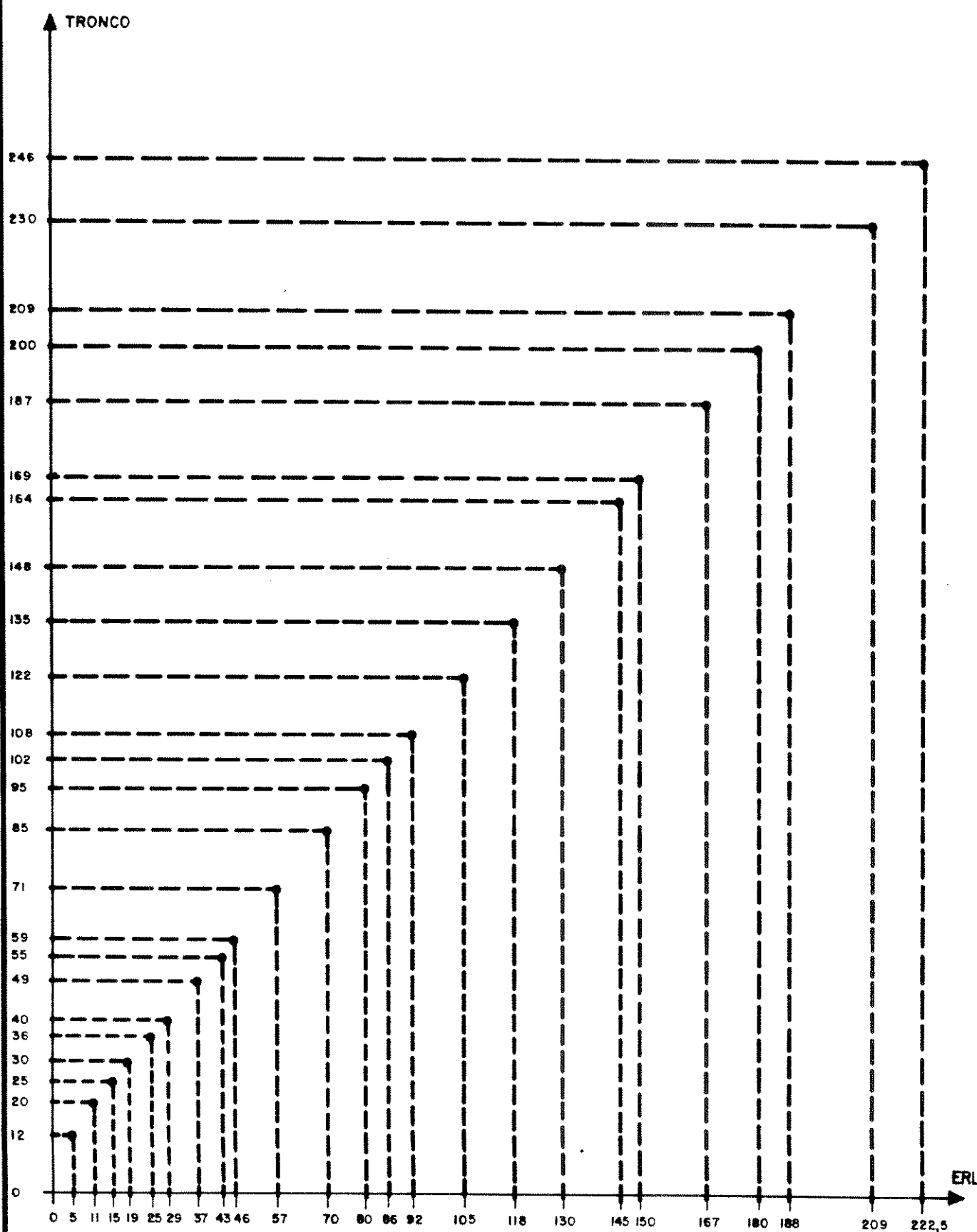


Figura 5.2 - Conversão Erlang - Tronco usando a Fórmula B
de Erlang

O procedimento computacional desenvolvido adota uma curva simplificada, na forma da figura abaixo, que permite sem grandes margens de erro, proceder à conversão ERLANG $\rightarrow$ TRONCO de uma maneira automatizada e sem a necessidade de recorrer às tabelas reais.

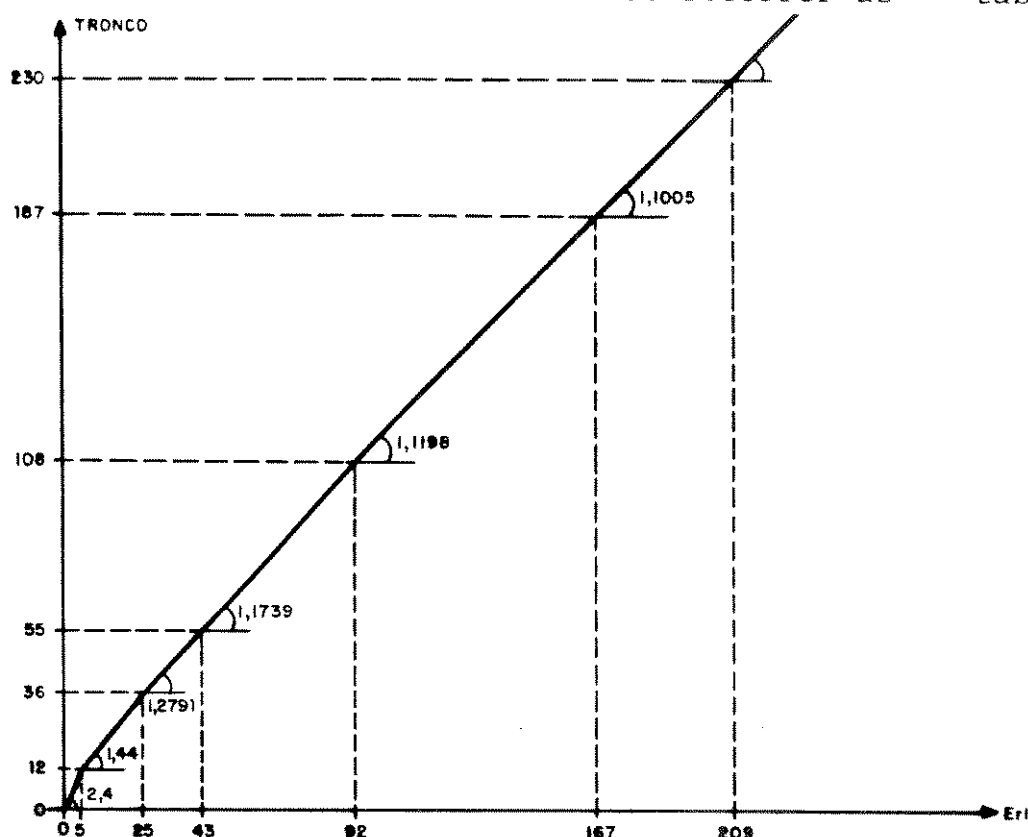


Figura 5.3 - Curva simplificada para a conversão Erlang $\rightarrow$ Tronco.

Para conversão simplificada ERLANG $\rightarrow$ TRONCO $\rightarrow$ SISTEMA PCM (2 Mb/s, 30 canais), foi desenvolvido um programa computacional (MATRON) que realiza, para cada demanda, as seguintes operações:

- . Identifica a perda admissível para a ligação.

- . Realiza a conversão ERLANG $\rightarrow$ TRONCO utilizando os parâmetros de inclinação dos gráficos simplificados da Fórmula B de Erlang (um para cada valor de perda).

- . converte TRONCOS $\rightarrow$ SISTEMAS PCM(2 Mb/s, 30 canais) utilizando a seguinte relação:

$$\text{Nº de sistemas PCM} = \text{menor inteiro} \geq \left(\frac{\text{Nº de troncos}}{30} \right)$$

O diagrama de blocos abaixo ilustra o procedimento adotado:

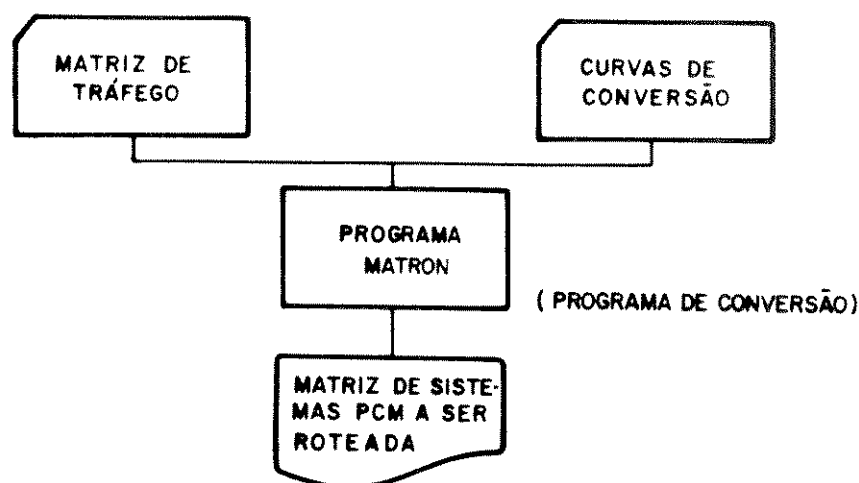


Figura 5.4 - Diagrama de blocos do programa de conversão Erlang→Sistemas PCM

V.4. A GERAÇÃO DOS CAMINHOS E A DEFINIÇÃO DAS ROTAS

Na etapa de otimização do Roteamento, em função das experiências acumuladas nos problemas de roteamento com segurança e roteamento em horizonte de longo prazo descritos anteriormente, decidiu-se por:

- Adotar a formulação arco-caminho.
- Considerar a COMPETIÇÃO entre as transmissões através dos planos PTP (PCM 30 canais) e PTF (Fibras óptica com 480 canais).

Torna-se, portanto, de fundamental importância identificação dos caminhos em cada um dos planos de transmissão, entre cada par de estações, para posterior definição das rotas onde as demandas serão escoadas.

V.4.1. DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS NO PLANO DE TRANSMISSÃO EM PCM

Para se definir as rotas com transmissão exclusivamente no plano PTP foi adotada a técnica de caminhos ϵ -mínimos [34]

para determinar os p-caminhos mais curtos entre duas estações. Foram utilizadas para isto, rotinas computacionais já implementadas em outros sistemas.

O programa computacional que determina os caminhos no plano PTP está preparado para identificar os caminhos disjuntos de soma mínima (quando os aspectos de segurança da transmissão são considerados) e admite também a indicação de caminhos adicionais por parte do usuário.

V.4.2 DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS UTILIZANDO O PLANO DE TRANSMISSÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

Para se obter o Plano de Transmissão em fibras ópticas torna-se indispensável estabelecer a localização das PORTAS de mudança de hierarquia da transmissão. Utilizando técnicas de caminho mínimo pode-se determinar a menor distância entre cada par de portas.

Um caminho entre duas estações, utilizando o plano de transmissão em fibras ópticas, pode ser genericamente representado de acordo com a figura abaixo:

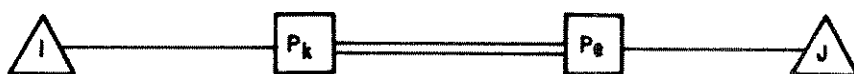


Figura 5.5 - Representação de um caminho utilizando o plano de transmissão em fibras ópticas.

onde:



são as estações de origem/destino



PORTAS de mudança de hierarquia de transmissão

A idéia predominante é obter caminhos mais curtos entre as estações, privilegiando aqueles que possuem maiores trechos no plano de transmissão em fibras ópticas.

Na determinação destes caminhos foi utilizada a seguinte estratégia:

. entre $\triangle I \rightarrow \square P_k$ e $\square P_e \rightarrow \triangle J$, adotou-se uma técnica do tipo Programação Dinâmica, FORWARD para o primeiro caso e BACKWARD para o segundo, para determinar a trajetória de distância Mínima.

. entre $\square P_k \rightarrow \square P_e$ adotou-se uma técnica de caminho mínimo

A figura abaixo fornece uma representação para estes caminhos:

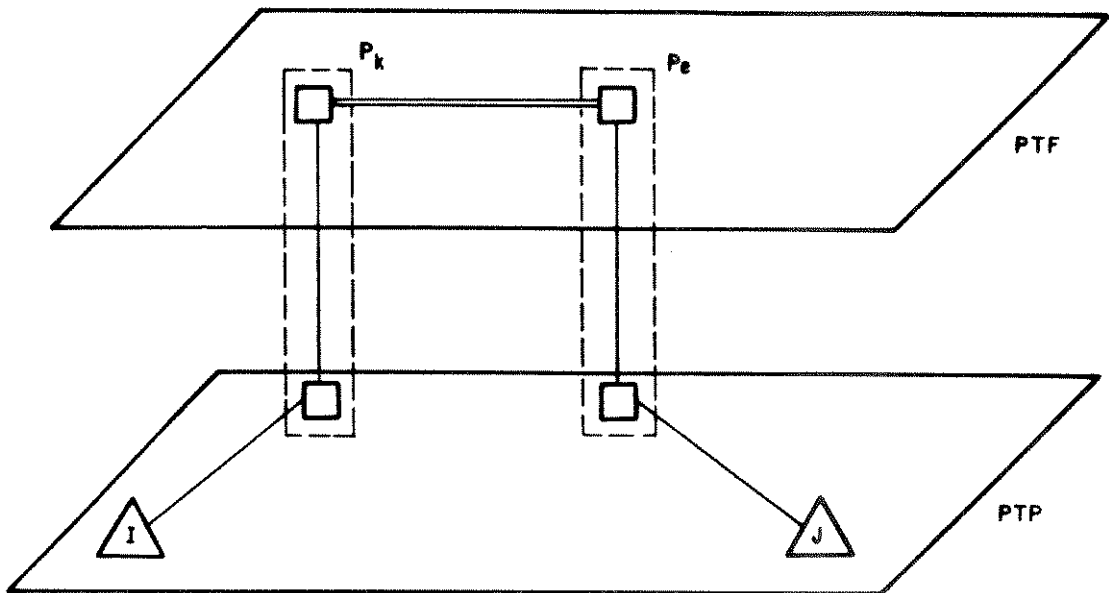


Figura 5.6 - Representação de um caminho utilizando o Plano de Transmissão em Fibras ópticas.

Algumas particularidades destes caminhos devem ser destacadas:

- eles também utilizam arcos do Plano de Transmissão em PCM (PTP) correspondentes às ligações $\triangle I \rightarrow \square P_k$ e $\square P_e \rightarrow \triangle J$
- há a necessidade de serem criados ARCOS FICTÍCIOS, de "distância nula", para permitir a ligação dos planos PTP e PTF.

- embora os trechos de fibras ópticas utilizem, na prática, os arcos da rede de troncos, torna-se necessário a criação de ARCOS ARTIFICIAIS (que podem corresponder à união de vários arcos originais da rede) para as ligações entre as portas.

Estes Arcos Artificiais correspondem às distâncias mínimas entre as Portas e são utilizados para simplificar o tratamento da rede no plano de transmissão em fibras ópticas. Vale lembrar que este tipo de simplificação não afeta a qualidade dos resultados, uma vez que não estamos considerando os aspectos de segurança da transmissão no plano de alta hierarquia.

Pode ocorrer que a Estação origem $\triangle I$ coincida com uma porta $\square PK$ e/ou a estação destino $\triangle J$ coincida com uma porta $\square Pe$. Neste caso, uma ligação entre as estações $\triangle I$ e $\triangle J$ assume uma das configurações abaixo:

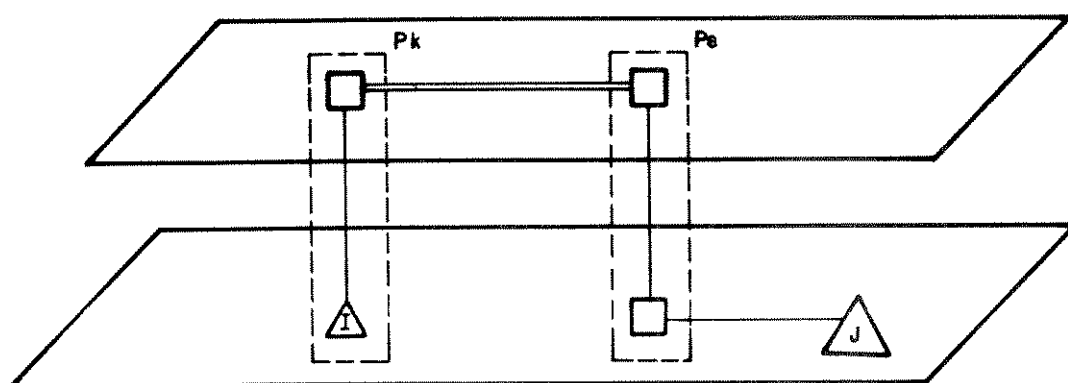


Figura 5.7 - Ligação entre duas estações $\triangle I \rightarrow \triangle J$ quando $\triangle I$ coincide com uma porta.

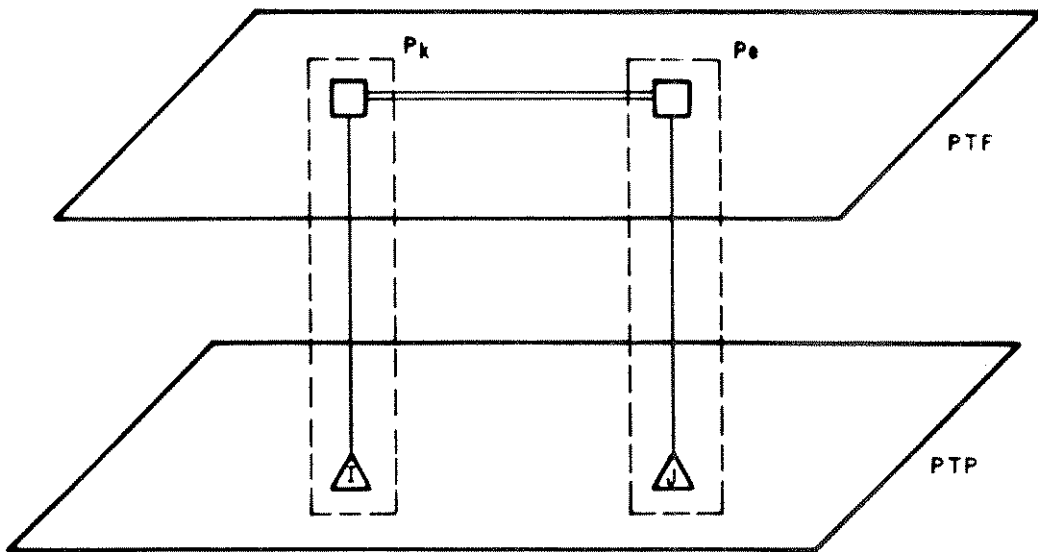


Figura 5.8 - Ligação entre duas estações $I \rightarrow J$ e ambas são Portas.

Para facilitar a definição das rotas e a construção da estrutura de custos, os caminhos são identificados em função do plano de transmissão:

$$\text{Plano } (k) = \begin{cases} 1 & \text{Se o caminho } k \text{ utiliza apenas o plano de transmissão em PCM (1ª. ordem)} \\ 3 & \text{Se o caminho } k \text{ utiliza o plano de transmissão em fibras ópticas (3ª. ordem).} \end{cases}$$

O procedimento para determinação dos caminhos que utilizam o plano de transmissão em fibras ópticas pode ser resumido como:

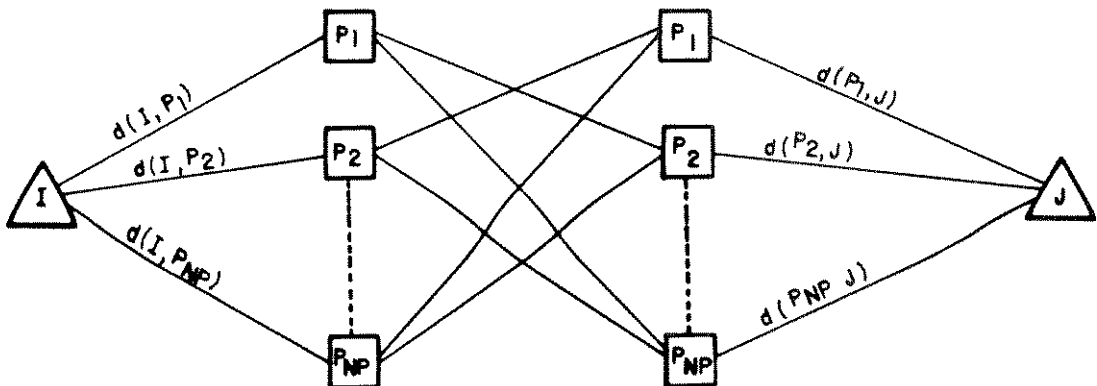


Figura 5.9 - Esquema de determinação dos caminhos no Plano de Transmissão em Fibras Ópticas

$d(I, P_k)$ - Distância do caminho mínimo da estação origem $\triangle I$
até a PORTA $\boxed{P_k}$ (Forward)

$d(P_e, J)$ - Distância do caminho mínimo da estação destino $\triangle J$
até a porta $\boxed{P_e}$ (Backward)

$d(P_k, P_e)$ - Distância do caminho mínimo entre as PORTAS $\boxed{P_k}$ e $\boxed{P_e}$

A distância mínima entre as estações $\triangle I \rightarrow \triangle J$, $d(I, J)$,
é obtida da seguinte forma:

$$d(I, j) = \min_k \{ d(I, P_k) + \min_e [d(P_k, P_e) + d(P_e, J)] \}$$

$K = 1, 2, \dots, NP$

$e = 1, 2, \dots, NP$

$K \neq e$

NP = número total de portas

Onde a minimização interna descreve o sentido "Backward"
e a minimização externa o sentido "Forward" do processo.

Na metodologia desenvolvida são considerados os três
caminhos mais curtos entre as estações $\triangle I \rightarrow \triangle J$, que passam
por duas PORTAS. Foram necessárias algumas adaptações no modelo de
Programação Dinâmica para garantir que o programa armazene estes
caminhos.

V.4.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS CUSTOS DAS ROTAS

Levando-se em consideração que as demandas a serem ro-
teadas são originadas no Plano de Comutação Digital e que, por hi-
pótese, a transmissão se fará através de meios digitais, a deter-
minação das rotas torna-se uma tarefa simplificada. Os meios di-
gitais utilizados (PCM e PCM + FIBRA) são sempre FACTÍVEIS para
todas as ligações. Deve-se atentar apenas para o custo das ROTAS
que será função do plano onde a rota é definida.

Se a rota é definida no Plano de Transmissão em PCM, cuja representação é mostrada na figura abaixo, devem ser considerados na definição do custo da rota:

. Custo de Regeneradores (1 para cada sistema PCM (2Mb/s) em cada ponto de regeneração). Em média são colocados pontos de regeneração a cada 1,5 Km.

. Custo do cabo para PCM

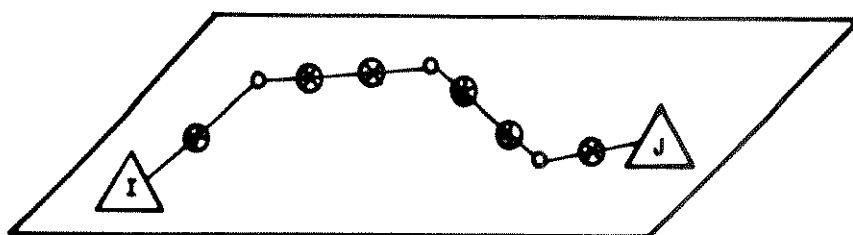


Figura 5.10 - Representação de uma rota no Plano de Transmissão em PCM.

onde:

⊗ - indica os pontos de regeneração em cada arco.

Para definição do custo das rotas que utilizam o Plano de Transmissão em Fibras Ópticas, é preciso visualizar o esquema de transmissão entre as PORTAS de mudança de hierarquia, cuja representação é mostrada na figura 5.11.

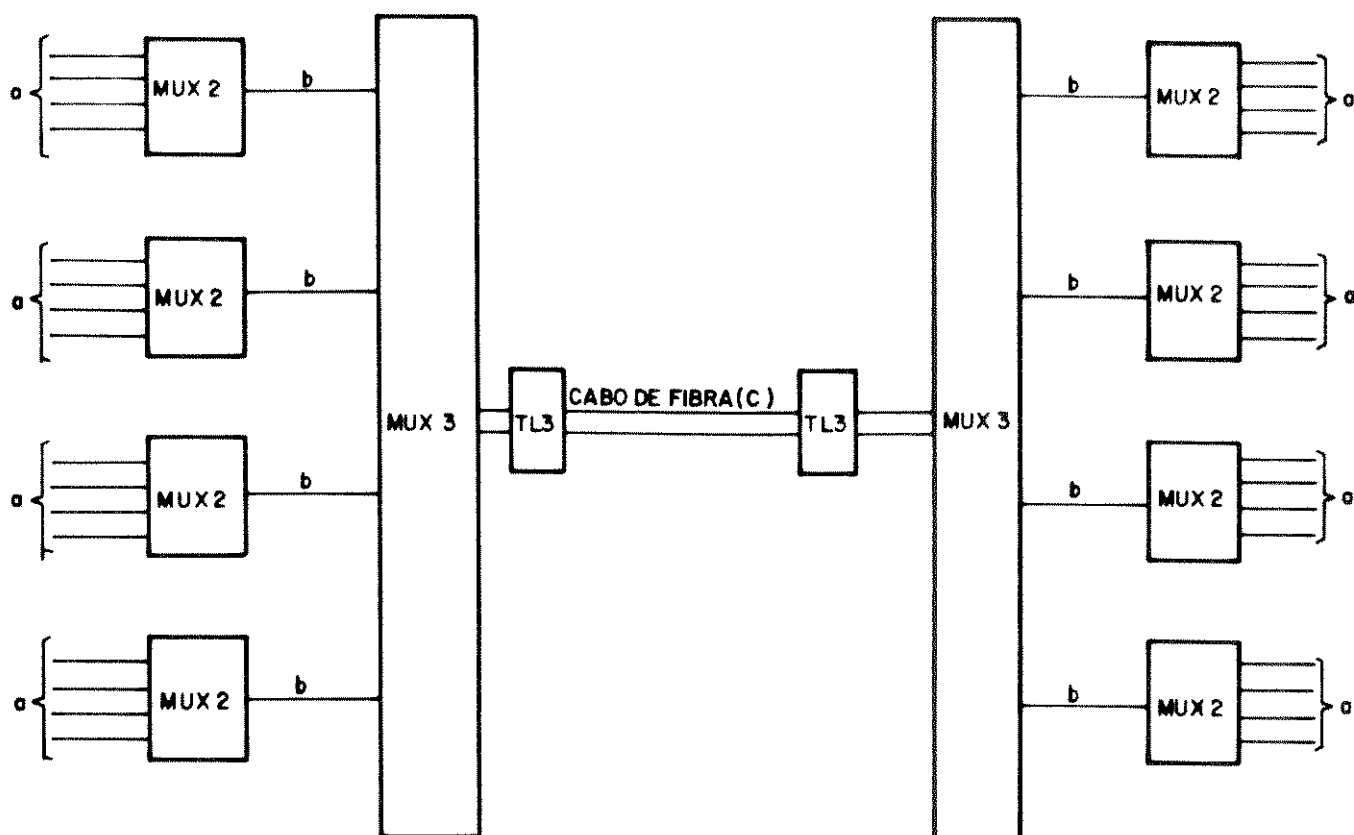


Figura 5.11 - Representação do esquema de transmissão entre duas PORTAS

onde:

- a - Linhas de transmissão em PCM (2 Mb/s)
- b - Linhas de transmissão em 8 Mb/s
- c - Linhas de transmissão em fibra óptica (34 Mb/s)

Mux2 - Equipamento de multiplexagem que agrupa 4 sistemas PCM 30 canais (2 Mb/s) em 1 sistema de 120 canais (8 Mb/s).

Mux3 - Equipamento de multiplexagem que agrupa 4 sistemas PCM de 120 canais (8 Mb/s) em 1 sistema de 480 canais (34 Mb/s). Portanto, 16 sistemas PCM de 30 canais (2 Mb/s).

TL3 - Terminal de linha para o sistema de 34 Mb/s.

Para estas rotas, cuja representação é mostrada na figura abaixo, na definição do custo devem ser considerados:

- Custo no Plano de Transmissão em PCM, correspondente aos trechos $I \rightarrow P_k$ e $P_e \rightarrow J$ (cabo para PCM + Regeneradores).
- Custo no plano de transmissão em fibras ópticas correspondentes à ligação $P_k \rightarrow P_e$: cabo de Fibra, MUX3, MUX2, TL3, e repetidor óptico (quando necessário).

Em média são colocados repetidores a cada 10 Km de linha de transmissão com cabo óptico.

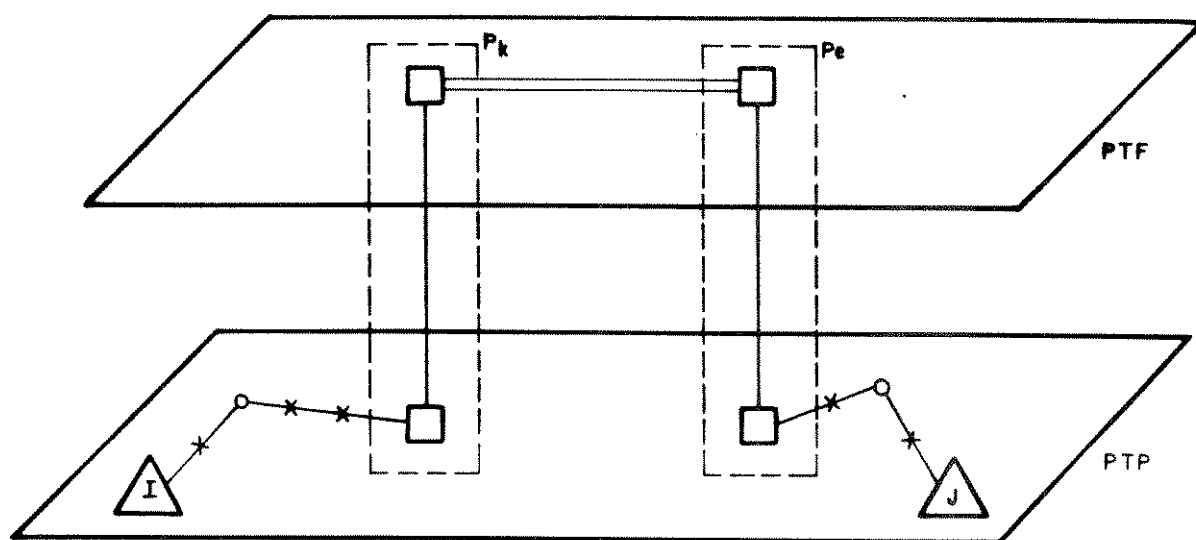


Figura 5.12 - Representação de uma rota utilizando o Plano de Transmissão em fibras ópticas.

V.5. A OTIMIZAÇÃO INICIAL

O que se pretende é obter o roteamento ótimo para a demanda admitindo-se a competição, em termos de custos, entre a transmissão nos planos de PCM e de fibras ópticas. Para fins de roteamento adotou-se a mesma formulação Arco-Caminho, utilizada nos problemas de roteamento com segurança e roteamento em horizontes de longo prazo. A implementação deste modelo exige que as funções de custo sejam lineares/lineares por partes.

Na definição dos CUSTOS DAS ROTAS (custo nos caminhos) é considerado apenas um CUSTO OPERACIONAL (linear) que é função do plano onde a rota é definida. Entretanto, para as variáveis correspondentes à COMPRA nos arcos é utilizada uma função de custo, dependente do plano onde o arco é definido, da seguinte forma:

- Arcos do Plano de Transmissão em PCM

Admitindo a existência no arco de:

- . N regeneradores por ponto de regeneração
- . C pares "disponíveis" para PCM

O custo da variável de compra correspondente assume a forma:

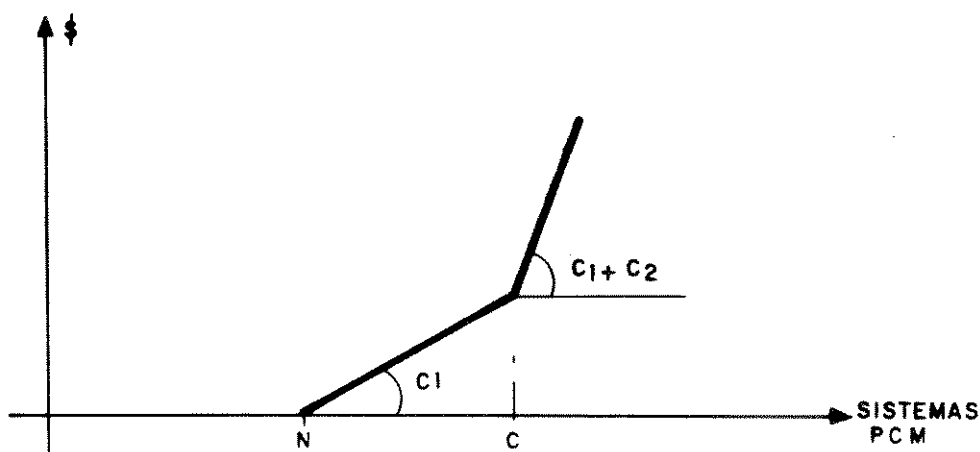


Figura 5.13 - Função de Custo para a compra em um arco do Plano de Transmissão em PCM.

onde:

- C_1 - Custo por Regenerador (função da quantidade de pontos de regeneração existentes no arco)
- C_2 - Custo do cabo para PCM (função do comprimento do arco).

- Arcos no Plano de Transmissão em Fibras Ópticas

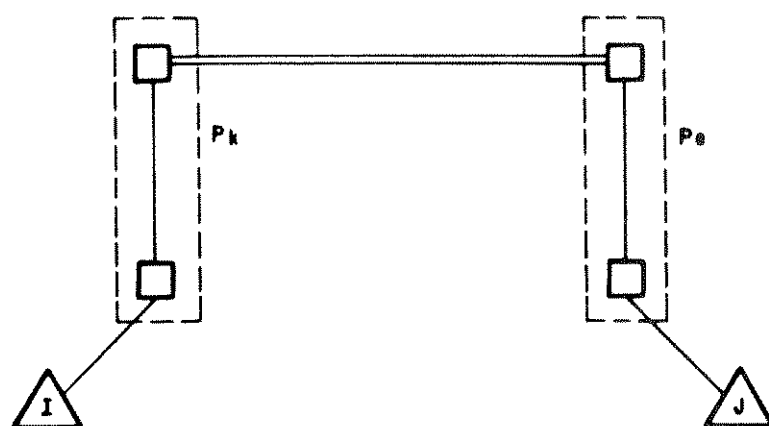


Figura 5.14 - Representação de uma rota utilizando o Plano de transmissão em fibra óptica.

As rotas representadas de acordo com a Figura 5.14 utilizam, na prática, os dois planos de transmissão. Para os arcos correspondentes às ligações Estação Origem/Porta Origem ($\boxed{PK}$) e Porta Destino/Estação Destino ($\boxed{Pe} \rightarrow J$), pertencentes ao plano de transmissão em PCM, é adotada uma função de custo como mostrada na figura 5.13. Para os arcos que caracterizam as ligações entre as PORTAS, pertencentes ao plano de transmissão em fibras ópticas, utiliza-se, numa rodada inicial, custos linearizados segundo a figura abaixo:

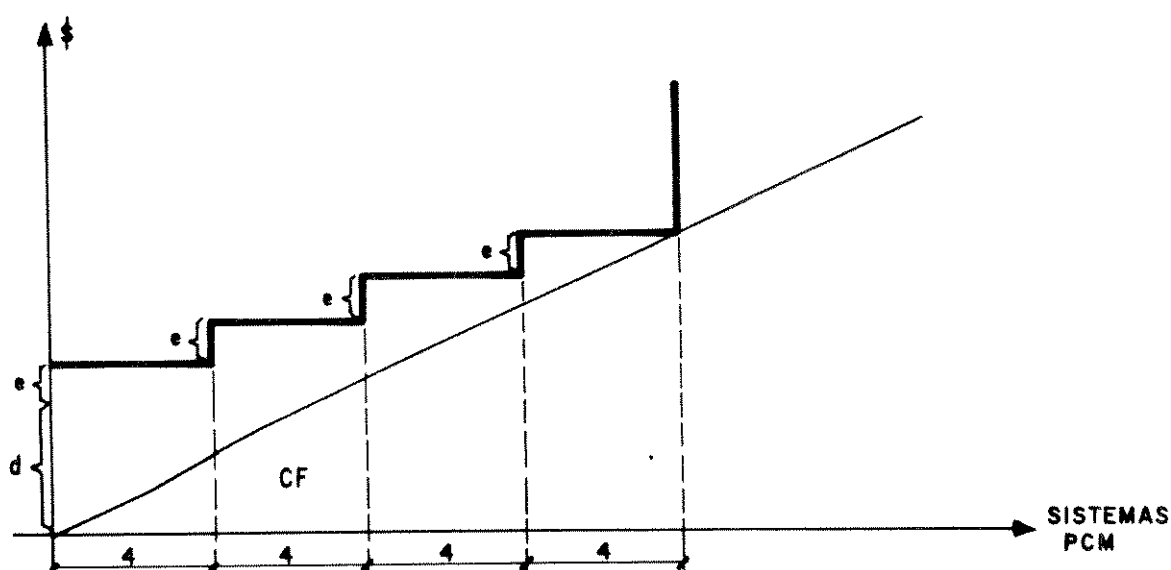


Figura 5.15 - Função de Custo para a compra nos arcos do Plano de Transmissão em Fibras Ópticas

onde:

- d - representa a parte fixa dos custos dos equipamentos de transmissão em 34 Mb/s para cada conjunto de até 16 sistemas de 2 Mb/s (modularidade); corresponde a:
 - . 2 MUX3, 2 TL3, PARKM DE FIBRA, indispensáveis para a transmissão no plano PTF.
 - . repetidor óptico na proporção de um repetidor a cada 10Km, em média, para cada sistema de 34 Mb/s.
- e - representa o custo dos equipamentos de multiplexagem dos sistemas de 8 Mb/s:
 - . 2 MUX2 para cada 4 sistemas PCM 2 Mb/s roteados no plano PTF.

CF - Custo linearizado

$$CF = \frac{d + 4e}{16}$$

O modelo resultante apresenta restrições do tipo Limite Superior Generalizado (GUB) e função objetivo linear por partes. Uma rodada inicial considerando as funções de custo mostradas nas figuras 5.13 e 5.15 fornece como resultados:

- roteamento no plano de transmissão em PCM.
- carregamento inicial nos arcos de fibras ópticas.

A partir desta solução inicial, otimista no plano de transmissão em Fibras Ópticas, torna-se necessário o desenvolvimento de procedimentos heurísticos com os seguintes objetivos:

- . corrigir os erros decorrentes da linearização dos custos nos arcos do plano de transmissão em fibras ópticas.

- . aproveitar as disponibilidades eventualmente existentes após o processo de correção dos custos, nos sistemas de 2ª. ordem, e não evidenciadas com os custos simplificados.

Será adotado neste trabalho o termo solução otimista para caracterizar uma solução onde o custo resultante das heurísticas utilizadas é no máximo igual ao custo real da mesma. Em suma, o termo otimista indica que as funções de custos utilizadas correspondem a linearizações inferiores da curva de custo real.

V.6. UM PROCEDIMENTO HEURÍSTICO PARA CORREÇÃO DO CARREGAMENTO NOS ARCOS DO PLANO DE TRANSMISSÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

Para resolver as questões levantadas no item anterior, quanto ao carregamento nos arcos de fibras ópticas, foi desenvolvido um procedimento heurístico que consiste, fundamentalmente, em correções sucessivas das funções de custo correspondentes; as correções dependem da solução considerada para o roteamento e pretendem melhorá-la. Num primeiro momento, procura-se diminuir a "distância" entre o custo real e o custo simplificado (linearizado), deixando tanto quanto possível este último sempre "otimista" em relação ao primeiro. Este procedimento pode implicar em várias iterações do processo correção de custos x Otimização. Em seguida, face ao efeito da modularidade dos sistemas de 2ª. ordem, utiliza-se um procedimento do tipo "relaxação dos custos", visando aproveitar as disponibilidades correspondentes à não utilização completa dos sistemas comprados.

V.6.1. HEURÍSTICA PARA APROXIMAÇÃO DO CUSTO SIMPLIFICADO COM O CUSTO REAL

Após a otimização inicial, onde são adotados custos linearizados para as compras nos arcos de fibras ópticas de acordo com a figura 5.15, três situações distintas podem ocorrer em relação aos fluxos nestes arcos merecendo, portanto, tratamento diferenciado:

SITUAÇÃO I : O fluxo Final é Múltiplo de 16 sistemas PCM

Neste caso estão sendo completamente utilizados um certo número de sistemas de 3ª. ordem (sistema de 34 Mb/s em 480 canais). Há, portanto, igualdade entre os custos linearizado e real. Adota-se para estes arcos a seguinte função de custo:

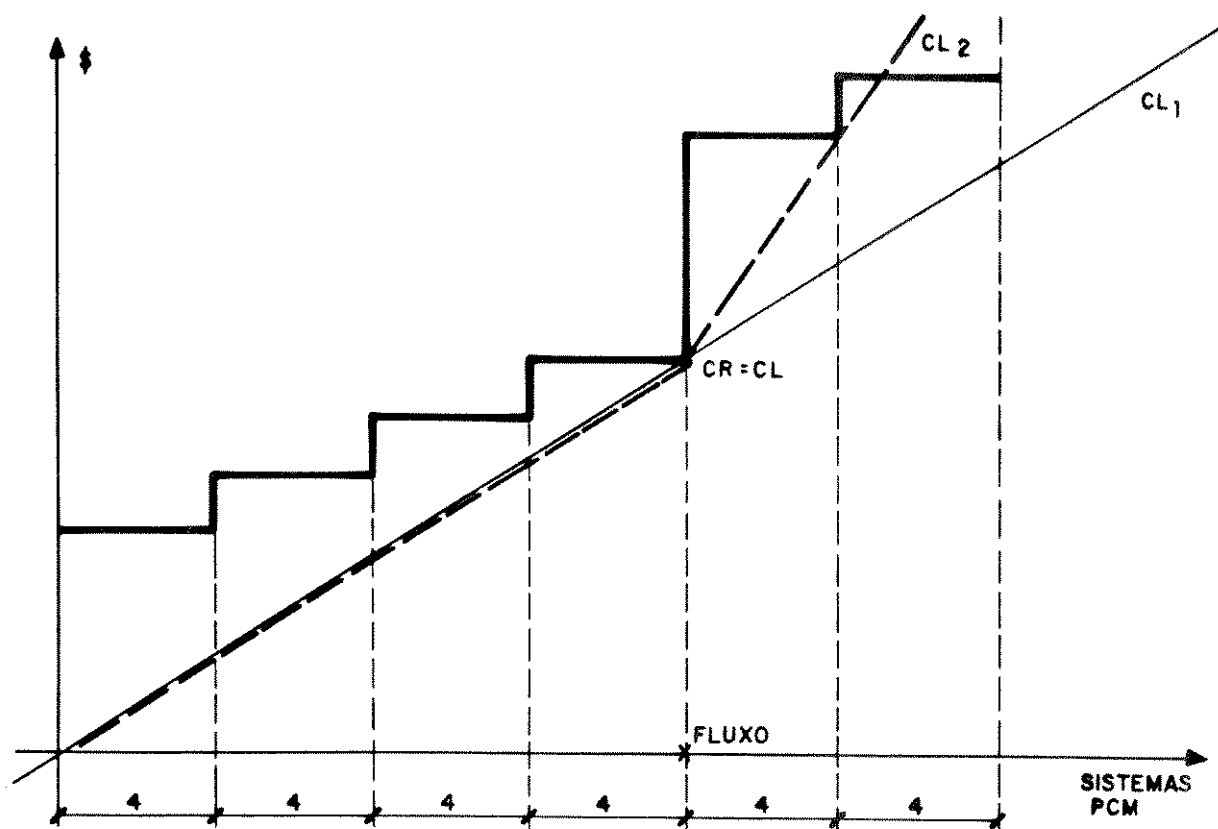


Figura 5.16 - Função de custo para a compra nos arcos de fibra óptica cujo fluxo é múltiplo de 16.

Onde:

CR - é o custo real da compra do arco.

CL - custo linearizado da compra do arco.

CL_1 - curva de custo linearizada da rodada inicial.

CL_2 - curva de custo penalizada para rodadas adicionais.

SITUAÇÃO II: o Fluxo no arco é múltiplo de 4 sistemas PCM

Evidentemente, está se admitindo que o fluxo não é múltiplo de 16 sistemas PCM. Isto indica a existência de um sistema de 3ª. ordem (Alta Hierarquia) parcialmente utilizado e alguns sistemas de 2ª. ordem (Sistema de 8 Mb/s em 120 canais) totalmente utilizados. Há, portanto, uma ociosidade em relação à capacidade do sistema de Alta Hierarquia. Nestes arcos, o Custo Real é maior que o custo linearizado e a seguinte função de custo é adotada:

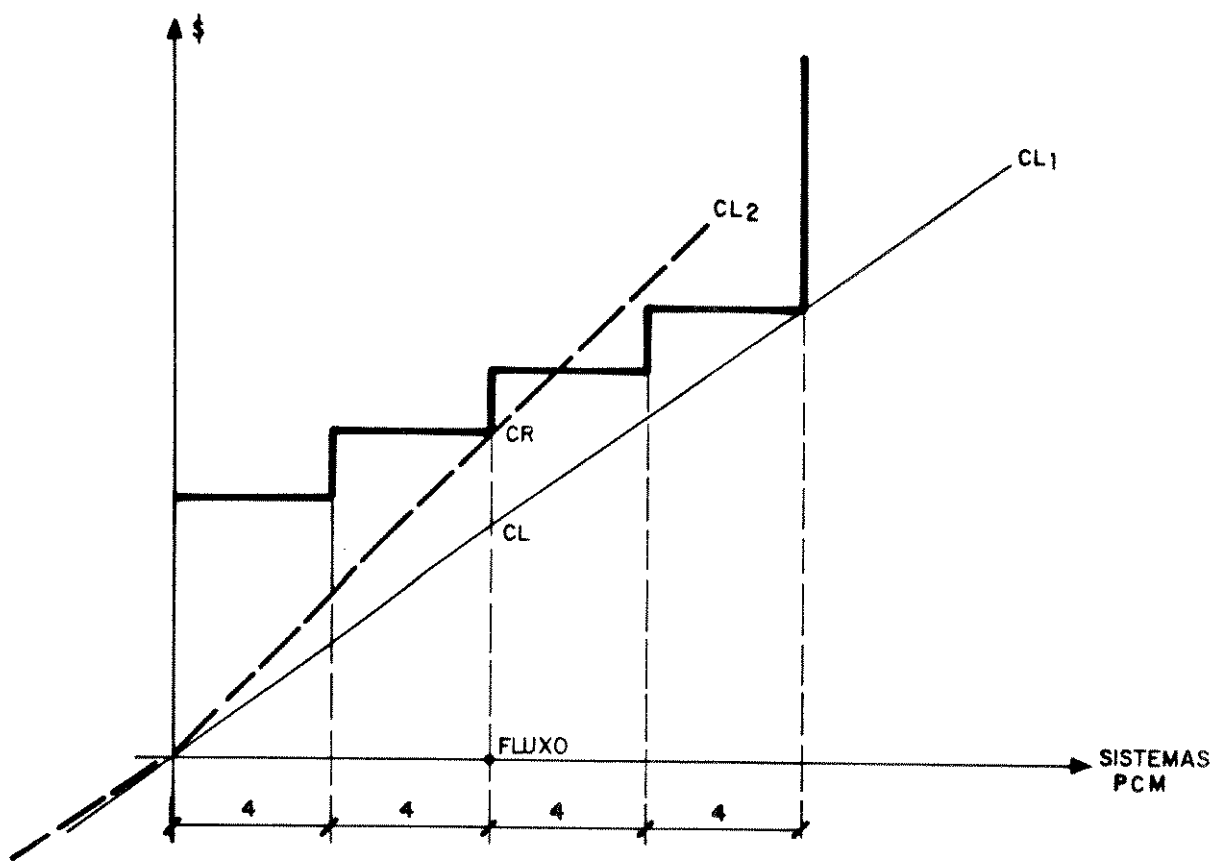


Figura 5.17 - Função de custo para um arco de fibra óptica cujo fluxo é múltiplo de 4 sistemas PCM.

SITUAÇÃO III: O fluxo final não é múltiplo de 4 sistemas PCM

Este caso é semelhante ao verificado na Situação II. Indica a existência de sistema de 2ª. ordem parcialmente utilizado. Aparecem, então, ociosidades tanto no sistema de 3ª. ordem quanto no sistema de 2ª. ordem. A função de custo neste caso assume a forma:

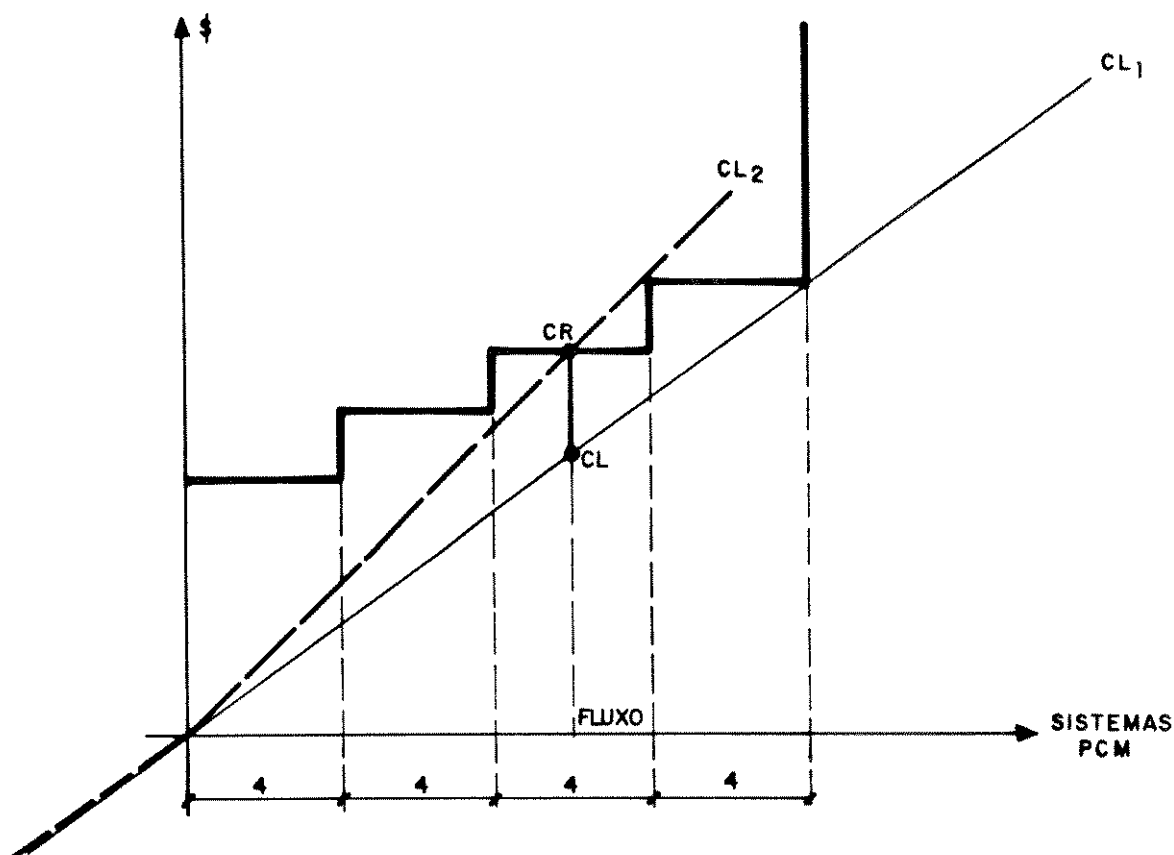


Figura 5.18 - Função de custo para um arco de fibra óptica cujo fluxo não é múltiplo de 4 sistemas PCM.

Em função dos custos envolvidos no problema, podem ocorrer situações onde se verifica a perda da característica "otimista" das funções de custo sugeridas pelo procedimento heurístico desenvolvido. Para estas situações adota-se uma função de custo com dupla quebra mostrada a seguir:

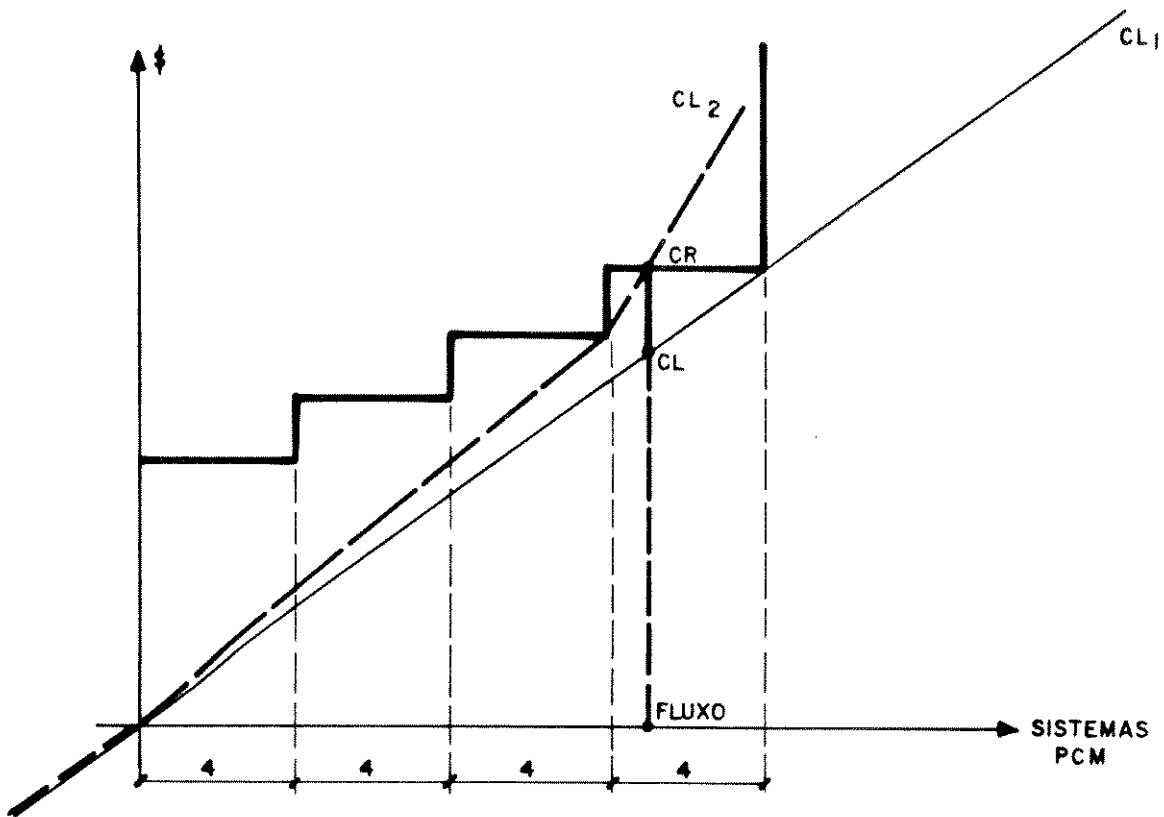


Figura 5.19 - Função de custos para a compra nos arcos de fibra óptica onde há perda de característica "otimista".

Nos arcos do plano de Transmissão em PCM, o custo da compra representado na figura 5.13 permanece inalterado durante todo o processo.

Mantém-se, deste modo, a característica linear por partes da função objetivo do modelo apresentado.

Neste processo de correção dos custos, denominado HEURÍSTICA 2, busca-se uma aproximação do custo real com o custo simplificado (linearizado) para as compras nos arcos do Plano de Transmissão em fibras ópticas.

V.6.2. A CONSIDERAÇÃO DAS DISPONIBILIDADES NOS SISTEMAS DE 2ª ORDEM

A estrutura de Custo obtida no processo HEURÍSTICA2, pode levar a uma situação onde está se pagando por uma certa quantidade de equipamentos de 2ª. ordem (MUX2) sem que estes sejam totalmente utilizados. Por exemplo, após uma rodada do processo de otimização com os dados definidos na HEURÍSTICA2, o fluxo num determinado arco é de 13 sistemas PCM. Para este fluxo o programa indica a necessidade de 4 equipamentos MUX2, fazendo com que o custo dos 13 sistemas indicado seja idêntico ao custo de 16 sistemas. Isto gera uma disponibilidade nos sistemas de 2ª. ordem, com custo nulo. Há, portanto, a necessidade de uma nova correção dos custos para, num processo de otimização global, procurar utilizar estas disponibilidades.

Duas situações podem ocorrer com relação à quantidade de equipamentos de 2ª. ordem indicada para compra:

a) o sistema de Alta Hierarquia fica completamente utilizado, embora com ociosidade no sistema de 2ª. ordem.

b) há ociosidade no sistema de Alta Hierarquia, além da existente no sistema de 2ª. ordem.

Tomando:

$$S_1 = \frac{\text{Nº de sistemas PCM}}{16}$$

$$S_2 = \text{menor inteiro tal que } S_2 \geq S_1$$

obtem-se as seguintes caracterizações para as situações descritas:

- . situação a: $0 < S_2 - S_1 \leq 0,25$
- . situação b: $S_2 - S_1 > 0,25$ e S_1 não é múltiplo de 4.

Para estes casos, são adotadas as seguintes funções de Custo:

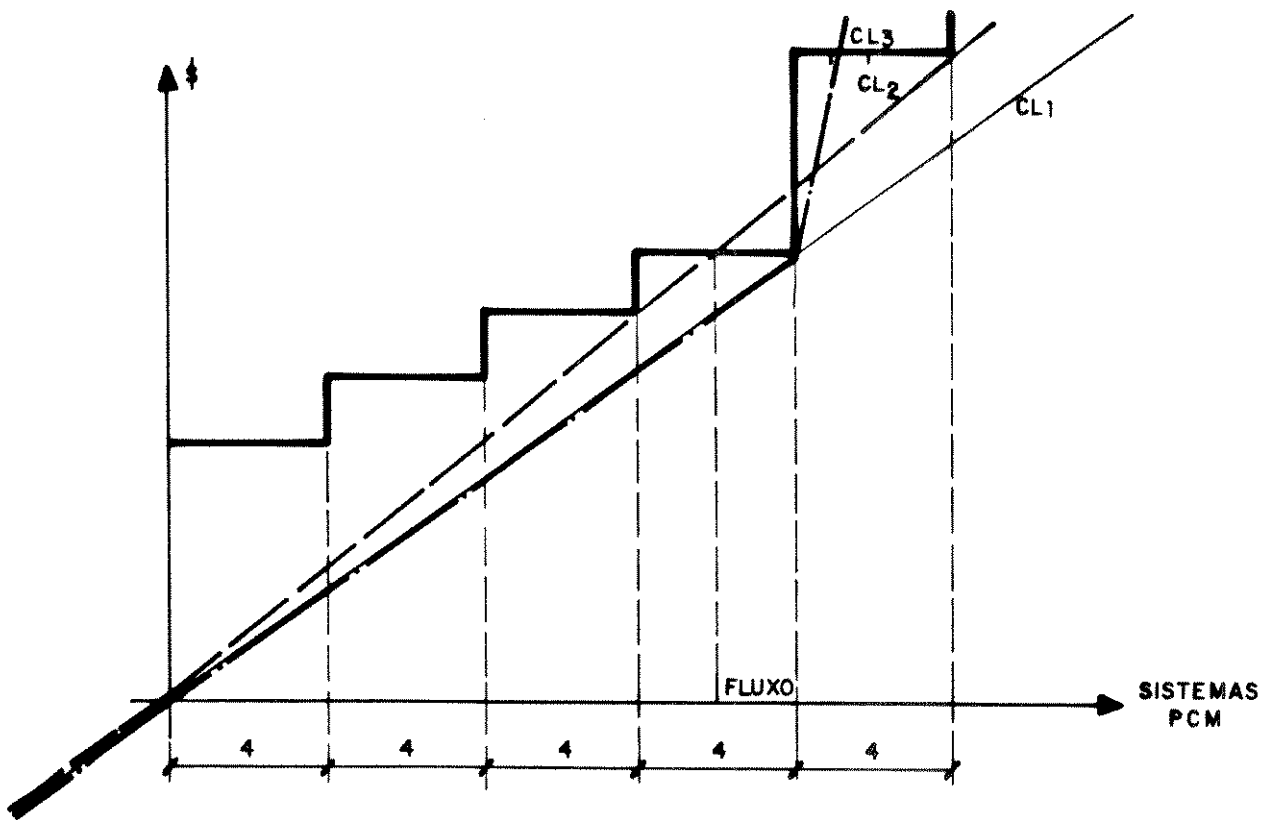


Figura 5.20 - Função de Custo para a utilização completa do sistema de alta hierarquia.

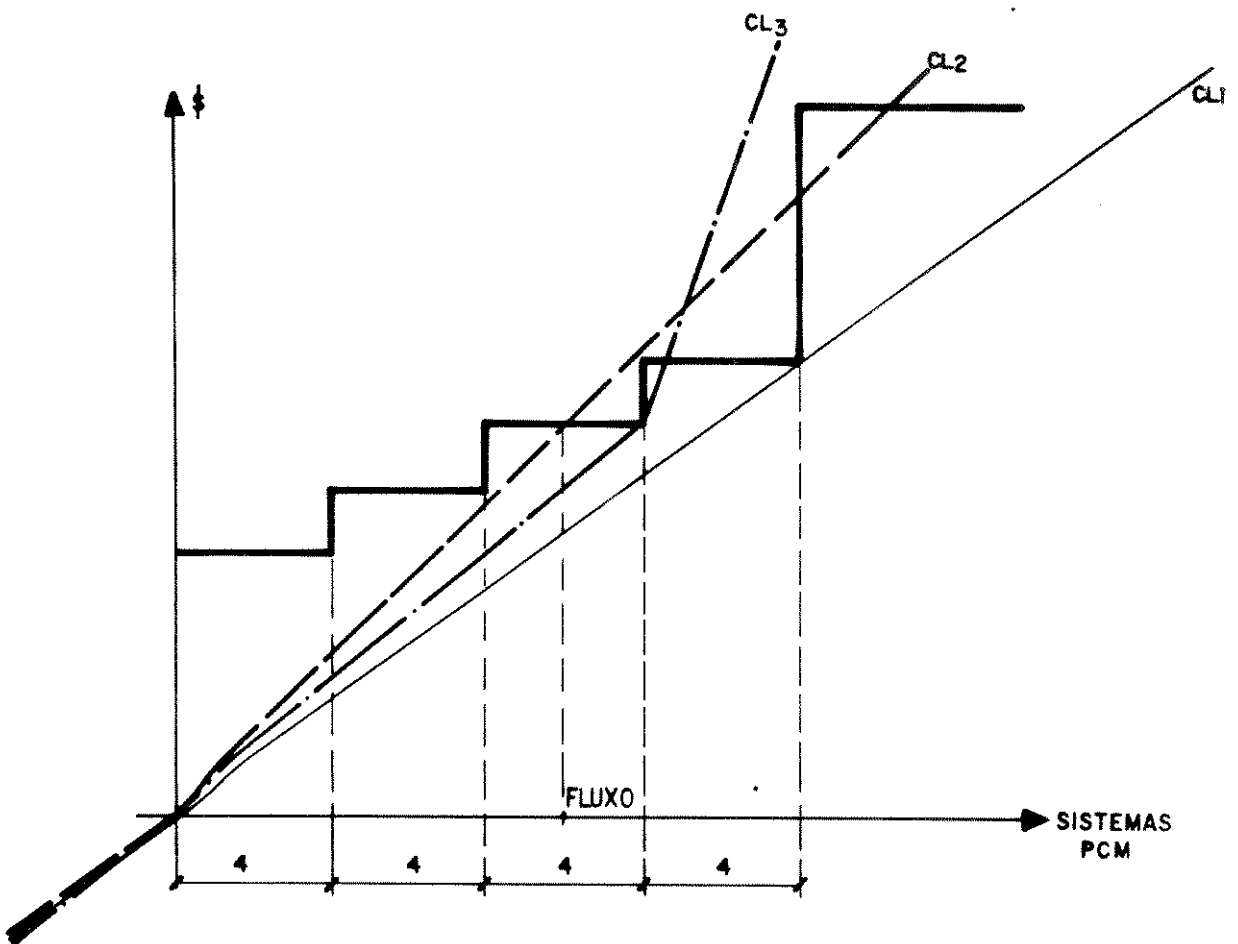


Figura 5.21 - Função de custo para a utilização parcial do Sistema de alta hierarquia.

Onde:

CL_3 - curva de custo penalizada para a rodada final.

Com uma nova rodada do modelo de otimização adotado, obtém-se o CARREGAMENTO nos arcos do plano de transmissão em fibras ópticas que, mesmo não sendo uma SOLUÇÃO INTEIRA em termos de sistemas de 3ª. ordem e/ou sistemas de 2ª. ordem é, provavelmente, uma BOA solução "contínua" do problema. Correções buscando a integralidade da solução poderiam ser obtidas, por exemplo, com um algoritmo do tipo "Branch and Bound", onde a solução final do procedimento heurístico apresentado seria adotada para inicialização do processo.

O diagrama de blocos da figura 5.22 resume o procedimento utilizado para definição dos trechos de fibras ópticas no entroncamento digital:.

O Loop observado no processo HEURÍSTICA2 pode tornar -se necessário se ocorrer a perda da característica otimista da solução. Nestes casos, adotou-se o critério de penalizar individualmente cada uma das variáveis correspondentes.

Note que, no procedimento heurístico adotado, a função de custo para um arco de fibra óptica, originalmente não linear e não convexa, é convertida em uma função convexa e linear por partes.

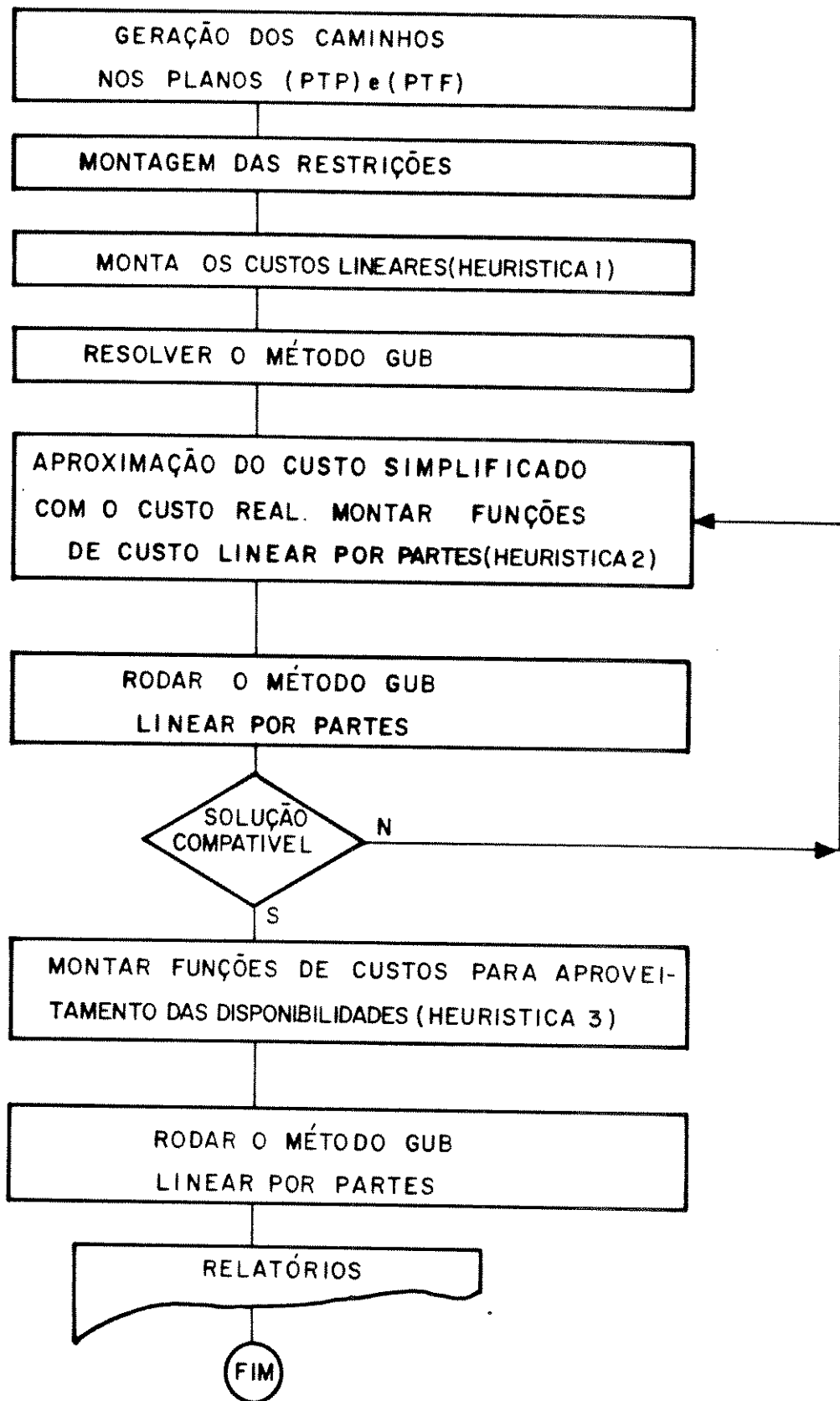


Figura 5.22 - Diagrama de Blocos para o procedimento de definição dos trechos de fibras ópticas

CAPÍTULO VI

A ESTRUTURA COMPUTACIONAL PARA
QUANTIFICAÇÃO DOS ENLACES DE FIBRAS ÓPTICAS

VI.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a estrutura computacional do programa que quantifica os enlaces de fibras ópticas no entroncamento digital (Sistema PRETA). São mostradas as principais particularidades do programa e como as heurísticas de custo influenciam a qualidade da solução, utilizando para estas rodadas as redes de troncos digitais das cidades do Rio de Janeiro e São Paulo.

VI.2. A ORGANIZAÇÃO COMPUTACIONAL

A utilização de fibras ópticas (34 Mb/s, 480 canais) no entroncamento digital introduz algumas complicações adicionais ao problema de entroncamento/roteamento apresentado anteriormente. Fundamentalmente pode-se destacar:

- . Necessidade de identificar a localização das PORTAS de mudança de hierarquia da transmissão (ponto onde a transmissão passa de 2 Mb/s para 34 Mb/s).

- . Possibilidade de alterações no cálculo do entroncamento, devido à maior flexibilidade de encaminhamento de tráfego dos equipamentos de comutação digital.

- . Introdução de não linearidades nas funções de custo, devido à modularidade dos sistemas de 34 Mb/s (1 sistema de 34 Mb/s corresponde a 16 sistemas de 2 Mb/s).

- . Necessidade, devido a esta modularidade, de utilização de equipamentos de multiplexagem de sinais de níveis intermediários (Multiplex de 8 Mb/s, um para cada 4 sistemas de 2 Mb/s).

Entretanto, apesar da introdução destas dificuldades, a parte central do problema é determinar a configuração ótima para a estrutura de entroncamento/roteamento. Neste caso, deve-se considerar a existência de duas hierarquias (dois planos) para a transmissão (plano de transmissão em PCM-PTP- e Plano de Transmissão em fibras ópticas -PTF).

Na otimização do roteamento é utilizada a formulação

arco-caminho apresentada no capítulo II e, como consequência, alguns procedimentos computacionais aqui mencionados são os mesmos utilizados no problema de otimização do roteamento em horizontes de longo prazo.

O programa computacional desenvolvido apresenta uma ESTRUTURA MODULAR, semelhante a apresentada no capítulo IV, com a seguinte organização:

- . MÓDULO I - Determinação dos caminhos para escoamento das demandas.
- . MÓDULO II- Cálculo do entroncamento digital simplificado e Inicialização do processo de otimização.
- . MÓDULO III-Construção das heurísticas de custos e otimização do roteamento.
- . MÓDULO IV- Emissão dos relatórios de roteamento e de aquisição de equipamentos.

VI.2.1. DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS PARA ESCOAMENTO DAS DEMANDAS

Em função da utilização de dois planos para a transmissão devem ser determinados:

- Caminhos utilizando somente o plano PTP.
- Caminhos que utilizam o plano PTF.

Para determinação dos caminhos no plano PTP é utilizado o programa KAMINH, apresentado no capítulo IV.

Quanto aos caminhos que utilizam o plano PTF, estes são obtidos a partir de técnicas de Programação Dinâmica; decidiu-se por determinar os três (3) caminhos mais curtos entre duas estações passando por duas portas. Quando existem caminhos de mesmo comprimento, adota-se como critério priorizar aqueles de maior distância entre as portas. Nesta etapa do processo é utilizado o

programa CAMPOR.

Em função da formulação arco-caminho adotada no tratamento do problema de roteamento, há a necessidade de organizar as ROTAS que serão utilizadas na etapa de otimização. O programa GECAM, apresentado no capítulo IV, com pequenas adaptações, é utilizado nesta fase.

O diagrama de blocos da Figura 6.1 resume o procedimento de determinação dos caminhos.

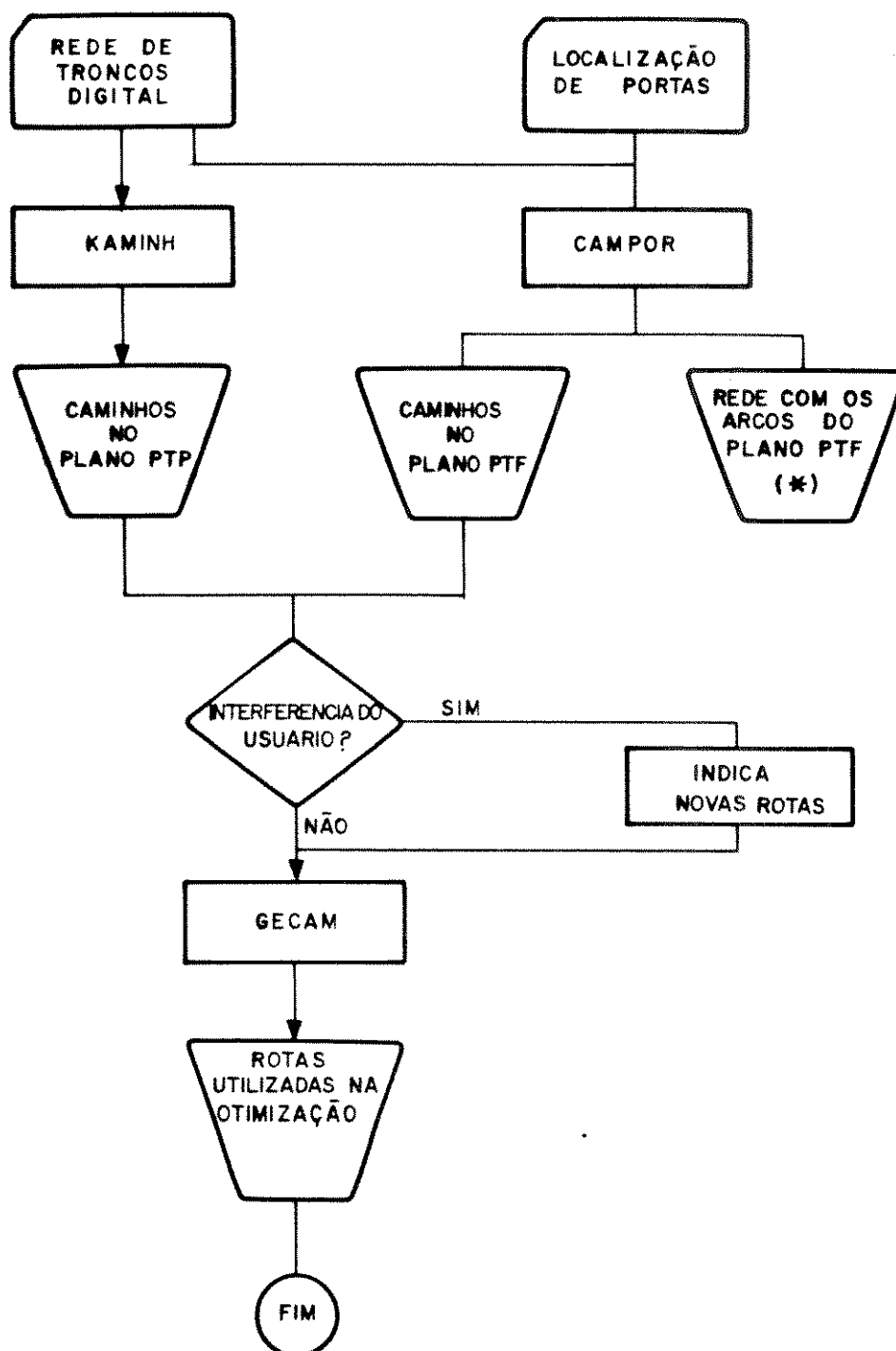


Figura 6.1- Diagrama de blocos da fase de determinação dos caminhos para escoamento das demandas (Módulo I)

(*) este arquivo recebeu o nome de REDTOT.DAT e descreve totalmente a rede utilizando os dois planos de transmissão.

Nesta etapa os dados de entrada são:

. Rede de Troncos Digital: descreve a rede em termos de nós e arcos. Contém, para cada arco original da rede, informações como nó origem, nó destino, comprimento (em metros), número de pontos de regeneração, pares disponíveis para transmissão em PCM, etc...

. Localização das Portas de mudança na hierarquia da transmissão (2 Mb/s -> 34 Mb/s).

Gera como dados de saída:

. A rede a ser considerada no processo de otimização. Inclui a parte correspondente à transmissão em 34 Mb/s.

. As rotas possíveis de serem utilizadas no escoamento das demandas.

VI.2.2 CÁLCULO DO ENTRONCAMENTO DIGITAL SIMPLIFICADO E INICIALIZAÇÃO DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Tomando como premissa que as centrais digitais tem acessibilidade plena e que a função tandem no entroncamento digital não apresenta significativo aumento nos custos dos equipamentos de comutação, decidiu-se por realizar um cálculo simplificado do entroncamento tomando por base a Fórmula B de Erlang. A utilização desta parte do programa é deixada a critério do usuário que, em caso afirmativo, deve fornecer a Matriz de Demanda de Tráfego entre os grupamentos; caso contrário o dado fornecido é a matriz de demanda de sistemas PCM (2 Mb/s, 30 canais).

O diagrama de blocos da figura 6.2 ilustra o procedimento utilizado neste módulo.

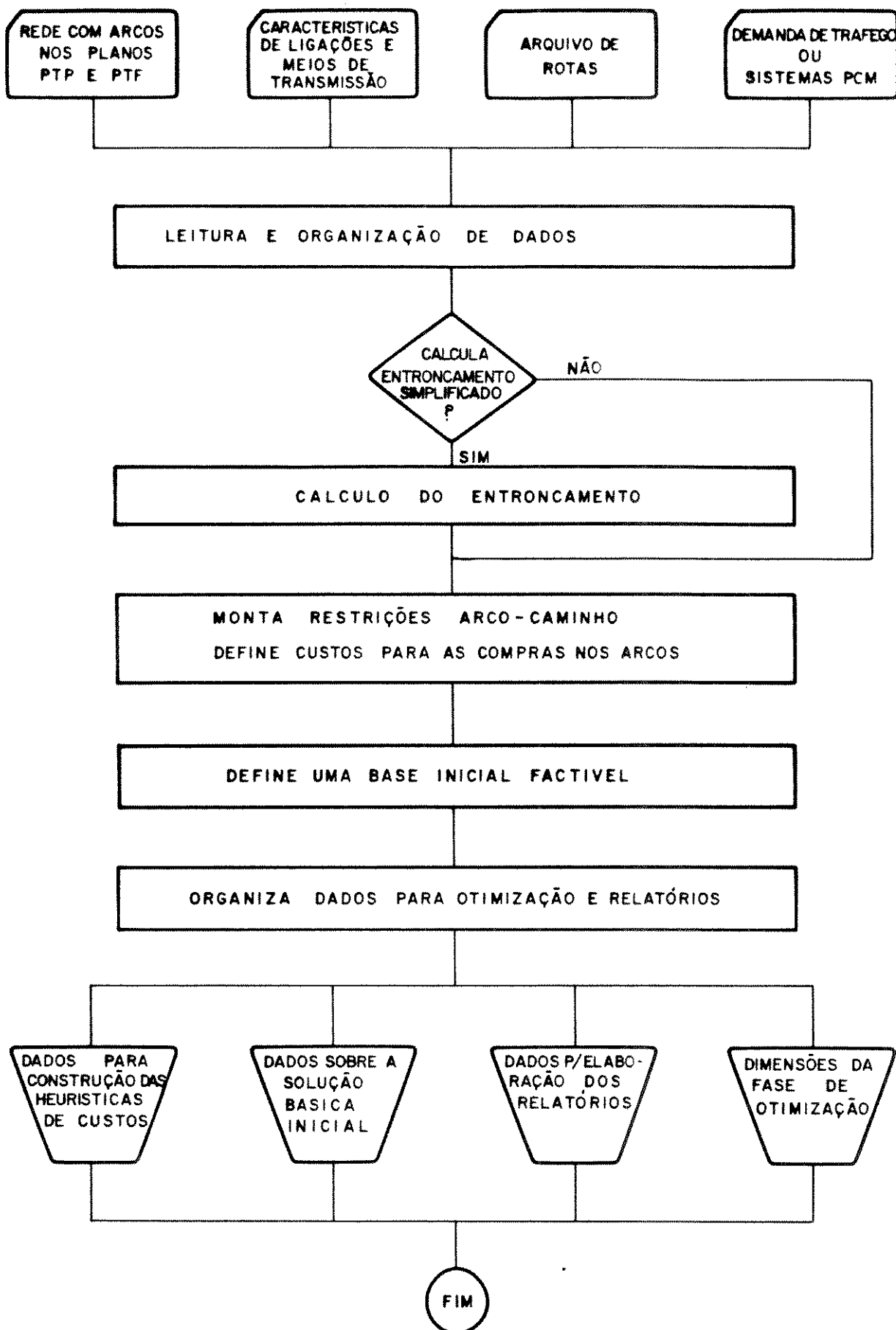


Figura 6.2 - Diagrama de blocos do Módulo II.

VI.2.3 CONSTRUÇÃO DAS HEURÍSTICAS DE CUSTOS E OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO

A partir da organização dos dados realizada nas etapas anteriores, este módulo monta as HEURÍSTICAS DE CUSTOS descritas no capítulo anterior (HEURÍSTICA1, HEURÍSTICA2, HEURÍSTICA3) que podem ser combinadas, a critério do usuário, na otimização do roteamento.

A HEURÍSTICA1 serve para obter uma solução inicial de referência e consiste na linearização dos custos das variáveis de compra dos arcos do plano PTF, mantendo a estrutura linear por partes para o custo dos arcos no plano PTP.

A HEURÍSTICA2 consiste em, dada uma solução, promover correções em funções de custo dos arcos no plano PTF, visando aproximar o custo linearizado (simplificado) do custo real correspondente. Gera penalizações na função de custo de cada arco do plano PTF, restringindo (limitando) a passagem de unidades adicionais no arco.

A HEURÍSTICA3 atua no sentido de aproveitar as "ociosidades" geradas nos arcos do plano PTF. Promove penalizações mais suaves nas funções de custo correspondente à compra nos arcos, no sentido de facilitar o escoamento da demanda no plano PTF.

O modelo matemático resultante, independente da heurística utilizada, é do tipo Limite Superior Generalizado com função objetivo Linear por partes (GUBLPP). Isto ocorre devido a compra nos arcos do plano PTP apresentar uma estrutura linear por partes.

Neste trabalho adotamos, para fins de análise, as seguintes combinações das heurísticas:

ALTERNATIVA I

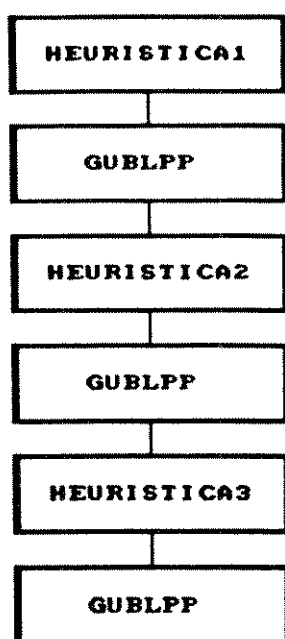


Figura 6.3 - Estrutura computacional para a Alternativa I explorada na otimização do roteamento.

ALTERNATIVA II

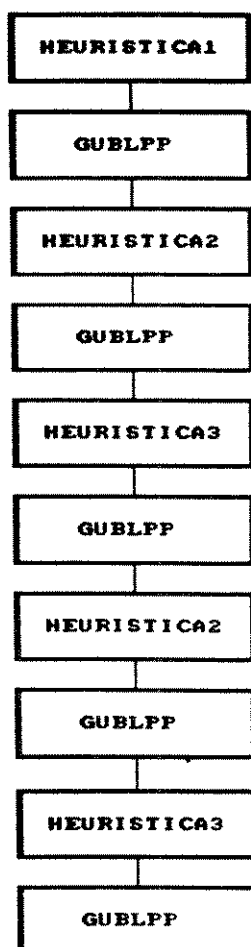


Figura 6.4 - Estrutura computacional para a alternativa II explorada na otimização do roteamento

ALTERNATIVA III

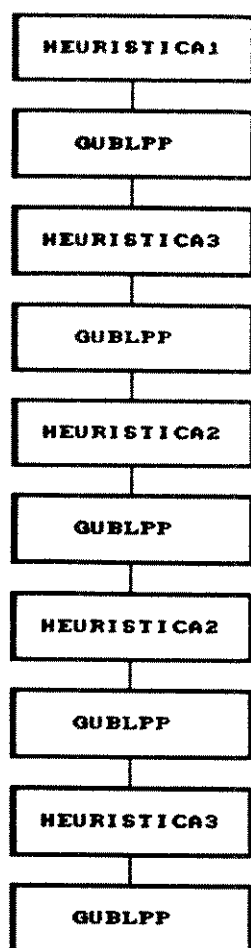


Figura 6.5 - Estrutura computacional para a Alternativa III explorada na otimização do roteamento.

VI.2.4 EMISSÃO DOS RELATÓRIOS DE ROTEAMENTO E DE AQUISIÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Esta etapa tem por finalidade agrupar os dados gerados na etapa de inicialização com os resultados da otimização do roteamento em relatórios gerenciais. São elaborados relatórios sobre o escoamento de cada demanda, o carrégamento de cada arco e as necessidades de compra de equipamentos de transmissão, principalmente no plano PTF.

O diagrama de blocos da figura 6.6 ilustra o processo adotado:

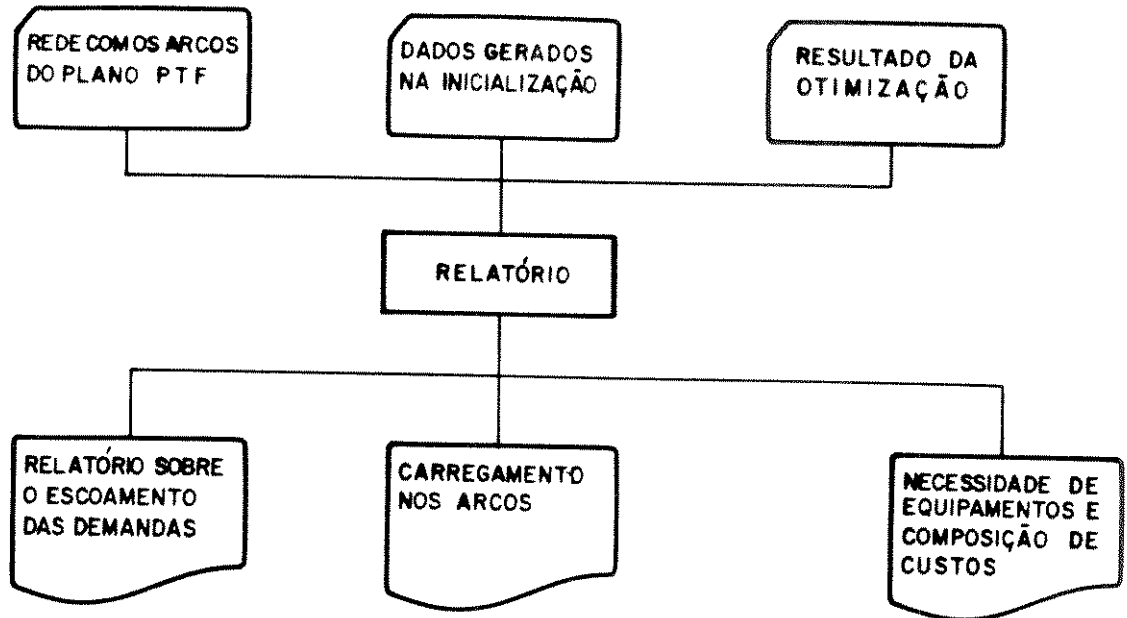


Figura 6.6 - Diagrama de blocos do Módulo de Relatórios de Saída.

VI.3. APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA

O procedimento computacional apresentado foi utilizado no estudo de planejamento das redes digitais do Rio de Janeiro, figuras 6.7 e 6.8, e São Paulo, figuras 6.9 e 6.10.

Procurando ilustrar os efeitos das aplicações das Heurísticas rodou-se para o Rio de Janeiro e São Paulo as 3 alternativas mencionadas no item anterior. A descrição de cada uma das redes e uma análise dos resultados obtidos para cada uma das alternativas são apresentadas a seguir.

VI.3.1. ESTUDO DO PLANEJAMENTO DA REDE DIGITAL DO RIO DE JANEIRO

Nesta aplicação foi utilizada a rede de troncos digital da cidade do Rio de Janeiro, descrita nas figuras 6.7 e 6.8.

A rede original no plano PTP possui a seguinte configuração:

- 33 Estações Telefônicas
- 35 Arcos

Adotando um cenário com 15 PORTAS no plano PTF, a rede envolvendo os dois planos de transmissão assume a seguinte configuração:

- 33 Estações Telefônicas
- 15 Portas
- 155 Arcos

Este total de arcos (155) corresponde a:

- 35 arcos originais
- 15 arcos fictícios, de distância nula, ligando os planos PTP e PTF.
- 105 arcos (C_{15}^2 , combinação das 15 portas duas a duas) no plano PTF.

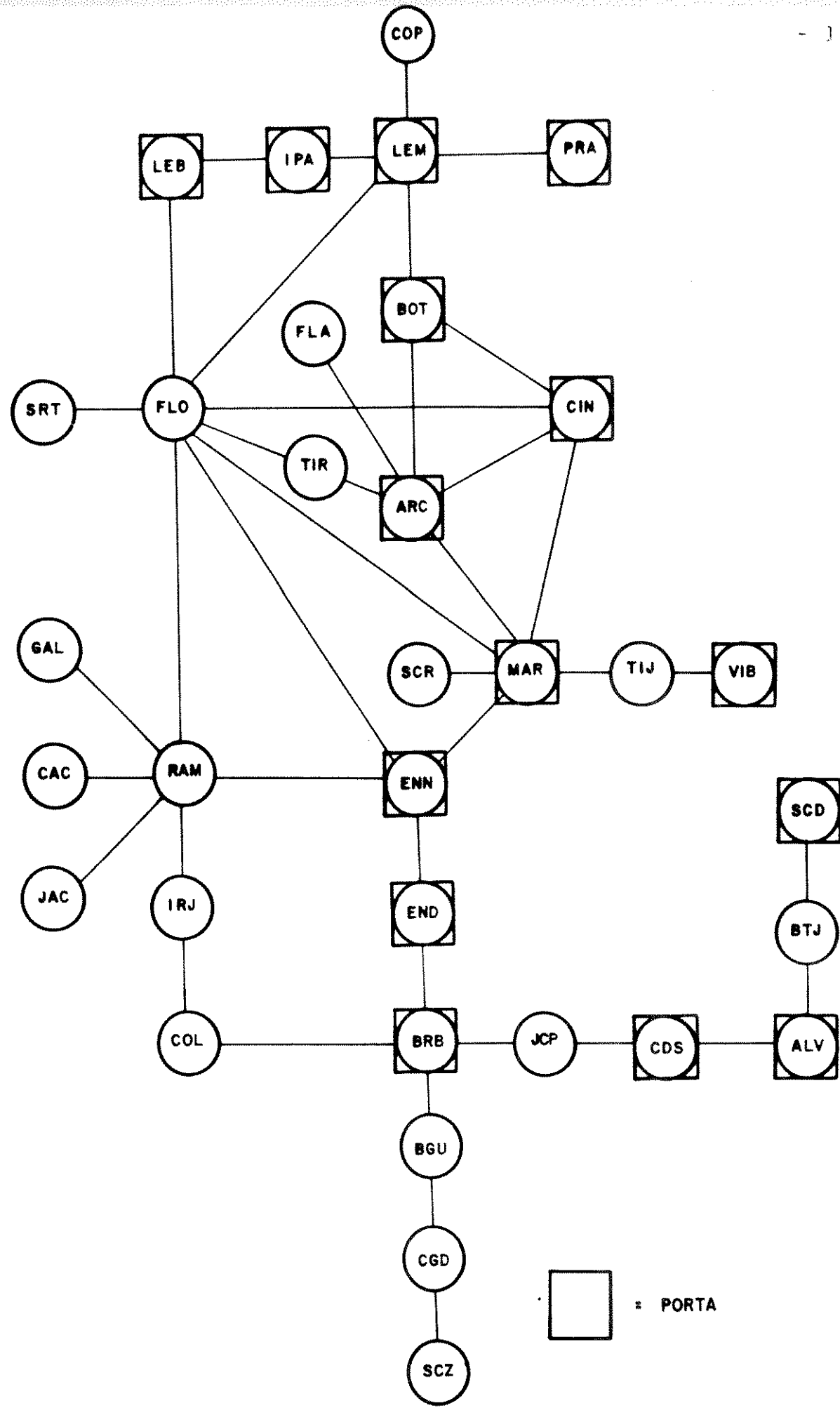


Figura 6.8 - Rio de Janeiro com 15 portas

DEMANDA DE SISTEMAS PCM UTILIZADAS NO EXEMPLO DO RIO

DE	PARA	DEMANDA	DE	PARA	DEMANDA	DE	PARA	DEMANDA
ARC	BOT	25	ARC	CIN	17	ARC	END	14
ARC	ENN	4	ARC	FLO	34	ARC	LEB	6
ARC	LEM	7	ARC	MAR	10	ARC	PRA	22
ARC	RAM	15	ARC	SCR	3	ARC	TIJ	4
ARC	TIR	18	ARC	ALV	2	ARC	BRB	9
ARC	BTJ	1	ARC	CDS	14	ARC	CGD	10
ARC	COL	1	ARC	SCD	1	BOT	CIN	11
BOT	END	9	BOT	ENN	3	BOT	FLO	2
BOT	IPA	14	BOT	LEB	18	BOT	LEM	10
BOT	PRA	19	BOT	RAM	9	BOT	SCR	2
BOT	TIJ	6	BOT	VIB	7	BOT	ALV	2
BOT	BGU	1	BOT	BRB	4	BOT	BTJ	2
BOT	CDS	7	BOT	CGD	5	BOT	COL	1
BOT	IRJ	22	BOT	JCP	1	BOT	SCD	1
CIN	ENN	1	CIN	FLO	3	CIN	IPA	2
CIN	LEM	3	CIN	MAR	2	CIN	PRA	2
CIN	RAM	1	CIN	SCR	1	CIN	TIJ	1
CIN	TIR	2	CIN	BRB	10	CIN	CDS	1
END	ENN	4	END	FLO	3	END	MAR	2
END	PRA	2	END	RAM	2	END	SCR	1
END	TIJ	3	END	TIR	1	END	BGU	1
END	BRB	17	END	CDS	3	END	CGD	1
END	COL	1	END	IRJ	1	END	JCP	1
ENN	FLO	1	ENN	LEB	3	ENN	LEM	2
ENN	PRA	4	ENN	VIB	1	ENN	ALV	1
ENN	BRB	9	ENN	CDS	3	ENN	CGD	2
ENN	SCD	1	FLO	RAM	1	FLO	VIB	1
FLO	ALV	10	FLO	BRB	2	FLO	BTJ	3
FLO	CDS	5	FLO	CGD	3	FLO	COL	3
FLO	JCP	2	IPA	MAR	3	IPA	PRA	1
IPA	TIR	5	IPA	BRB	1	IPA	CDS	1
IPA	SCD	1	LEB	LEM	2	LEB	MAR	4
LEB	PRA	1	LEB	TIR	6	LEB	CDS	1
LEM	MAR	4	LEM	PRA	3	LEM	RAM	3
LEM	TIR	4	LEM	BRB	1	MAR	PRA	1
MAR	ALV	3	MAR	BGU	1	MAR	BRB	7
MAR	CDS	2	MAR	CGD	1	MAR	COL	1
PRA	TIJ	1	RAM	VIB	1	RAM	BRB	20
RAM	CDS	2	RAM	CGD	1	SCR	VIB	1
TIR	ALV	4	TIR	BRB	1	TIR	CDS	1
TIR	COL	1	VIB	BRB	4	ALV	BGU	1
ALV	BRB	8	ALV	CDS	4	ALV	COL	1
ALV	IRJ	1	BGU	BRB	5	BGU	CDS	1
BGU	CGD	13	BRB	BTJ	2	BRB	CDS	19
BRB	CGD	17	BRB	COL	10	BRB	IRJ	6
BRB	JCP	3	BRB	SCD	1	BTJ	CDS	7
CDS	CGD	1	CDS	COL	1	CDS	IRJ	2
CDS	JCP	5	CDS	SCD	6	CGD	COL	1
CGD	IRJ	1						

Após a execução dos Módulos I e II do programa computacional descritos anteriormente, são obtidos os seguintes dados para o processo de otimização:

- 145 produtos (demandas a rotear)
- 835 variáveis de fluxo
- 135 linhas na matriz de acoplamento do sistema de restrições (matriz arco-caminho).

adotando-se como meios de transmissão, PCM em cabo especial no plano PTP e Fibra Óptica no plano PTF.

Pelo exposto anteriormente, o número esperado de rotas seria 870 (145 produtos x 6 caminhos (3 no plano PTP e 3 no plano PTF)). Verificando, dentre outras, as ligações LEM→PRA, BRB→BTJ, BRB→CGD, BRB→JCP, observa-se a existência de apenas uma rota no plano PTP contribuindo, conseqüentemente, para a diminuição do número total de rotas.

Fato semelhante ocorre com o número esperado de linhas da matriz de acoplamento, 155. O número obtido, 135, é explicado pelas seguintes observações:

. O arco CGD→SCZ, do plano PTP, não é utilizado. Isto ocorre porque não há demanda originada /terminada na estação SCZ .

. Os arcos entre as portas das ligações ARC→VIB, BRB→LEB, END→IPA, dentre outros, também não são utilizados. Isto ocorre porque, além de não existir demanda entre as estações correspondentes, eles não são utilizados para nenhuma outra ligação no plano PTF.

A matriz de acoplamento envolvendo as variáveis de folga e compra nos arcos tem, conseqüentemente, dimensão (135, 1105).

O carregamento dos arcos do plano PTF e os principais dados de custos e necessidades de equipamentos para cada uma das alternativas de combinação das heurísticas de custos propostas,

são apresentados a seguir. A demanda total a ser roteada é de 692 sistemas PCM.

- Carregamentos nos arcos do plano PTF

. ALTERNATIVA I

ARCOFIBRA	COMPRIMENTO	FLUXO NOS ARCOS		
		NEUR.I	NEUR.II	NEUR.III
ARC - END	15070	15	19	16
ARC - BRB	23440	27	16	16
ARC - ENH	11220	4		
ARC - LEB	16500	12	12	12
ARC - IPA	15400	5		
ARC - PRA	14200	27	16	16
ARC - ALV	43950	7		
ARC - CDS	35350	15	22	22
ARC - SCD	60060	1		
BOT - END	21070	9		
BOT - BRB	29440	12	14	14
BOT - ENH	17220	14	25	16
BOT - VIB	16300	7		
BOT - ALV	49950	4		
BOT - CDS	41350	7		
BOT - SCD	66060	1		
CIN - BRB	21140	10		
CIN - IPA	15700	2		
CIN - PRA	14500	2		
CIN - CDS	33050	1		
MAR - LEM	14700	4		
MAR - BRB	17740	17	16	16
MAR - LEB	19720	4		
MAR - IPA	19100	3		
MAR - PRA	17900	2		
MAR - ALV	38250	16	16	16
MAR - CDS	29650	7		
LEM - BRB	32440	1		
LEM - ENH	20220	2		
END - PRA	27270	7		
END - CDS	20280	3		
BRB - IPA	36840	1		
BRB - VIB	22340	4		
BRB - ALV	20510	13	14	14
BRB - SCD	36670	1		
ENH - LEB	25240	3		
ENH - PRA	23470	4		
ENH - ALV	37730	1		
ENH - CDS	24130	5		
ENH - SCD	48840	1		
LEB - CDS	49730	1		
IPA - CDS	48750	1		
IPA - SCD	73460	1		
CDS - SCD	24710	6		
TOTAL DE SISTEMAS		275	170	156

Tabela I: Carregamento nos arcos do plano PTF para a rede do Rio de Janeiro. Alternativa I.

. ALTERNATIVA II

FLUXO NOS ARCOS						
ARCO/FIBRA	COMPRIMENTO	HEUR.I	HEUR.II	HEUR.III	HEUR.IV	HEUR.V
ARC - END	15070	15	19	16	16	16
ARC - BRB	23440	22	16	16	16	16
ARC - ENN	11220	4				
ARC - LEB	16500	12	12	12	12	12
ARC - IPA	15400	5				
ARC - PRA	14200	22	16	16	16	16
ARC - ALV	43950	7				
ARC - CDS	35350	15	22	22	16	16
ARC - SCD	60060	1				
BOT - END	21070	9				
BOT - BRB	29440	12	14	14	14	14
BOT - ENN	17220	14	25	16	16	16
BOT - VIB	16300	7				
BOT - ALV	49950	4				
BOT - CDS	41350	7				
BOT - SCD	66060	1				
CIN - BRB	21140	10				
CIN - IPA	15700	2				
CIN - PRA	14500	2				
CIN - CDS	33050	1				
MAR - LEM	14700	4				
MAR - BRB	17740	17	16	16	16	16
MAR - LEB	19720	4				
MAR - IPA	19100	3				
MAR - PRA	17900	2				
MAR - ALV	38250	16	16	16	16	16
MAR - CDS	29650	7				
LEM - BRB	32440	1				
LEM - ENN	20220	2				
END - PRA	27270	2				
END - CDS	20280	3				
BRB - IPA	36840	1				
BRB - VIB	22340	4				
BRB - ALV	20510	13	14	14	14	14
BRB - SCD	36620	1				
ENN - LEB	25240	3				
ENN - PRA	23420	4				
ENN - ALV	32730	1				
ENN - CDS	24130	5				
ENN - SCD	48840	1				
LEB - CDS	49730	1				
IPA - CDS	48750	1				
IPA - SCD	73460	1				
CDS - SCD	24710	6				
TOTAL DE SISTEMAS		275	170	158	152	152

Tabela II - Carregamento nos arcos do Plano PTF para a rede do Rio de Janeiro. Alternativa II.

. ALTERNATIVA III

		FLUXO NOS ARCOS				
ARCO/FIBRA	COMPRIMENTO	HEUR.I	HEUR.III	HEUR.II	HEUR.II	HEUR.I
ARC - END	15070	15	16	16	16	16
ARC - BRB	23440	22	16	16	16	16
ARC - ENN	11220	4				
ARC - LEB	16500	12	12	12	12	12
ARC - IPA	15400	5				
ARC - PRA	14200	22	16	16	16	16
ARC - ALV	43950	7	6			
ARC - CDS	35350	15	16	16	16	16
ARC - SCD	60060	1				
BOT - END	21070	9				
BOT - BRB	29440	12	14	14	14	14
BOT - ENN	17220	14	16	16	16	16
BOT - VIB	16300	7				
BOT - ALV	49950	4				
BOT - CDS	41350	7	12	12	12	12
BOT - SCD	66060	1				
CIN - BRB	21140	10	10			
CIN - IPA	15700	2				
CIN - PRA	14500	2				
CIN - CDS	33050	1				
MAR - LEM	14700	4				
MAR - BRB	17740	17	16	16	16	16
MAR - LEB	19720	4				
MAR - IPA	19100	3				
MAR - PRA	17900	2				
MAR - ALV	38250	16	16	16	16	16
MAR - CDS	29650	7	9	15	15	15
LEM - BRB	32440	1				
LEM - ENN	20220	2				
END - PRA	27270	2				
END - CDS	20280	3				
BRB - IPA	36840	1				
BRB - VIB	22340	4				
BRB - ALV	20510	13	14	14	14	14
BRB - SCD	36620	1				
ENN - LEB	25240	3				
ENN - PRA	23420	4				
ENN - ALV	32730	1				
ENN - CDS	24130	5				
ENN - SCD	48840	1				
LEB - CDS	49730	1				
IPA - CDS	48750	1				
IPA - SCD	73460	1				
CDS - SCD	24710	6				
TOTAL DE SISTEMAS		275	189	179	179	179

Tabela III - Carregamento nos arcos do plano PTF para a rede do Rio de Janeiro. Alternativa III.

Em função dos resultados mostrados nas Tabelas I, II e III, algumas observações são necessárias para uma melhor compreensão das heurísticas apresentadas:

. Na tabela II, as três primeiras heurísticas aplicadas são idênticas às da Tabela I e apresentam, portanto, os mesmos resultados.

. Da HEURÍSTICA I para a HEURÍSTICA II, em ambas as tabelas, nota-se que no ARCOFIBRA correspondente à ligação entre as portas BOT $\rightarrow$ ENN ocorre um aumento de fluxo de 14 para 25 sistemas. Embora este fenômeno possa parecer anormal devido a aplicação da HEURÍSTICA II, ele não deve ser visto isoladamente. O ARCOFIBRA BOT $\rightarrow$ ENN aparece em uma das rotas factíveis no plano PTF, para as ligações LEM $\rightarrow$ ENN, BOT $\rightarrow$ END, cujos ARCOFIBRA correspondentes são fortemente penalizados quando da aplicação da HEURÍSTICA II. Neste caso, a HEURÍSTICA III da tabela II é utilizada como fator de correção para eventuais distorções da função de custos. Fato semelhante ocorre também com o ARCOFIBRA ARC $\rightarrow$ CDS. Além disso, em função das distâncias, algumas demandas ligando duas estações, onde pelo menos uma delas não é uma porta, que originalmente eram roteadas no plano PTF, podem tornar-se mais econômica, quando agrupadas com outras demandas e serem roteadas no plano PTF.

. Na tabela III, também é observado este efeito quando da passagem HEURÍSTICA III para a HEURÍSTICA II. O ARCOFIBRA MAR $\rightarrow$ CDS tem seu fluxo aumentado de 9 para 15 sistemas. Ele aparece em uma das rotas no plano PTF entre outras ligações, cujo ARCOFIBRA correspondente é fortemente penalizado, neste caso a ligação ARC $\rightarrow$ ALV.

. Observe na tabela III que a aplicação da HEURÍSTICA III, após a HEURÍSTICA I, seguida da HEURÍSTICA II apresenta um melhor resultado em termos de sistemas roteados no plano PTF. Isto é importante no sentido de melhor preparar a rede para o futuro. Além disso, conforme pode ser verificado nas tabelas IV, V e VI, esta solução, apesar de mais revolucionária em termos de utilização do plano PTF, apresenta o menor custo total (custo real).

. Pela experiência realizada na tabela III, a segunda aplicação da HEURÍSTICA II poderia ser dispensada. Entretanto, esta afirmativa não pode ser generalizada para outras aplicações.

. Tanto na tabela II quanto na tabela III, a última aplicação da HEURÍSTICA III não mudou o resultado em relação a HEURÍSTICA II imediatamente anterior. Entretanto, como a HEURÍSTICA III é utilizada no sentido de aproveitar eventuais disponibilidades nos sistemas ópticos, sugere-se que o procedimento sempre termine com a sua aplicação.

- Dados de Custos e Equipamentos

. ALTERNATIVA I

ITEM	HEURÍSTICA I	HEURÍSTICA II	HEURÍSTICA III
Custo linear (Cz\$)	48,6x10 ⁶	55,3x10 ⁶	54,9x10 ⁶
Custo real (Cz\$)	85,3x10 ⁶	56,4x10 ⁶	55,6x10 ⁶
Custo PCM (Cz\$)	25,6x10 ⁶	40,4x10 ⁶	41,4x10 ⁶
Custo Fibra (Cz\$)	59,7x10 ⁶	16,0x10 ⁶	14,2x10 ⁶
Parkm Fibra	1340,58	295,36	263,07
Total Sistemas (*)	275	170	158
MUX Terc.Ordem	94	26	22
MUX Seg. Ordem	176	90	82
Tot. Repet. ópticos	110	22	20
Util.Sist.Terc.Ordem	36,6%	81,7%	89,8%

Tabela IV - Resumo dos Dados de Custo e Equipamentos na Alternativa I.

(*) Indica o número de sistemas PCM roteados no plano PTF de um total de 692 sistemas.

. ALTERNATIVA II

ITEM	HEUR. I	HEUR. II	HEUR. III	HEUR. II	HEUR. III
Custo linear (Cz\$)	48,6x10 ⁶	55,3x10 ⁶	54,9x10 ⁶	55,2x10 ⁶	54,9x10 ⁶
Custo real (Cz\$)	85,3x10 ⁶	56,4x10 ⁶	55,6x10 ⁶	55,2x10 ⁶	55,2x10 ⁶
Custo PCM (Cz\$)	25,6x10 ⁶	40,4x10 ⁶	41,4x10 ⁶	42,5x10 ⁶	42,5x10 ⁶
Custo Fibra (Cz\$)	59,7x10 ⁶	16,0x10 ⁶	14,2x10 ⁶	12,7x10 ⁶	12,7x10 ⁶
Parkm Fibra	1340,58	295,36	263,07	227,72	227,52
Total sistemas(*)	275	170	158	152	152
MUX terc. ordem	94	26	22	20	20
MUX seg. ordem	176	90	82	78	78
Tot.Repet.ópticos	110	22	20	17	17
Uti.Sist.Terc.ordem	36,6%	81,7%	89,8%	95,0%	95,0%

Tabela V - Resumo dos Dados de Custos e Equipamentos na Alternativa II.

. ALTERNATIVA III

ITEM	HEUR. I	HEUR. III	HEUR. III	HEUR. II	HEUR. III
Custo linear (Cz\$)	48,6x10 ⁶	54,9x10 ⁶	54,3x10 ⁶	53,5x10 ⁶	53,1x10 ⁶
Custo real (Cz\$)	85,3x10 ⁶	54,7x10 ⁶	53,5x10 ⁶	53,5x10 ⁶	53,5x10 ⁶
Custo PCM (Cz\$)	25,6x10 ⁶	35,9x10 ⁶	37,5x10 ⁶	37,5x10 ⁶	37,5x10 ⁶
Custo fibra (Cz\$)	59,7x10 ⁶	18,8x10 ⁶	16,0x10 ⁶	16,0x10 ⁶	16,0x10 ⁶
Parkm Fibra	1340,58	363,81	298,72	298,72	298,72
Total Sistemas (*)	275	189	179	179	179
MUX terc.ordem	94	28	24	24	24
MUX seg.ordem	176	100	92	92	92
Tot.Repet.ópticos	110	29	23	23	23
Util.Sist.Terc.Ordem	36,6%	84,4%	93,3%	93,3%	93,3%

Tabela VI - Resumo dos dados de custos e equipamentos na alternativa III.

Analisando os resultados das tabelas IV, V e VI, verifica-se que a ALTERNATIVA III corresponde à melhor combinação das heurísticas de custos propostas. Observa-se, também, que a HEURÍSTICA II quando aplicada cumpre o papel esperado de aproximação do custo simplificado (linearizado) com o custo real da solução correspondente.

Algumas observações com relação ao comportamento dos custos e utilização dos sistemas ópticos são necessárias neste momento:

. Nas experiências realizadas, após a última aplicação da HEURÍSTICA II (quando utilizada mais que uma vez) verifica-se a igualdade entre os custos real e linearizado, validando a proposta original da metodologia desenvolvida.

. Na última aplicação da HEURÍSTICA II observa-se uma diminuição do custo linearizado. Isto se justifica pela própria construção das funções de custo.

. Note que a melhor solução, correspondente à tabela VI, apresenta uma utilização dos sistemas de terceira ordem (93,3%) menor que a solução da tabela V (95,0%). Entretanto, apresenta maior quantidade de sistemas roteados no plano PTF.

VI.3.2 ESTUDO DO PLANEJAMENTO DA REDE DIGITAL DE SÃO PAULO

Com o objetivo de testar o comportamento do programa em redes de grande porte, foram realizadas experiências com a rede de troncos digital da cidade de São Paulo, representada nas figuras 6.9 e 6.10.

As considerações feitas sobre os resultados obtidos com as rodadas executadas para a rede do Rio de Janeiro não serão aqui apresentadas. Serão mostrados apenas os resultados finais para cada combinação das heurísticas desenvolvidas.

A rede original no plano PTP apresenta as seguintes características:

- 44 Estações telefônicas
- 58 nós (estações + portas)
- 14 portas
- 186 arcos

Com a execução dos módulos I e II do programa computacional, são obtidos os seguintes dados para o módulo de otimização:

- 426 produtos
- 2554 variáveis de fluxo
- 181 linhas na matriz de acoplamento do sistema de restrições.

adotando-se como meios de transmissão PCM em cabo especial no plano PTP e fibra óptica no plano PTF.

Com a introdução das variáveis de folga e de compra nos arcos, a matriz de acoplamento fica com dimensão (181, 2916).

A seguir são apresentados o carregamento dos arcos no plano PTF e os principais dados de custos e necessidades de equipamentos para cada combinação das heurísticas de custos. A demanda total a ser roteada é de 1274 sistemas PCM de 2 Mb/s.

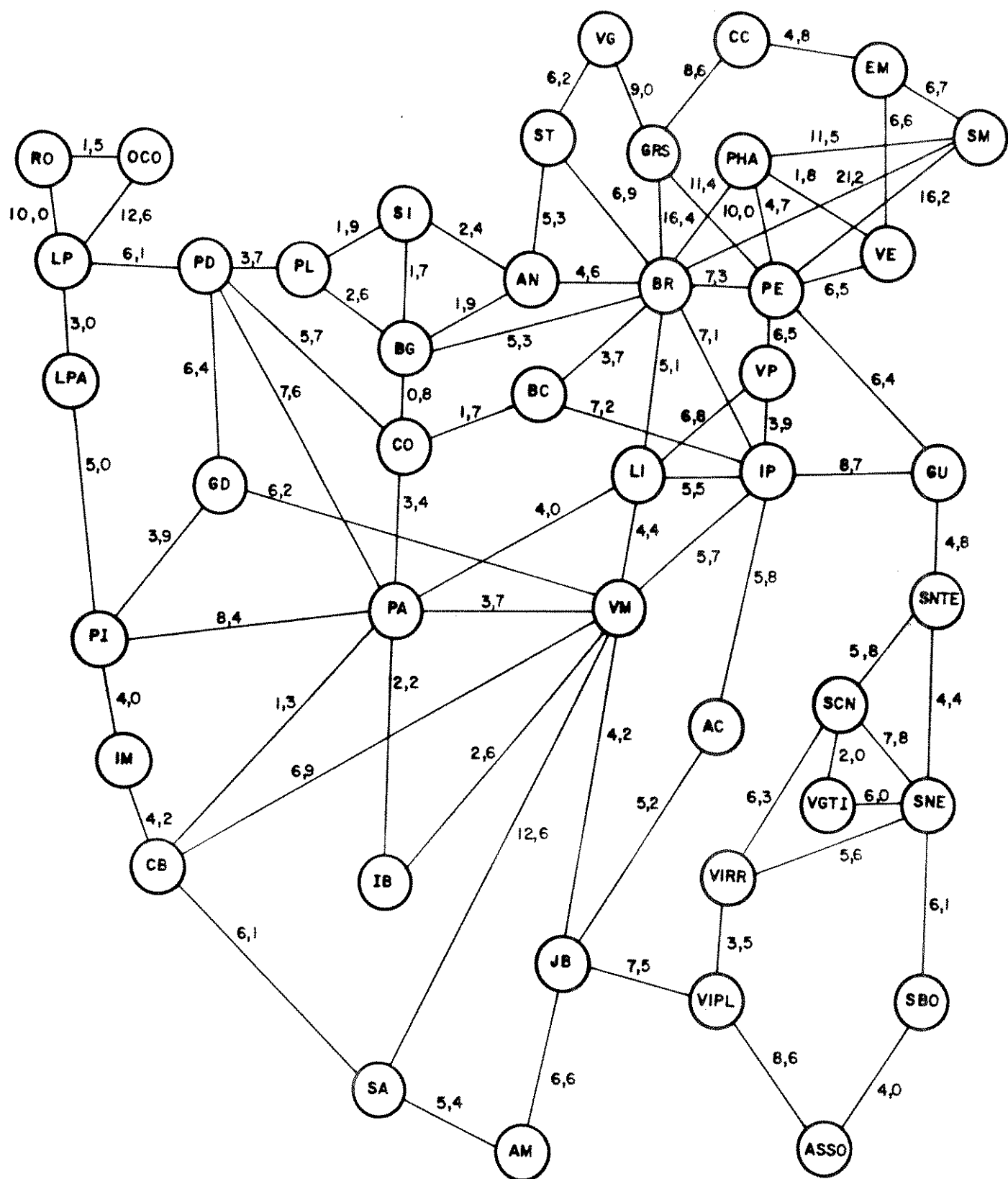


Figura 6.9 - Rede Digital da cidade de São Paulo.
Comprimento dos arcos em KM.

DEMANDA DE SISTEMAS PCM UTILIZADOS NO EXEMPLO DE SAO PAULO

DE - PARA DEMANDA			DE - PARA DEMANDA			DE - PARA DEMANDA		
AC	IB	1	AC	PD	1	AC	VP	1
AM	IM	24	AM	PE	3	AM	LP	1
AM	BC	1	AM	BG	7	AM	BR	2
AM	CB	15	AM	CO	2	AM	LI	4
AM	PA	3	AM	PD	7	AM	RO	1
AM	SA	9	AM	SI	2	AM	SNE	4
AM	VM	1	AN	AM	2	AN	BC	1
AN	BR	1	AN	EM	1	AN	IM	1
AN	SM	2	AN	OCO	1	AN	PD	2
AN	LI	1	ASSO	SBO	2	ASSO	VIRR	1
ASSO	BG	2	BC	AM	3	BC	LI	30
BC	CB	3	BC	LP	1	BC	GRS	1
BC	IM	3	BC	OCO	1	BC	VG	1
BC	BG	4	BC	CO	3	BC	IB	1
BC	IP	1	BC	JD	1	BC	PA	2
BC	PD	2	BC	PE	1	BC	PI	1
BC	SI	1	BC	AN	1	BG	AM	4
BG	CC	1	BG	PI	1	BG	IP	1
BG	SM	1	BG	LI	4	BG	LP	3
BG	OCO	3	BG	PD	6	BG	PI	3
BG	SNE	1	BG	ASSO	1	BG	JB	1
BR	AM	4	BR	CB	1	BR	JB	1
BR	PD	4	BR	PHA	2	BR	SA	1
BR	PE	2	BR	SNE	2	BR	AN	1
BR	CC	1	BR	IB	1	BR	LI	1
BR	VG	1	CB	BC	2	CB	IM	8
CB	LI	5	CB	PD	5	CB	PE	1
CB	SA	1	CB	AM	7	CB	BG	1
CB	BR	1	CB	IB	1	CB	PA	3
CB	ST	1	CB	BC	1	CB	PI	2
CB	LPA	6	CC	AM	1	CC	IB	1
CC	IP	1	CC	LI	2	CC	PD	1
CC	PI	1	CC	ST	1	CO	BC	2
CO	PA	7	CO	IM	3	CO	JD	1
CO	LI	1	CO	GRS	1	CO	OCO	1
CO	AM	3	CO	PD	2	CO	PE	1
CO	SNE	2	EM	BG	1	EM	PA	1
GRS	AM	2	GRS	LI	3	GRS	PD	2
GRS	BG	1	GU	AM	2	GU	LI	3
GU	PD	2	GU	VIPL	1	GU	BG	1
GU	BR	1	GU	CO	1	GU	PA	1
GU	PE	1	GU	PHA	1	GU	SI	1
IB	AM	1	IB	BR	1	IB	CB	1
IB	CO	1	IB	IM	2	IB	JB	1
IB	JD	1	IB	LI	17	IB	LPA	6
IB	PA	2	IB	PD	4	IB	PI	1
IB	VM	1	IM	AM	1	IM	AN	2
IM	BC	2	IM	CB	10	IM	CO	3
IM	IP	1	IM	JB	2	IM	JD	5
IM	LI	4	IM	LP	1	IM	LPA	13

DE - PARA DEMANDA			DE - PARA DEMANDA			DE - PARA DEMANDA		
IM	PA	4	IM	PD	5	IM	PJ	3
IM	PL	1	IM	SA	5	IM	SI	1
IM	VM	3	IP	AM	4	IP	BC	1
IP	BG	1	IP	IM	1	IP	LI	2
IP	PD	2	IP	VIPL	1	IP	BR	1
IP	PE	1	IP	PHA	1	JB	AM	2
JB	IM	2	JB	LI	3	JB	PD	1
JB	IB	1	JB	PA	3	JB	PE	1
JD	AM	3	JD	BC	2	JD	PL	1
JD	IM	4	JD	LI	6	JD	LPA	15
JD	PD	2	JD	BR	1	JD	IB	1
JD	CB	1	JD	SA	1	LI	AM	3
LI	BC	1	LI	IM	1	LI	SA	1
LI	BR	3	LI	IB	1	LI	SNE	1
LI	PD	7	LI	PE	5	LI	GU	2
LI	CO	2	LI	PA	4	LI	PHA	1
LI	SI	1	LI	ST	10	LI	VG	11
LI	VM	2	LI	VP	1	LI	BG	6
LI	JB	2	LP	AM	3	LP	BG	3
LP	IM	1	LP	LI	3	LP	LPA	21
LP	PD	21	LP	SA	1	LP	IB	2
LP	CB	1	LP	PE	1	LP	PI	1
LP	PL	6	LP	ST	1	LPA	JD	15
LPA	LP	16	LPA	OCO	11	LPA	PA	18
LPA	PD	19	LPA	PE	2	LPA	PJ	15
LPA	PL	17	OCO	PA	2	OCO	RO	4
OCO	AM	1	OCO	BG	2	OCO	LJ	1
OCO	LPA	6	OCO	PD	4	PA	BC	6
PA	BG	2	PA	IM	3	PA	OCO	1
PA	PL	1	PA	LI	8	PA	PD	2
PA	SA	6	PA	ST	1	PA	AM	2
PA	AN	2	PA	ASSO	2	PA	CB	5
PA	CO	5	PA	JB	3	PA	SBO	1
PA	SI	3	PA	SNE	6	PA	VIPL	2
PA	VIRR	1	PA	CC	1	PA	LP	1
PA	SM	1	PA	PE	2	PA	VG	1
PA	PI	1	PD	LPA	21	PD	AM	8
PD	IM	5	PD	SA	1	PD	IB	1
PD	BG	6	PD	LI	4	PD	PE	3
PD	SNE	6	PD	OCO	11	PD	BR	1
PD	CO	2	PD	PL	3	PD	LP	16
PD	PA	4	PD	RO	13	PD	ST	3
PD	VM	2	PD	LPA	4	PD	CB	1
PE	AM	4	PE	LI	3	PE	PD	4
PE	BC	1	PE	CB	1	PE	PA	1
PE	BG	2	PE	SA	1	PE	BR	1
PE	CO	1	PE	SI	1	PE	SNE	2
PE	CC	1	PE	EM	2	PE	SM	6
PE	GU	2	PE	VE	2	PHA	BR	3
PHA	SM	2	PHA	IP	4	PHA	LI	1

DE - PARA DEMANDA

DE - PARA DEMANDA

DE - PARA DEMANDA

PHA	GU	1
PI	AM	2
PI	IM	3
PI	CB	1
PI	BC	1
PL	LI	4
PL	SA	1
PL	BG	1
SA	AM	14
SA	PD	4
SA	JD	1
SA	IP	1
SA	VM	1
SBO	ASSO	4
SBO	SNE	1
SCN	LI	1
SI	AM	5
SI	LI	1
SI	PE	2
SM	BG	2
SM	PA	1
SM	PHA	2
SM	SI	1
SNE	SNTE	3
SNE	PD	4
SNE	BR	1
SNE	PE	1
SNE	VM	2
ST	AM	3
ST	PD	3
ST	LP	1
ST	PHA	1
VE	LI	1
VG	LI	7
VG	CC	1
VGTI	BG	1
VIPL	LI	2
VIRR	AM	1
VIRR	PA	1
VM	IM	2
VM	BG	1
VM	CB	2

PHA	ST	3
PI	BG	2
PI	LI	2
PI	PA	1
PL	AM	3
PL	LPA	14
PL	PA	1
RO	LPA	1
SA	IM	5
SA	BG	2
SA	BR	1
SA	PA	4
SA	CB	1
SBO	LI	1
SBO	PA	1
SCN	PD	1
SI	BC	1
SI	OCO	1
SI	SNE	2
SM	LI	3
SM	CO	1
SM	PE	4
SM	SNE	1
SNE	AM	4
SNE	SCN	2
SNE	CO	2
SNE	SI	2
SNTE	PA	1
ST	CB	1
ST	BG	2
ST	JB	1
VE	BG	1
VG	AM	2
VG	PD	1
VG	PHA	1
VIPL	AM	2
VIPL	SNE	1
VIRR	ASSO	1
VIRR	LI	1
VM	PD	2
VM	PE	1
VM	SA	1

PHA	VG	1
PI	CC	1
PI	LPA	13
PI	PD	2
PI	IM	1
PL	PD	6
PL	LP	5
RO	OCO	5
SA	LI	5
SA	PE	1
SA	CO	1
SA	SI	1
SBO	AM	1
SBO	PD	1
SCN	AM	1
SCN	SNE	1
SI	IM	2
SI	PD	1
SM	AM	1
SM	VM	1
SM	BR	1
SM	PD	1
SNE	BG	7
SNE	LI	3
SNE	ASSO	11
SNE	PA	4
SNE	VGTI	6
SNTE	SNE	14
ST	LI	7
ST	CC	1
ST	PA	1
VE	GRS	1
VG	BR	1
VG	BG	1
VG	SI	1
VIPL	BG	1
VIPL	IP	1
VIRR	BG	1
VIRR	SNE	1
VM	AM	1
VM	SNE	2
VP	AM	1

- Carregamento nos arcos do plano PTF

. ALTERNATIVA I:

FLUXO NOS ARCOS				
ARCO/FIBRA	COMPRIMENTO	NEUR.I	NEUR.II	NEUR.III
PD - LI	11600	14		
PD - CB	17900	6		
PD - AM	27100	21	16	16
PD - PE	18400	10	10	10
PD - SM	32300	1		
PD - SNE	37100	10		
CO - CB	13700	6		
CO - AM	17900	9		
CO - PE	12700	7		
CO - SM	26600	1		
CO - SNE	26800	4		
PA - AM	14500	5		
PA - PE	16100	3		
PA - SM	30000	7		
PA - SNE	24500	12	26	26
VM - AM	10800	12		
VM - BR	9500	4		
VM - PE	16100	7		
VM - SM	30700	1		
VM - SNE	20800	4		
SI - LI	9900	2		
SI - PE	14300	3		
SI - SM	28200	1		
SI - SNE	29300	4		
BG - CB	4500	1		
BG - AM	18700	28	28	28
BG - PE	12600	3		
BG - SM	26500	3		
BG - SNE	27600	8	12	12
AN - LI	9700	1		
AN - CB	16400	2		
AN - SM	25800	7		
LI - CB	11300	16	16	16
LI - AM	15700	8		
LI - PE	12400	11		
LI - SM	26300	3		
LI - SNE	23400	11	11	15
CB - AM	11500	49	48	48
CB - BR	16400	2		
CB - PE	23000	4		
AM - BR	20300	9		
AM - PE	26900	7		
AM - SM	41500	1		
AM - SNE	23200	11	9	10
BR - SM	21200	1		
BR - SNE	22900	3		
PE - SM	16200	10		
PE - SNE	15600	3		
SM - SNE	31800	1		
TOTAL DE SISTEMAS		337	176	181

Tabela VII - Carregamento nos arcos do plano PTF para a rede de São Paulo (alternativa I)

. ALTERNATIVA II

ARCO/FIBRA	COMPRIMENTO	FLUXO NOS ARCOS				
		NEUR.I	NEUR.II	NEUR.III	NEUR.II	NEUR.III
PD - LI	11600	14				
PD - CB	17900	6				
PD - AM	22100	21	16	16	16	16
PD - PE	18400	10	10	10	10	10
PD - SM	32300	1				
PD - SNE	32100	10				
CO - CB	13700	6				
CO - AM	17900	9				
CO - PE	12700	2				
CO - SM	26600	1				
CO - SNE	26800	4				
PA - AM	14500	5				
PA - PE	16100	3				
PA - SM	30000	2				
PA - SNE	24500	12	26	26	26	26
VM - AM	10800	12				
VM - BR	9500	4				
VM - PE	16100	2				
VM - SM	30700	1				
VM - SNE	20800	4				
SI - LI	9900	2				
SI - PE	14300	3				
SI - SM	28200	1				
SI - SNE	29300	4				
BG - CB	4500	1				
BG - AM	18700	28	28	28	28	28
BG - PE	12600	3				
BG - SM	26500	3				
BG - SNE	27600	8	12	12	12	12
AN - LI	9700	1				
AN - CB	16400	2				
AN - SM	25800	2				
LI - CB	11300	16	16	16	16	16
LI - AM	15200	8				
LI - PE	12400	11				
LI - SM	26300	3				
LI - SNE	23400	11	11	15	15	15
CB - AM	11500	49	48	48	48	48
CB - BR	16400	2				
CB - PE	23000	4				
AM - BR	20300	9				
AM - PE	26900	7				
AM - SM	41500	1				
AM - SNE	23200	11	9	10	9	10
BR - SM	21200	1				
BR - SNE	22900	3				
PE - SM	16200	10				
PE - SNE	15600	3				
SM - SHF	31800	1				
TOTAL DE SISTEMAS		337	176	181	180	181

Tabela VIII - Carregamento nos arcos do plano PTF para a rede de São Paulo (alternativa II)

. ALTERNATIVA III

		FLUXO NOS ARCOS				
ARCO/FIBRA	COMPRIMENTO	NEUR. I	NEUR. III	NEUR. II	NEUR. II	NEUR. III
PD - LI	11600	14	14			
PD - CB	17900	6				
PD - AM	22100	21	16	16	16	16
PD - PE	18400	10	10	10	10	10
PD - SM	32300	1				
PD - SNE	32100	10	10	10	10	10
CO - CB	13700	6				
CO - AM	17900	9	9			
CO - PE	12700	2				
CO - SM	26600	1				
CO - SNE	26800	4				
PA - AM	14500	5				
PA - PE	16100	3				
PA - SM	30000	2				
PA - SNE	24500	12	16	16	16	16
VM - AM	10800	12				
VM - BR	9500	4				
VM - PE	16100	2				
VM - SM	30700	1				
VM - SNE	20800	4				
SI - LI	9900	2				
SI - PE	14300	3				
SI - SM	28200	1				
SI - SNE	29300	4				
BG - CB	4500	1				
BG - AM	18700	28	28	28	28	28
BG - PE	12600	3				
BG - SM	26500	3				
BG - SNE	27600	8	12	12	12	12
AN - LI	9700	1				
AN - CB	16400	2				
AN - SM	25800	2				
LI - CB	11300	16	16	16	16	16
LI - AM	15200	8				
LI - PE	12400	11				
LI - SM	26300	3				
LI - SNE	23400	11	15	15	15	15
CB - AM	11500	49	48	48	48	48
CB - BR	16400	2				
CB - PE	23000	4				
AM - BR	20300	9	9			
AM - PE	26900	7	7			
AM - SM	41500	1				
AM - SNE	23200	11	10	9	9	10
BR - SM	21200	1				
BR - SNE	22900	3				
PE - SM	16200	10	12	12	12	12
PE - SNE	15600	3				
SM - SNE	31800	1				
TOTAL DE SISTEMAS		337	232	192	192	193

Tabela IX - Carregamento nos arcos do plano PTF para a rede de São Paulo (alternativa III)

- Dados de custos e equipamentos

. ALTERNATIVA I:

ITEM	HEURÍSTICA I	HEURÍSTICA II	HEURÍSTICA III
Custo Linear (Cz\$)	85,9x10 ⁶	93,5x10 ⁶	92,2x10 ⁶
Custo real (Cz\$)	116,9x10 ⁶	93,0x10 ⁶	92,6x10 ⁶
Custo PCM (Cz\$)	61,3x10 ⁶	78,1x10 ⁶	77,6x10 ⁶
Custo Fibra (Cz\$)	55,6x10 ⁶	14,9x10 ⁶	15,0x10 ⁶
Parkm Fibra	1073,00	246,90	246,90
Total Sistemas (*)	337	176	181
MUX Terc. ordem	108	26	26
MUX seg. ordem	208	92	94
Tot. repet. ópticos	83	19	19
Util.Sist.terc.ordem	39,0%	84,6%	87,0%

Tabela X - Resumo dos dados de custos e equipamentos na Alternativa 1.

. ALTERNATIVA II

ITEM	HEUR.I	HEUR.II	HEUR.III	HEUR.II	HEUR.III
Custo Linear (Cz\$)	85,9x10 ⁶	93,5x10 ⁶	92,2x10 ⁶	92,6x10 ⁶	91,9x10 ⁶
Custo Real (Cz\$)	116,9x10 ⁶	93,0x10 ⁶	92,6x10 ⁶	92,7x10 ⁶	92,6x10 ⁶
Custo PCM (Cz\$)	61,3x10 ⁶	78,1x10 ⁶	77,6x10 ⁶	77,7x10 ⁶	77,6x10 ⁶
Custo Fibra (Cz\$)	55,6x10 ⁶	14,9x10 ⁶	15,0x10 ⁶	15,0x10 ⁶	15,0x10 ⁶
Parkm Fibra	1073,00	246,90	246,90	246,90	246,90
Total Sistemas (*)	337	176	181	180	181
MUX terc. ordem	108	26	26	26	26
MUX seg. ordem	208	92	94	94	94
Tot.repet.ópticos	83	19	19	19	19
Util.Sist.terc.ordem	39,0%	84,6%	87,0%	86,5%	87,0%

Tabela XI - Resumo dos dados de custos e equipamentos na alternativa II

. ALTERNATIVA III

ITEM	HEUR.I	HEUR.III	HEUR.II	HEUR.II	HEUR.III
Custo Linear (Cz\$)	85,9x10 ⁶	91,9x10 ⁶	92,3x10 ⁶	92,4x10 ⁶	91,6x10 ⁶
Custo Real (Cz\$)	116,9x10 ⁶	92,6x10 ⁶	92,4x10 ⁶	92,4x10 ⁶	92,3x10 ⁶
Custo PCM (Cz\$)	61,3x10 ⁶	71,9x10 ⁶	76,1x10 ⁶	76,1x10 ⁶	76,0x10 ⁶
Custo Fibra (Cz\$)	55,6x10 ⁶	20,7x10 ⁶	16,3x10 ⁶	16,3x10 ⁶	16,3x10 ⁶
Parkm Fibra	1073,00	347,40	270,70	270,70	270,70
Total Sistemas (*)	337	232	192	192	193
MUX terc.ordem	108	36	28	28	28
MUX seg.ordem	208	124	100	100	100
Tot.repet.ópticos	83	27	21	21	21
Util.sist.terc.ordem	39,0%	80,55%	85,7%	85,7%	86,2%

Tabela XII - Resumo dos dados de custos e equipamentos na Alternativa III.

(*) indica o número de sistemas PCM 2 Mb/s roteadas no plano PTF de um total de 1.274 sistemas.

Como verificado para o exemplo da rede do Rio de Janeiro, a Alternativa III corresponde, também no caso de São Paulo, à melhor combinação das heurísticas propostas.

Nas duas aplicações realizadas foram utilizados os seguintes dados para os equipamentos de transmissão (**).

- Equipamentos para transmissão em PCM 2 Mb/s
 - . Par x Km de cabo PCM Cz\$ 2.200,00
 - . Regenerador para 2 Mb/s Cz\$ 5.200,00
- Equipamentos para transmissão em Fibra Óptica
 - . Par x Km de fibra óptica Cz\$ 15.800,00
 - . Repetidor Óptico Cz\$ 135.000,00
 - . MUX 3ª ordem Cz\$ 63.800,00
 - . TL 3ª ordem Cz\$ 104.000,00
 - . MUX 2ª ordem Cz\$ 44.500,00

(**) Fonte- TELERJ, base 10/86.

Para fins de informação, na rodada da rede de São Paulo foi utilizado um computador VAX MX-850 com um tempo total de 3h e 30min de CPU para execução dos vários módulos do programa. Os tempos de CPU em um computador de maior porte como, por exemplo, VAX 8700, IBM 4381 ou PDP-10, certamente serão bem inferiores aos aqui verificados.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

VII.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma análise dos resultados obtidos com a aplicação dos procedimentos expostos nos capítulos III, IV, V e VI e listadas as principais limitações observadas. Em seguida, são propostas algumas alterações que podem ser implementadas nos procedimentos desenvolvidos e apresentados sugestões de continuidade deste trabalho.

VII.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste item é feita uma avaliação das metodologias propostas a partir dos resultados obtidos na aplicação de cada uma delas.

Na metodologia de planejamento para horizontes de longo prazo os resultados obtidos são compatíveis com os objetivos propostos. No exemplo explorado foi considerado apenas o estudo do roteamento com segurança no Ano Horizonte de Planejamento. Entretanto, a critério do usuário, podem ser considerados para o roteamento no ano horizonte:

- . utilização dos p-caminhos mais curtos entre as estações.

- . utilização de caminhos disjuntos de soma mínima e p-caminhos mais curtos entre as estações.

Quando o estudo de longo prazo envolver parte analógica e parte digital, elas devem ser tratadas em separado. Neste caso a utilização de cabo de pares para roteamento deve ser priorizada para o caso analógico. No caso digital, o programa contempla apenas a transmissão em PCM com 2 Mb/s, 30 canais.

Uma das principais qualidades deste procedimento é fornecer ao planejador uma estratégia de evolução do roteamento em função da evolução proposta para os pontos de comutação (ampliação das estações existentes e/ou implantação de novas estações), garantindo o atendimento das demandas em cada período e admitindo uma certa flexibilidade na utilização da infraestrutura já implantada. Além disso, a elaboração do cronograma de compra de equipa-

mentos em função da modularidade dos mesmos, minimizando o valor presente dos custos, constitui-se numa importante ferramenta auxiliar à tomada de decisão.

No que se refere ao procedimento para quantificação dos enlaces de fibras ópticas (34 Mb/s, 480 canais), dentro da proposta de um estudo do tipo "cross section", os resultados também são plenamente satisfatórios. Foi evidenciado nas aplicações apresentadas que a forma como as Heurísticas de custos são utilizadas interfere diretamente na solução final encontrada. Entretanto, independentemente da combinação em que as mesmas são utilizadas, o procedimento deve iniciar pela Heurística I e terminar pela Heurística III; a sequência indicada na Figura 6.5 apresentou, nos testes realizados, os melhores resultados.

No sentido de aprimorar a metodologia proposta neste trabalho foram desenvolvidas em [35], as seguintes atividades:

- . análise da formulação proposta no capítulo V.
- . estudo dos efeitos da variação do número de rotas no plano PTF, na qualidade de solução; foram propostas medidas para se reduzir tais efeitos.
- . estudo do comportamento da solução para algumas situações de barateamento relativo dos equipamentos de transmissão em fibras ópticas.
- . utilização de diferentes critérios para escolha de portas.

VII.3. PROPOSTAS DE MELHORIAS NAS METODOLOGIAS APRESENTADAS

A análise dos resultados obtidos nos capítulos IV e VI, bem como os estudos adicionais realizados, nos sugerem propor algumas melhorias nas metodologias apresentadas, tais como:

- a) considerar a utilização de rotas no plano PTF, como definidas no sistema PRETA, no procedimento de evolução do rotea-

mento ao longo do tempo, PORULP.

b) adicionar ao procedimento de quantificação dos enlaces de fibras ópticas, as seguintes possibilidades:

b.1. Consideração de mais de 3 caminhos entre duas estações utilizando o plano PTF.

b.2. explorar, para os caminhos que utilizam o plano PTF, a consideração de outros caminhos quando o número de portas num dado caminho for superior ou igual a 3. Por exemplo, se um caminho entre as estações A e B utilizando o plano PTF tiver a configuração da figura 7.1, as alternativas 1 e 2 deveriam também ser exploradas.

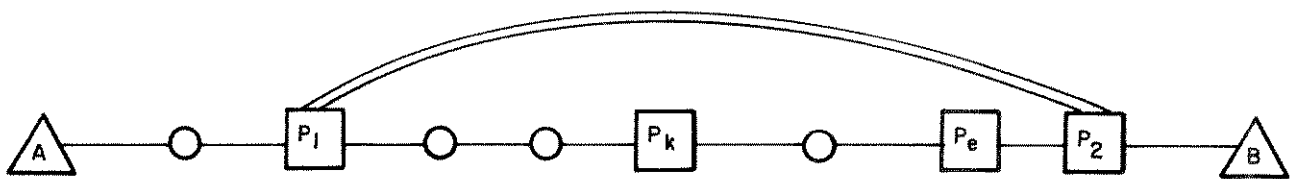


Figura 7.1 - Configuração de um caminho entre A e B

Alternativa 1:



Alternativa 2:



onde:

○ — arco no plano PTP

□ — arco no plano PTF

- b.3. Incorporar os aspectos de segurança da transmissão nas rotas, utilizando o plano PTF.

VII.4. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE PARA ESTE TRABALHO

Alguns aspectos do problema de entroncamento/ roteamento que não foram abordados neste trabalho poderiam ser alvo de investigação futura. Dentre eles pode-se destacar:

- a) Estudo da localização de centrais Tandem no Plano de Comutação Digital:

Este tipo de estudo se justifica não somente pela economia que a localização de Tandem pode representar nos equipamentos de transmissão, mas também como forma de otimizar a interface entre os Planos de Comutação Analógica e Digital.

- b) Avaliação do Entroncamento em função das perdas pré-estabelecidas:

Em função dos resultados obtidos com o cálculo simplificado do entroncamento e utilizando uma estrutura de Tandens proposta, torna-se necessária uma avaliação do entroncamento (verificação das perdas) no sentido de, por exemplo, eliminar rotas de baixo tráfego.

- c) Tratar a rede do plano PTF de maneira detalhada.

No desenvolvimento apresentado no Capítulo V, consideramos os trechos de fibras ópticas como uma ligação direta entre as portas. Cada trecho corresponde, na prática, a união de vários arcos da rede original no plano PTP.

O tratamento detalhado dos trechos de fibras ópticas considerando as disponibilidades dos sistemas ópticos para cada arco da rede original, embora apresente algumas dificuldades com relação aos custos dos equipamentos, incorporaria um maior realismo ao modelo matemático utilizado.

Apesar de não haver dúvidas quanto à importância deste desenvolvimento, pareceu-nos, após uma análise inicial, ser este um problema complexo. O principal problema detectado é como considerar os efeitos das não linearidades decorrentes das modularidades dos sistemas ópticos.

Estamos certos de que estes desenvolvimentos constituiriam um passo inicial, nos estudos de planejamento, para a transformação das redes telefônicas locais com vistas à tendência futura de redes digitais de serviços integrados.

APÊNDICE I

PROGRAMAÇÃO LINEAR POR PARTES

APÊNDICE 1

PROGRAMAÇÃO LINEAR POR PARTES

I. INTRODUÇÃO

É apresentada uma síntese do Método Primal de Programação Linear por Partes, desenvolvido em [21], [22], [36], [37] que é uma ferramenta importante na resolução dos problemas de otimização do roteamento

II. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR POR PARTES

O problema de programação matemática (P) abaixo.

$$(P) \left\{ \begin{array}{l} \text{MIN } F(\underline{x}) \\ \text{s.a} \\ A\underline{x} = \underline{b} \\ \underline{\alpha} \leq \underline{x} \leq \underline{\beta} \end{array} \right.$$

com $\underline{x}(n,1)$, $\underline{b}(m,1)$, $A(m,n)$ de "rank" m e $F(\underline{x})$ convexa, linear por partes e separável, da forma

$$F(\underline{x}) = \sum_{j=1}^n f_j(x_j)$$

é um problema de programação linear por partes e cada função $f_j(x_j)$ pode ser representada por

$$f_j(x_j) = \left\{ \begin{array}{ll} c_0^j x_j + h_{0,j} & \alpha_j \leq x_j \leq g_{1,j} \\ c_k^j x_j + h_{k,j} & g_{k,j} \leq x_j \leq g_{k+1,j} \\ c_{\ell}^j x_j + h_{\ell,j} & g_{\ell,j} \leq x_j \leq \beta_j \end{array} \right.$$

com $h_{k,j} = f_j(g_{k,j}) - c_k^j g_{k,j}$ em $[g_{k,j} ; g_{k+1,j}]$ e cujo gráfico é mostrado a seguir.

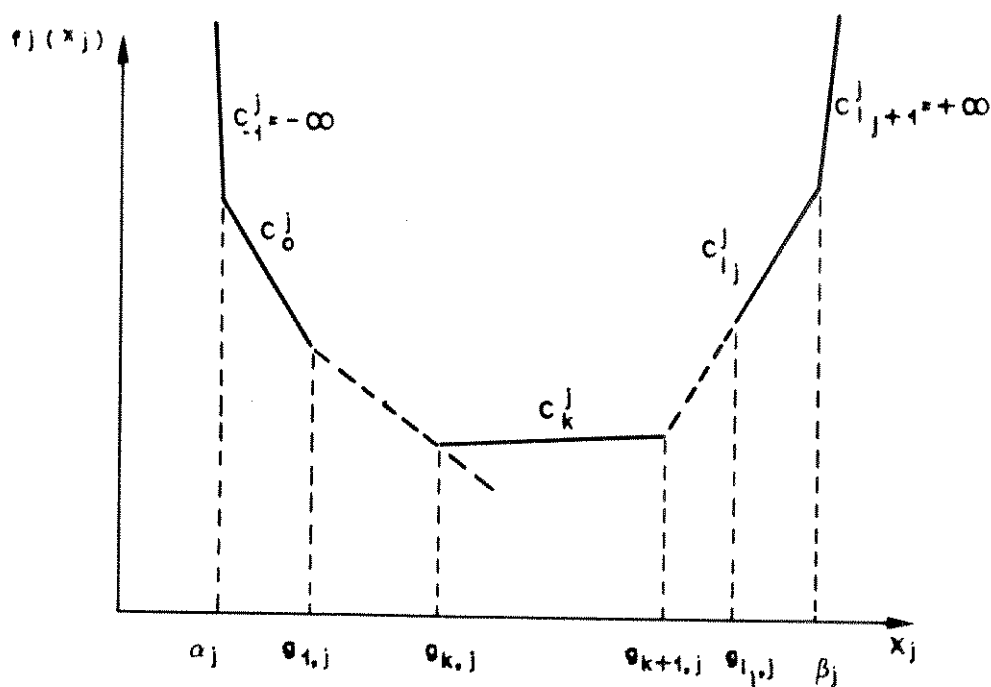


Figura 1

Os pontos $g_{k,j}$, onde ocorrem mudança de inclinação do gráfico, são denominados "pontos críticos" de $f_j(x_j)$.

O coeficiente angular c_k^j é dado por

$$c_k^j = c_0^j + \sum_{i=1}^k \sigma_i^j, \quad \sigma_i^j > 0$$

O problema (P) acima pode ser visto como uma extensão do problema clássico da programação linear com variáveis canalizadas, mostrado em [14]; assim, são válidos os mesmos conceitos utilizados no PL canalizado, exceto que, no caso linear por partes, a variável não-básica pode estar situada em qualquer "ponto crítico". As variáveis básicas estarão sempre situadas no interior de um determinado intervalo, a menos de degenerescências.

Portanto, na resolução do sistema

$$\underline{Ax} = \underline{b} \tag{1}$$

a mesma caracterização de conjuntos básicos I e não básicos J, [38], pode ser utilizada.

O sistema (1) pode, então, ser colocado na forma

$$A^I \underline{x}_I + A^J \underline{x}_J = \underline{b}$$

$$\underline{x}_I = (A^I)^{-1} [\underline{b} - A^J \underline{x}_J]$$

$$\underline{x}_I = \underline{\hat{b}} - \hat{A}^J \underline{x}_J \quad (2)$$

sendo $\underline{x}_J = \underline{g}_{k,J}$ (vetor dos pontos críticos associado às variáveis não-básicas).

Uma solução básica será então da forma

$$\underline{x}^+ = \begin{bmatrix} \underline{x}_I^+ \\ \underline{x}_J^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\hat{b}} - \hat{A}^J \underline{g}_{k,J} \\ \underline{g}_{k,J} \end{bmatrix}$$

Pré-multiplicando (1) pelo vetor multiplicador π e subtraindo da função objetivo, tem-se:

$$(P1) \left\{ \begin{array}{l} \text{MIN } F(\underline{x}) - \pi \underline{b} = \sum_{j=1}^n f_j(x_j) - \pi A \underline{x} \\ \text{s.a} \\ A \underline{x} = \underline{b} \\ \underline{\alpha} \leq \underline{x} \leq \underline{\beta} \end{array} \right. \quad (3)$$

O termo $Z^j = \pi A^j$, coeficiente angular da reta $Z^j x_j, j \in J$, é chamado de Inclinação de Referência.

Tomando um conjunto básico factível, I , de P e $\pi = \pi^+$ corresponde a solução básica $\underline{x} = \underline{x}^+$, tal que

$$\underline{z}^{+I} = \pi^+ A^I = \underline{c}_K^I$$

obtém-se o multiplicador

$$\pi^+ = \underline{c}_K^I (A^I)^{-1}$$

e considerando

$$h_{K,j} = f_j(x_j) - c_K^I x_j, \quad j \in I,$$

a função objetivo (3) pode ser reescrita como

$$F(\underline{x}^+) - \underline{\pi}^+ \underline{b} = \sum_{j \in I} h_{K,j} + \sum_{j \in J} [f_j(x_j^+) - z^{+j} x_j^+]$$

expressa somente em termos das variáveis não-básicas, facilitando assim a análise local da variação de $F(\underline{x})$ em torno de cada componente não-básica.

Então

$$[f_j(x_j^+) - z^{+j} x_j^+] = [c_{\gamma}^j - z^{+j}] x_j^+ = \hat{c}_{\gamma}^j x_j^+$$

sendo $\gamma = k$ e/ou $(k-1)$.

Pré-multiplicando (1) por $(A^I)^{-1}$, então (P) pode ser escrita na forma preparada, em relação à base I, abaixo.

$$(P') \left\{ \begin{array}{l} \text{MIN } F(\underline{x}^+) - z_0 = \hat{c}_{\gamma(x_j^+)}^J x_J \\ \underline{x}_I + \hat{A}^J x_J = \underline{b} \\ \underline{\alpha}_I \leq \underline{x}_I \leq \underline{\beta}_I \\ \underline{\alpha}_J \leq \underline{x}_J \leq \underline{\beta}_J \end{array} \right.$$

A variável x_j tem dois custos relativos: o custo relativo à direita, $\hat{c}_k^j$, e o custo relativo à esquerda, $\hat{c}_{k-1}^j$.

Três casos podem ocorrer quanto aos valores assumidos por z^{+j}

$$a) \ z^{+j} > c_k^j > c_{k-1}^j$$

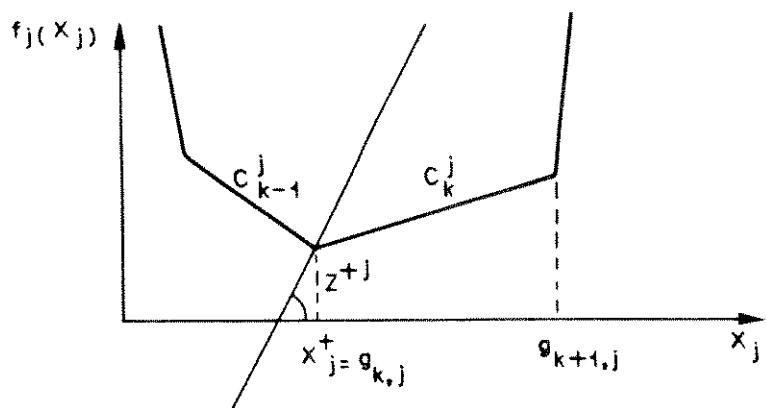


Fig. 2 - Custos relativos negativos

Os custos relativos são tais que $\hat{c}_{k-1}^j < 0$ e $\hat{c}_k^j < 0$, e o aumento do valor da variável não-básica x_j^+ contribuirá para uma diminuição do valor da função objetivo. Portanto, x_j^+ tende para $g_{k+1,j}$.

$$b) \ z^+j < c_{k-1}^j < c_k^j$$

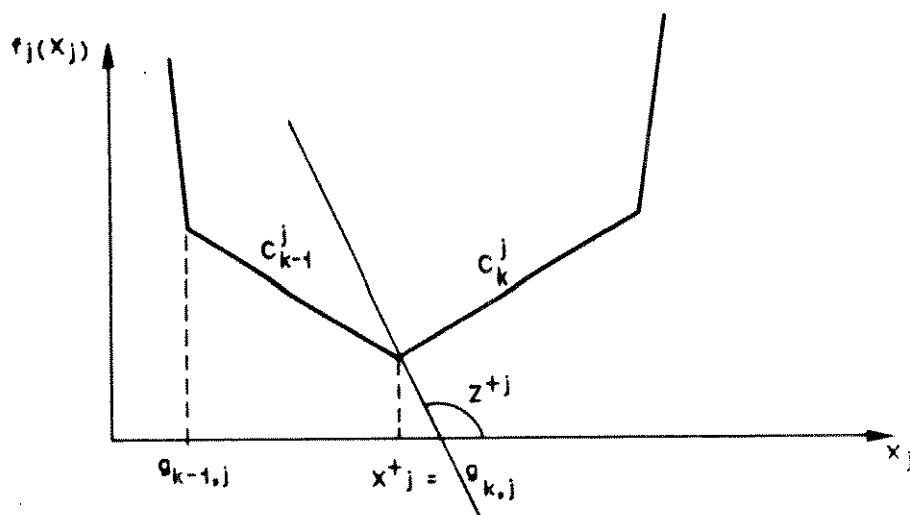


Fig. 3 - Custos relativos positivos

Os custos relativos são tais que $\hat{c}_{k-1}^j > 0$ e $\hat{c}_k^j > 0$, e a diminuição do valor da variável não-básica x_j^+ implicará em uma diminuição no valor da função objetivo.

$$c) \ c_{k-1}^j < z^+j < c_k^j$$

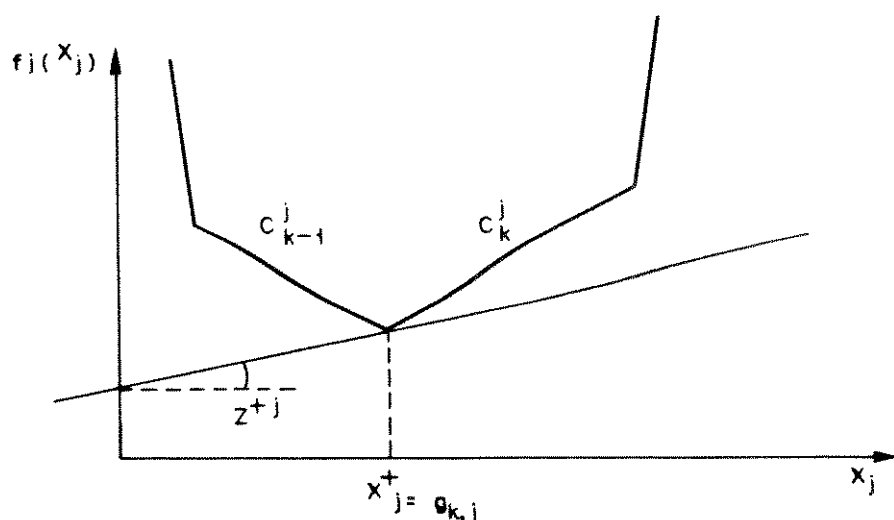


Fig. 4 - Custos relativos na otimalidade

Neste caso, $\hat{c}_k^j > 0$ e $\hat{c}_{k-1}^j < 0$, e qualquer que seja a variação em torno de x_j^+ , o valor da função objetivo aumentará.

A solução x^+ é, então, ótima se

$$c_{k-1}^j < z^j < c_k^j, \quad \forall j, j \in J$$

e este é o critério de otimalidade.

Seja x_s a variável candidata a entrar na base, definida por um dos casos a) ou b) já mencionados, e suponha que x_s e as variáveis básicas serão alteradas de um valor ϵ que leva uma delas a alcançar um ponto crítico (para valores ultrapassando este ponto, deixaria de valer a forma canônica referente à solução básica x^+).

Para a variável x_s , $s \in J$, tem-se

- 1) se $z^{+s} > c_k^s > c_{k-1}^s$, x_s vai se deslocar em direção ao próximo ponto crítico à direita. Supondo que x_s alcance o ponto crítico, tem-se

$$\epsilon_s = g_{k+1,s} - g_{k,s} > 0$$

- 2) se $z^{+s} < c_{k-1}^s < c_k^s$, x_s se desloca em direção ao próximo ponto crítico à esquerda. Neste caso, supondo que x_s alcance o ponto crítico, obtém-se

$$\epsilon_s = g_{k-1,s} - g_{k,s} < 0$$

Para as variáveis básicas, o cálculo de ϵ depende dos custos relativos da variável não-básica x_s .

- 1) Para custos relativos à direita e à esquerda negativos, tem-se que x_s caminha para a direita. Então $\underline{x}_J = \underline{x}_J^+ + \underline{\epsilon}$, $\underline{\epsilon} = [0..0 \uparrow 10..0]^T$

$$\underline{x}_I = \underline{b} - \hat{A}^J \underline{x}_J$$

$$\underline{x}_I = \underline{b} - \hat{A}^J (\underline{x}_J^+ + \underline{\epsilon})$$

$$\underline{x}_I = \underline{b} - A^J \underline{x}_J^+ - A^J \underline{\epsilon}$$

$$\underline{x}_I = \underline{x}_I^+ - \hat{A}_j^S \epsilon$$

$$x_j = x_j^+ - \hat{A}_j^S \epsilon, \quad j \in I$$

$x_j, j \in I$, tenderá para o limite inferior ou superior do seu intervalo de definição se $\hat{A}_j^S > 0$ ou $\hat{A}_j^S < 0$, respectivamente.

Para $x_j, j \in I$, tendendo para $g_{k,j}$, tem-se

$$\epsilon_j = \frac{g_{k,j} - x_j^+}{\hat{A}_j^S}$$

e tendendo para o limite inferior $g_{k-1,j}$,

$$\epsilon_j = \frac{g_{k-1,j} - x_j^+}{\hat{A}_j^S}$$

2) Para custos relativos à direita e à esquerda positivos, tem-se que $\underline{x}_J = (\underline{x}_J^+ - \underline{\epsilon})e$

$$x_j = x_j^+ + \hat{A}_j^S \epsilon, \quad j \in I$$

$x_j, j \in I$, tenderá para o ponto crítico à esquerda se $\hat{A}_j^S < 0$ e

$$\epsilon_j = \frac{g_{k-1,j} - x_j^+}{\hat{A}_j^S}$$

e tenderá para o ponto crítico à direita se $\hat{A}_j^S > 0$ e então

$$\epsilon_j = \frac{g_{k,j} - x_j^+}{\hat{A}_j^S}$$

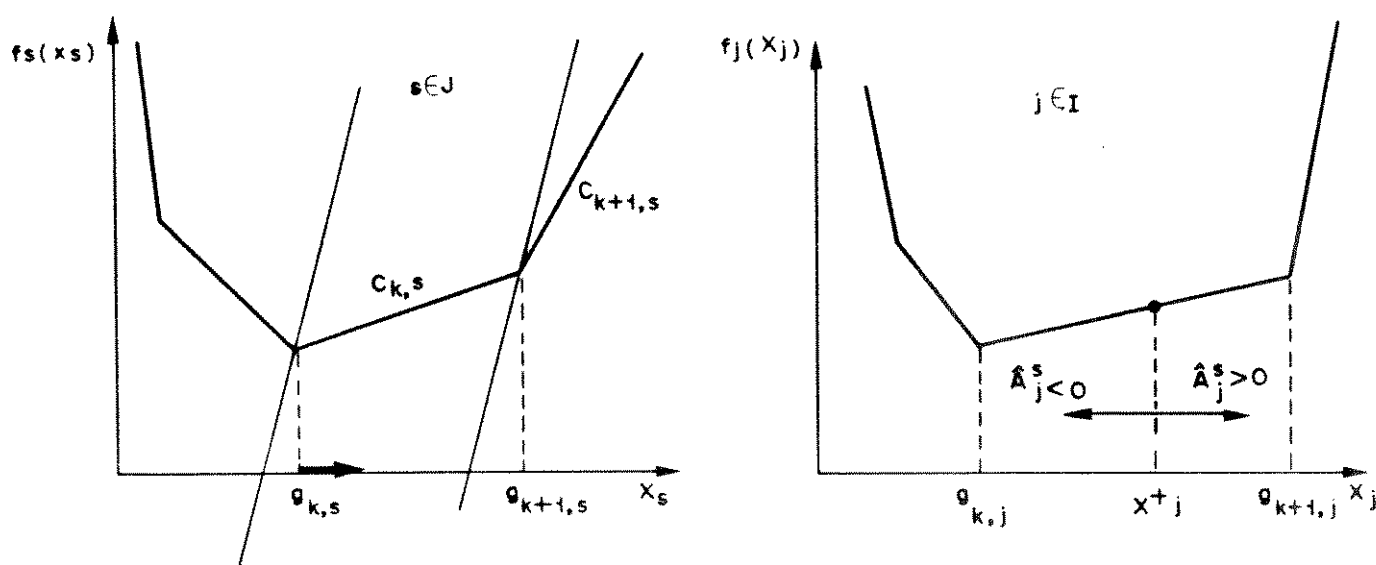
O máximo valor do parâmetro ϵ , tal que uma das variáveis básicas ou x_s alcance um ponto crítico, é dado por

$$\epsilon_{\text{MAX}} = \text{MIN} \{ \epsilon_s; \epsilon_j, \forall j \in I \}$$

Dois casos podem ocorrer:

- 1) $\epsilon_{\text{MAX}} = \epsilon_s$ → o bloqueio é dado pela variável não-básica que atinge seu ponto crítico $g_{k-1,j}$ ou $g_{k,j}$ se os custos relativos forem positivos ou negativos, respectivamente. Não há, portanto, mudança de base.

1.a) Para custos relativos negativos



$$\left\{ \begin{array}{l} x_s = g_{k+1,s} \\ x_j = x_j^+ - \epsilon_{\text{MAX}} \hat{A}_j^s, x_j \in [g_{k,j}; g_{k+1,j}] \quad , j \in I \end{array} \right.$$

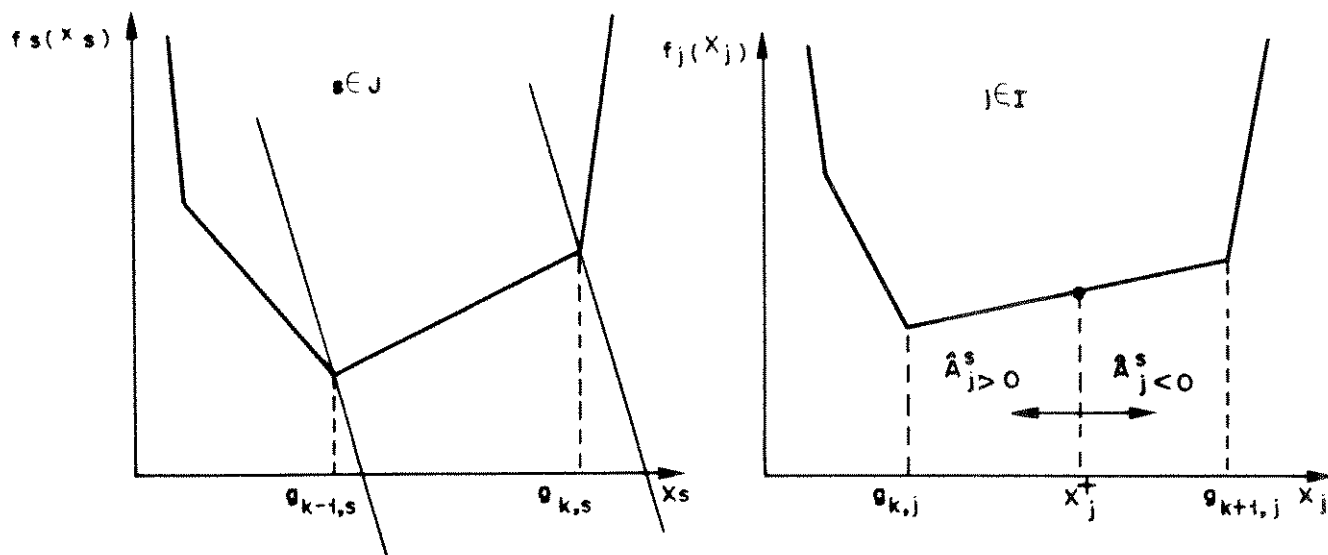
A inclinação de referência não se altera e mudam apenas os custos relativos da variável x_s .

$$(c_s^{\text{esq}})_{\text{NOVO}} = (c_s^{\text{dir}})_{\text{ANTIGO}}$$

$$(c_s^{\text{dir}})_{\text{NOVO}} = c_{k+1,s} - z^{+s}$$

1.b) Se os custos relativos forem positivos, a variável

vel não-básica assume o valor do ponto crítico à esquerda.



$$\begin{cases} x_s = g_{k-1,s} \\ x_j = x_j^+ - \epsilon_{\text{MAX}} \hat{A}_j^s, x_j \in [g_{k,j} : g_{k+1,j}] \quad j \in I \end{cases}$$

Atualizando os custos relativos, tem-se

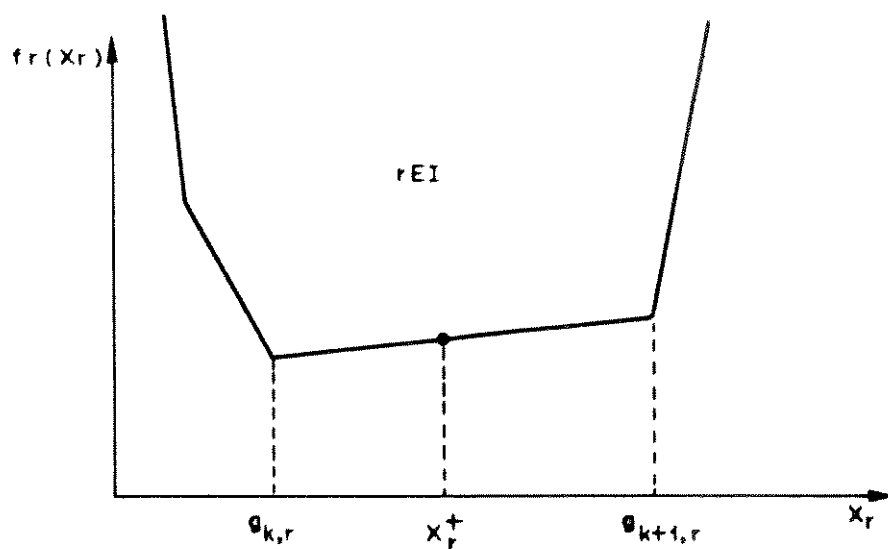
$$(c_s^{\text{dir}})_{\text{NOVO}} = (c_s^{\text{esq}})_{\text{ANTIGO}}$$

$$(c_s^{\text{esq}})_{\text{NOVO}} = c_{k-1,s} - z^{+s}$$

Se os novos custos relativos tiverem sinais contrários, deve-se procurar outra variável não-básica candidata a entrar na base.

2. $\epsilon_{\text{MAX}} = \epsilon_r$, $r \in I \rightarrow$ o bloqueio é dado pela variável básica x_r , ocorrendo mudança de base e alteração nos valores das variáveis básicas e da variável x_s .

$$x_j = x_j^+ - \hat{A}_j^s \epsilon_r, j \in I - \{r\}$$



$$x_r = \begin{cases} g_{k,r} \\ \text{ou} \\ g_{k+1,r} \end{cases}$$

$$x_s = g_{k,s} + \varepsilon_r$$

A variável x_s entra na base e sai a variável x_r . Atualiza-se então a base e calcula-se a nova inclinação de referência e os novos custos relativos à esquerda e à direita das variáveis não-básicas.

Continua-se o processo até ser atingida a condição de otimalidade do problema.

APÊNDICE II

O MÉTODO DE LIMITE SUPERIOR GENERALIZADO
PARA PROBLEMAS COM CRITÉRIO LINEAR POR PARTES

I - APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme mostrado anteriormente o estudo do roteamento de troncos em uma rede telefônica local multi-estações é caracterizado por um problema de fluxo multiproduto. A utilização da formulação arco-rota (denominada arco-caminho na literatura clássica de Pesquisa Operacional) adotada, além de reduzir a dimensão do problema, gera uma estrutura do tipo GUB (mostrada abaixo) para as restrições de capacidade nos arcos (disponibilidade) e atendimento à demanda de cada produto; permite ainda a individualização dos custos por rota.

$$A^1 \underline{x}^1 + A^2 \underline{x}^2 + \dots + A^P \underline{x}^P \leq \underline{b} + I\underline{y} \quad \left\{ \begin{array}{l} (1) \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} e^1 x^1 = d^1 \\ e^2 x^2 = d^2 \\ \vdots \\ e^P x^P = d^P \end{array} \right\} \quad (2)$$

Estrutura de restrições: (1) disponibilidade

(2) atendimento à demanda

A consideração dos aspectos de segurança da transmissão, o procedimento de evolução do roteamento ao longo do tempo e as heurísticas adotadas na quantificação dos enlaces de fibras ópticas, levam a uma função objetivo linear por partes, convexa e separável para cada rota, de acordo com a figura abaixo.

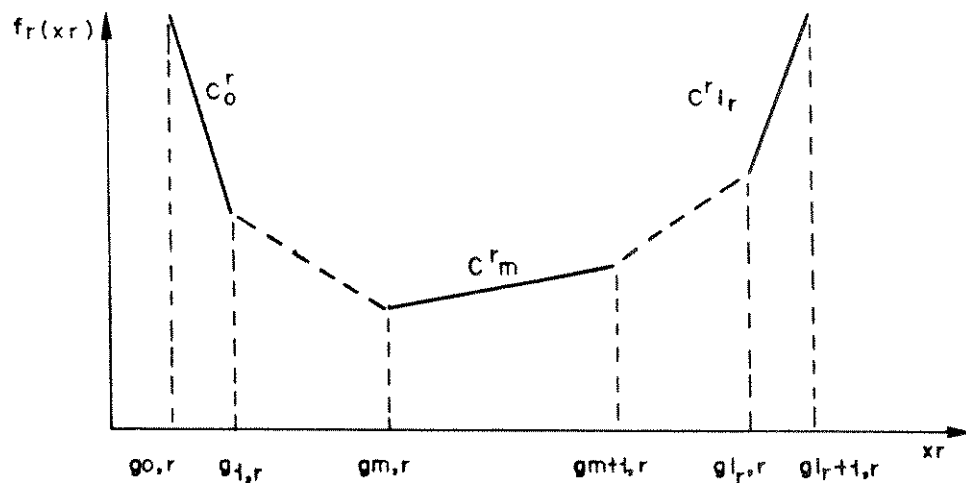


Figura 1

sendo:

$$f_r(x_r) = \begin{cases} c_0^r x_r + h_0^r, & g_{0,r} \leq x_r \leq g_{1,r} \\ \vdots & \vdots \\ c_m^r x_r + h_m^r, & g_{m,r} \leq x_r \leq g_{m+1}^r \\ \vdots & \vdots \\ c_{l_r}^r x_r + h_{l_r}^r, & g_{l_r,r} \leq x_r \leq g_{l_r+1,r} \end{cases} \quad (3)$$

Os custos de compra também assumem uma estrutura linear por partes, obtida por penalizações na função objetivo a partir de determinados valores de compra.

A função objetivo do problema de roteamento utilizada tem a forma:

$$\text{MIN } F = \sum_{r=1}^R f_r(x_r) + \sum_{j=1}^M \delta_j(y_j) \quad (4)$$

estando sujeita às restrições (1) e (2) e sendo as funções $f_r(x_r)$ e $\delta_j(y_j)$ do tipo da Fig. 1.

O sistema de restrições (1) - (2) pode ser reescrito na forma:

$$B \underline{s} = \underline{w} \quad (5)$$

em que:

$$\underline{s} = \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{t} \\ \underline{y} \end{bmatrix} \quad \underline{w} = \begin{bmatrix} \underline{b} \\ \text{---} \\ \underline{d} \end{bmatrix}$$

$$B = \left[\begin{array}{ccc|cc} A^1 & \dots & A^P & I & -I \\ \hline e' & & & 0 & 0 \\ & \ddots & & & \\ & & e^P & & \end{array} \right]$$

$$B \ (M + P, R + M + M)$$

$$\underline{s} \ (R + M + M, 1)$$

$$\underline{w} \ (M + P, 1)$$

Na resolução de (5) é adotada uma extensão do conceito de "solução básica" utilizada no linear. Aqui, uma variável não-básica pode estar em qualquer um dos "pontos críticos" da sua correspondente função linear por partes (pontos de mudança de inclinação da função objetivo).

Se I e J são os conjuntos de índices das variáveis básicas e não-básicas, respectivamente, (5) pode ser escrita como

$$\begin{aligned} B^I \underline{s}_I + B^J \underline{s}_J &= \underline{w} \\ \underline{s}_I &= (B^I)^{-1} [\underline{w} - B^J \underline{s}_J] \\ \underline{s}_I &= \hat{\underline{w}} - \hat{B}^J \underline{s}_J \end{aligned} \quad (6)$$

Logo, $\underline{s} = \begin{bmatrix} \underline{s}_I & \underline{s}_J \end{bmatrix}^T$ é uma solução básica do sistema (1)

-(2) com

$$\begin{bmatrix} \underline{s}_I \\ \underline{s}_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\underline{w}} - \hat{B}^J \underline{g}_{m,J} \\ \underline{g}_{m,J} \end{bmatrix} \quad (7)$$

cujas factibilidade deve ser verificada para cada tipo de variável:

- variável de fluxo e de compra $\left\{ \begin{array}{ll} g_{m,i} \leq s_i \leq g_{m+1,i} & i \in I \\ s_j = g_{m,j} & , j \in J \end{array} \right.$
- variável de folga $\left\{ \begin{array}{ll} s_i \geq 0 & , i \in I \\ s_j \geq 0 & , j \in J \end{array} \right.$

É admitido, para fins de desenvolvimento, que as soluções básicas são não-degeneradas, ou seja, s_i , $i \in I$, não coincide com nenhum de seus pontos críticos.

II. CÁLCULO DOS MULTIPLICADORES

Lembrando que o valor de uma variável básica, chave e não-chave, deve estar entre dois pontos críticos e, portanto, seu custo é o correspondente a este intervalo, o cálculo dos multiplicadores obedece às mesmas relações do caso linear.

$$\underline{\pi} = \underline{c}^{I2} T^{-1} \quad (8)$$

$$\underline{\mu} = \underline{c}^{I1} - \underline{\pi} A \quad (9)$$

onde:

$\underline{c}^{I1} = \begin{bmatrix} \underline{c}_m^{I1} \end{bmatrix}$, corresponde às variáveis de fluxo chaves
 $\underline{c}^{I2}$, corresponde às variáveis básicas não-chaves, cujos componentes são

- . c_m^j , para as variáveis de fluxo
- . 0, para as variáveis de folga
- . ρ_m^j , para as variáveis de compra

III. DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL QUE ENTRA NA BASE

III.1 - Cálculo da Inclinação de Referência Z e dos Custos Relativos para todas Variáveis Não-Básicas

A forma preparada para o problema linear por partes é análoga a adotada no caso linear, a menos dos componentes dos vetores de custo.

$$(FP) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{MIN } F - \underline{\lambda} \left[\frac{b}{d} \right] = (\underline{c}_m^{I1} - \underline{\lambda} B^{I1}) x_{I1} + (\underline{c}_m^{I2} - \underline{\lambda} B^{I2}) x_{I2} + \underline{\hat{c}}^J x_J \\ \text{s.a.} \\ B^{I1} x_{I1} + B^{I2} x_{I2} + B^J x_J = \left[\frac{b}{d} \right] \end{array} \right. \quad (10)$$

onde:

$$\hat{c}^J = \underline{c}^J - \begin{bmatrix} \underline{\pi} & \underline{\mu} \end{bmatrix} B^J \quad (11)$$

Tomando

$$Z^J = \begin{bmatrix} \underline{\pi} & \underline{\mu} \end{bmatrix} B^J$$

pode-se reescrever (11) como

$$\hat{c}^J = \underline{c}^J - Z^J \quad (12)$$

que permite a seguinte caracterização em termos das variáveis do problema:

• Variáveis de fluxo

$$Z^j = \begin{bmatrix} \underline{\pi} & \underline{\mu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^j \\ -\frac{e_p}{e_p} \end{bmatrix}, \quad j \in J$$

$$e_p = \begin{bmatrix} 0 \dots 0 \underset{\substack{\uparrow \\ \text{posição } p}}{1} 0 \dots 0 \end{bmatrix}^T$$

$$Z^j = \underline{\pi} A^j + \mu_p$$

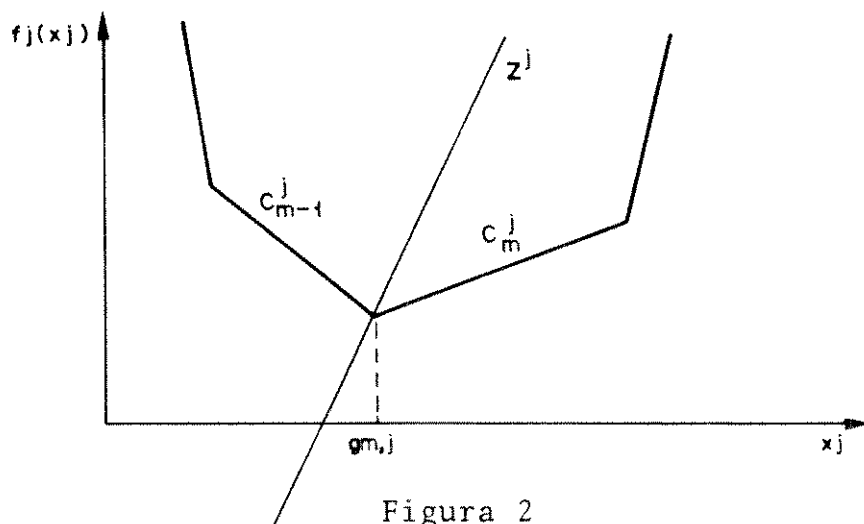


Figura 2

portanto, a variável de fluxo apresenta dois custos relativos, conforme mostrado na figura 2 acima.

$$\hat{c}_E^j = \hat{c}_{esq}^j = c_{m-1}^j - Z^j$$

$$\hat{c}_D^j = \hat{c}_{dir}^j = c_m^j - Z^j$$

- Variável de folga

$$z^j = \left[\begin{array}{c} \pi \quad \mu \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} -I^j \\ 0 \end{array} \right] = \pi^j, \quad j \in J$$

$$\hat{c}^j = c^j - z^j = 0 - \pi^j = -\pi^j$$

- Variável de compra - apresenta também, dois custos relativos, à direita e à esquerda

$$z^j = \left[\begin{array}{c} \pi \quad \mu \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} -I^j \\ 0 \end{array} \right] = -\pi^j, \quad j \in J$$

$$\hat{c}^j = c^j - z^j$$

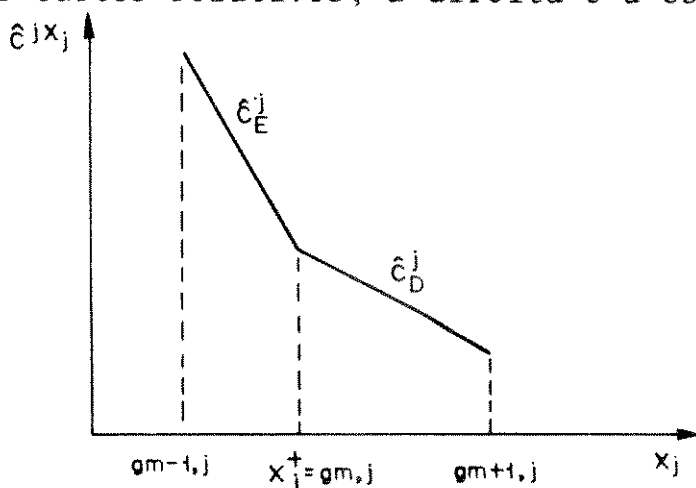
$$\hat{c}_E^j = \hat{c}_{\text{esq}}^j = \rho_{m-1}^j - z^j = \rho_{m-1}^j + \pi^j$$

$$\hat{c}_D^j = \hat{c}_{\text{dir}}^j = \rho_m^j - z^j = \rho_m^j + \pi^j$$

III.2 - Variável Candidata a Entrar na Base

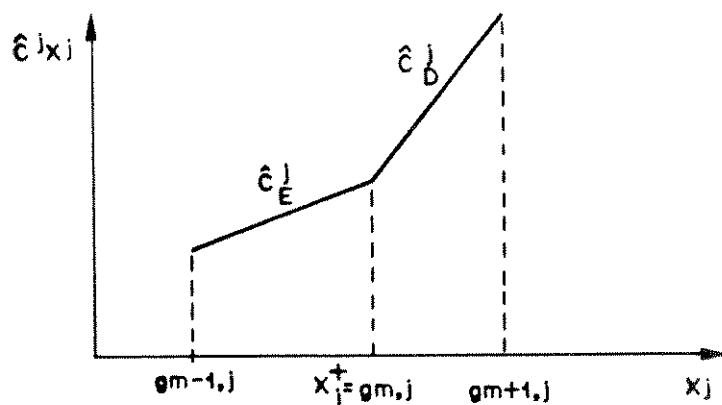
Da forma preparada mostrada em (10), nota-se que o termo $\hat{c}^j x_j$ terá influência na variação da função objetivo. Analisando graficamente os custos relativos e tomando x_j^+ como o valor da variável j , $j \in J$, na solução básica presente, obtém-se.

CASO 1 - ambos os custos relativos, à direita e a esquerda, são negativos.



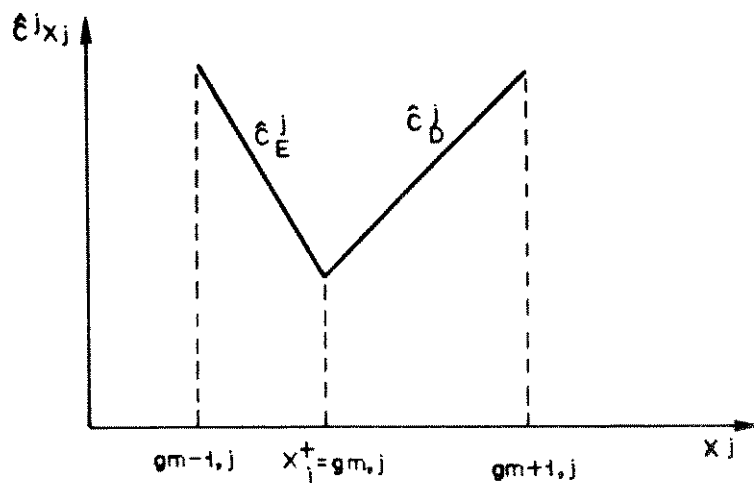
se $x_j = x_j^+$ aumentar de valor, $\hat{c}^j x_j$ diminui e a função objetivo também diminui.

CASO 2 - ambos os custos relativos, à direita e à esquerda, são positivos.



o valor da função objetivo diminui se $x_j = x_j^+$ diminuir de valor.

CASO 3 - os custos relativos, à direita e à esquerda, têm sinais contrários.



a função objetivo aumenta qualquer que seja a variação de $x_j = x_j^+$.

Dos 3 casos acima, tem-se que para uma variável de fluxo ou de compra ser candidata a entrar na base, seus custos relativos (direita e esquerda) devem ser ambos positivos ou negativos; se os custos relativos tiverem sinais contrários, então a solução é ótima. Para a variável de folga (linear) ser candidata a entrar na base, seu custo relativo deve ser negativo.

III.3 - Critério de Escolha, entre as Variáveis Candidatas, da Variável a Entrar na Base

- Para as variáveis de fluxo e de compra

. se ambos os custos forem negativos (CASO 1), toma-se o custo de direita

$$\hat{c}^j = |\hat{c}_D^j|$$

. se ambos os custos relativos forem positivos (CASO 2), toma-se o custo relativo à esquerda

$$\hat{c}^j = |\hat{c}_E^j|$$

- Para as variáveis de folga, se $\pi^j > 0$, toma-se:

$$\hat{c}^j = \pi^j$$

A variável a entrar na base é a variável x_s , tal que

$$\hat{c}^s = \text{MAX } \hat{c}^j$$

IV. DETERMINAÇÃO DA VARIÁVEL QUE SAI DA BASE

As variáveis básicas e a não-básica x_s , deverão ser alteradas de um valor ϵ até que uma delas atinja um ponto crítico (Apêndice I), e o valor máximo de ϵ é dado por

$$\epsilon_{\text{MAX}} = \text{MIN} \left\{ \epsilon_s; \epsilon_j, \forall j \in I \right\}$$

dois casos podem ocorrer:

A) $\epsilon_{\text{MAX}} = \epsilon_s$, ou seja, o bloqueio é dado pela variável não básica, que atinge seu ponto crítico $g_{m-1,s}$ ou $g_{m+1,s}$, se os custos relativos forem positivos ou negativos, respectivamente, não havendo mudança de base.

A inclinação de referência também não se altera e mudam apenas os custos relativos da variável x_s . Se os novos custos relativos tiverem sinais contrários, deve-se procurar outra variável não-básica candidata a entrar na base.

B) $\epsilon_{\text{MAX}} = \epsilon_r$, $r \in I$, ou seja, o bloqueio é dado pela variável básica x_r , ocorrendo mudança de base e alteração nos valores das variáveis básicas e da variável x_s , como explicitado no

Apêndice I.

Atualiza-se a inversa da base de modo análogo ao caso linear e, conseqüentemente, deve-se calcular os novos multiplicadores, a nova inclinação de referência e os novos custos relativos para as variáveis não-básicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] DEBIESSE, J.L. - "EPICURE Network Planning Package", Echo des Recherches, nº 82, Outubro, 1985.
- [02] OLIVEIRA, G.C. - "Um Problema de Planejamento de Redes Telefônicas", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1975.
- [03] NAKAGAWA, J.M. - "Planejamento de Sistemas Telefônicos: Alocação de Centros de Fios", Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEE, 1984.
- [04] CARLSON Fº, C.M. - "Planejamento de Sistemas Telefônicos: Plano de Interligação e Cronograma de Implantação de Estações Urbanas", Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEE, 1984.
- [05] FRAISLEBEM, F. - "Evolução Dinâmica de Cortes de Área em Redes Telefônicas Urbanas", Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEE, 1984.
- [06] GIRÃO, S.E.; CARDOSO, F.P. - "Matriz de Tráfego Local", 1º Seminário de Tráfego Telefônico, Rio de Janeiro, 1978.
- [07] RAPP, Y. - "Planning of Junction Network in a Multi-Exchange Area: General Principles", Ericsson Techniques, nº 1, pp 77-130, 1964.
- [08] WILKINSON, R.I. - "Theories for Tool Trafic Engineering in the USA", Bell Systems Technical Journal, Vol. 35, nº 2, 1956.
- [09] WALLSTROM, B. - "Methods for Optimizing Alternative Routing Networks", Ericsson Technics, nº 1, 1969.
- [10] TIBA, C.R.; SOLON, L.R.; UEHARA, J.M. - "Otimização do Entroncamento Local", Relatório Interno, TELESP, 1981.

- [11] YAMAKAMI, A.; CARLSON Fº, C.M; TAVARES, H.M.F.; FERNANDES, J.F.R. - "ECIC - Programa Estimador do Custo de Interligação de Centrais", Relatório Técnico RT-11, Convênio UNICAMP/TELEBRÁS - Redes Digitais, 1982.
- [12] MORENO, A.O. - "Planejamento de Redes Telefônicas: Determinação do Circuito de Junção", Tese de Mestrado, ITA, 1974.
- [13] FORD, L.R.; FULKERSON, D.R. - "Flows in Network", Princeton, 1962.
- [14] BAZARAA, M.; JARVIS, J.J. - "Linear Programming and Network Flows", John Wiley, 1977.
- [15] REIS, A.C.F. - "Aplicações de Modelos de Programação Combinatória ao Problema de Expansão de Redes Telefônicas", Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, 1979.
- [16] SHIBATA, M. - "Otimização do Investimento a Curto Prazo em Redes de Transmissão Telefônicas de Áreas Multi Centrais"- Tese de Mestrado, UNICAMP/IMECC, 1981.
- [17] McCALLUM, C.J. - "A Generalized Upper Bounding Approach to a Communications Network Planning Problem", Network, 7, pp 1-23, 1977.
- [18] MINOUX, M.; SERREAUULT, J.Y. - "Synthese Optimale D'un Réseaux de Télécommunication avec Contraintes de Sécurité"-Annales de Telecommunication, 36, nº 3-4, 1981.
- [19] SERREAUULT, J. Y.; MINOUX, M. - "Le Programme d'Admissibilité Avec Contraintes de Sécurité et Coûts de Mutation: - Application Aux Réseaux de Transmission Mistes" - Annales de Télécommunication, 36, nº 1-2, 1980.
- [20] GARCIA, A.S.; TAVARES, H.M.F; RIBEIRO, R.V.; BIM, T.M.F. - "Uma Metodologia para Otimização do Roteamento de Troncos em Redes Telefônicas Urbanas com Segurança", II CLAIO, Buenos Ayres, 1984.

- [21] YODINE, D.; GOLSTEIN, E. - "Problèmes Particulieüs de la Programmation Linéaire", MIR, 1973.
- [22] GARCIA, A.S. - "Método Dual Simplex para Problemas com Critério Linear por Partes", Tese de Mestrado, UNICAMP/IMECC, 1978.
- [23] FERREIRA, E.P. - "Programação linear por Partes: Método Primal Dual", Tese de Mestrado, UNICAMP/FEC/DEE, 1979.
- [24] BIM, T.M.F.; GARCIA, A.S.; RIBEIRO, R.V.; TAVARES, H.M.F. - "Uma Extensão do Método Generalized Upper Bound (GUB) para Programação Linear por Partes", 6º Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, São José dos Campos, 1983.
- [25] GARCIA, A.S.; TAVARES, H.M.F.; RIBEIRO, R.V.; GUERRA, R.B. - "Um Procedimento para Otimização do Roteamento de Troncos em Horizontes de Longo Prazo", 6º Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1986.
- [26] NEMHAUSER, G. - "Introduction to Dynamic Programming", Wiley, 1966.
- [28] BELLMAN, R.; KALABA, R. - "Dynamic Programming and Modern Control Theory", Academic Press, 1965.
- [29] LARSON, R.E. - "State Increment Dynamic Programming", Wiley, 1966.
- [30] RAPP, Y. - "Empleo de Programación Dinâmica para el Planeamento de Ampliaciones de Redes de Canalización Y Primarias en una Zona Local de Central", Ericsson Review, nº 46, pp 102-112, 1969.
- [31] ROBIN, G.; TREVES, S.R. - "Programatic Introduction of Digital Switching and Transmission in Existing Network", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-27, nº 7, 1979.

- [32] RAPP, Y. - "Planning of Junction Network in a Multi - Exchange Area: Extensions of the Principles and Applications", Ericsson Technics, nº 2, pp 187-240, 1965.
- [33] SIEMENS AG - "Teoria do Tráfego Telefônico: Tabelas e Gráficos", Edgard Blucher, 1975.
- [34] AUTHIÉ, G. - "Otimização em Grafos", UNICAMP, 1976.
- [35] AZEVEDO JR, H. - "Otimização do Roteamento de Redes Telefônicas Urbanas com Utilização de Fibras Ópticas", Tese de Mestrado, UNICAMP/FEE, 1987.
- [36] RIBEIRO, R.V. - "Estudos em Programação Linear", Tese de Doutorado, UNICAMP/FEC, 1980.
- [37] FERNANDES, J.F.R. - "Programação Linear por Partes: Resolução por Decomposição de um Problema de Grande Porte", Tese de Doutorado, UNICAMP/FEC, 1978.
- [38] SAKAROVITCH, M. - "Notes on Linear Programming", Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
- [39] YAGED, B. - "Long Range Planning for Communications Networks", Tese de Doutorado, Polytechnic Institute of Brooklyn, Michigan, 1971.
- [40] COMBOT, J.R., EPSTEIN, N. - "The Introduction to Digital Switching to the Local Network", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM.27, nº 7, 1979.
- [41] COMBOT, J.P.; TSUI, M.S.C.; WEIHMAYER, R. - "Optimal Digital Switching Introduction Into the Local Network", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM.29, nº 10, 1981.
- [42] LACOMBE, B.J.; MADJAR, A.V.; MATIGNON, G. - "Traffic Routing in a Hibrid Analog - Digital Network", Annales des Télécommunications, tome 36, nº 9-10, 1981.

- [43] ODAKA, S.; YUSA, Y.; OKIMI, K.; HARADA, H. - " Evolutional Strategy of Digital Transmission Network", IEEE, 1981.
- [44] HINTON, T.T.; BABLER, G.M.; BAILEY, C.C. - "Analog to Digital Facility Evolutinary Planning Using the Outstate Facility Network Planning System", IEEE, 71.3.1 - 71.3.6, 1981.
- [45] OKAZAKI, H. - "Planning an Urban Area Digital Telephone Junction Network", NEC Res & Development, nº 73, 1984.
- [46] BURITY, L.O.; PELLETIER, J. - "Methods for the Dynamic Optimization of Transmission Networks", ISSLS, 1984.
- [47] ELSNER, W.B. - "Dimensiomig Trunk Groups for Digital Networks", The Bell System Technical Journal, Setembro , 1980.
- [48] COMBOT, J.P.; HORN, F.; SALENGS, C.; VANDERSTRAETEM, F. - "A Digital Switching Introduction Evaluation Model for Local Telephone Networks", ISSLS, 1984.
- [49] MITCHEL, W.J. - "A Strategic Loop Network Planning Procedure for New Digital Services and Technologies", ISSLS, 1984.
- [50] LABANDEIRA, A. - "Digitalization of Telephone Network in a Large City", ISS, 1984.
- [51] CLOSE, W.; DARLING, P.; O'NEILL, P. - "Development of the Australian Integrated Digital Network and Strategy Towards ISDN", ISS'84, 1984.
- [52] GARCIA, A.S.; RIBEIRO, R.V. - "PORRUS-PORJLP: Uma Metodologia Otimizante para Cálculo do Roteamento a Longo Prazo com Segurança", Revista TELEBRÁS, pp. 49-59, junho 1984.
- [53] LASDON, L.S.- "Optimization Theory for Large System", Mcmillan, 1970.