

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Este exemplar corresponde à versão  
final da tese defendida por Henderson  
Azevedo Junior e aprovada pela Comissão  
Julgadora em 28/01/1987

Hermano de Moraes Tavares

OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO DE REDES  
TELEFÔNICAS URBANAS COM UTILIZAÇÃO  
DE FIBRAS ÓPTICAS

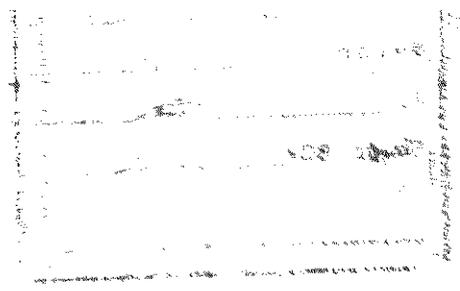
HENDERSON AZEVEDO JUNIOR

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 MESTRE  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

JANEIRO 1987

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL



À minha esposa Lêa Christina

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Hermano M.F. Tavares pela orientação, entusiasmo, e dedicação a este trabalho.

Ao Prof. Anilton S. Garcia pelo apoio constante e inúmeras contribuições.

À Isabel Cristina Moraes por todo esforço e dedicação durante os trabalhos de datilografia.

À Marta R.B. Martini por todos os recursos obtidos junto ao CPqD-TELEBRÁS.

Aos funcionários do CPD-CPqD-TELEBRÁS, pelo excelente suporte computacional.

À TELESP e TELERJ por todos os dados e informações fornecidas.

Aos Professores e Colegas da FEE-UNICAMP, que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho.

## SUMÁRIO

Devido ao grande desenvolvimento tecnológico atual, com conseqüente barateamento de custos, tem se observado uma tendência crescente de digitalização das redes telefônicas nacionais, bem como a utilização de fibras ópticas em locais com grande tráfego telefônico.

As grandes cidades brasileiras são potenciais candidatas ao uso de fibras ópticas, e em pouco tempo já deverão apresentar um bom volume de utilização de tais equipamentos.

Tornam-se necessários modelos de otimização que permitam orientar a implantação destes equipamentos, de forma a fornecer alternativas econômicas para a utilização de tecnologia digital.

Com este objetivo, foi desenvolvido um modelo, originalmente proposto em [1], e apresentado em detalhes no capítulo II. Verifica-se na sua aplicação que a estrutura de custos para transmissão utilizando fibra óptica apresenta um comportamento não linear, com saltos em valores discretos. Foram estudadas diferentes heurísticas para linearizar esta estrutura, apresentadas no capítulo III, de forma a se resolver o problema utilizando-se técnicas de programação linear.

Em decorrência da modularidade dos equipamentos para transmissão em fibras ópticas, ocorrem situações em que não é utilizada a sua capacidade total. No capítulo IV é estudado este comportamento e são sugeridas medidas para minimizar estas situações.

No capítulo V são analisados os efeitos de um barateamento de custo dos equipamentos para transmissão em fibras ópticas. Também são avaliados os resultados obtidos utilizando-se diferentes critérios para escolha das Estações (portas) onde devem ser localizados estes equipamentos. Ainda neste capít

tulo são fornecidos alguns aspectos computacionais do modelo, visto que ele está voltado para redes telefônicas de grande porte.

Foram consideradas neste trabalho as redes telefônicas digitais das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

## SUMMARY

With the recent technological developments and the consequent cost reduction, there is an increasing utilization of digital technology and optical fibers in the urban telephone networks.

In order to direct the use of this technology in an economical way, it was developed a model originally described in [1] and presented in chapter II.

The present work studies some heuristics to linearize the discrete cost structure of the 34 M b/s transmission using optical fibers. With this heuristics, the optimization model can be solved applying linear programming.

The model allows a competition between transmissions in 34 M b/s and 2 M b/s (PCM systems), and the problems related to modularity and utilization of idle capacity of the optical fiber transmission equipments are discussed in chapter IV.

The effects of a cost reduction in the 34 M b/s transmission equipments, compared with 2 M b/s are presented in chapter V. Also in this chapter are studied different criteria for choosing the exchange offices to install the 34 M b/s transmission equipments

Some computational aspects of the model are also presented in chapter V, since it was developed for large urban digital networks.

In this work are considered the digital networks of the cities of São Paulo and Rio de Janeiro.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	01
CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO DO MODELO .....	05
II.1 - INTRODUÇÃO .....	06
II.2 - PLANOS ANALÓGICO E DIGITAL .....	06
II.3 - DETERMINAÇÃO DE CAMINHOS .....	08
II.4 - DEFINIÇÃO DAS ROTAS .....	11
II.5 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....	12
II.6 - CUSTO DE COMPRA NOS ARCOS DE PCM E FIBRA ÓPTICA .....	19
II.7 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO .....	22
CAPÍTULO III - HEURÍSTICAS PARA TRATAR A ESTRUTURA DE CUSTOS DOS ARCOS DE FIBRA ÓPTICA .....	23
III.1 - INTRODUÇÃO .....	24
III.2 - HEURÍSTICA 1 .....	24
III.3 - HEURÍSTICA 2 .....	25
III.4 - HEURÍSTICA 3 .....	29
III.5 - APLICAÇÃO DAS HEURÍSTICAS .....	32
III.5.1 - SEQUÊNCIA DE HEURÍSTICAS 1-2-3 .....	35
III.5.2 - SEQUÊNCIA DE HEURÍSTICAS 1-3-2 .....	40
III.5.3 - PENALIZAÇÕES INDIVIDUAIS	43

III.6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	48
III.7 - CONCLUSÕES .....	56
CAPÍTULO IV - ESTUDO DAS ROTAS NO PLANO PTF .....	58
IV.1 - INTRODUÇÃO .....	59
IV.2 - EFEITOS DO AUMENTO NO NÚMERO DE PORTAS .....	59
IV.3 - INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE ROTAS NO PLANO PTF, NA QUALIDADE DA SOLUÇÃO .....	64
IV.4 - INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE ROTAS NA SEQUÊNCIA DE HEURÍSTICAS .....	67
IV.5 - ROTAS A SEREM OFERECIDAS A CADA PRODUTO .....	69
CAPÍTULO V - ANÁLISES COMPLEMENTARES .....	71
V.1 - INTRODUÇÃO .....	72
V.2 - BARATEAMENTO RELATIVO DOS EQUIPAMENTOS PARA TRANSMISSÃO EM FIBRA ÓPTICA .....	72
V.3 - CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE PORTAS ...	78
V.4 - CONSIDERAÇÕES COMPUTACIONAIS .....	81
V.5 - PROPOSTA DE ROTEAMENTO PARA AS CIDADES DO RIO DE JANEIRO E SÃO PAULO ..	85
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES .....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
ANEXO I .....	94
ANEXO II .....	96

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Serão apresentados neste capítulo alguns aspectos relacionados a telefonia, de forma a dar uma visão simplificada do assunto, que permita ao leitor situar este trabalho no estudo das redes telefônicas.

Todos os terminais telefônicos, comerciais ou residenciais, estão ligados a uma Central telefônica. Num mesmo prédio, também chamado de Estação Telefônica, podemos ter uma ou mais centrais telefônicas ligadas entre si. As estações por sua vez estão ligadas entre si por Circuitos telefônicos, também chamados de Troncos ou Canais. Num mesmo instante, um canal só pode ser utilizado para uma única ligação telefônica entre dois usuários. Entretanto, estes canais não são exclusivos, podendo ser utilizados por diferentes usuários em diferentes períodos de tempo. Assim, estabelecido um grau de serviço, que corresponde ao percentual de ligações telefônicas que serão completadas, é calculado para uma dada demanda, o número de troncos necessários para cada par de centrais [2] , [3] , [4] , [5] , [6] , [7], [8]. Isto permite uma significativa economia de escala, porque nem todos usuários se comunicam entre si ao mesmo tempo.

Os troncos são fisicamente colocados dentro de galerias, e uma rede telefônica urbana se caracteriza por um conjunto de Estações ligadas por galerias, conforme indicado na figura I.1. Os pontos de passagem são locais de encontro de galerias, onde não está localizada uma central.

Com o crescimento da demanda por circuitos telefônicos, e a necessidade de redução de custos, começou a se utilizar a tecnologia digital, que permite o aproveitamento simultâneo de um circuito por vários usuários. Através de uma técnica denominada PCM (Pulse Code Modulation), foi possível a transmissão de 30 ligações telefônicas, por um único circuito. O equipamento eletrônico usado na técnica PCM, é compartilhado no tempo pelas 30 ligações telefônicas, cujos sinais são amostrados e digitalizados. Isto é feito transmitindo-se um fluxo de aproximadamente  $2 \times 10^6$  bits/seg (2M b/s), que a partir de agora será chamado de sistema PCM.

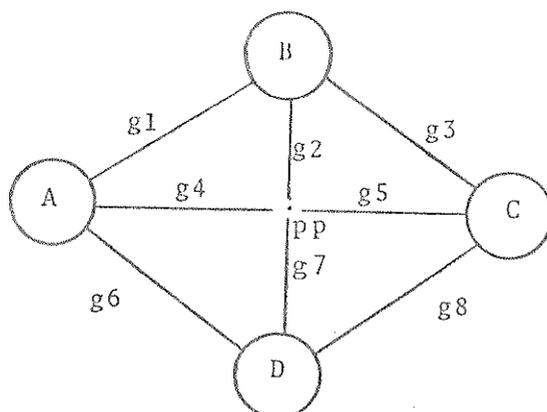


Figura I.1 - Esquema de uma Rede Telefônica Urbana

onde:

A, B, C, D são centrais  
 $g_i$ ,  $i=1,8$  são galerias  
 pp é um ponto de passagem

Com um compartilhamento maior, pode-se transmitir simultaneamente 4 sistemas PCM por um mesmo canal, correspondendo a 120 canais, e também 16 sistemas PCM, ou seja, 480 canais (34M b/s). Além de ganhos nos custos de transmissão, este processo permite uma considerável economia de espaço nas galerias da rede, o que é um fator bastante importante na cidade de São Paulo.

Esse processo de concentração ocorre dentro de uma hierarquia, onde as transmissões em 30 canais são denominadas de 1.<sup>a</sup> ordem, 120 canais 2.<sup>a</sup> ordem e 480 canais 3.<sup>a</sup> ordem.

No Brasil, optou-se pela não utilização das transmissões em 2.<sup>a</sup> ordem, e pelo uso de fibras ópticas para as transmissões em 3.<sup>a</sup> ordem.

As centrais onde há mudança de hierarquia, são chamadas de portas.

A tecnologia digital está sendo implantada progressivamente [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], e durante esta fase de transição da tecnologia analógica para digital, haverá uma coexistência das duas tecnologias, que na realidade leva a uma competição entre elas. O mesmo ocorre com relação as transmissões digitais em 1.<sup>a</sup> e 3.<sup>a</sup> ordem, o que é o objeto de estudo deste trabalho. Todas as demandas tem a possibilidade de utilizar qualquer um desses tipos de transmissão, e a definição

é feita durante o processo de otimização. Pode ocorrer de uma demanda ser escoada parte em 2 M b/s e parte em 34 M b/s.

O modelo utilizado, descrito no capítulo II, e as heurísticas 1, 2 e 3 foram propostas originalmente em [1]. Neste trabalho é analisado o comportamento de cada heurística bem como a sua aplicação na sequência 1-2-3, também proposta em [1]. Com base nos resultados obtidos foram feitas modificações nas heurísticas inicialmente propostas, e também na sua ordem de aplicação na sequência. Foi estudada a necessidade de se utilizar maior quantidade de heurísticas a medida que são oferecidas as mais opções de escoamento da demanda em fibra óptica.

É apresentada uma proposta de penalizações individuais, que utiliza uma nova heurística, desenvolvida para esta aplicação. Todos estes estudos sobre heurísticas encontram-se descritos no capítulo III.

As análises da formulação proposta, bem como os demais estudos apresentados nos capítulos IV e V foram desenvolvidos inteiramente neste trabalho.

Utilizou-se os programas computacionais para determinação de caminhos  $\epsilon$ -mínimos (Anexo 1), e resolução do modelo de otimização, desenvolvidos pelo Grupo de Redes Telefônicas do Convênio UNICAMP-TELEBRÁS. Também foram utilizados os programas desenvolvidos em [1], para determinar caminhos passando por duas portas, e montar as heurísticas 1, 2 e 3.

Foram feitas correções e alterações nestes programas de forma a se efetuar os estudos apresentados. Foi necessária a elaboração de novos programas para as diferentes heurísticas e sequências analisadas. Todos os programas tiveram que ser adaptados para torna-los compatíveis com as dimensões das redes telefônicas de São Paulo e Rio de Janeiro.

Neste trabalho é considerado a demanda em sistemas PCM entre cada par de estações, e os dados foram fornecidos pela TELESP e TELERJ nesta mesma unidade ou em troncos.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DO MODELO

## II.1 INTRODUÇÃO

Uma vez determinada a demanda de canais telefônicos entre cada par de Estações, o modelo de otimização aqui apresentado, tem por objetivo definir para as transmissões digitais, como serão escoadas as demandas entre os pares de centrais telefônicas. São determinados os equipamentos, 1.<sup>a</sup> ou 3.<sup>a</sup> ordem, e as galerias que serão utilizadas. Este processo é denominado roteamento telefônico.

A demanda de troncos entre cada par de estações caracteriza um produto. Assim, vários produtos estarão disputando os mesmos equipamentos de transmissão nos arcos da rede.

A otimização do roteamento se caracteriza por um problema de fluxo Multiproduto, onde as demandas de troncos devem ser roteadas de forma a minimizar o custo total de transmissão. Neste capítulo é apresentada a Metodologia que permite tratar o problema. Também é feita uma análise das características do modelo.

Utiliza-se o conceito de planos analógico e digital [9] .

---

## II.2 PLANOS ANALÓGICO E DIGITAL

A rede telefônica pode ser dividida em dois planos, conforme definido a seguir [10] :

- . Plano Analógico; É formado pelas centrais analógicas, e os meios que as interligam.
- . Plano Digital; É formado pelas centrais digitais e os meios que as interligam.

No Brasil foi estabelecida a diretriz de se utilizar a transmissão digital, quando se tratar de uma ligação entre uma central analógica e uma digital.

Com a utilização de fibra óptica, o plano digital pode ser dividido em:

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

Este trabalho está voltado para a rede digital, e todo esforço de análise será concentrado nos planos de transmissão digital, PTP e PTF.

A Fig. II.1 ilustra de maneira simplificada como podem ser visualizadas as ligações telefônicas nesses planos.

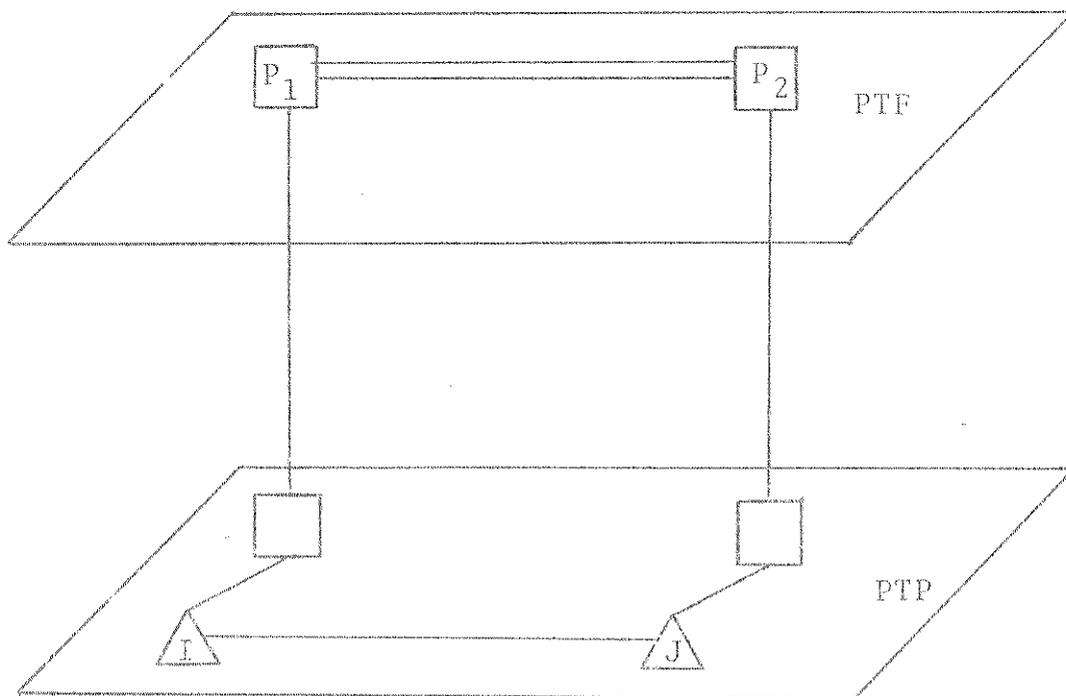


Figura II.1 - Roteamento nos Planos de Transmissão Digitais

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

$P_1, P_2$  - Pontos de mudança de hierarquia da transmissão (Portas).

———— - Transmissão em PCM com 30 canais.

===== - Transmissão em Fibra Óptica com 480 canais.

### II.3 DETERMINAÇÃO DE CAMINHOS

Para a utilização do modelo, é necessária a identificação de caminhos entre cada par de estações. Um caminho consiste numa ou mais galerias adjacentes da rede telefônica, ligando du as estações quaisquer.

Na figura II.2, um caminho ligando as estações A e C , consiste nas galerias g1 e g2. A galeria g1 é um caminho entre A e B, da mesma forma que as galerias g4 e g3. Como neste exem plo, é comum uma rede telefônica urbana apresentar vários cami nhos entre cada par de estações.

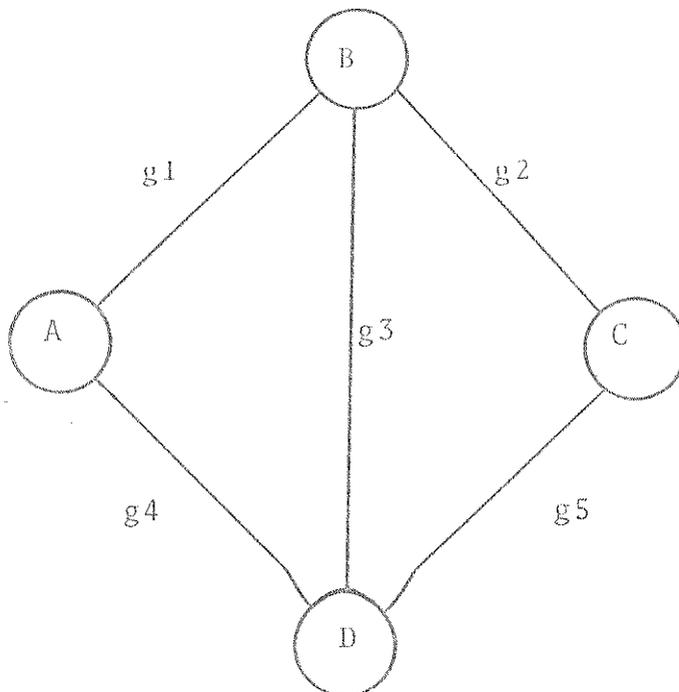


Figura II.2 - Caminhos em uma Rede Telefônica.

onde: A, B, C e D são estações.

$g_i$ ,  $i = 1, 5$  são galerias

a) DETERMINAÇÃO DE CAMINHOS NO PLANO DE TRANSMISSÃO EM PCM (PTP)

São determinados, os p- caminhos mais curtos entre cada par de estações, utilizando-se a técnica de caminhos e- míni mos (Anexo I).

Também podem ser determinados os caminhos disjuntos de soma mínima, quando forem considerados aspectos de segurança da transmissão [1]. Quando necessário, o modelo permite a escolha de caminhos adicionais por parte do planejador.

b) DETERMINAÇÃO DE CAMINHOS UTILIZANDO O PLANO DE TRANSMISSÃO EM FIBRAS ÓPTICAS (PTF).

A identificação das portas permite obter o plano de Transmissão em Fibras Ópticas. Utilizando-se técnicas de caminho mínimo, determina-se a menor distância entre cada par de portas.

A Fig. II.3 representa um caminho passando por duas portas.



Figura II.3 - Caminho passando por duas portas.

onde: I, J são as Estações de origem e destino.

$P_1$  e  $P_2$  são os pontos de mudança de hierarquia da trans missão (portas).

Considera-se que nos caminhos utilizando o Plano de Transmissão em Fibras Ópticas ocorrem apenas duas mudanças de

plano (PTP  $\rightarrow$  PTF e PTF  $\rightarrow$  PTP).

A idéia é obter os caminhos mais curtos entre as estações, privilegiando em caso de empate, aqueles que possuem maior trecho no Plano de Transmissão em Fibras Ópticas. A determinação dos caminhos mínimos utilizando o plano PTF, é feita através de técnicas de Programação Dinâmica [1] .

Esses caminhos possuem algumas particularidades a serem destacadas:

- podem ser utilizados arcos do Plano de Transmissão em PCM (PTP), correspondentes as ligações  $I \rightarrow P_1$  e  $P_2 \rightarrow J$
- a ligação entre os planos PTF e PTF é feita através de Arcos Fictícios de distância nula.
- os trechos em fibra óptica são considerados como um arco único entre duas portas, embora na prática possam corresponder a mais de uma galeria da rede original.

Pode ocorrer que uma das estações de origem ou destino, ou mesmo ambas, coincidam com as portas previamente indicadas. Neste caso a ligação entre as estações I e J assume uma configuração semelhante a da Fig. II.4.

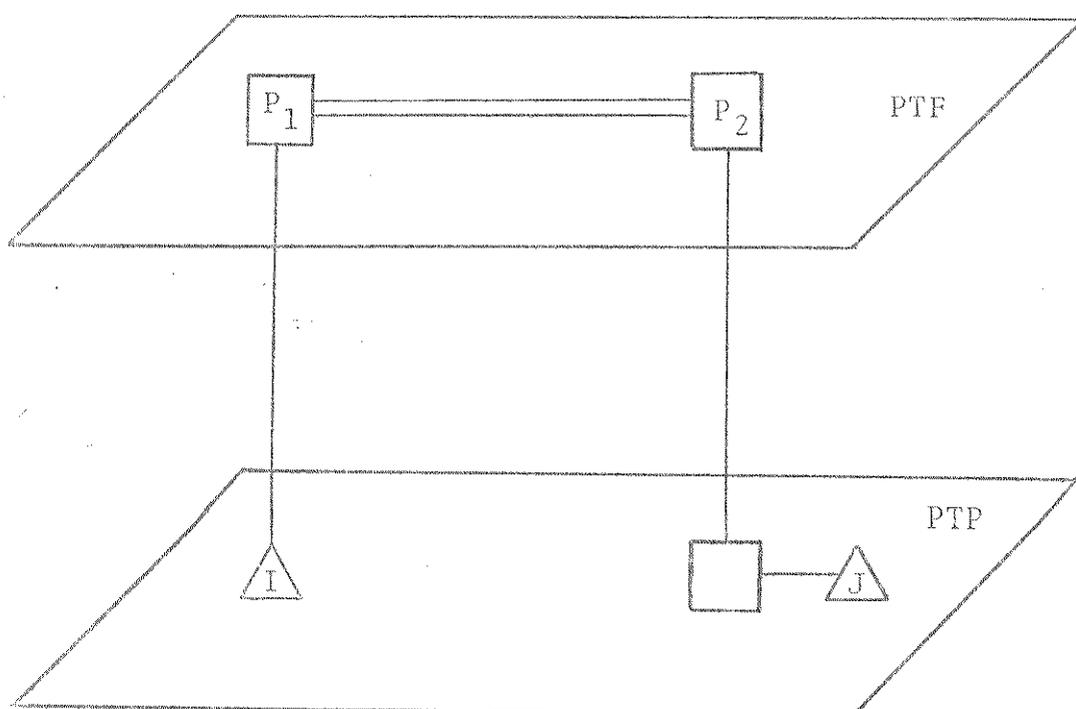


Figura II.4 - Ligação entre I e J , quando I coincide com uma porta.

## II.4 DEFINIÇÃO DAS ROTAS

Uma rota é definida por um caminho e pelos meios transmissão usados nas suas galerias. Nas ligações em PCM, só há um meio, cabo PCM, e portanto caminho e rota se confundem. As ligações que utilizam o plano PTF, podem ter um trecho no plano PTP, conforme descrito no item II.3. Assim, nessas ligações é possível ter mais de uma rota, utilizando um mesmo caminho. Nestes casos, as rotas são diferenciadas pelos trechos que elas tem em cada plano, Fig. II.5.



Figura II.5 - Rotas de I para J.

onde: I e J são estações que não tem pontos de mudança de hierarquia.

$P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  são portas.

$g_i$ ,  $i = 1, 4$  são galerias do caminho de I para J.

No caminho entre as estações I e J da Fig. II.5, podemos ter uma rota utilizando o plano PTP nos trechos  $I \rightarrow P_1$  e  $P_3 \rightarrow J$ , e o plano PTF em  $P_1 \rightarrow P_3$ . Outra rota utilizando o mesmo caminho seria  $I \rightarrow P_2$  e  $P_3 \rightarrow J$  no plano PTP, e  $P_2 \rightarrow P_3$  no plano PTF.

Vale enfatizar que entre duas portas, podem haver ligações tanto no plano PTP como no plano PTF.

Deve-se observar que a cada produto podem corresponder várias rotas, entretanto uma rota só pode ser utilizada por um produto.

A seguir é apresentado um diagrama de blocos que descreve o procedimento para definição das rotas nos planos PTP e PTF.

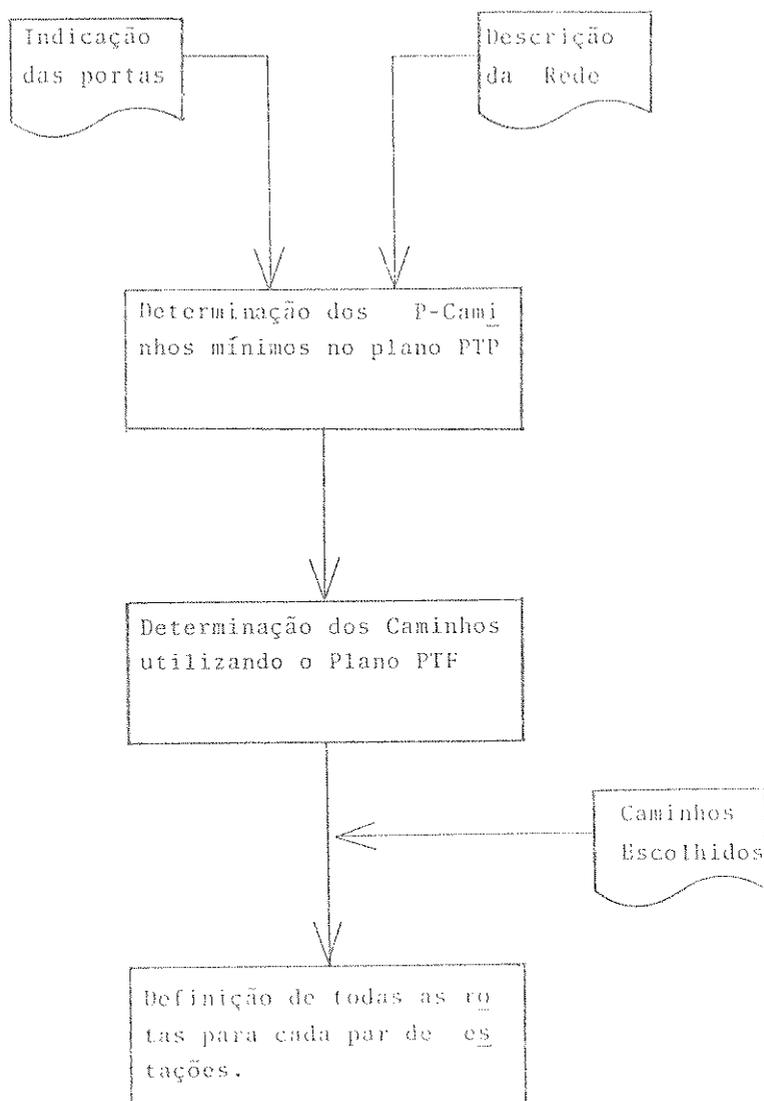


Diagrama de blocos para definição das rotas.

## II.5 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

No tratamento da rede telefônica, os nós representam as Estações e os pontos de passagem, enquanto que os arcos representam as galerias.

Em geral esse tipo de problema é abordado utilizando - se uma formulação Nó-Arco, onde a Matriz de incidência descreve

a rede [18] . Entretanto devido as dimensões que o problema pode assumir, dado o grande número de produtos, optou-se por uma formulação Arco-Rota [19] .

A cada par de Estações  $(i, j)$  onde há um produto  $p$ , está associado um conjunto de Rotas Factíveis,  $R(p)$  (rotas factíveis do produto  $p$ ).

A parcela da demanda de troncos  $p$ , escoada por uma rota  $r \in R(p)$  é denominada fluxo  $x_r$ , que expressa a quantidade de sistemas PCM que utilizam esta rota.

Assim, duas restrições são colocadas ao problema do roteamento:

- utilização dos meios de transmissão disponíveis nas galerias.
- atendimento às demandas por circuitos telefônicos entre as estações.

O atendimento a segunda restrição, pode indicar a necessidade de compra de equipamentos de transmissão para os arcos que compõe a rede.

Para maior facilidade de entendimento do problema, é apresentada a formulação para a rede exemplo da figura II.6

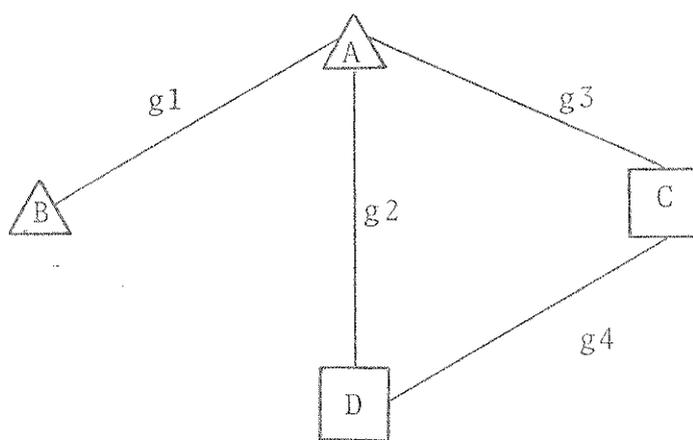


Figura II.6 - Rede Exemplo.

onde: - a tecnologia de comutação e transmissão é digital.

-  $\square$  indica porta.

-  $\triangle$  indica estação onde não há mudança de hierarquia.

-  $g_i$  são galerias da rede para  $i = 1, 4$ . Em  $g_4$  pode existir transmissão em PCM e fibras ópticas.

Na formulação adotada, a cada galeria é associado um arco, isto para transmissão em PCM. No caso de fibras ópticas, cada arco corresponde a uma ligação entre duas portas, mesmo contendo mais de uma galeria.

Na Fig. II.7 estão indicados os arcos da rede exemplo:

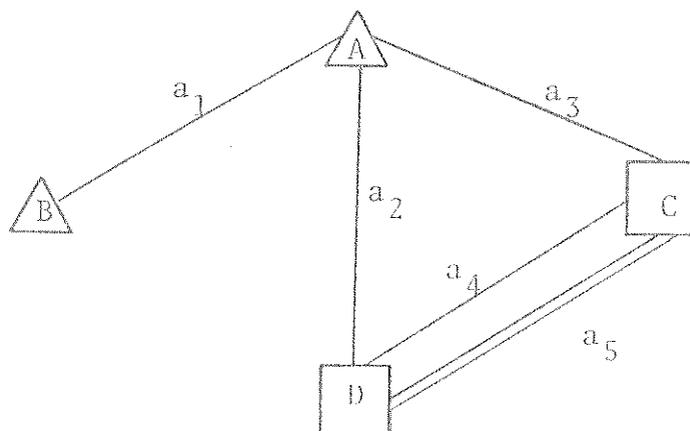


Figura II.7 - Arcos da Rede Exemplo.

onde: -  $a_i$ ,  $i = 1, 5$  são arcos, e  $a_5$  é um arco de fibras ópticas.

São considerados os arcos de fibra óptica necessários para ligar duas a duas todas as portas da rede. Assim, o número de arcos de fibra será dado pela combinação do número de portas duas a duas  $C_n^2$ , onde  $n$  é o número de portas.

A Tabela II.1 indica os caminhos existentes entre cada par de estações:

DE - PARA	Nº DO CAMINHO	GALERIAS
A - B	1	g1
A - C	2	g3
A - C	3	g2, g4
A - D	4	g2
A - D	5	g3, g4
B - C	6	g1, g3
B - C	7	g1, g2, g4
B - D	8	g1, g2
B - D	9	g1, g3, g4
C - D	10	g4
C - D	11	g3, g2

Tabela II.1 - Descrição dos Caminhos.

A tabela II.2 contém todas as rotas entre cada par de estações, considerando os arcos existentes.

PRODUTO	ESTAÇÕES (i, j)	CAMINHO	ROTA	ARCOS
1	A, B	1	1	a1
2	A, C	2	2	a3
		3	3	a2, a4
			4	a2, a5
3	A, D	4	5	a2
		5	6	a3, a4
			7	a3, a5
4	B, C	6	8	a1, a3
		7	9	a1, a2, a4
			10	a1, a2, a5
5	B, D	8	11	a1, a2
		9	12	a1, a3, a4
			13	a1, a3, a5
6	C, D	10	14	a4
			15	a5
		11	16	a3, a2

Tabela II.2 - Rotas

Verifica-se que diferentes produtos competem pelo mesmo arco. Neste exemplo temos um total de 5 arcos, 6 produtos, 11 caminhos e 16 rotas. A coluna Rotas da Tabela II.2 descreve o conjunto  $R(p)$ , ou seja, as rotas disponíveis para o escoamento do produto  $p$ . Por exemplo,  $R(2) = \{2, 3, 4\}$ . Observa-se que toda a demanda saindo de B ou chegando nesta estação, tem que utilizar o arco  $a_1$ .

Em situações como esta, o arco não influi no processo de otimização, e não precisa ser considerado no modelo. Assim pode-se reduzir o número de variáveis, e conseqüentemente as dimensões do problema. Nesse exemplo, a demanda de B para todas as demais centrais da rede, seria transferida para a central A.

Com as informações da Tabela II, podemos montar a matriz que descreve a utilização dos arcos para cada rota, também chamada de matriz de acoplamento. Para isto, considere-se a matriz  $A$  da Tabela II.3, onde cada linha representa um arco, cada coluna uma rota, e a cada arco está associada uma disponibilidade de meios. O elemento  $A_{a,r}$  da linha  $a$  e coluna  $r$  se caracteriza por:

$$A_{a,r} = \begin{cases} 1, & \text{se o arco "a" participa da rota "r".} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

arco \ rota	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1							1	1	1	1	1	1			
2			1	1	1				1	1	1					1
3		1				1	1	1				1	1			1
4			1			1			1			1		1		
5				1			1			1			1		1	

Tabela II.3 - Matriz Arco-Rota.

O atendimento à demanda exige que para o produto  $p$ , a soma dos fluxos que pertencem a  $R(p)$  deve ser igual a demanda

$d^p$ . Para o produto 2 por exemplo, são oferecidas as rotas 2, 3 e 4, e portanto a soma dos fluxos  $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_4$  deve ser igual à demanda  $d^2$ .

Desse modo são definidas as restrições para o atendimento à demanda de cada produto  $p$ , especificando-se quais as rotas utilizadas para escoar  $d^p$ , Tabela II.4.

Var. de fluxo Produto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1															
2		1	1	1												
3					1	1	1									
4								1	1	1						
5											1	1	1			
6														1	1	1

Tabela II.4 - Matriz E de atendimento à demanda.

Matematicamente, as restrições de atendimento à demanda podem ser representadas por:

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

ou

$$\underline{e}^p \underline{x} = d^p \quad [ii]$$

onde :

$$\underline{e}^p = \text{linha } p \text{ da matriz } E$$

Supondo haver disponibilidade de equipamentos nos arcos, elas serão representadas pelo vetor  $\underline{S}$ . O atendimento à demanda, pode implicar em compras de equipamentos para cada arco, que serão representadas pelo vetor  $\underline{Y}$ . Assim, as restrições de acoplamento podem ser escritas na forma.

$$A \underline{x} \leq \underline{S} + \underline{Y} \quad [\text{iii}]$$

onde

$$\underline{x} = \{x_r\}, r = 1, 16$$

$$\underline{S} = \text{vetor de disponibilidades } \{S_a\} \quad a = 1, 5$$

$$\underline{Y} = \text{vetor de compras } \{Y_a\} \quad a = 1, 5$$

Com a introdução de variáveis de folga  $T_a$ ,  $a = 1, 5$  o sistema pode ser escrito como:

$$A \underline{x} + \underline{T} - \underline{Y} = \underline{S}, \text{ ou} \quad [\text{iv}]$$

$$\begin{bmatrix} A & I & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{T} \\ \underline{Y} \end{bmatrix} = \underline{S}$$

O problema deve minimizar os custos de compra e ligação de fios, quando houver disponibilidades. Considerando - se custos lineares, o que será tratado em detalhes no item seguinte, a função de custos se escreve:

$$F = \sum_{r=1}^{16} \delta_r x_r + \sum_{a=1}^5 \gamma_a y_a \quad [\text{v}]$$

onde

$\delta_r$  = custo de ligar a rota  $r$  em Cz/unidade de fluxo.

$\gamma_a$  = custo de compra para o arco  $a$  em Cz/unidade de fluxo.

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

$$\text{Minimizar } F = \sum_r \delta_r x_r + \sum_a \gamma_a y_a$$

$$\text{s.a. } \begin{bmatrix} A & I & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x} \\ \underline{T} \\ \underline{Y} \end{bmatrix} = \underline{S}$$

$$\underline{e}^p \underline{x} = d^p, \quad p = 1, n^{\circ} \text{ total de produtos}$$

$$\underline{x}, \underline{T}, \underline{Y} \geq 0$$

onde

$$\underline{e}^p = \text{linha } p \text{ da matriz } E$$

cuja estrutura é favorável a utilização do método Generalized Upper Bound (GUB), [20] , [21] .

## II.6 CUSTO DE COMPRA NOS ARCOS DE PCM E FIBRA ÓPTICA

A seguir são apresentados os custos de compra dos equipamentos necessários para transmissão em PCM e Fibra Óptica. A unidade de fluxo utilizada é Sistemas PCM (2M b/s).

### a) Transmissão em PCM

Admitindo-se a existência de N regeneradores e C pares disponíveis para PCM no arco, teremos a função de custo da Fig. II.8.

Na verdade, a linearização é uma simplificação dos custos reais. Há fatores que permitem ganhos de escala, e levam a estruturas não lineares. Entretanto, não está se introduzindo grandes distorções, ao se utilizar esta estrutura de custos.

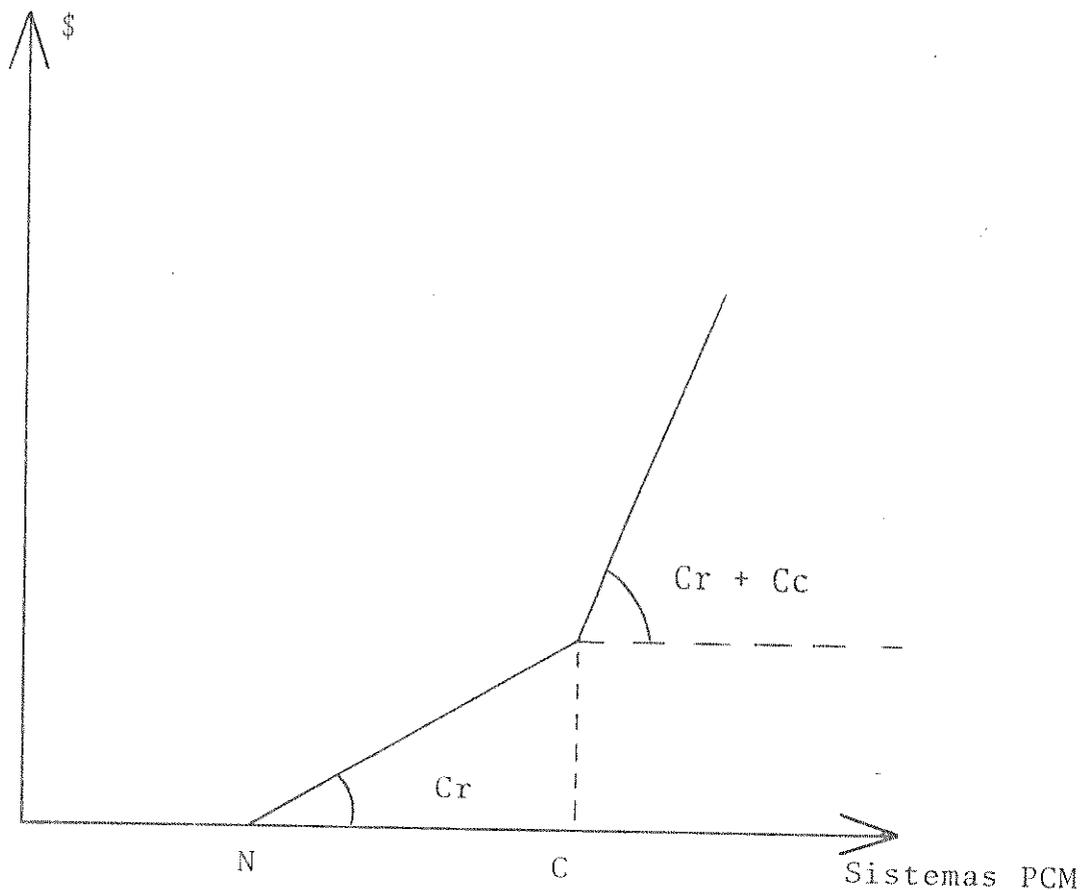


Figura II.8 - Função de Custo de Compra para um Arco com Transmissão em PCM.

- onde: -  $C_r$  é o custo dos regeneradores necessários no arco, sendo função da quantidade de pontos de regeneração existente.
- $C_c$  é o custo do cabo para transmissão em PCM, sendo função do comprimento do arco.

#### b) Transmissão em Fibra Óptica

Neste caso os custos são claramente não lineares. Eles são discretos, e apresentam uma estrutura em degraus de tamanho variável (Fig. II.9), não permitindo qualquer linearização, sem a introdução de grandes distorções.

A seguir são descritos os equipamentos necessários e

sua respectiva capacidade de transmissão, caracterizando dois custos fixos distintos.

Custo Fixo 1: CF1, é o custo de compra de um par de MUX 3 (Multiplex de 3.<sup>a</sup> ordem), um par de TL 3 (Terminal de linha de 3.<sup>a</sup> ordem), Fibra Óptica e Repetidores Ópticos (um a cada 10 km). Este conjunto de equipamentos tem capacidade de transmissão de 16 sistemas PCM.

Custo Fixo 2: CF2, é o custo de compra de dois MUX 2 (Multiplex de 2.<sup>a</sup> ordem), que tem capacidade de transmissão de 4 sistemas PCM.

A Fig. II.9 mostra a função de custo para os arcos de fibra óptica.

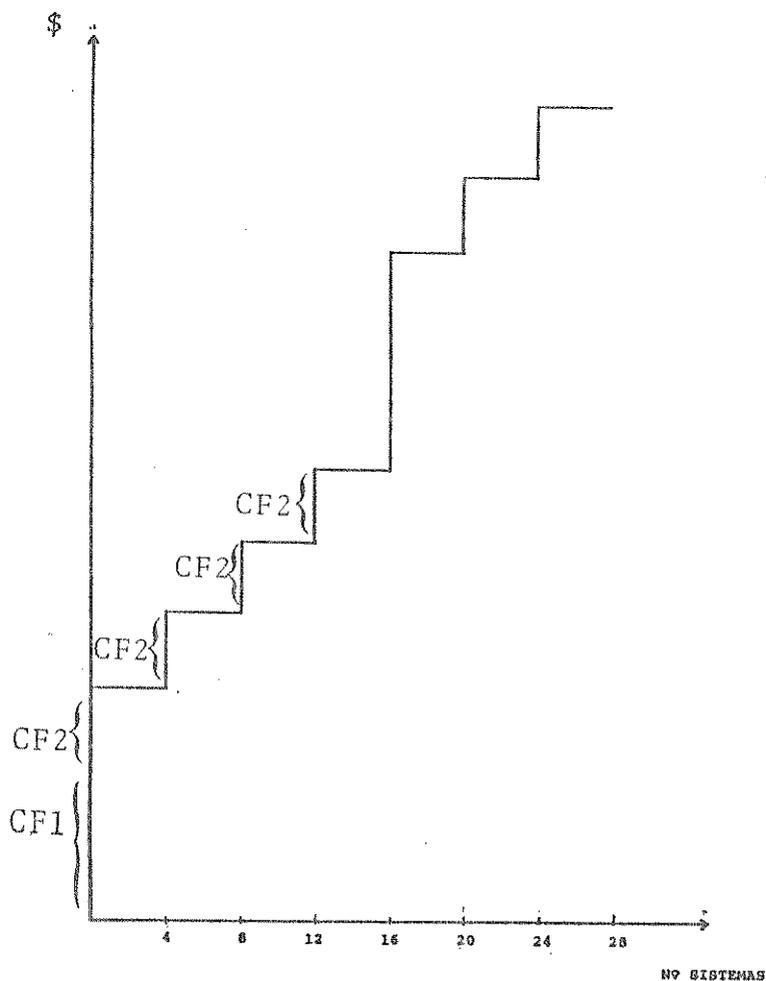


Figura II.9 - Função de Custo de Compra nos Arcos com Transmissão em Fibra Óptica.

No capítulo III são apresentadas heurísticas que permitem tratar esta estrutura de custos.

Normalmente os cabos para transmissão em PCM, e as fibras ópticas são compostos por vários fios, o que leva a um efeito de modularidade nos custos. Entretanto dada a variedade de cabos existentes, bem como a diferença de critérios para sua escolha por parte das companhias telefônicas nacionais, não se considerou este aspecto no modelo apresentado. Acreditamos não estarem sendo introduzidas grandes distorções, e quando necessário, pode ser adotado um procedimento iterativo, onde uma primeira execução permite estimar as dimensões dos cabos a serem utilizados, possibilitando a correção dos custos inicialmente considerados.

## II.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO

A formulação apresentada permite a competição entre as transmissões nos planos de PCM e Fibra Óptica. Todas as Estações, incluindo as portas podem ter sua demanda escoada por qualquer um dos planos de transmissão.

Também não é necessária a filiação das estações a uma determinada porta, o que pode prejudicar consideravelmente a qualidade da solução.

Entretanto, é assumida a hipótese de que um arco de fibra corresponde a uma ligação entre duas portas, podendo conter mais de uma galeria de rede. Isto simplifica a montagem dos custos de compra nos arcos de fibra, mas por outro lado, dificulta a consideração de disponibilidade de equipamentos para transmissão em fibra óptica em cada arco da galeria.

Além disso, o modelo considera para cada par de Estações, um determinado número de rotas passando por duas portas. Com isto, deixa-se de aproveitar eventuais folgas em rotas no plano PTF, por estas não terem sido oferecidas ao escoamento do produto. Tais fatos podem influir negativamente na qualidade da solução, e serão tratados em detalhes no capítulo IV.

CAPÍTULO III

HEURÍSTICAS PARA TRATAR A ESTRUTURA DE  
CUSTOS DOS ARCOS DE FIBRA ÓPTICA

### III.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas heurísticas propostas em [1], para contornar o problema da estrutura não linear do custo de compra dos arcos de fibra óptica. A idéia básica é utilizar diferentes linearizações da estrutura de custos.

São analisadas as formas de aplicação dessas heurísticas, e propostas modificações visando melhorar a qualidade dos resultados.

Ao final são feitas sugestões para a utilização das heurísticas.

### III.2 HEURÍSTICA 1

O custo de compra dos equipamentos de fibra óptica é transformado numa função linear, com coeficiente angular igual ao custo/sistema de um conjunto de equipamentos para transmissão de 16 sistemas PCM, conforme mostrado na Fig. III.1.

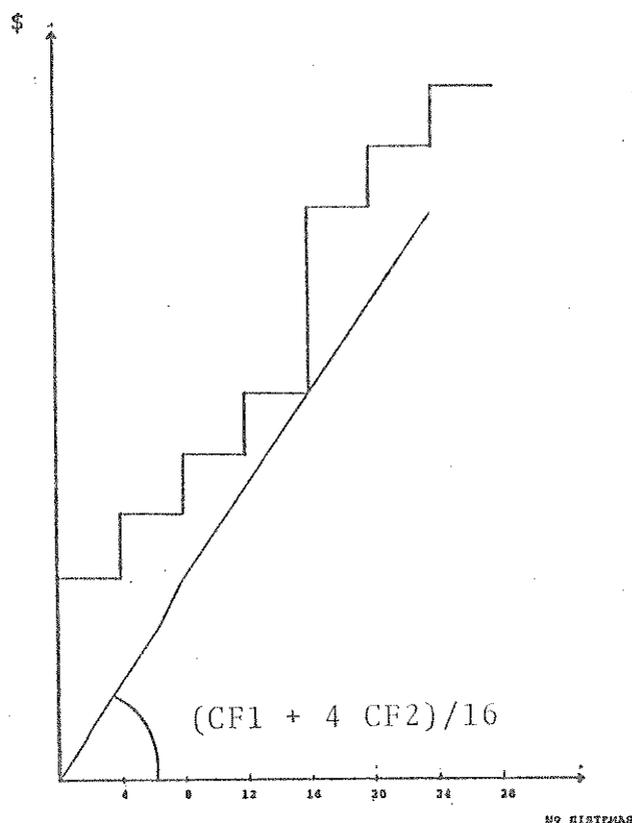


Figura III.1. - Heurística 1

A seguir são apresentadas as características da Heurística 1:

- . Com exceção do fluxo nulo, e múltiplos de 16 sistemas, todos os custos são subestimados, favorecendo o roteamento dos produtos através dos arcos de fibra óptica. Assim, a estrutura de custos da heurística 1 tem uma característica otimista, em relação aos valores reais de custo.
- . É frequente a ocorrência de arcos de fibra óptica com baixo aproveitamento dos equipamentos, como por exemplo, arcos com fluxo de 1 ou 2 sistemas PCM. Isto faz com que em geral, as soluções obtidas com a aplicação dessa heurística não sejam de boa qualidade.
- . Não são necessários valores prévios de fluxo para sua aplicação, por isso a heurística 1 se caracteriza por ser uma inicializadora do processo de otimização.
- . Fornece um limitante inferior para a solução ótima do problema, que é o custo linear calculado para os fluxos obtidos em cada arco.

### III.3 HEURÍSTICA 2

A estrutura de custo dos arcos de fibra óptica é transformada numa função linear por partes, de forma a se atribuir a cada arco, o custo real de compra dos equipamentos necessários para escoar o fluxo obtido em heurísticas anteriores.

#### a) Fluxo Nulo ou Múltiplo de 16 Sistemas PCM

Estes valores de fluxo tem seu crescimento penalizado, num valor correspondente ao custo de compra dos equipamentos necessários ao escoamento adicional de um sistema.

Para os múltiplos de 16 sistemas, é mantida a mesma

função da heurística 1, até o valor do fluxo no arco Fig. III.2.

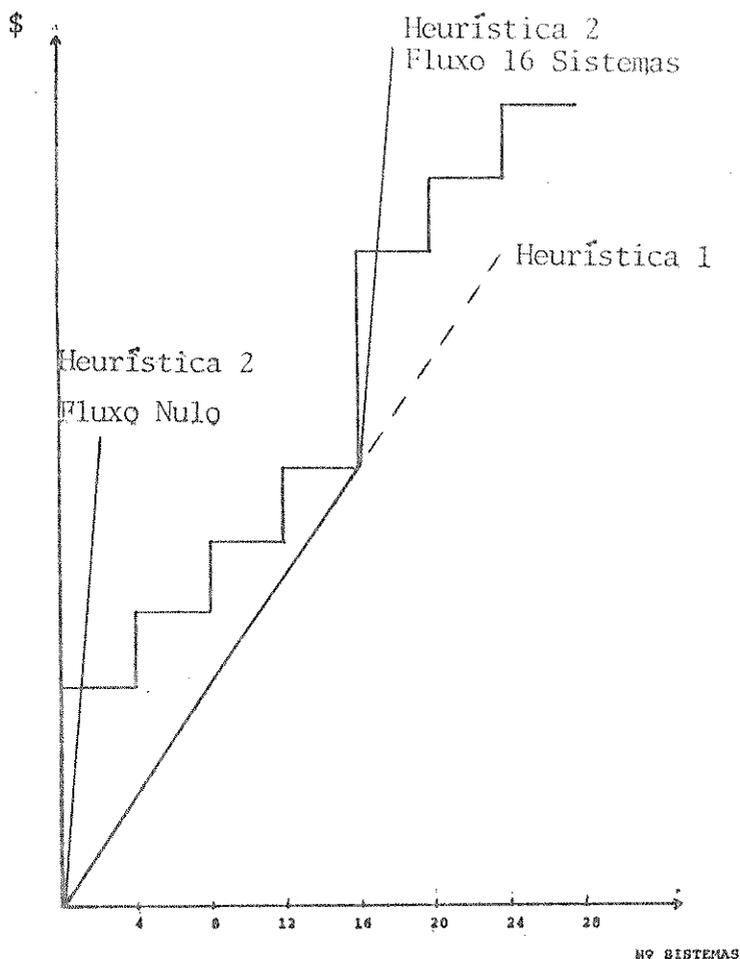


Figura III.2. - Heurística 2 - Fluxo Nulo e Múltiplo de 16 Sistemas PCM.

b) Fluxo Múltiplo de 4 Sistemas PCM

Neste caso está se admitindo que o fluxo não é Múltiplo de 16 sistemas PCM. Esta situação indica a utilização parcial de equipamentos para transmissão de 16 sistemas (3ª ordem), e a utilização completa de alguns equipamentos para transmissão de 4 sistemas (2ª ordem). A função de custo é mostrada na Fig. III.3. Para não se perder a característica otimista da heurística, para fluxos inferiores ao que está sendo considerado, são criados pontos de quebra sempre que necessário, como ocorre em 16 sistemas. Não há penalização para acréscimos de fluxo.

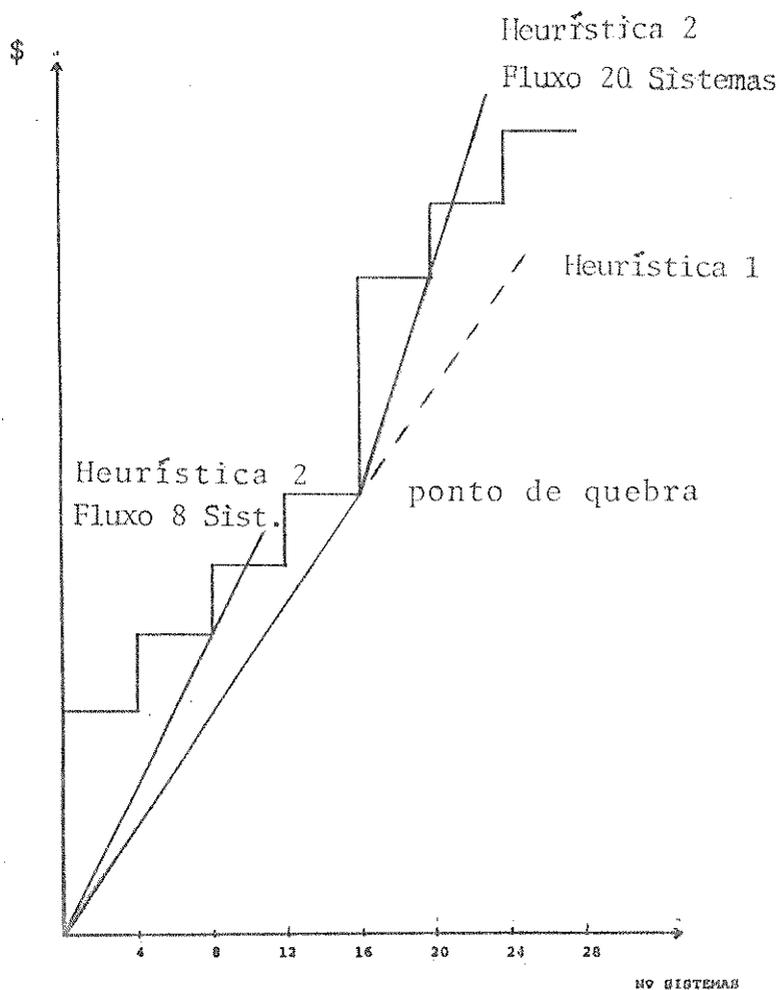


Figura III.3. - Heurística 2 - Fluxos Múltiplos de 4 Sistemas PCM.

c) Fluxo Não Múltiplo de 4 Sistemas PCM

Neste caso ocorrem ociosidades tanto nos equipamentos para transmissão de 16 sistemas como 4 sistemas. A função de custo assume a forma indicada na Fig. III.4. Também neste caso não há penalização para acréscimos de fluxo, e quando necessário são criados pontos de quebra para não se perder a característica otimista da função de custo.

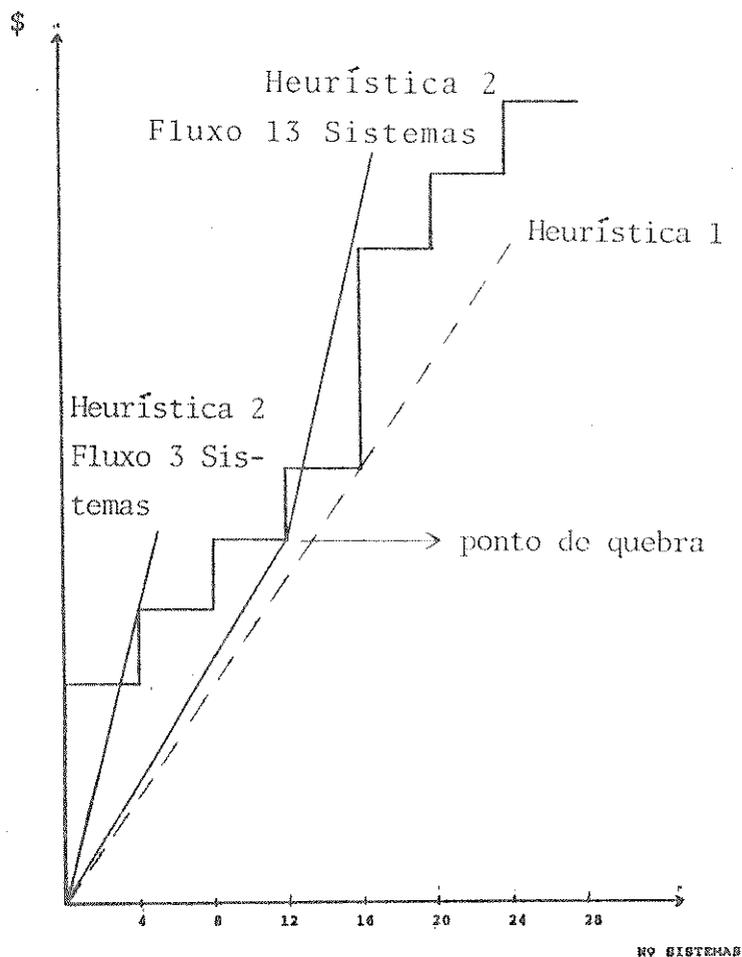


Figura III.4. - Heurística 2- Fluxos não Múltiplos de 4 Sistemas PCM.

#### d) Características apresentadas pela Heurística 2

- . Ao contrário da Heurística 1, a função de custo é estabelecida de acordo, com o fluxo nos arcos. Assim, para aplicar a heurística 2 é necessário o conhecimento de uma solução para o problema.
- . Arcos com baixa utilização dos equipamentos tendem a ser eliminados, devido a alta penalização que recebem.
- . Quando aplicada após a heurística 1, há uma tendência geral de diminuição dos fluxos nos arcos de fibra. Entretanto, é possível a ocorrência de aumentos em determinados arcos, que passam a receber o fluxo de outros fortemente penalizados.

- . A menos de casos particulares, descritos no item III.6 , esta heurística tende a reduzir o custo real do problema. Isto se deve a eliminação de situações com excesso de ociosidade nos equipamentos. Em alguns casos foram verificadas reduções de custo superiores a 20%, quando aplicada após a heurística 1.
- . Algumas vezes pode-se obter um custo linear superior ao custo real. Isto ocorre porque nos arcos em que há aumento de fluxo pode ser perdida a característica otimista do custo linear (descrição em detalhes no item III.6).
- . Os arcos com fluxo nulo ou múltiplo de 16 sistemas tendem a se manter inalterados, devido a forte penalização para os aumentos de fluxo, e nos múltiplos de 16, a manutenção da mesma função de custo da heurística 1, para valores menores de fluxo.

#### III.4 HEURÍSTICA 3

É adotada uma estrutura de custos linear por partes semelhante a da heurística 2, mas procurando-se aproveitar e ventuais folgas de equipamentos de 2.<sup>a</sup> ordem (MUX 2), conforme descrito a seguir.

##### a) Fluxo Nulo ou Múltiplo de 4 Sistemas PCM

Neste caso não há folgas no equipamento de 2.<sup>a</sup> ordem . É considerado o custo real dos equipamentos utilizados, e a crêscimos de fluxo são penalizados, conforme indicado na Fig. III.5. Nesta heurística também são criados pontos de quebra quando necessário, para que não seja perdida a característica otimista do custo linear, para fluxos inferiores ao que está sendo considerado.

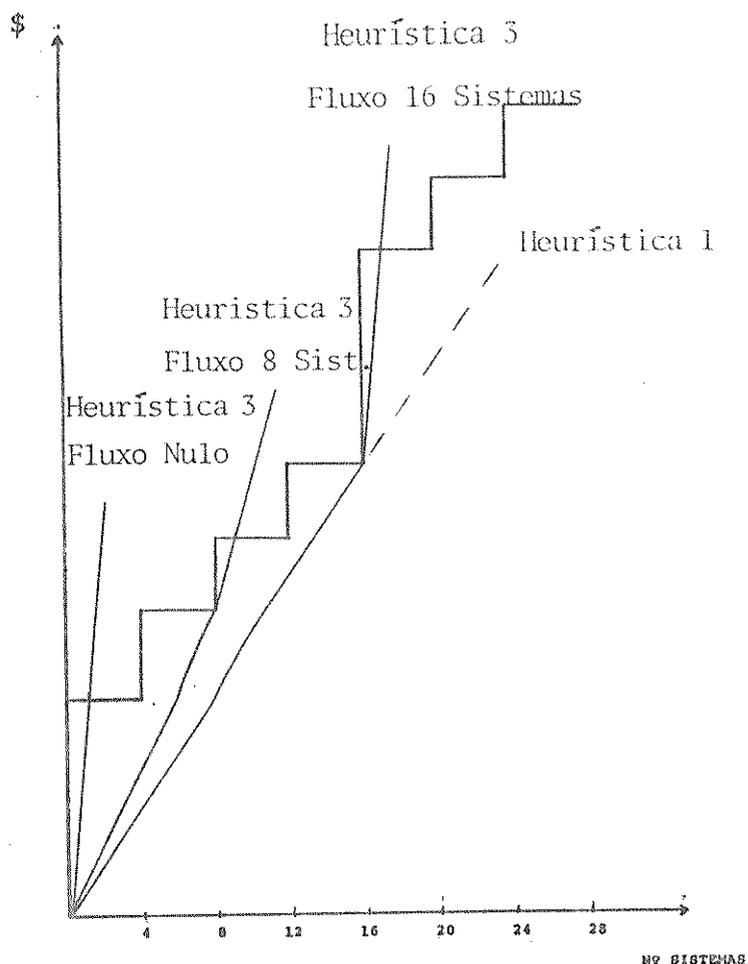


Figura III.5. - Heurística 3 - Fluxo Nulo ou Múltiplo de 4 Sistemas PCM.

#### b) Fluxo não Múltiplo de 4 Sistemas PCM

Neste caso há folgas nos equipamentos de 2.<sup>a</sup> ordem, e a função de custo é montada de forma a incentivar o seu aproveitamento, conforme indicado na Fig. III.6. São penalizados acréscimos de fluxo acima da capacidade de transmissão dos equipamentos.

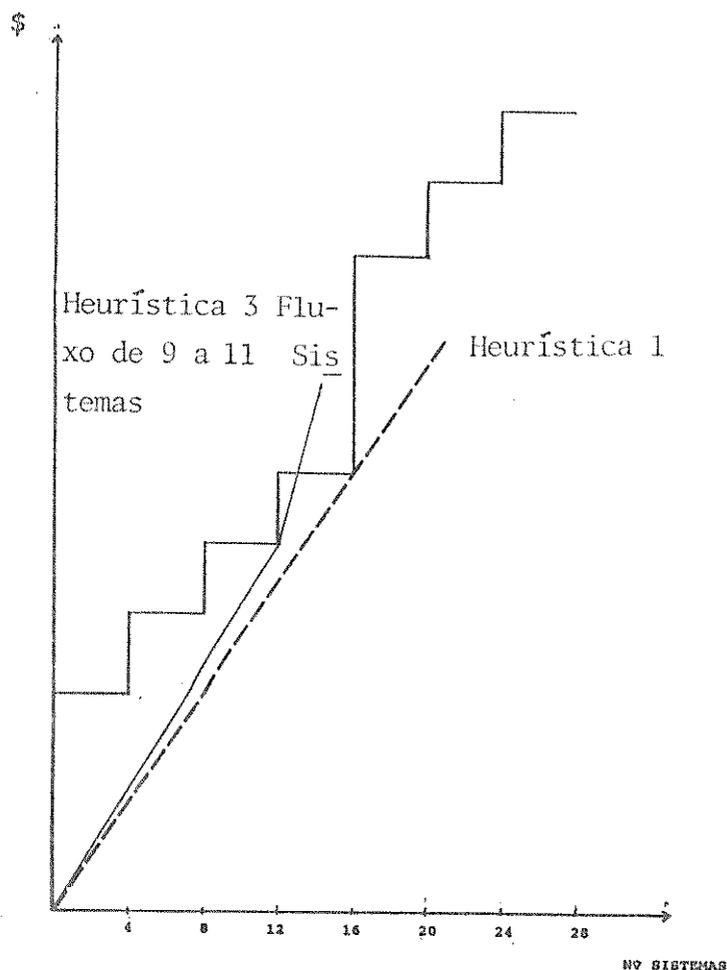


Figura III.6. - Heurística 3 - Fluxo não Múltiplo de 4 Sistemas PCM.

### c) Características apresentadas pela Heurística 3

- . Semelhante ao que ocorre na heurística 2, a função de custo é estabelecida de acordo com o fluxo nos arcos, sendo também necessário o conhecimento de uma solução para o problema.
- . As reduções de custo ocorrem não apenas devido a penalizações, mas também a um melhor aproveitamento dos equipamentos de 2.<sup>a</sup> ordem.

### III.5 APLICAÇÃO DAS HEURÍSTICAS

Por apresentarem características que se complementam, as heurísticas devem ser utilizadas em conjunto, de forma a se obter melhores resultados.

Após a aplicação de cada heurística, é feita uma otimização do problema, utilizando o modelo descrito no capítulo II, item II.5.

A seguir são apresentados os resultados obtidos, aplicando-se as heurísticas nas sequências 1-2-3 e 1-3-2. Também é analisada uma terceira alternativa, em que é dado um tratamento específico para cada arco. Utilizando-se uma nova heurística, que será descrita no item III.5.3, são penalizados individualmente os arcos que tiveram aumento de fluxo no decorrer do processo. Os demais arcos permanecem com a mesma estrutura de custos da penalização anterior. Cada vez que um arco recebe uma nova estrutura de custos, é feita uma otimização do problema. O procedimento termina quando já tiverem sido penalizados individualmente, todos os arcos em que ocorreu aumento de fluxo em relação ao valor inicial, obtido com a heurística 1. Com este procedimento, pretende-se permitir uma maior competição entre os arcos, conforme será descrito no item III.5.3.

Pelas suas características, descritas no item III.2, a heurística 1 é sempre usada para inicializar o processo.

As figuras III.7 e III.8 apresentam as redes telefônicas urbanas digitais das cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, que foram utilizadas neste trabalho. Deve-se observar que não foram consideradas as Estações de grau 1 na rede de São Paulo. Incluindo estas estações, haveria um total de 85 estações e 122 arcos.

A tabela III.1 fornece os parâmetros destas redes. Embora existam demandas entre todos os pares de estações, é frequente a utilização de Tandens nestas redes, que por exemplo recebem a demanda da estação origem, e a enviam para o destino. Por este motivo, o total de produtos é menor que a combinação de todas as estações duas a duas.

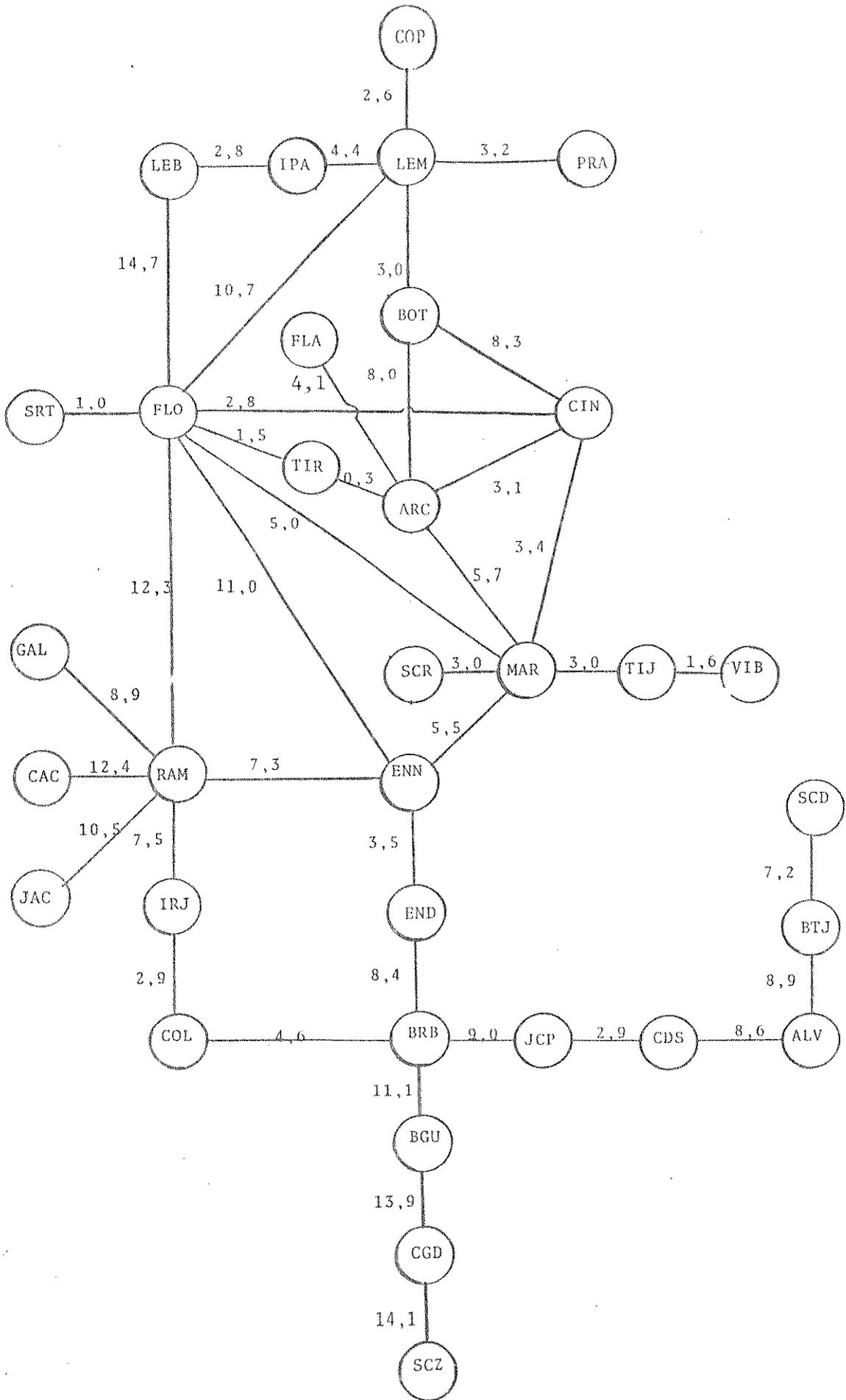


Figura III.7. - Rede Digital da cidade do Rio de Janeiro. Comprimento dos arcos em KM.



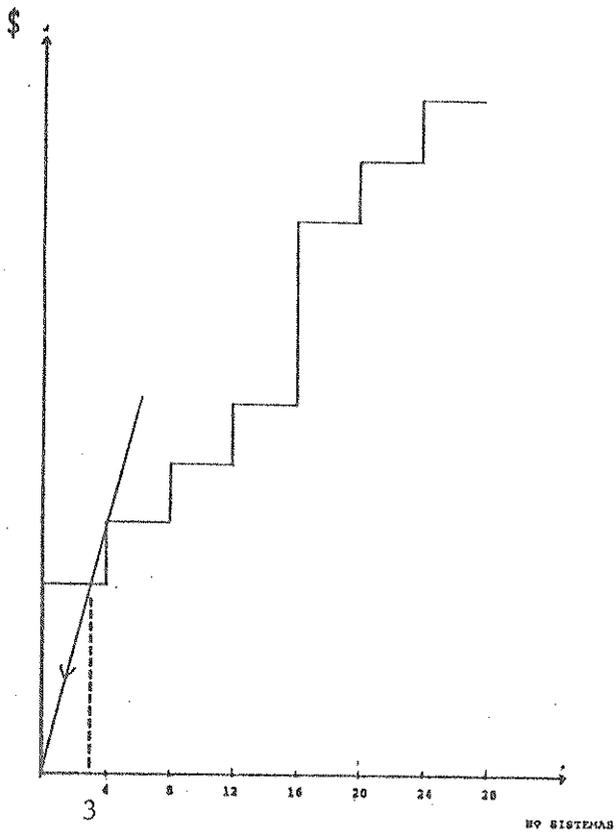
	RIO DE JANEIRO	SÃO PAULO
Número de Estações	33	44
Número de Arcos	42	81
Número de Produtos	145	426
Demanda em Sistemas PCM	692	1285

Tabela III.1 - Parâmetros das redes utilizadas

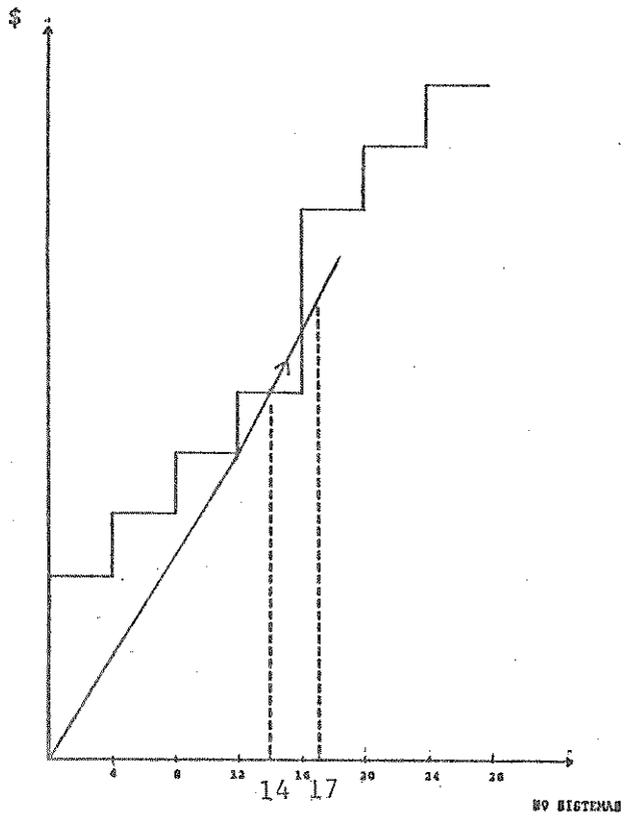
### III.5.1 SEQUÊNCIA DE HEURÍSTICAS 1 - 2 - 3

Esta sequência foi inicialmente proposta em [1] , como forma de contornar o problema da não linearidade da estrutura de custos dos arcos de fibra óptica. A partir de uma solução inicial gerada pela heurística 1, a 2 corrige os custos para seus valores reais, e a 3 procura aproveitar eventuais folgas nos e equipamentos de 2ª ordem.

Embora a heurística 2 tenha por objetivo conferir maior realismo ao custo linearizado, bem como eliminar excessos de ociosidade dos equipamentos, observou-se que a sua aplicação também pode provocar tais situações. Isto ocorre porque o fluxo de alguns arcos severamente penalizados tende a se deslocar para outros, que ao receberem este incremento, podem passar a uma situação de excesso de ociosidade de equipamentos.



Heurística 2 - Fluxo de 3 Sistemas PCM



Heurística 2 - Fluxo de 14 Sistemas PCM

Figura III.9 - Variações de Fluxo devido a Heurística 2.

A Fig. III.9 ilustra o exemplo de dois arcos concorrentes, ou seja, oferecidos ao escoamento de um mesmo produto, sendo que após a heurística 1, o primeiro recebe um fluxo de 3 sistemas PCM, e o segundo 14 sistemas PCM. Ao se aplicar a heurística 2, o fluxo de 3 sistemas poderá ser deslocado para o arco concorrente, que passaria a escoar 17 sistemas PCM.

Em seguida, com a aplicação da heurística 3, é possível que a situação se mantenha, porque a penalização do arco com fluxo de 17 sistemas, pode não ser suficientemente severa para reduzir o fluxo até 16 sistemas, Fig. III.10.

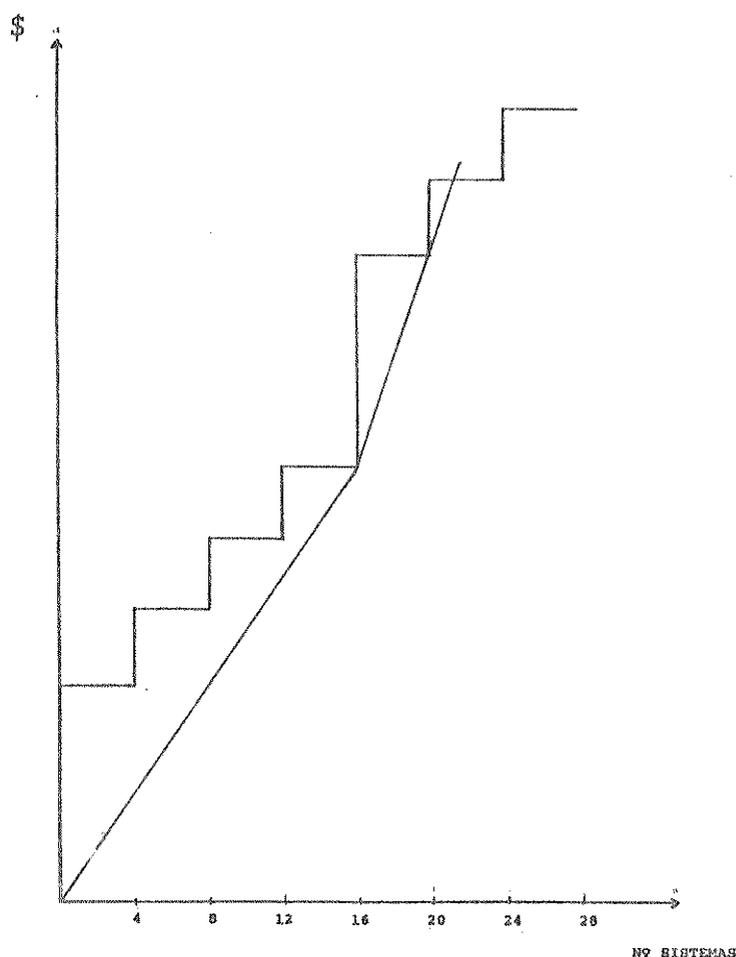


Figura III.10. - Heurística 3 para fluxo de 17 Sistemas PCM.

Assim, uma aplicação adicional da heurística 2 permite reduzir essas distorções. Considerando-se a rede do Rio de Janeiro com 15 portas conforme mostrado na Figura III.11, a aplicação adicional da heurística 2 permitiu uma redução de 1,2% no custo real da solução. A tabela III.2, mostra as reduções percentuais de custo obtidas com a aplicação de cada heurística. São aplicadas as heurísticas 1-2-3-2-3 e 1-3-2-3-2-3 e os percentuais são calculados em relação a solução final.

	Redução de Custo - % do Custo Final Real	
	1-2-3-2-3	1-3-2-3-2-3
Heurística 3	-	9,9
Heurística 2	21,1	12,5
Heurística 3	0,7	0,6
Heurística 2	1,2	0,0
Heurística 3	0,0	0,0
Solução final	1037,6 x 10 <sup>5</sup>	

Tabela III.2 Reduções de Custo de cada Heurística.

Em alguns casos estudados, aplicações sucessivas das heurísticas permitiram reduções de custo da ordem de 2,4%.

Também foi observado, que a aplicação da heurística 2 após a 1, pode provocar a redução do fluxo em arcos concorrentes, para o ponto de quebra inferior, quando poderia ser mais econômico concentrar todo o fluxo em um desses arcos.

Para exemplificar, supomos dois arcos concorrentes escoando inicialmente fluxos de 18 e 2 Sistemas PCM. Ao se aplicar a heurística 2 estes arcos podem passar a escoar 16 e 0 sistemas respectivamente Fig. III.12, mas muitas vezes poderia ser mais econômico escoar todos os 4 sistemas por um deles, em vez de usar o plano PTP.

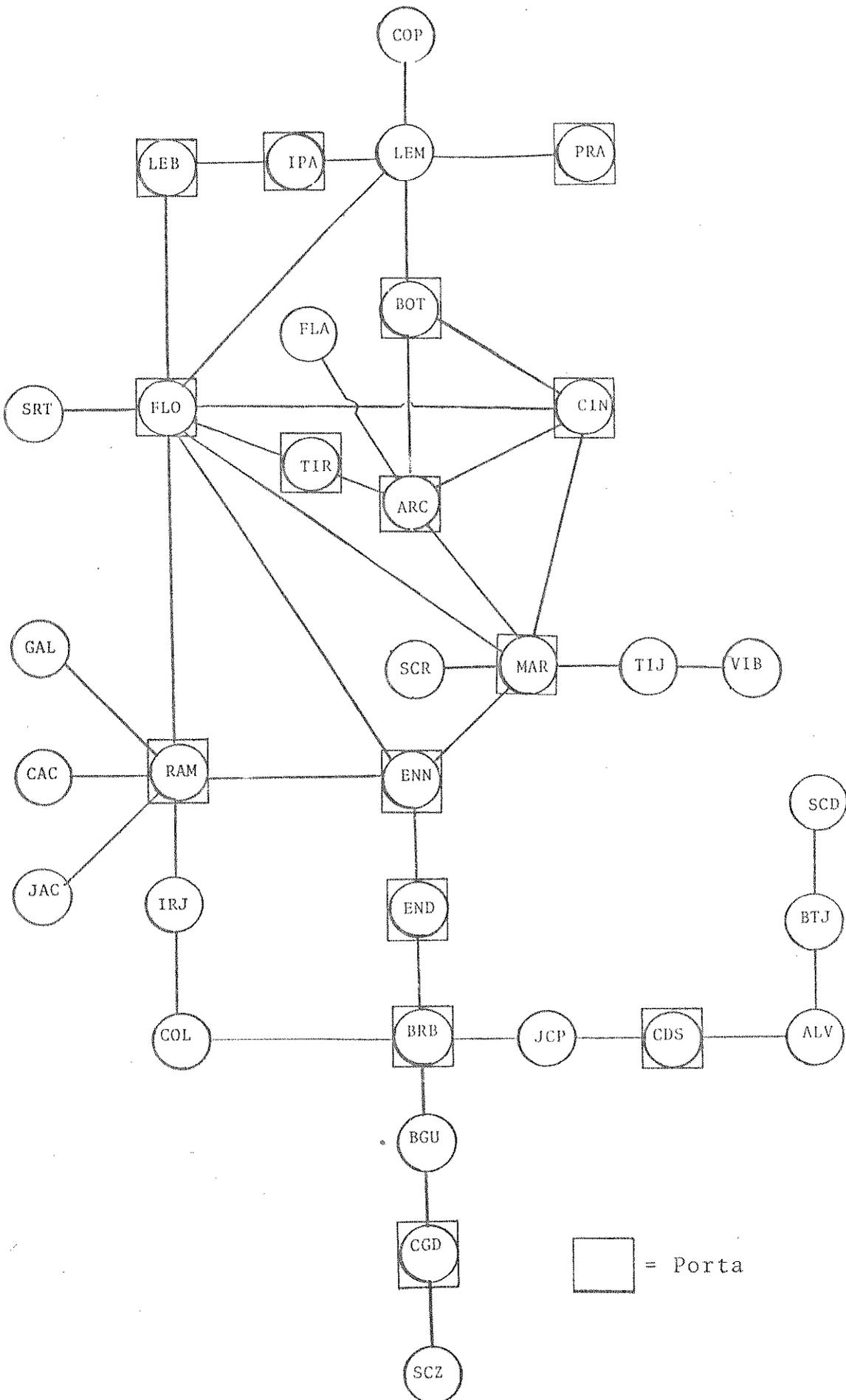


Figura III.11. - Rio de Janeiro com 15 portas

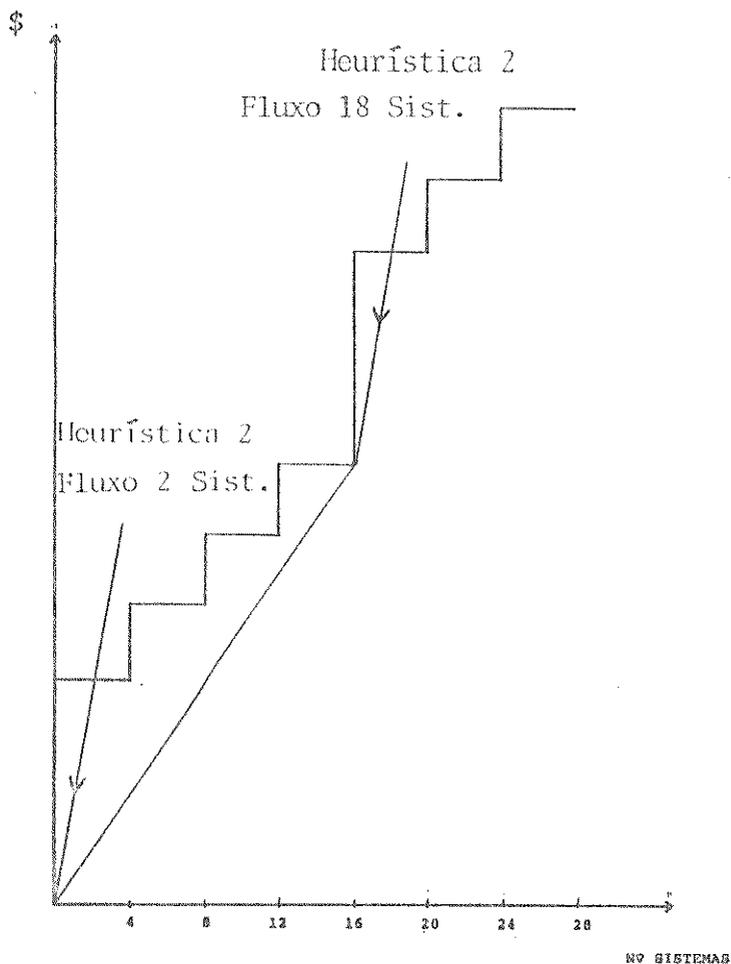


Figura III.12. - Heurística 2 - Redução dos Fluxos devido a Penalização.

Em seguida, a aplicação da heurística 3 não permite um aumento desses fluxos, devido a forte penalização para acrêscimo de fluxos nulos ou múltiplos de 16 sistemas.

Para evitar este comportamento, decidiu-se inverter a ordem de aplicação das heurísticas, ou seja, aplicar a sequência 1-3-2 conforme descrito a seguir.

### III.5.2 SEQUÊNCIA DE HEURÍSTICAS 1-3-2

A aplicação da heurística 3 após a 1, diminuiu a ocorrência das situações descritas no item anterior. Em seguida a

heurística 2 elimina eventuais ociosidades, e dessa forma conseguiu-se obter em alguns casos, soluções melhores do que com a sequência anterior.

Entretanto, esta sequência também pode provocar comportamentos negativos, relacionados ao crescimento de fluxo nos arcos. Isto ocorre porque a heurística 3 penaliza incrementos de fluxo acima da capacidade dos equipamentos, o que nem sempre ocorre com a Heurística 2.

Assim, quando vários arcos estão competindo entre si, e um deles recebe uma penalização consideravelmente menor que os demais, há uma tendência de se escoar todo o fluxo por este arco, muitas vezes com ganhos de custo em relação ao roteamento no plano PTP.

Para exemplificar, numa configuração estudada, utilizando a sequência 1-2-3, um arco escoava um fluxo de 31 sistemas após a aplicação da heurística 1. Ao se aplicar a heurística 2 este fluxo foi aumentado para 40 sistemas, porque o arco passou a receber fluxos da ordem de 1, 2 ou 3 sistemas, de outros que sofreram penalizações mais severas. Isto ocorreu a um custo menor, do que se estes sistemas fossem escoados pelo plano PTP. Ao aplicar a sequência 1-3-2 ao mesmo problema, o arco tem seu crescimento limitado até 32 sistemas, porque a partir desse valor, os aumentos de fluxo são penalizados pela heurística 3. Em seguida a heurística 2 mantém a mesma penalização em 32 sistemas, e o fluxo dos demais arcos é escoado pelo plano PTP a um custo maior.

A Fig. III.13 mostra esta diferença de penalizações entre as heurísticas 2 e 3 para o fluxo de 31 sistemas.

Da mesma forma que na sequência anterior, também devem ser feitas duas ou três aplicações sucessivas das Heurísticas 3-2, para se obter uma melhoria na qualidade da solução.

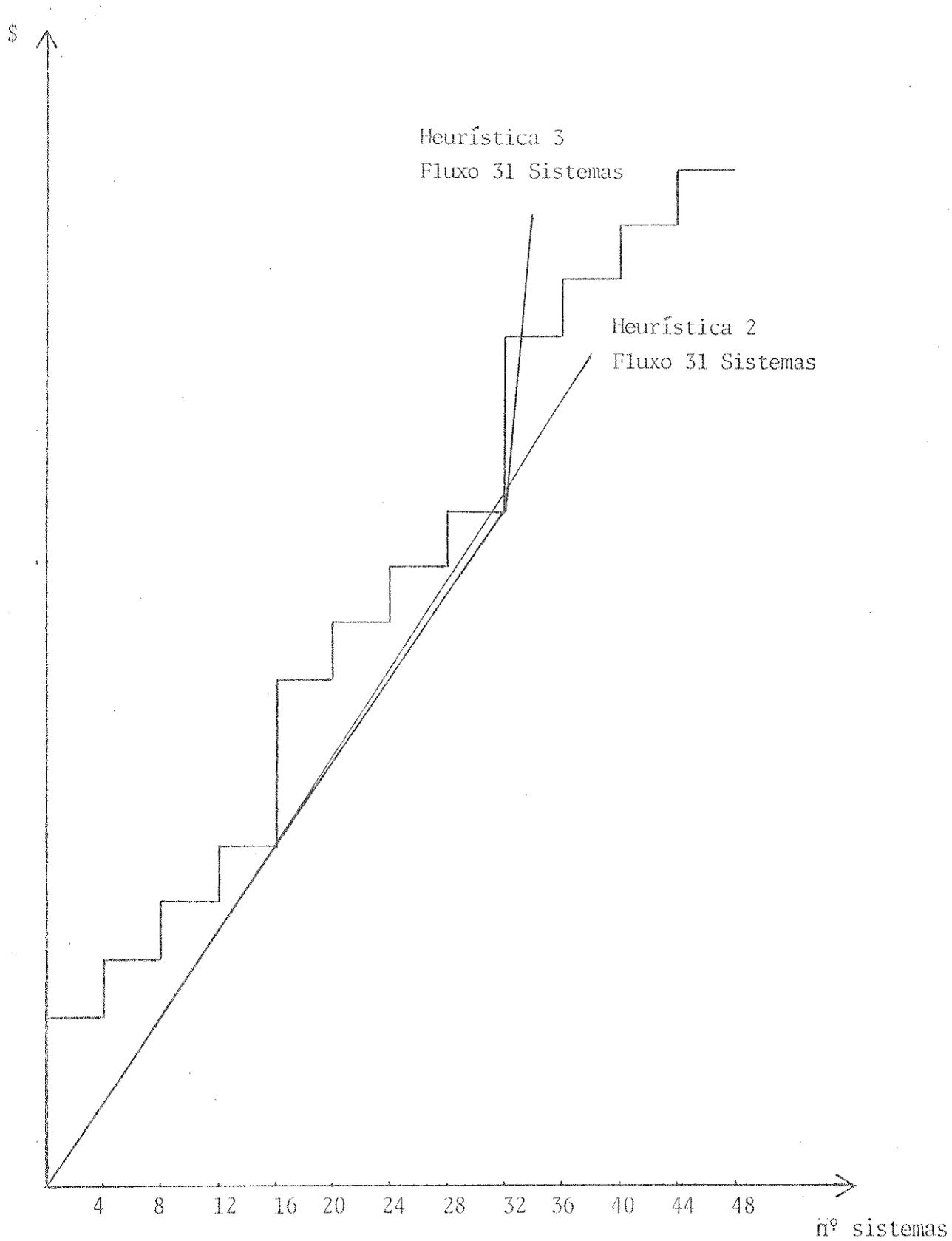


Figura III.13. - Diferenças na Penalização de um mesmo Fluxo usando as Heurísticas 2 e 3.

### III.5.3 PENALIZAÇÕES INDIVIDUAIS

Com o objetivo de estimular a competição entre os arcos, sem limitar o crescimento daqueles com fluxo nulo, e múltiplo de 16 sistemas, foi proposta uma nova heurística combinando características das heurísticas 1 e 2.

Estes arcos recebem a mesma função de custos que a heurística 1, enquanto que os demais recebem a função de custos da heurística 2, conforme mostrado na Figura III.14.

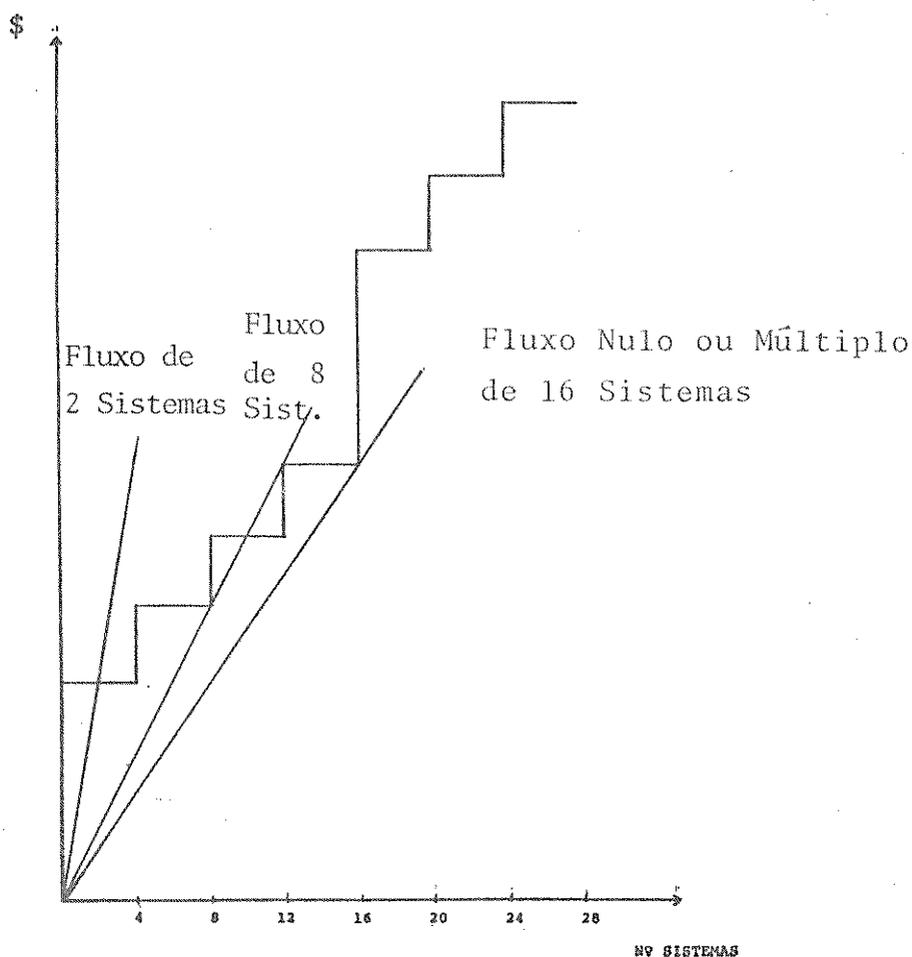


Figura III.14. - Heurística para Penalizações Individuais.

Este método procura identificar situações de competição entre os arcos, o que é feito através das variações nos fluxos a medida que são aplicadas as heurísticas. Um aumento de fluxo num arco, indica que ele passou a receber fluxo de outro que sofreu uma penalização mais severa. Assim, o processo é iniciado com a heurística 1, e em seguida é aplicada a nova heurística (heurística 4). São identificados os arcos que tiveram aumento de fluxo, e dentre eles, aquele com maior valor absoluto no vetor de custo marginal é novamente penalizado com a heurística 4. São mantidas as mesmas estruturas de custo para os demais arcos.

Vale observar que neste problema, o custo real e o custo marginal das variáveis que representam as compras de equipamentos nos arcos, tem o mesmo valor absoluto.

Isto pode ser observado, analisando-se a formulação do problema, descrita no capítulo II, item II.5. Os coeficientes destas variáveis formam uma matriz identidade negativa no conjunto de restrições, conforme indicado na Figura III.15.

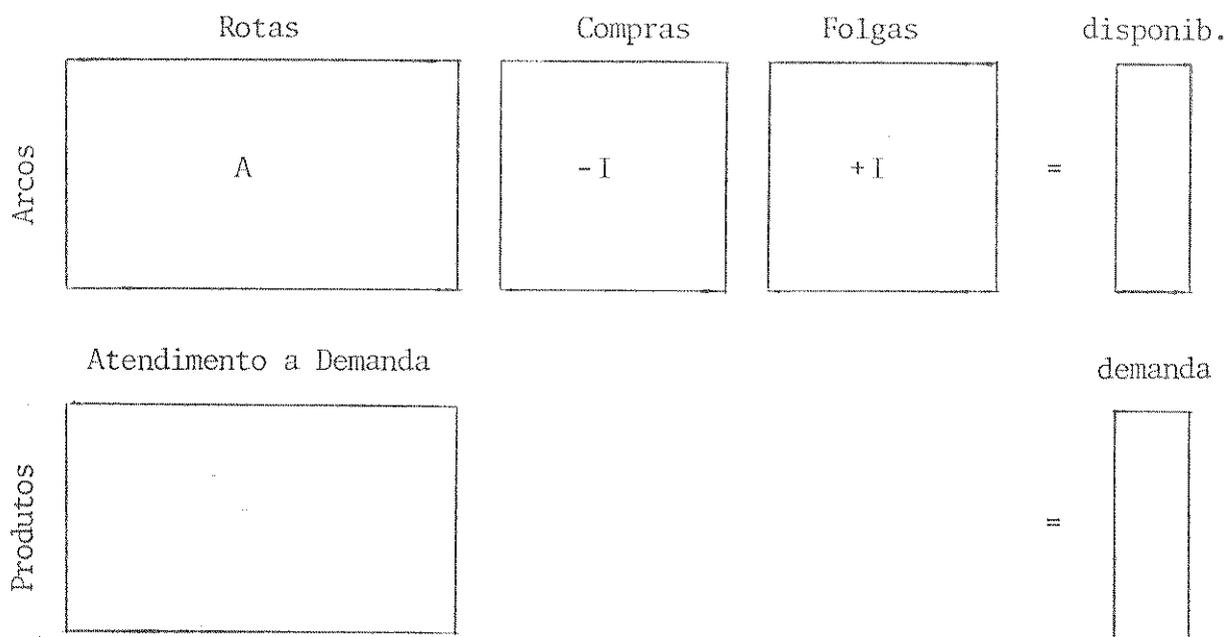


Figura III.15. - Esquema de Formulação Utilizada.

Como todos os coeficientes das restrições são 0 ou 1, quando uma variável de compra entra na base, ao ser zerado o coeficiente na função objetivo, seu custo relativo passa a ter o mesmo valor absoluto que o custo real.

O vetor de custos marginais é utilizado com o objetivo de se obter maiores ganhos nas primeiras iterações, o que pode ser útil quando não se deseja ir até o final do processo. O diagrama de blocos a seguir ilustra este procedimento.

Ao final são aplicadas as heurísticas 2 e 3 com o objetivo de eliminar eventuais ociosidades, e permitir um melhor aproveitamento dos equipamentos de 2.<sup>a</sup> ordem.

Com este método, procura-se favorecer o escoamento de um produto pelos arcos de fibra que lhe são oferecidos. Isto ocorre porque ao se penalizar somente um arco que tem um aumento de fluxo mantendo-se todos os demais com a mesma estrutura de custos, permitimos que este fluxo adicional, ou parte dele, possa na pior das hipóteses, voltar ao arco por onde era inicialmente escoado.

Em alguns casos, este procedimento levou a resultados melhores que os obtidos com as sequências 1-2-3 e 1-3-2. Entretanto é necessário um esforço computacional consideravelmente maior, principalmente quando há um grande número de portas, e não se pode garantir que a solução será de melhor qualidade.

A tabela III.3 fornece os tempos de CPU relativos ao processo de aplicação das sequências de heurística para os três casos descritos.

É considerada a rede do Rio de Janeiro com 15 portas conforme indicado na Figura III.16.

Na penalização individual, 29 arcos foram penalizados, em um total de 86.

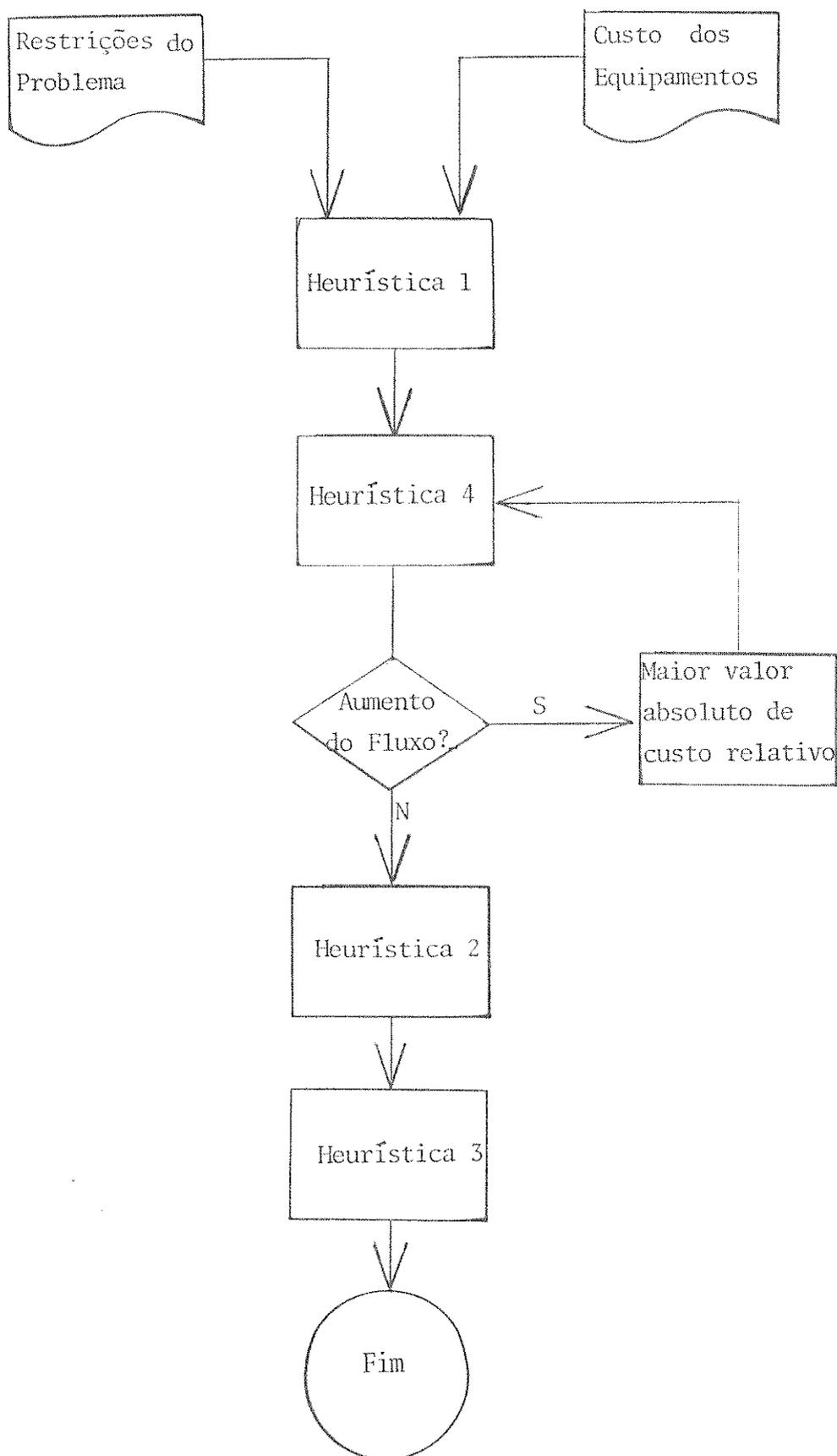


Diagrama de Blocos para Penalizações Individuais.

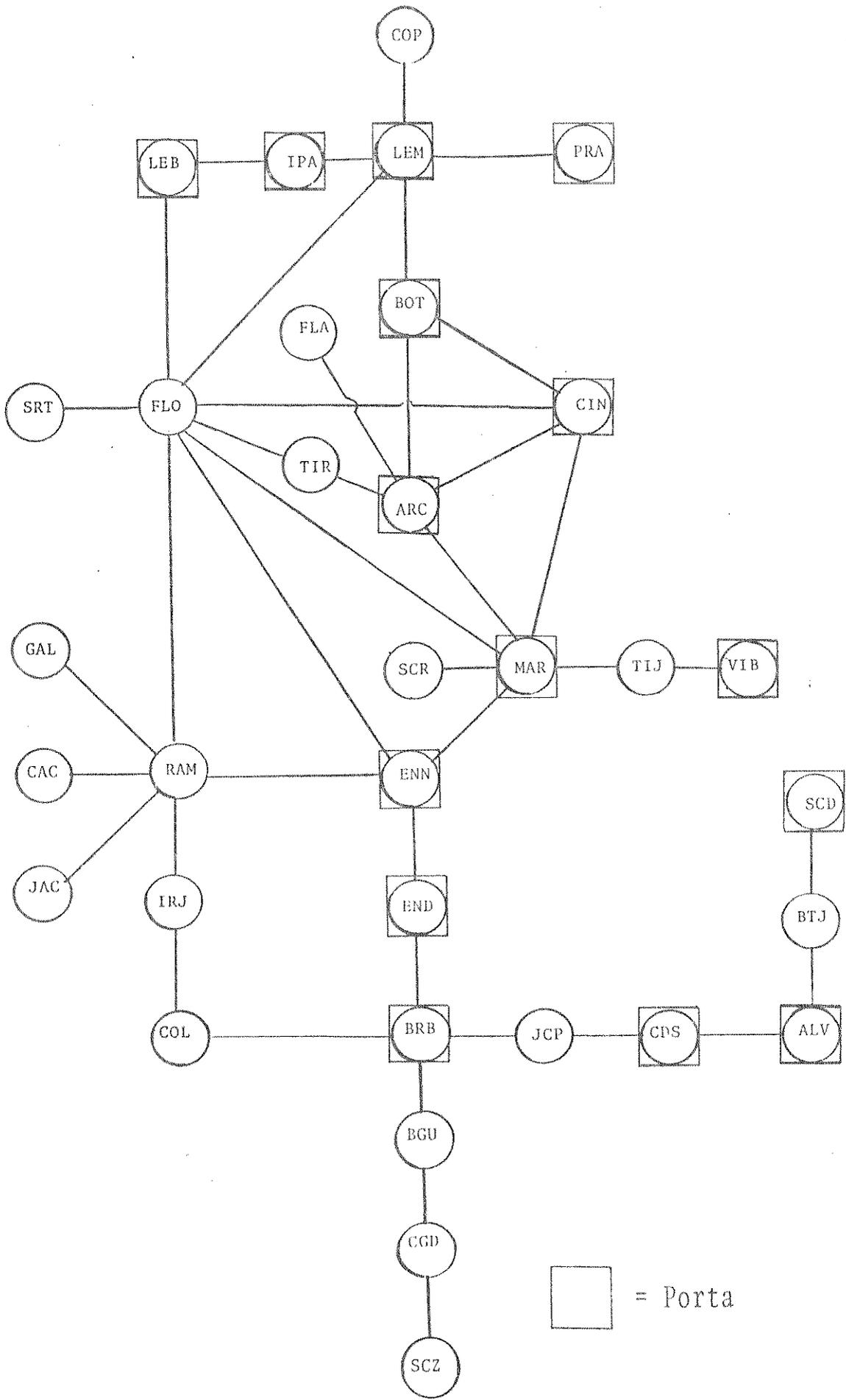


Figura III.16. - Rio de Janeiro com 15 portas

HEURÍSTICAS	TEMPO DE CPU EM MIN.
1-2-3-2-3-2-3	5,8
1-3-2-3-2-3-2-3	6,3
1-4-4 ind. -2-3	21,6

Tabela III.3 - Tempos de CPU para cada sequência

### III.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A cada aplicação de uma heurística, é obtido um custo linear, que corresponde ao custo calculado aplicando-se a estrutura de custos linearizada ao fluxo obtido em cada arco. O custo real é o custo de compra dos equipamentos necessários em cada arco. Também são fornecidos os custos reais de transmissão em PCM e fibra óptica.

As Figuras III.17, III.18 e III.19 fornecem o comportamento destes custos para as sequências 1-2-3, 1-3-2 e penalizações individuais respectivamente. Foi considerada a Rede do Rio de Janeiro com 15 portas, Fig. III.16.

Observa-se nas aplicações da heurística 2, que o custo linear foi maior que o real. Isto é possível por causa da estrutura de custos desta heurística, como pode ser observado na Fig. III.20.

Aumentos de mais de uma unidade nos arcos com fluxo nulo ou múltiplo de 16 sistemas, levam a um custo linear maior que o real. Para os demais casos, qualquer aumento de fluxo também leva a mesma situação.

Considerando a mesma figura, quando há diminuição de fluxo, em geral seu valor é deslocado para o ponto de quebra inferior da estrutura linearizada, onde os custos linear e real são iguais.

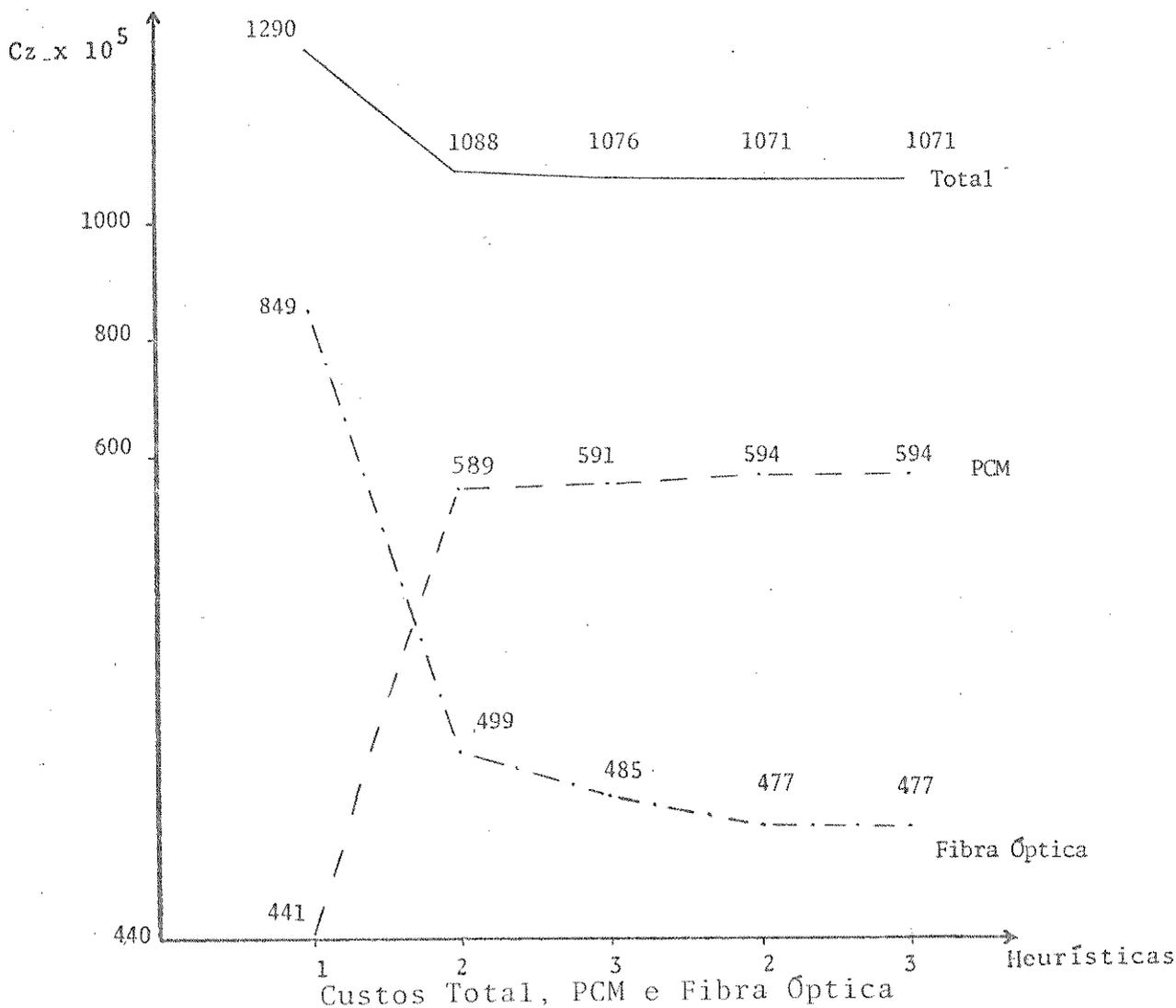
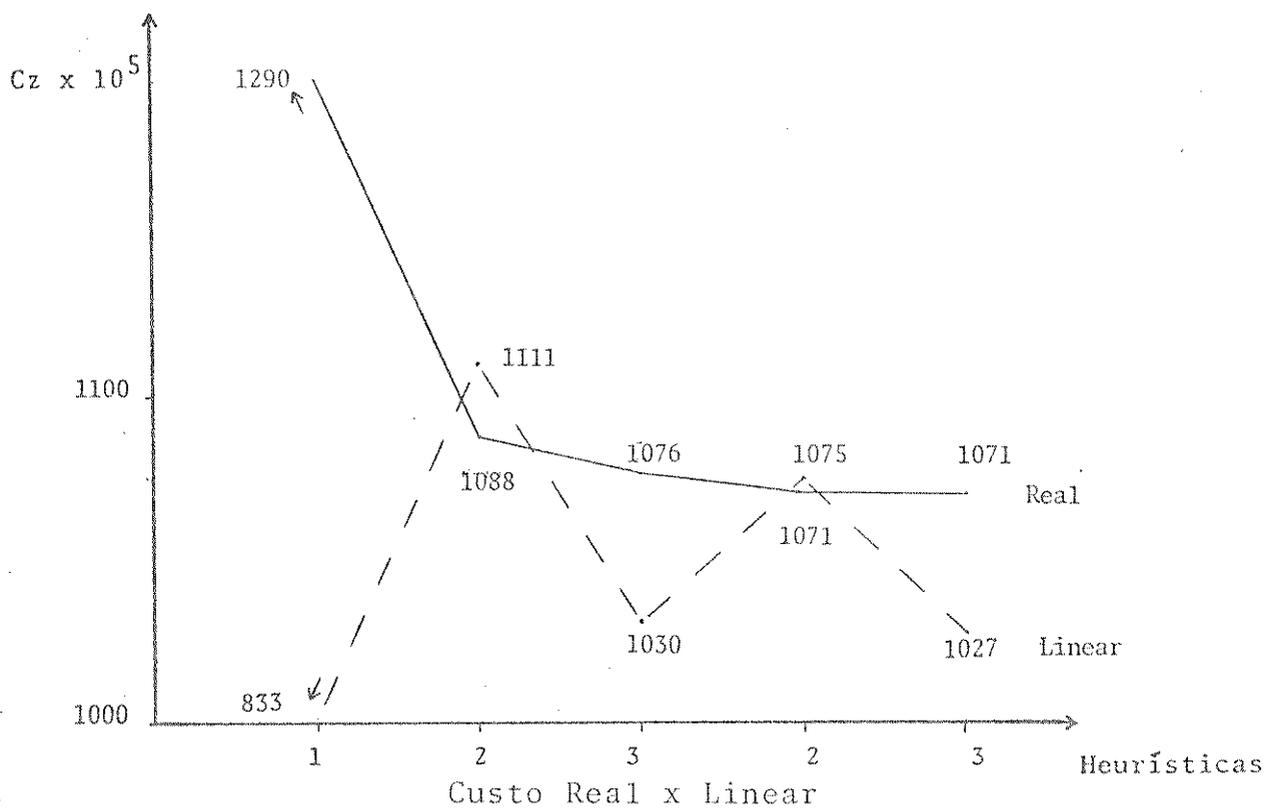


Figura III.17. - Comportamento dos Custos para se

sucessos 1, 2, 3

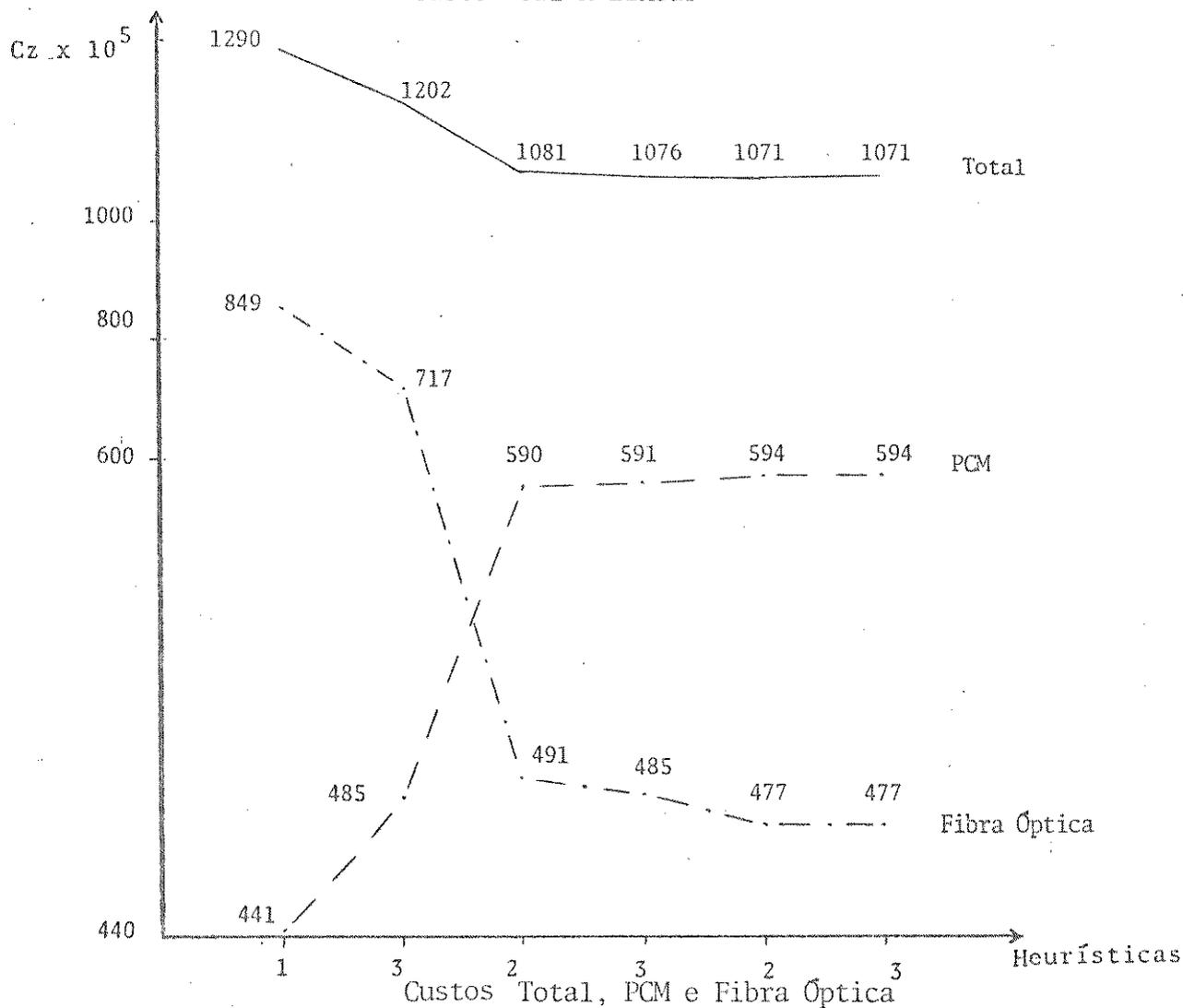
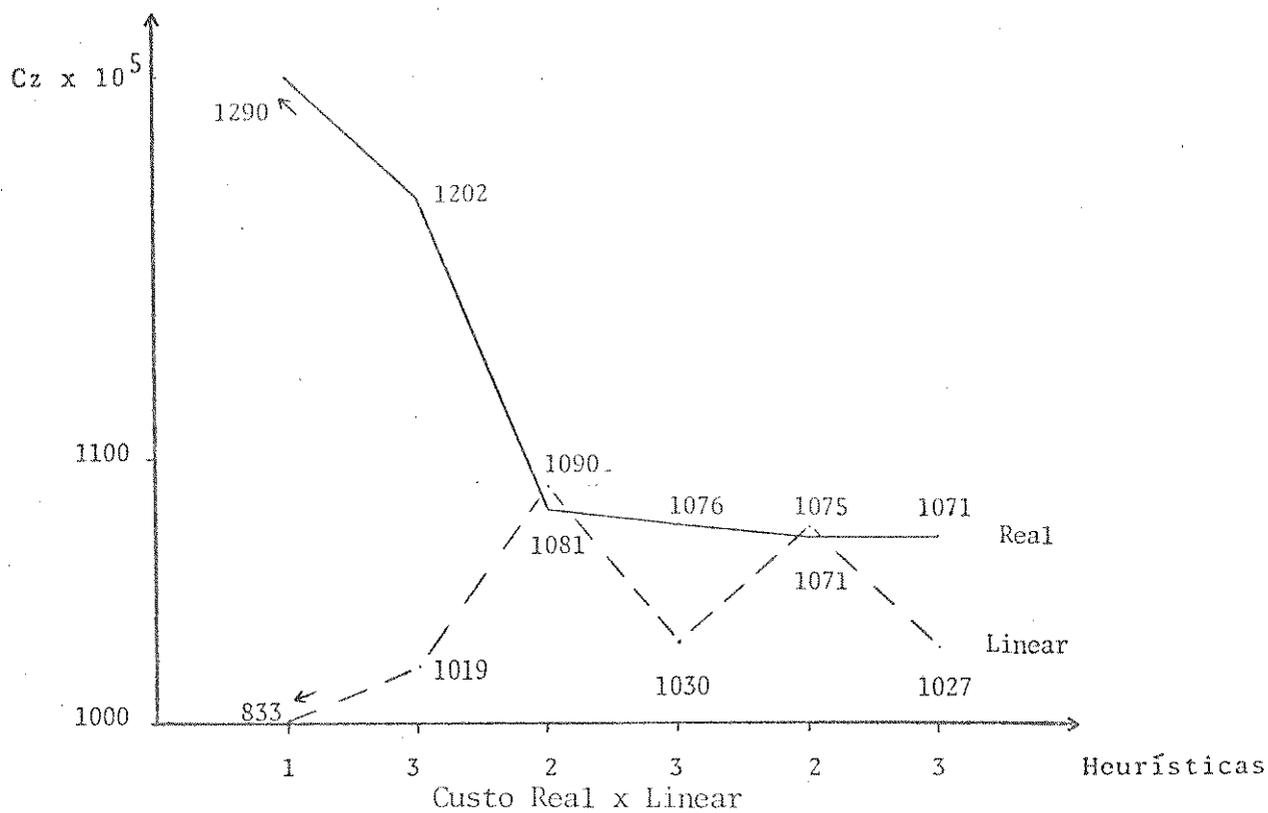


Figura III.18. - Comportamento dos Custos para se

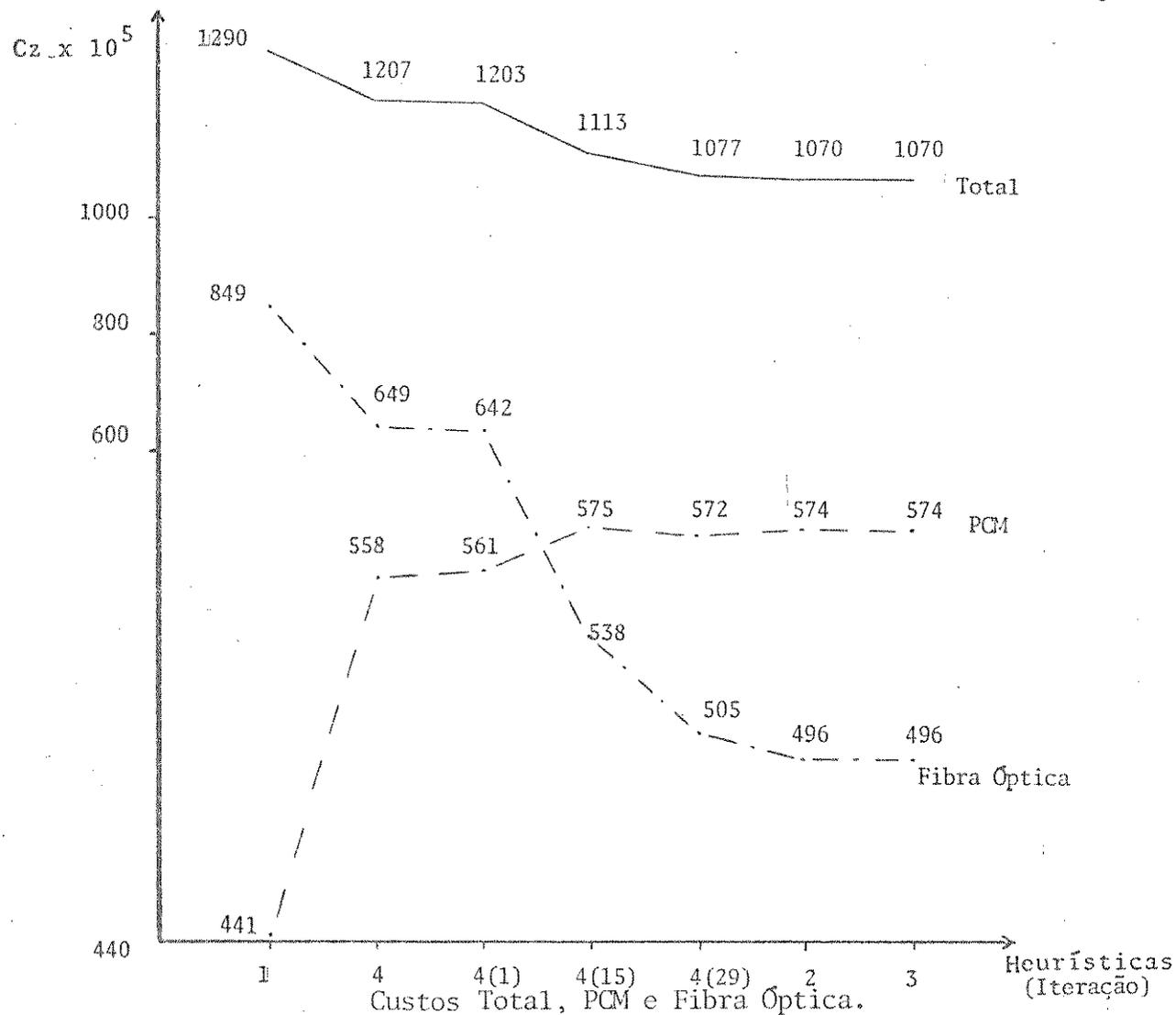
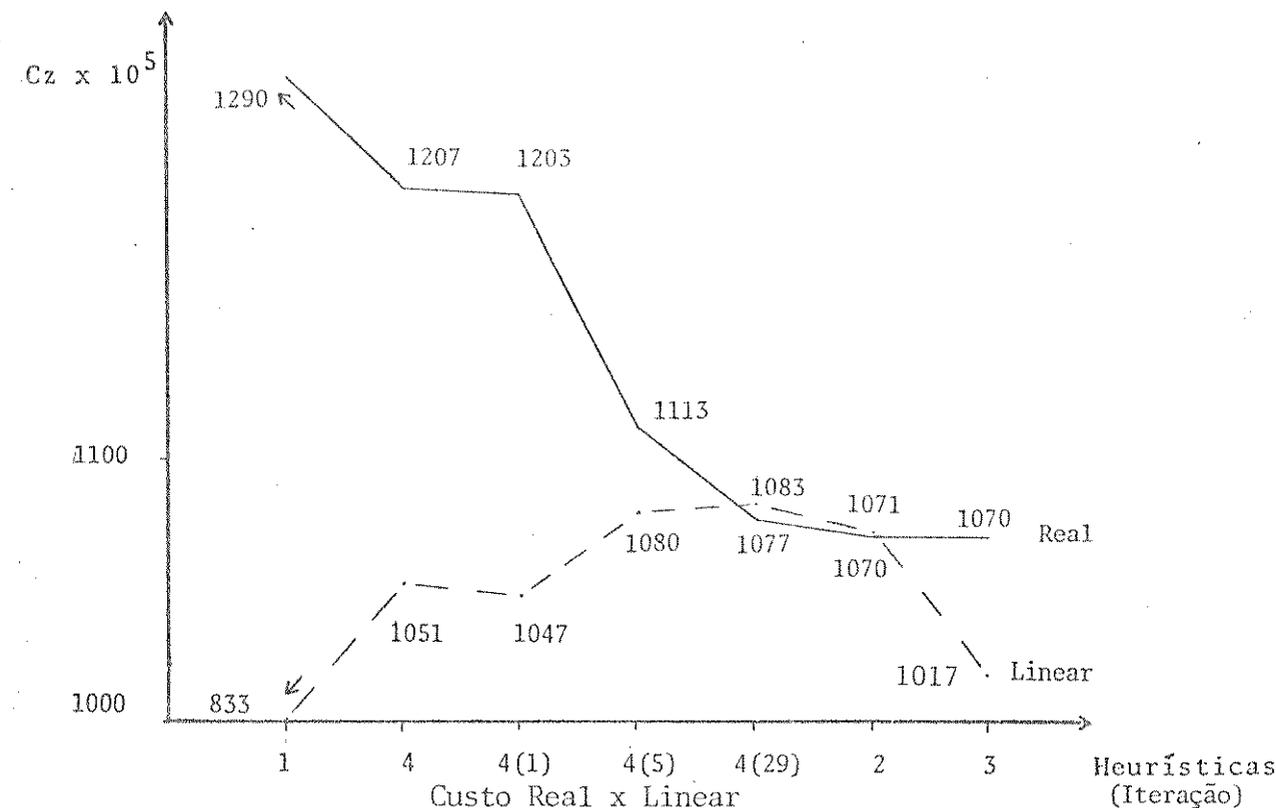


Figura III.19. - Comportamento dos Custos para Penalizações Individuais

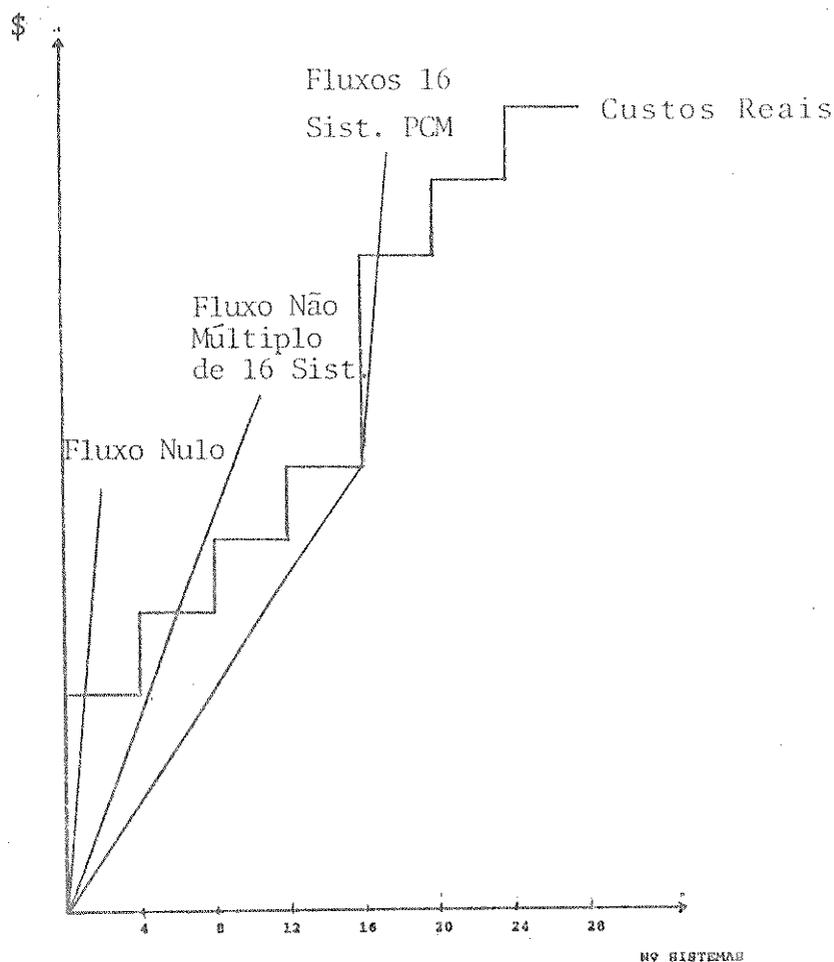


Figura III.20. - Heurística 2 - Estrutura de custos.

Como nas primeiras aplicações a heurística de custo 2 penaliza severamente os arcos com excesso de ociosidade, há vários casos de aumento e diminuição de fluxo, fazendo com que se ja mais acentuado este comportamento. Esta situação também ocorre com a heurística 4 nas penalizações individuais, embora com menor intensidade.

Verifica-se que a menos da ocorrência de ciclos descritos a seguir, os custos reais são decrescentes a medida que são aplicadas as heurísticas, o que é um comportamento bastante favorável.

O custo linear obtido com a heurística 1, é um limitante inferior para a solução ótima, e além disso é uma solução bastante otimista. O custo linear final, obtido com a heurística 3

não é uma solução excessivamente otimista, mas não se pode afirmar que seja um limitante inferior para a solução ótima do problema. Para a heurística com penalizações individuais, o custo real final é 5,0% maior que o custo linear final, e 22,1% maior que o custo linear obtido com a heurística 1. Analisando-se estas diferenças percentuais, e considerando-se a característica otimista da heurística 1, foram considerados aceitáveis os resultados obtidos.

Como esperado, os custos de transmissão em PCM são crescentes, e os de fibra óptica decrescentes a medida que são aplicados as heurísticas. Isto decorre das penalizações que os arcos no plano PTF sofrem ao longo da sequência, passando a escoar fluxo no plano PTP, ou aproveitando folgas em outros arcos do plano PTF. A Figura III.21 apresenta a redução de fluxo no plano PTF a medida que são aplicadas as heurísticas.

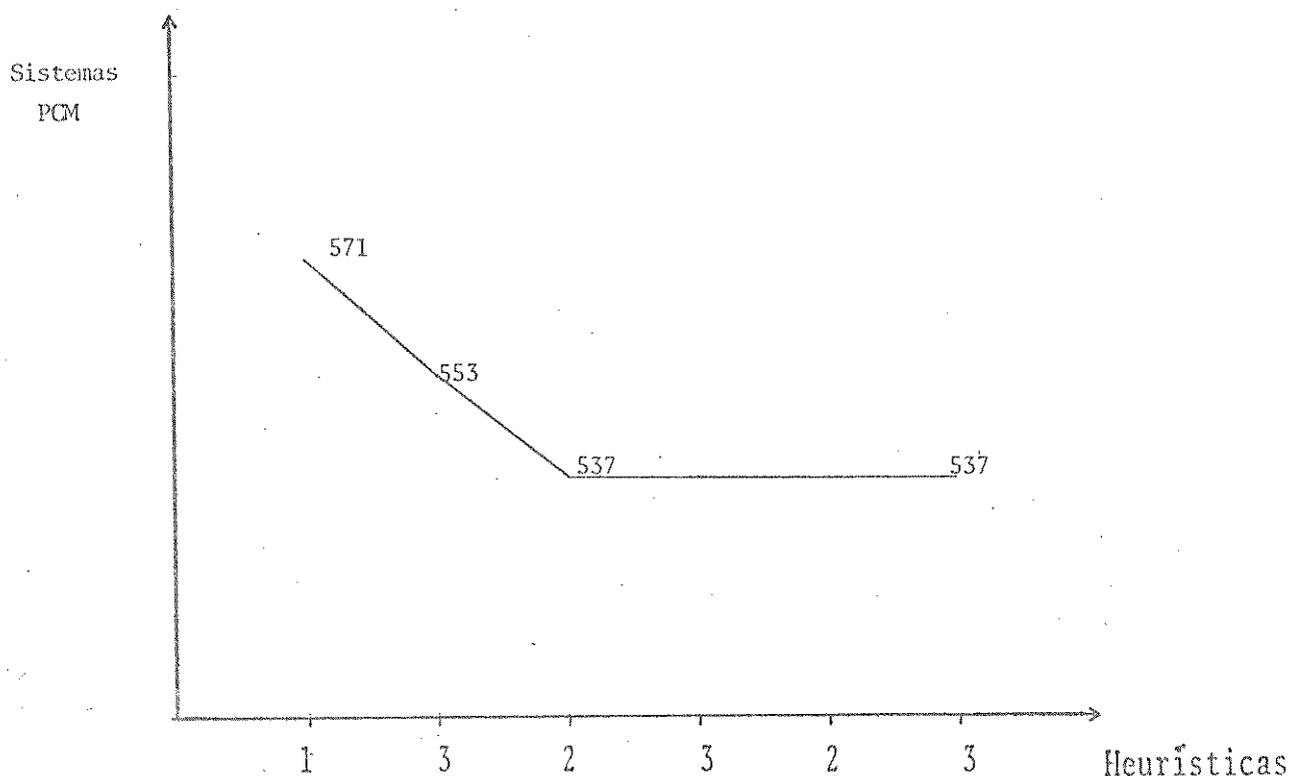


Figura III.21. - Redução de fluxo para as Heurísticas da sequência 1-3-2.

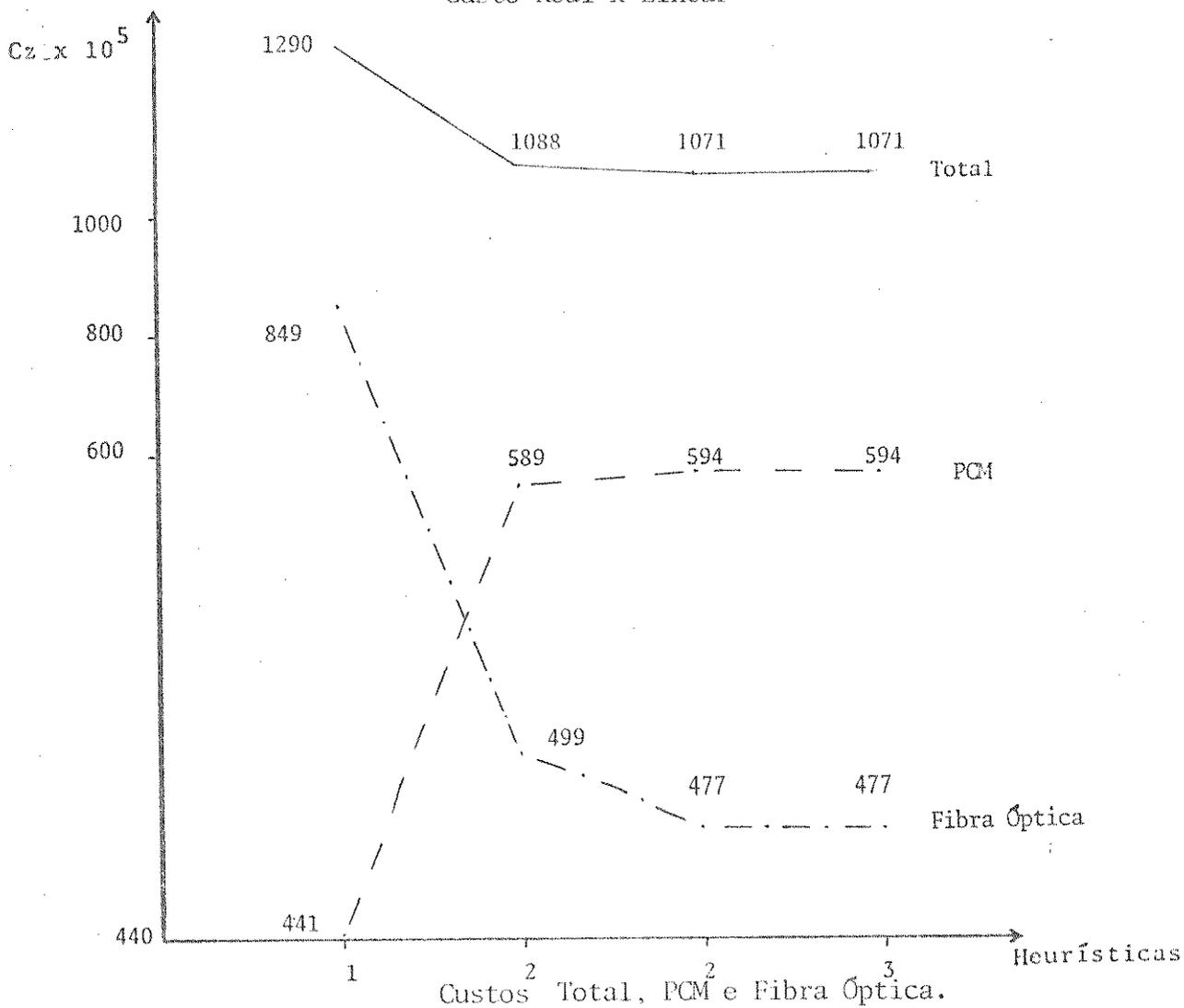
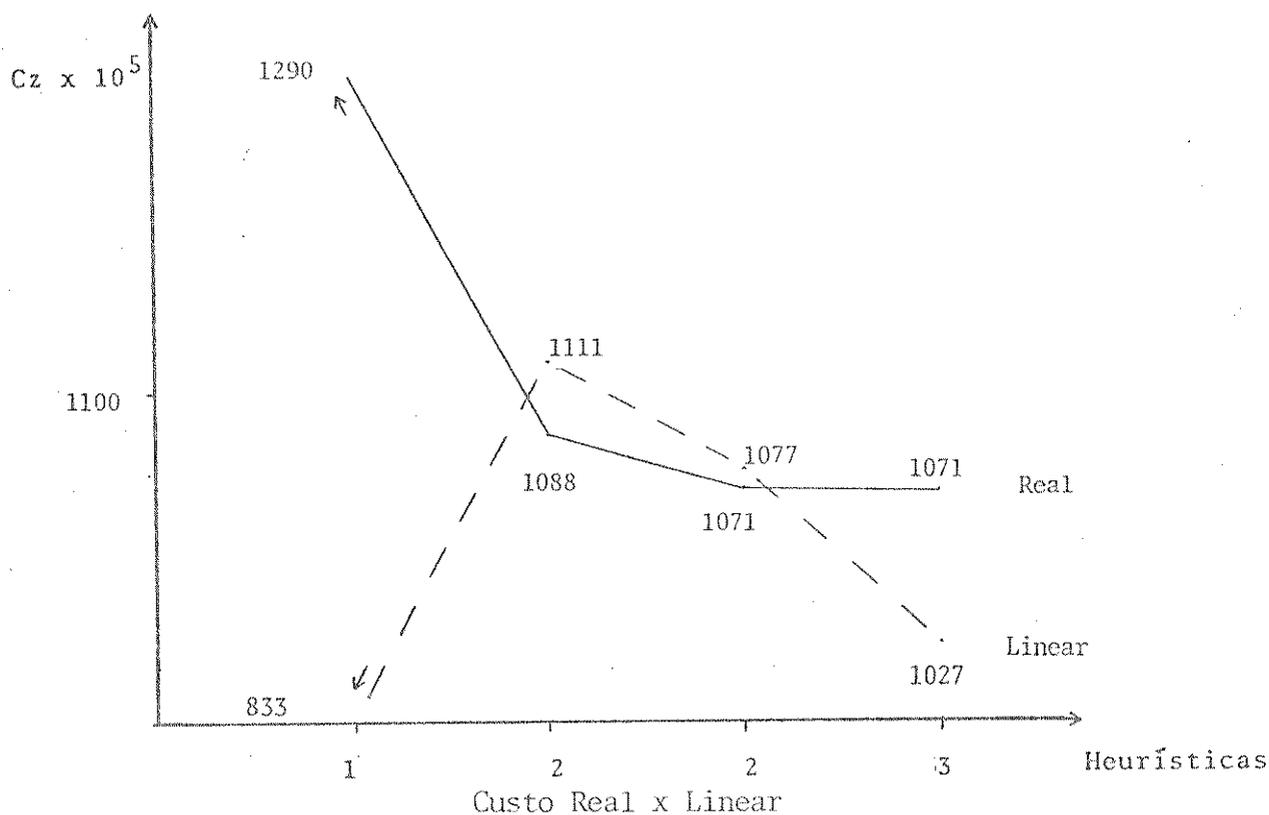


Figura III.22. - Comportamento dos Custos para a sequên

Nos casos estudados, tanto na sequência 1-2-3, quanto 1-3-2, duas aplicações da heurística 2 foram suficientes. Isto significa aplicar as heurísticas 1-2-3-2-3, ou 1-3-2-3-2-3. Também foram feitos testes eliminando-se a aplicação da heurística 3 entre as duas aplicações da 2.

Assim as sequências ficam 1-2-2-3 e 1-3-2-2-3, e foram obtidos os mesmos resultados, com a vantagem de se aplicar uma heurística a menos. Entretanto, não se pode generalizar estes comportamentos, e em situações de maior competição entre os arcos, o que será tratado no capítulo IV, podem ser necessárias mais que duas aplicações da heurística 2, bem como podem ser obtidas soluções diferentes com a retirada da heurística 3.

A Figura III.22 mostra o comportamento dos custos para a aplicação da sequência 1-2-2-3. Foi considerada a rede da Fig. III.16.

Em alguns casos, verifica-se a ocorrência de ciclos a medida que são aplicadas as heurísticas. Para exemplificar este comportamento, considere-se um arco escoando um fluxo de 3 sistemas. Ao se aplicar a heurística 2, este fluxo pode ser reduzido para 2 sistemas, mantendo constante o custo de transmissão no plano PTF, mas com um aumento do custo total real, devido ao roteamento adicional de 1 sistema no plano PTP. Ao se aplicar a heurística 3, o problema retorna a solução anterior, com uma redução no custo. A Fig. III.23 ilustra esta situação.

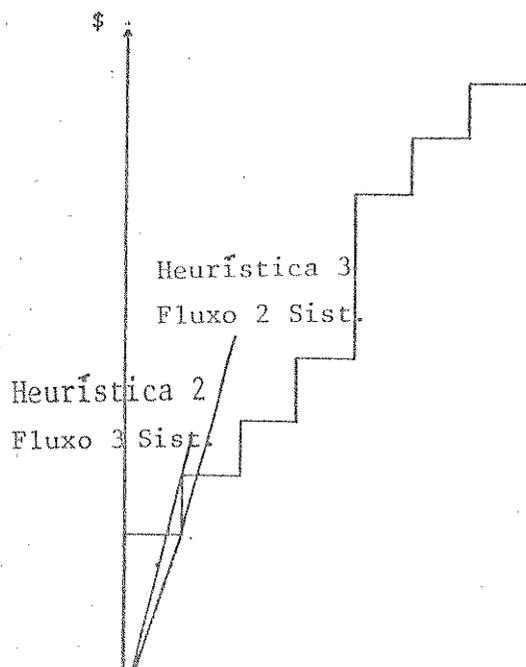


Figura III.23. -  
Comportamento  
Cíclico

### III.7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as diferentes formas de aplicação das heurísticas estão diretamente relacionadas às características particulares da rede, à configuração de portas proposta, e também à demanda a ser roteada. Isto se verifica porque com exceção da heurística 1, todas as demais são dependentes do fluxo escoado pelo arco, havendo casos particulares em que variações no valor do fluxo podem levar a diferentes penalizações, e conseqüentemente a soluções finais distintas.

Nos casos estudados as diferenças obtidas com as aplicações das sequências 1-2-3, 1-3-2, e penalizações individuais foram pequenas, e se restringiram a poucos arcos. Assim, podem ser feitas diferentes aplicações para identificar tais arcos, que deverão receber um tratamento específico por parte do planejador.

Ao se aumentar o número de arcos de fibra óptica oferecidos ao escoamento de cada produto, é possível que se verifiquem maiores diferenças entre os resultados obtidos com as sequências descritas. Isto porque haverá maior competição entre os arcos, conforme será visto em detalhes no capítulo IV.

Neste caso, recomenda-se utilizar sequências que permitam maior competição entre os arcos, como 1-3-2, ou penalizações individuais.

Também podem ser montadas sequências específicas com várias heurísticas distintas, para estes casos. Deve-se começar com heurísticas que não penalizem severamente os arcos, e permitam crescimentos em fluxos nulos e múltiplos de 16 sistemas. Isto poderia ser feito combinando-se as heurísticas 3 e 4, sem penalizar acréscimos de fluxo. Em seguida, deveriam ser aplicadas heurísticas com penalizações mais fortes e no final tentar aproveitar folgas de equipamentos com a heurística 3.

Esta ordem crescente de penalizações evita que os arcos com muitas folgas tenham seu fluxo forçado a escoar pelo

plano PTP no início do processo. Isto permite que um dos arcos concentre o fluxo dos demais, o que pode ser mais econômico que o roteamento em PCM.

Neste trabalho foram apresentadas as heurísticas e se quências que levaram aos melhores resultados, dentre todas as que foram estudadas.

CAPÍTULO IV

ESTUDO DAS ROTAS NO PLANO PTF

#### IV.1 INTRODUÇÃO

Ao se estudar a capacidade do modelo em eliminar portas previamente escolhidas, por não serem economicamente viáveis, observou-se em alguns casos, que ao se acrescentar uma nova porta a uma configuração já existente, foram obtidas soluções de pior qualidade. Isto ocorre porque com a adição de portas, diferentes rotas no plano PTF passam a ser oferecidas ao escoamento de alguns produtos. Para se evitar este problema, seria necessário aumentar o número de rotas oferecidas a cada produto, de forma a se incluir também aquelas consideradas anteriormente. Mas, dependendo do número de portas, esta alternativa pode aumentar consideravelmente as dimensões do problema, conforme será visto no item seguinte.

Neste capítulo são estudados os efeitos da variação no número de rotas no plano PTF, na qualidade da solução, e também são sugeridas medidas para se reduzir tais efeitos.

#### IV.2 EFEITOS DO AUMENTO NO NÚMERO DE PORTAS

Utilizando-se a rede do Rio de Janeiro, foram escolhidas inicialmente 15 portas, conforme indicado na Fig. IV.1. Foi resolvido o problema, e em seguida foi acrescentado um novo ponto de mudança de hierarquia em SCD, mantendo-se a mesma demanda.

O resultado obtido com 16 portas é pior do que, com 15, e a diferença está no arco de fibra óptica MAR-CDS, que escoava um fluxo de 16 sistemas na configuração de 15 portas, e somente 15 sistemas quando se acrescenta a porta SCD. Este sistema que deixa de ser escoado é o produto ARC-SCD, e isto ocorre porque na configuração de 16 portas, o arco MAR-CDS não é oferecido ao escoamento desse produto.

A Figura IV.2. indica as 3 rotas no plano PTF oferecidas ao escoamento do produto ARC-SCD, na configuração com 15 portas.

A Figura IV.3. indica as 3 rotas no plano PTF oferecidas ao escoamento do mesmo produto, quando é acrescentada a porta SCD.

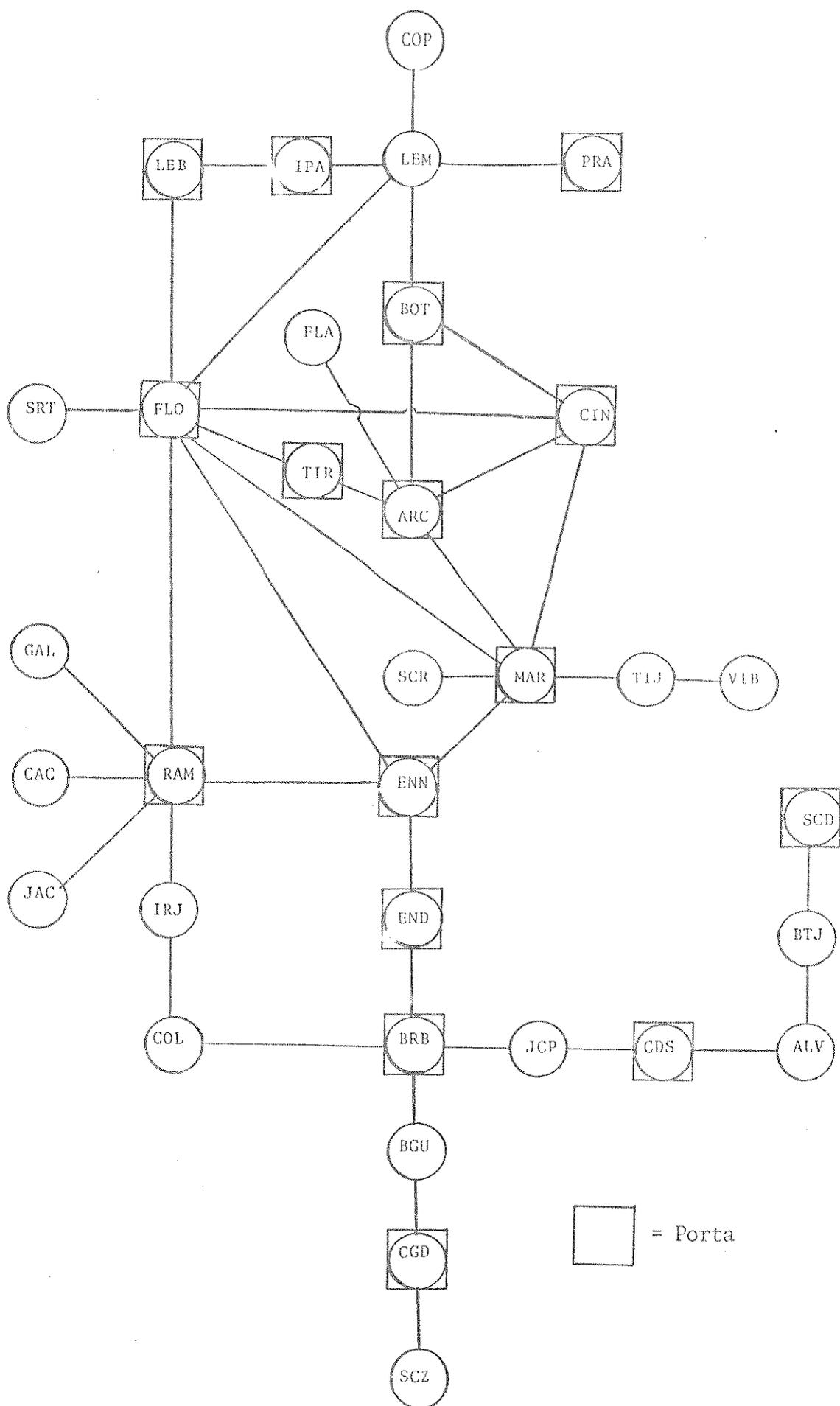


Figura IV.1. - Rio de Janeiro com 16.<sup>a</sup> em SCD.

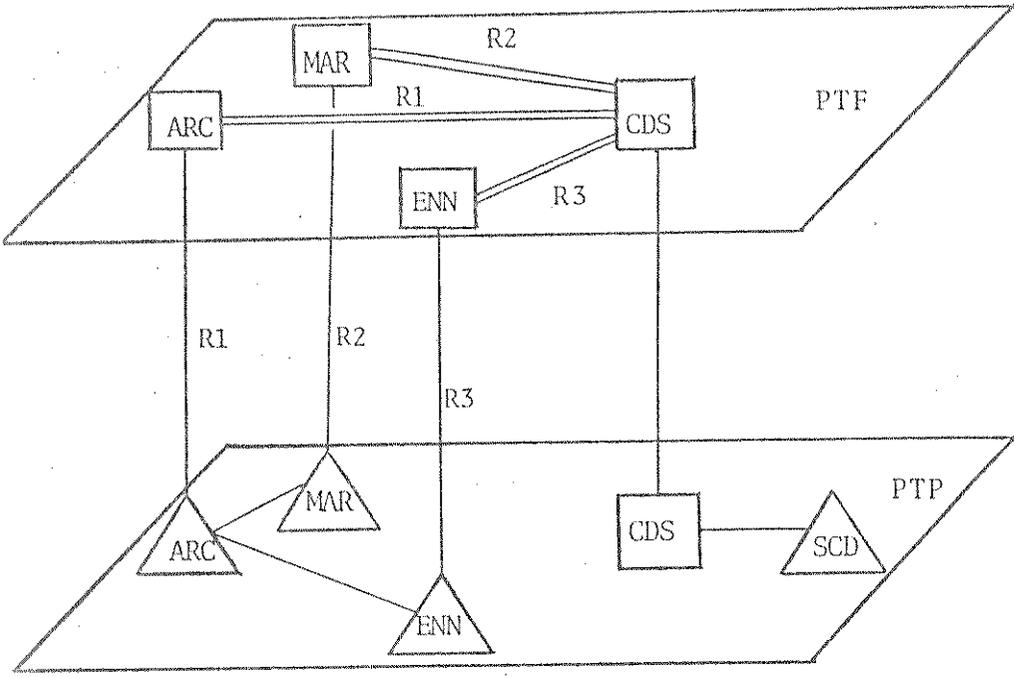


Figura IV.2. - Rotas Utilizando o Plano PTF, oferecidas ao Produto ARC-SCD, na Configuração de 15 Portas.

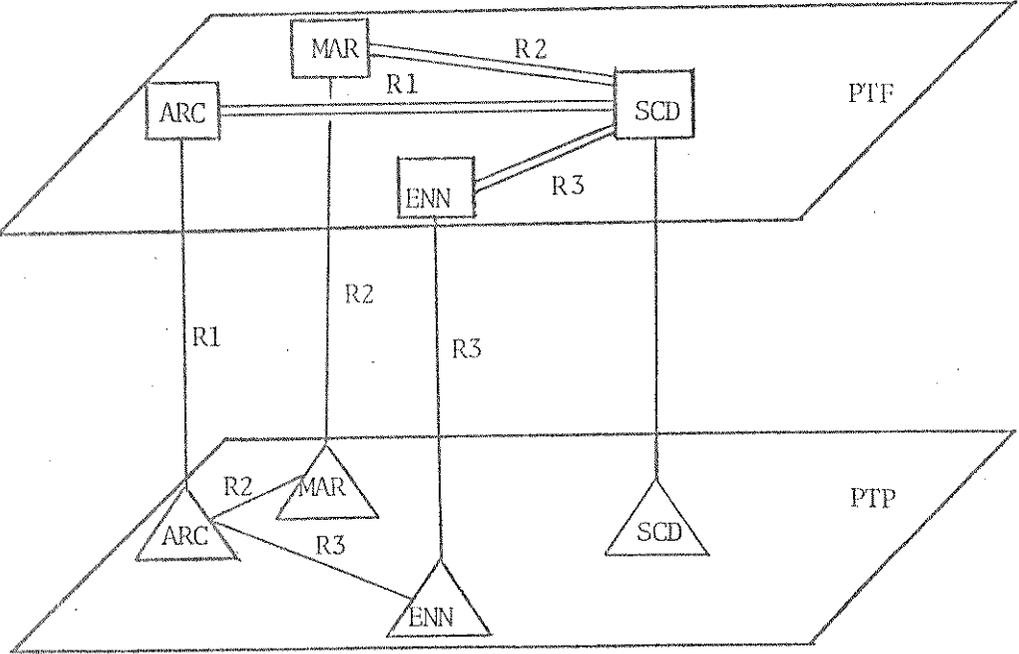


Figura IV.3. - Rotas Utilizando o Plano PTF, oferecidas ao Produto ARC-SCD, com 16<sup>a</sup> Portas em SCD.

— : indica transmissão no plano PTF  
 - - - : indica transmissão no plano PTP  
 $R_i$ ,  $i = 1,3$  são as rotas oferecidas

Assim, não são oferecidas as mesmas rotas nas duas configurações, e com 16 portas não foi possível aproveitar a folga de equipamento no arco MAR-CDS. O produto ARC-SCD foi roteado pelo plano PTP a um custo total maior.

São comprovadas as suspeitas levantadas no Cap. II item II.7, de que há um empobrecimento do modelo, por não se considerar as galerias originais da rede, nos roteamentos no plano PTF.

Uma forma de resolver este problema, seria considerar todas as possibilidades de mudança de plano ao longo dos caminhos, mas isto pode aumentar muito a dimensão do problema. Considerando só o caminho mínimo entre ARC e SCD, existem 6 portas (7 com SCD). Assim, seriam 15 rotas utilizando o plano PTF, ou 21 com a porta em SCD. Todas estas rotas são consideradas no modelo, mas não estão sendo oferecidas a todos os produtos.

Tomando-se todos os p- caminhos entre cada duas portas, e todos os produtos a serem roteados, o problema teria um considerável aumento em suas dimensões.

A Fig. IV.4 indica todas as portas, ao longo do caminho mínimo entre ARC e SCD.

Outra alternativa seria manter as mesmas rotas oferecidas anteriormente, e acrescentar as novas decorrentes do acréscimo no número de portas. Isto permitiria fazer estudos de evolução da rede, e a inclusão de novas portas não levaria a soluções piores do que as já existentes. Ainda assim, existiriam várias rotas que não estariam sendo oferecidas ao escoamento dos produtos.

Esta deficiência do modelo tende a se agravar, a medida que aumenta o número de portas, porque haverá maior quantidade de arcos de fibra óptica na rede, e provavelmente mais folgas de equipamentos, a serem aproveitadas.

A seguir são analisados os efeitos de variações no número de rotas oferecidas a cada produto, na qualidade da solução.

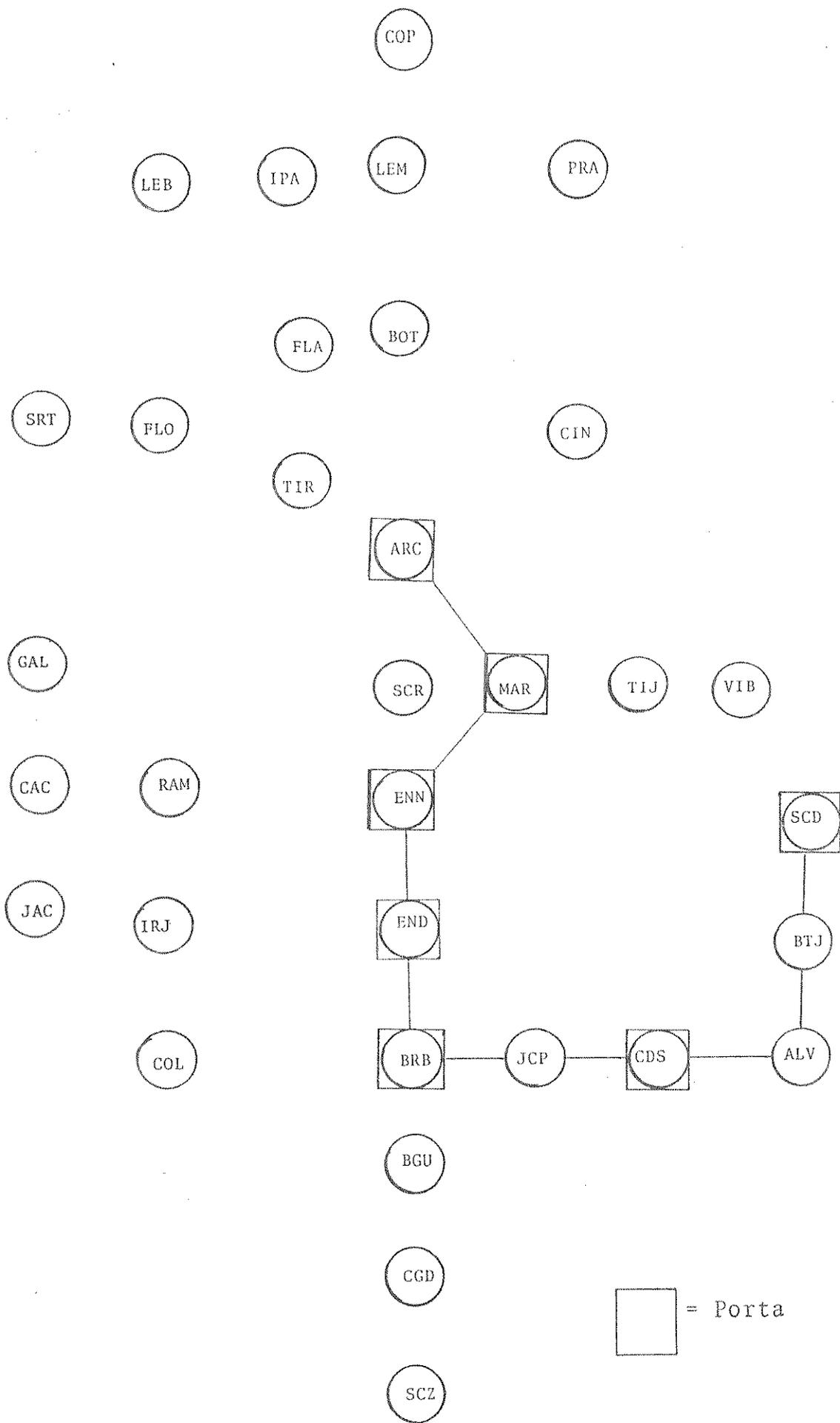


Figura IV.4. - Portas no Caminho Mínimo de ARC para SCD.

#### IV.3 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE ROTAS NO PLANO PTF, NA QUALIDADE DA SOLUÇÃO

Para uma mesma configuração de portas na rede do Rio de Janeiro, Fig. III.16 (Capítulo III), foram estudadas as seguintes alternativas:

1. Somente uma rota no plano PTF foi oferecida para cada produto.
2. Duas rotas no plano PTF foram oferecidas para cada produto.
3. Três rotas no plano PTF foram oferecidas para cada produto.

Nos três casos, foi oferecido o mesmo número de rotas no plano PTP.

Os resultados obtidos encontram-se resumidos na Tabela IV.1.

	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
custo total Cz\$	$1195 \cdot 10^5$	$1143 \cdot 10^5$	$1071 \cdot 10^5$
Arcos de Fibra Considerados	70	83	86
Sistemas Escodados no plano PTF	502	524	537
Sistemas 3. <sup>a</sup> Ordem	102	98	92
Sistemas 2. <sup>a</sup> Ordem	274	284	290
PAR x KM de Fibra Óptica	867,4	830,2	763,9

Tabela IV.1 - Resultados para Variações no Número de Rotas Oferecidas a cada Produto.

Embora o número possível de arcos de fibra óptica para 15 portas seja 105 ( $C_{15}^2$ ), o modelo não considera na otimização aqueles que não foram oferecidos a nenhum produto. Estes casos ocorrem quando não há nenhuma demanda entre as portas consideradas, e o arco de fibra óptica ligando estas portas não é oferecido ao escoamento de nenhum outro produto proveniente de outras estações. Assim, não sendo oferecidos ao escoamento de nenhum produto, estes arcos terão sempre fluxo nulo, não sendo necessários no processo de otimização. Isto explica porque o número de arcos de fibra óptica considerados em cada alternativa é menor que 105.

A medida que se diminui o número de rotas no plano PTF, há uma sensível piora na qualidade da solução. Isto se deve ao não aproveitamento da capacidade ociosa dos equipamentos, principalmente de 3.<sup>a</sup> ordem. As alternativas com menos rotas chegam a utilizar uma quantidade maior destes equipamentos, mesmo escoando um fluxo menor.

A tabela IV.2 fornece o aproveitamento médio dos equipamentos de 3.<sup>a</sup> ordem, obtido em cada alternativa.

	% Utilização dos Equipamentos 3. <sup>a</sup> ordem
Alternativa 1	61,5
Alternativa 2	66,8
Alternativa 3	73,0

Tabela IV.2 - Aproveitamento dos equipamentos de 3.<sup>a</sup> ordem.

Quando é oferecida apenas uma rota no plano PTF, o produto só tem duas alternativas, usar esta rota, ou ser escoado pelo plano PTP. A medida que se aumenta o número de rotas, mantendo-se as mesmas portas, passa a haver competição entre elas. Assim, o produto poderá ter um dos comportamentos abaixo, em comparação com o seu roteamento na alternativa 1.

Vale observar que são escolhidas inicialmente as rotas no plano PTF com menor comprimento total, e maior trecho em fibra óptica, que são as de menor custo por sistema PCM.

a) Produto escoado no plano PTF na Alternativa 1

Neste caso, quando são oferecidas mais rotas, o produto poderá continuar sendo escoado pela mesma, ou passar a utilizar uma nova rota, aproveitando folgas existentes. Se isto ocorrer, ele estará deixando de usar a rota atual, para utilizar outra que já existia anteriormente, mas não era oferecida ao seu escoamento. Assim, se o arco que estiver deixando de ser utilizado por este produto não escoar outros, haverá uma diminuição no PAR x KM de fibra óptica total, porque um arco deixa de ser utilizado, para se aproveitar uma folga em outro já existente.

Evidentemente, o número total de sistemas roteados no plano PTF será o mesmo.

b) Produto escoado no plano PTP na Alternativa 1

Neste caso, se com o aumento do número de rotas o fluxo passar a ser escoado pelo plano PTF, aproveitando eventuais folgas, haverá um aumento no número de sistemas roteados em fibra óptica, e não será alterado o PAR x KM, porque continuarão a ser utilizados os mesmos arcos no plano PTF.

A Tabela IV.3 resume os casos descritos acima:

Roteamento Anterior	PAR x KM	Nº SISTEMAS
Plano PTF	≤	=
Plano PTP	=	≥

Tabela IV.3 - Efeitos do Aumento no Número de Rotas no Plano PTF.

O fato de terem sido considerados mais arcos nas alternativas 2 e 3 em relação a 1 (13 e 16 respectivamente), não influenciou na solução, porque estes arcos foram oferecidos como segunda ou terceira rota ao escoamento dos produtos, e tiveram fluxo nulo nestas alternativas.

Isto é, o importante não é necessariamente ter mais arcos, mas, sobretudo oferecê-los a um maior número de produtos, o que permite um melhor aproveitamento das disponibilidades.

Em decorrência dos comportamentos descritos anteriormente, podem haver aumentos ou diminuições no fluxo de um arco de fibra óptica, a medida que são oferecidas mais rotas no plano PTF. A Tabela IV.4 fornece o fluxo final em cada arco, para as 3 alternativas.

#### IV.4 INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE ROTAS NA SEQUÊNCIA DE HEURÍSTICAS

Foi aplicada a sequência de heurísticas 1-3-2 para as alternativas 1 e 3 descritas no item anterior.

A Figura IV.5 apresenta o comportamento dos custos reais em cada caso, a medida que são aplicadas as heurísticas. Foi considerada a Rede do Rio de Janeiro da Figura III.16.

ARCO	FLUXOS		
	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
1 ARC-BOT	39	32	27
2 ARC-CIN			16
3 ARC-MAR			16
4 ARC-LEM			11
5 ARC-END			15
6 ARC-BRB			22
7 ARC-ENN	4		16
8 ARC-LEB			12
9 ARC-IPA			5
10 ARC-PRA			22
11 ARC-ALV			7
12 ARC-CDS			15
13 BOT-CIN	11	21	16
14 BOT-MAR		11	8
15 BOT-LEM	10	10	15
16 BOT-END			9
17 BOT-BRB	11	12	14
18 BOT-ENN	3	0	16
19 BOT-LEB			16
20 BOT-IPA	14		16
21 BOT-PRA	19	19	16
22 BOT-VIB			7
23 BOT-ALV	4	4	0
24 BOT-CDS	7	7	12
25 CIN-BRB			10
26 MAR-LEM	4	6	9
27 MAR-END	9	9	10
28 MAR-BRB			16
29 MAR-LEB			4
30 MAR-IPA	3	3	0
31 MAR-ALV			16
32 MAR-CDS	7	8	9
33 END-BRB			22
34 END-ENN			6
35 END-CDS	3		0
36 BRB-ENN			32
37 BRB-VIB			4
38 BRB-ALV	13	13	14
39 BRB-CDS	26		27
40 ENN-PRA	4	4	6
41 ENN-CDS	3	5	6
42 ALV-CDS			11
43 CDS-SCD		7	6

OBS: - Não são indicados os arcos com fluxo nulo nas três alternativas.

- Os arcos não indicados nas alternativas 1 e 2 tem o mesmo fluxo que na alternativa 3.

Tabela IV.4. - Fluxo nos arcos de Fibra Óptica.

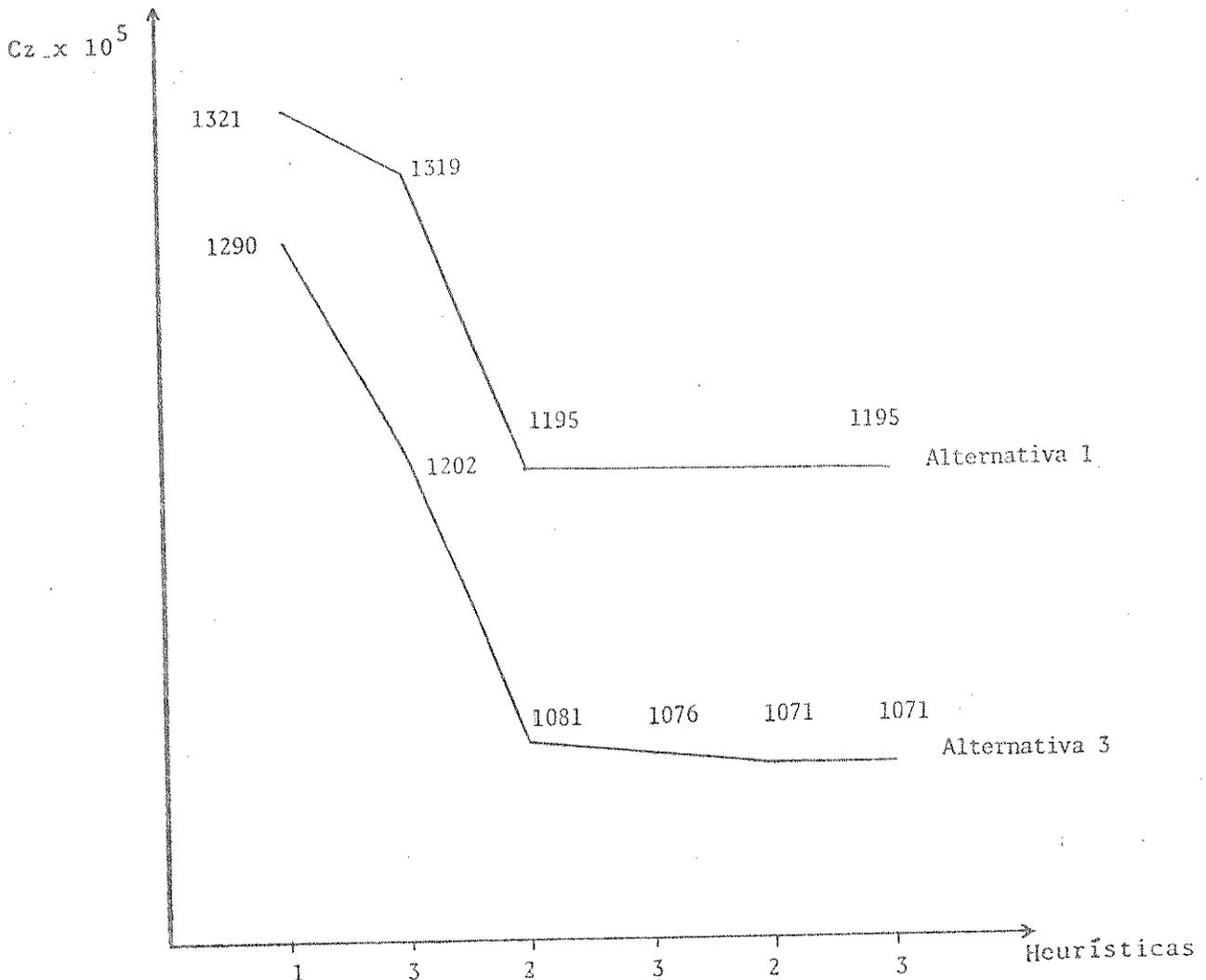


Figura IV.5. - Custos Reais da Sequência 1-3-2 para as alternativas 1 e 3.

Como era esperado, a alternativa com menos rotas chega a solução final com um número menor de heurísticas. Este comportamento decorre da menor competição entre os arcos, e comprova as indicações do capítulo III, de que a medida que se oferecem mais rotas no plano PTF a cada produto, o modelo se torna mais rico, sendo necessária a aplicação de sequências mais longas.

#### IV.5 ROTAS A SEREM OFERECIDAS A CADA PRODUTO

A quantidade adequada de rotas no plano PTF, a serem oferecidas ao escoamento de cada produto, é função sobretudo da configuração de portas, e também da densidade da rede. A medida

que se chega próximo a ocupação total dos equipamentos, aumentos no número de rotas produzirão ganhos menores, e as dimensões do problema podem aumentar consideravelmente. Assim, deve-se avaliar para cada produto roteado no plano PTP, se existem arcos de fibra óptica com folga no caminho mínimo, e que não estão sendo oferecidos ao seu escoamento. Estes arcos seriam oferecidos aos produtos, para aproveitar tais folgas.

Também podem ser considerados os arcos de fibra óptica existentes nos demais p- caminhos, quando estes não forem significativamente maiores que o caminho mínimo.

Estes procedimentos exigem uma maior participação do planejador no processo de otimização, mas podem levar a ganhos significativos.

CAPÍTULO V

ANÁLISES COMPLEMENTARES

## V.1 INTRODUÇÃO

Considerando as perspectivas futuras de comportamento dos preços, são apresentados neste capítulo, os resultados obtidos para duas situações de barateamento relativo dos equipamentos de transmissão em fibra óptica.

Com o objetivo de fornecer subsídios ao planejador, também são apresentados os resultados obtidos utilizando-se diferentes critérios para escolha de portas.

São feitas considerações computacionais sobre a aplicação do modelo, e no final são apresentadas propostas de roteamento para as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo.

## V.2 BARATEAMENTO RELATIVO DOS EQUIPAMENTOS PARA TRANSMISSÃO EM FIBRA ÓPTICA

Foram estudadas reduções de 17% e 33% nos custos de transmissão em fibra óptica. A Figura V.1. apresenta os resultados obtidos em cada situação. Foi utilizada a rede do Rio de Janeiro com a configuração de portas indicada na Figura III.16., capítulo III.

Considerando-se os custos atuais, o roteamento em fibra óptica é responsável por 29,9% do valor total. Adotando-se o roteamento obtido neste caso, e reduzindo-se em 17% o custo de transmissão em fibra óptica, o custo total final seria 5,1% menor (17% de 29,9%). Entretanto, com a otimização foi obtida uma redução de 6,2% no custo atual, e conforme esperado, as transmissões em fibra óptica passaram a ter uma participação maior no custo total (33,1%). Também se verifica o mesmo comportamento quando se reduz em 33% o custo de transmissão em fibra óptica, e a sua participação no custo total é de 45,2%.

A tabela V.1 fornece o fluxo em cada arco, e os equipamentos necessários em cada alternativa considerada. Deve-se observar que em cada arco, são necessários pelo menos dois equipa

ARCO	COMPRIMENTO	CUSTO ATUAL	17%	33%
ARC-BOT	8,0	0	16	32
ARC-MAR	5,7	0	0	16
ARC-LEM	11,0	0	0	16
ARC-END	15,1	16	16	16
ARC-BRB	23,4	16	16	16
ARC-LEB	16,5	12	12	12
ARC-PRA	14,2	16	16	16
ARC-CDS	35,4	16	16	16
BOT-CIN	8,3	0	0	16
BOT-END	21,1	0	0	9
BOT-BRB	29,4	14	14	14
BOT-ENN	17,2	16	16	16
BOT-LEB	10,2	0	0	16
BOT-IPA	7,4	0	0	16
BOT-VIB	16,3	0	0	7
BOT-CDS	41,4	12	12	12
CIN-BRB	21,1	0	10	10
MAR-BRB	17,7	16	16	16
MAR-ALV	38,3	16	16	16
MAR-CDS	29,7	15	15	15
END-BRB	8,4	0	16	16
BRB-ENN	12,2	0	0	32
BRB-ALV	20,5	14	14	14
BRB-CDS	11,9	0	16	16
ALV-CDS	8,6	0	0	11
CDS-SCD	24,7	0	0	6
ARCOS NÃO NULOS		12	16	26
TOTAL SISTEMAS		179	237	398
EQUIPAMENTOS 3ª Ordem		24	32	56
EQUIPAMENTOS 2ª Ordem		92	122	206
PAR x KM Fibra Óptica		298,7	348,1	493,9
REPETIDORES ÓPTICOS		23	26	35
PAR x KM/Equip. 3ª Ordem		12,4	10,9	8,8
PAR x KM/Repetidores Ópticos		13,0	13,4	14,2

Tabela V.1. - Resultados para Diferentes Reduções no Custo de Transmissão em Fibra Óptica.

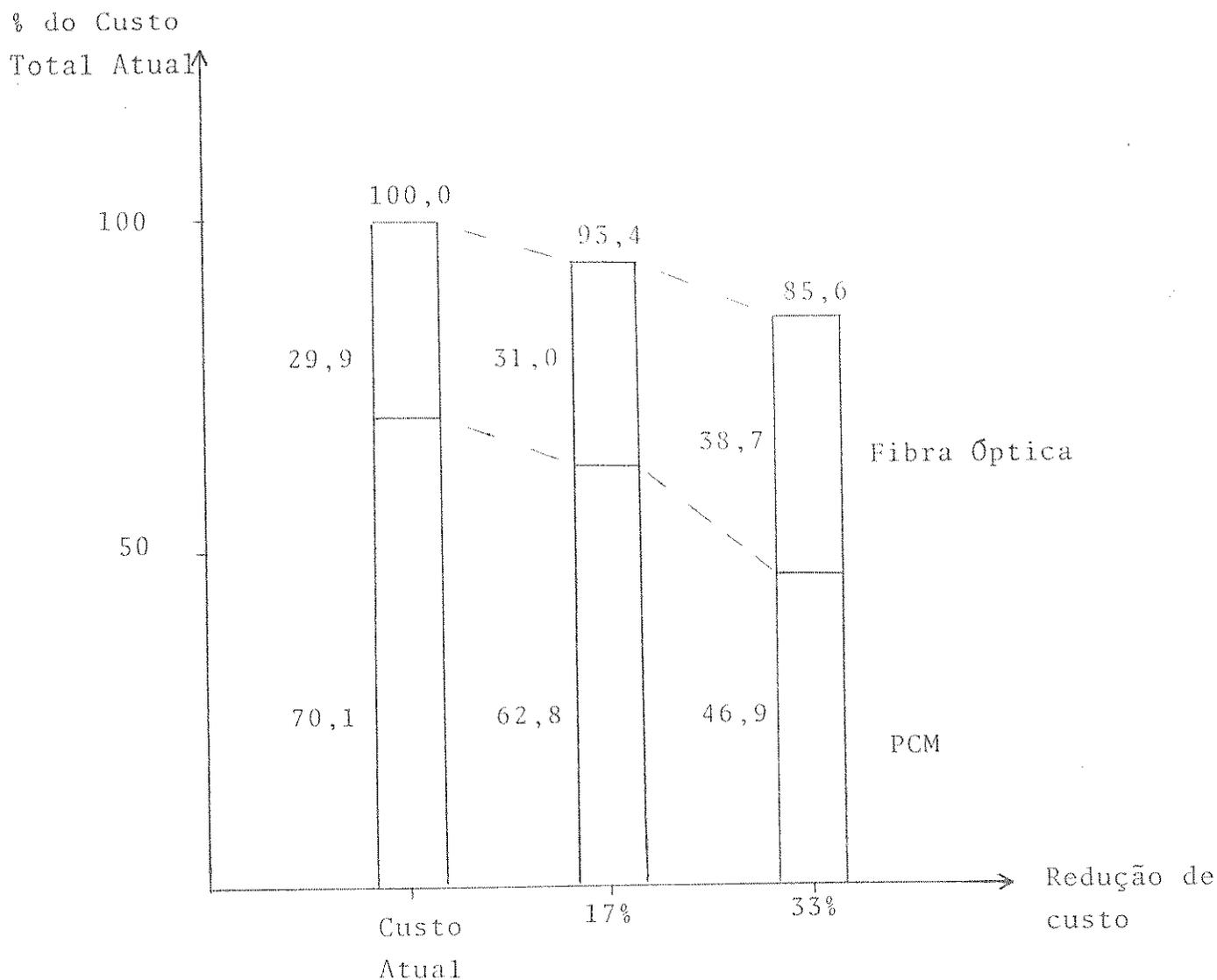
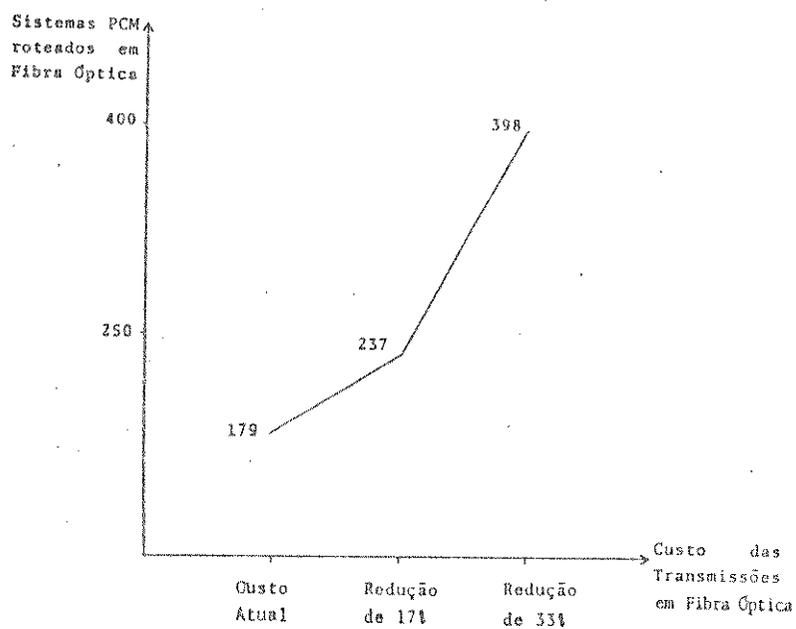
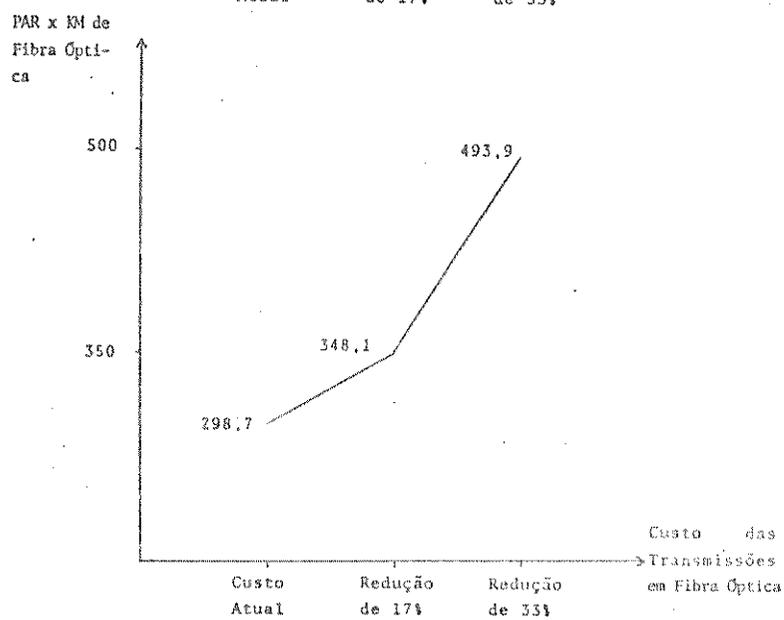
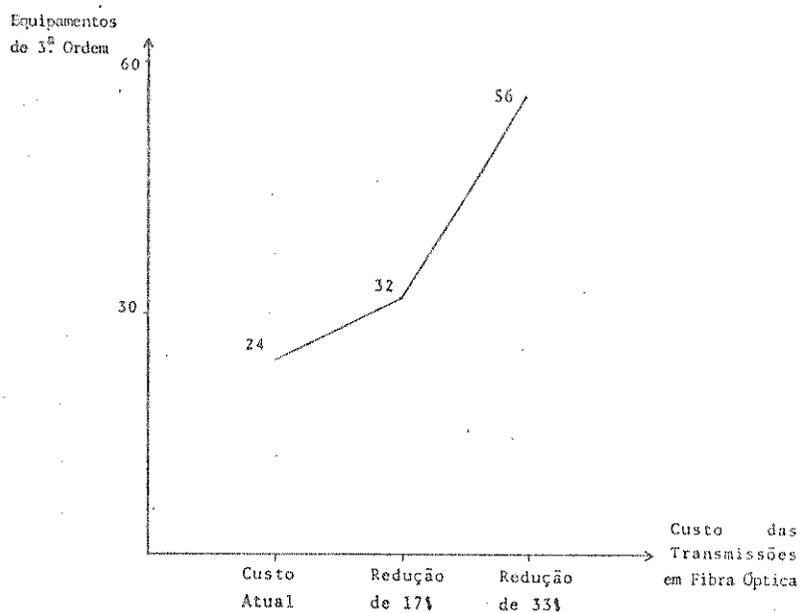


Figura V.1. - Custos de Transmissão em PCM e Fibra Óptica.

mentos de 3.<sup>a</sup> ordem, um para cada extremidade. Na alternativa com barateamento de 33%, dois arcos escoam um fluxo de 32 sistemas PCM, sendo necessários em cada um, 4 equipamentos de 3.<sup>a</sup> ordem.

A quantidade de sistemas roteados no plano PTF é bastante sensível às reduções de custo, Fig. V.2., e verifica-se um considerável aumento na quantidade de equipamentos necessários para transmissão em fibra óptica.

Com o barateamento de custos, os arcos de fibra óptica com menor comprimento passam a se tornar mais competitivos, havendo uma redução no comprimento médio dos arcos utilizados. Isto provoca uma redução na relação PAR x KM de fibra óptica/equi



Figuras V.2. - Aumentos na Quantidade de Sistemas Roteados e Equipamentos necessários para Transmissão em Fibra Óptica.

pamentos de 3.<sup>a</sup> ordem, como pode ser observado na Fig. V.3. Por outro lado, há um aumento na relação PAR x KM de fibra óptica/repetidores ópticos, Fig. V.4, porque os arcos com menos de 10 Km. não necessitam tais equipamentos.

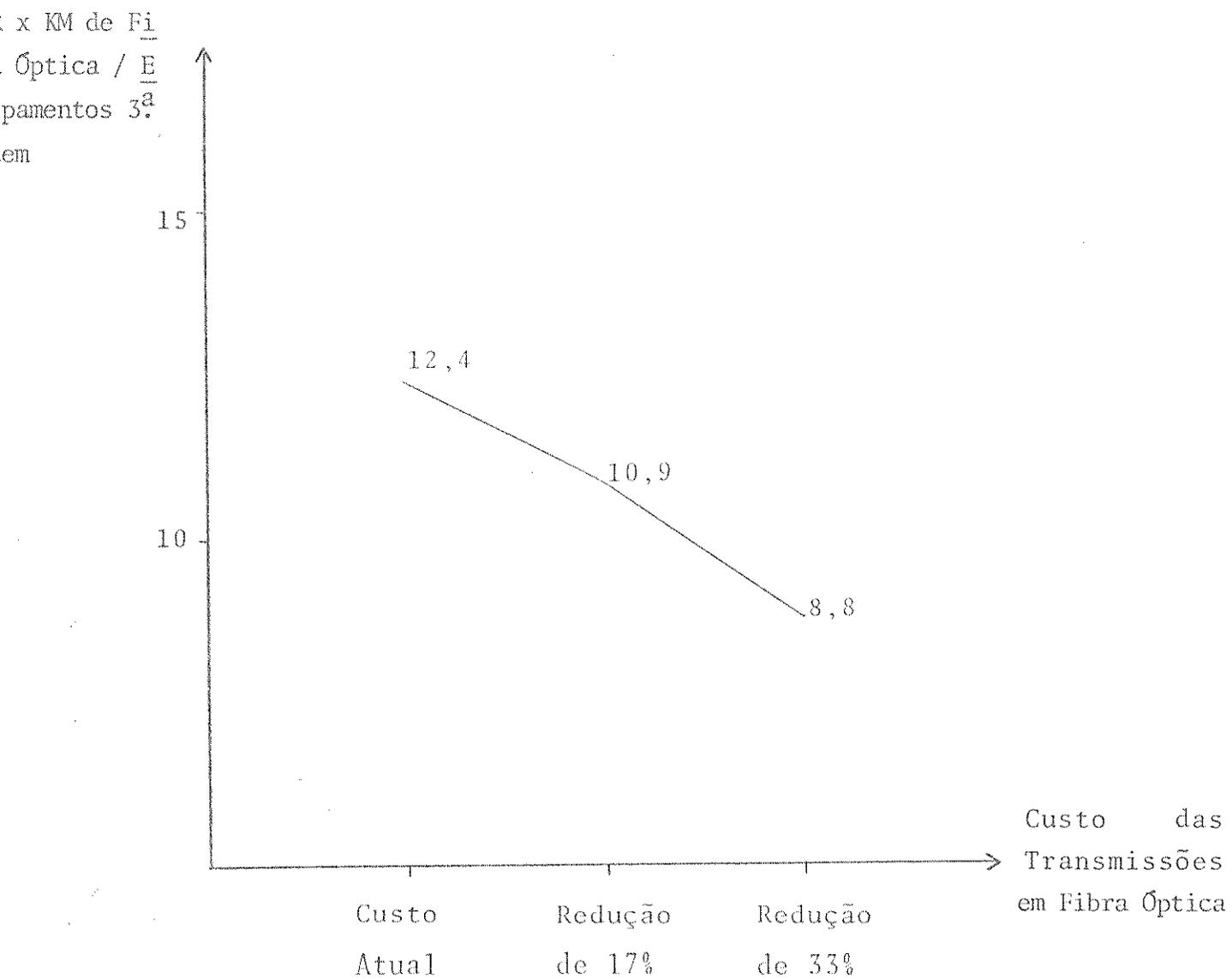


Figura V.3. - Redução na Relação PAR x KM de Fibra Óptica/Equipamentos de 3.<sup>a</sup> Ordem.

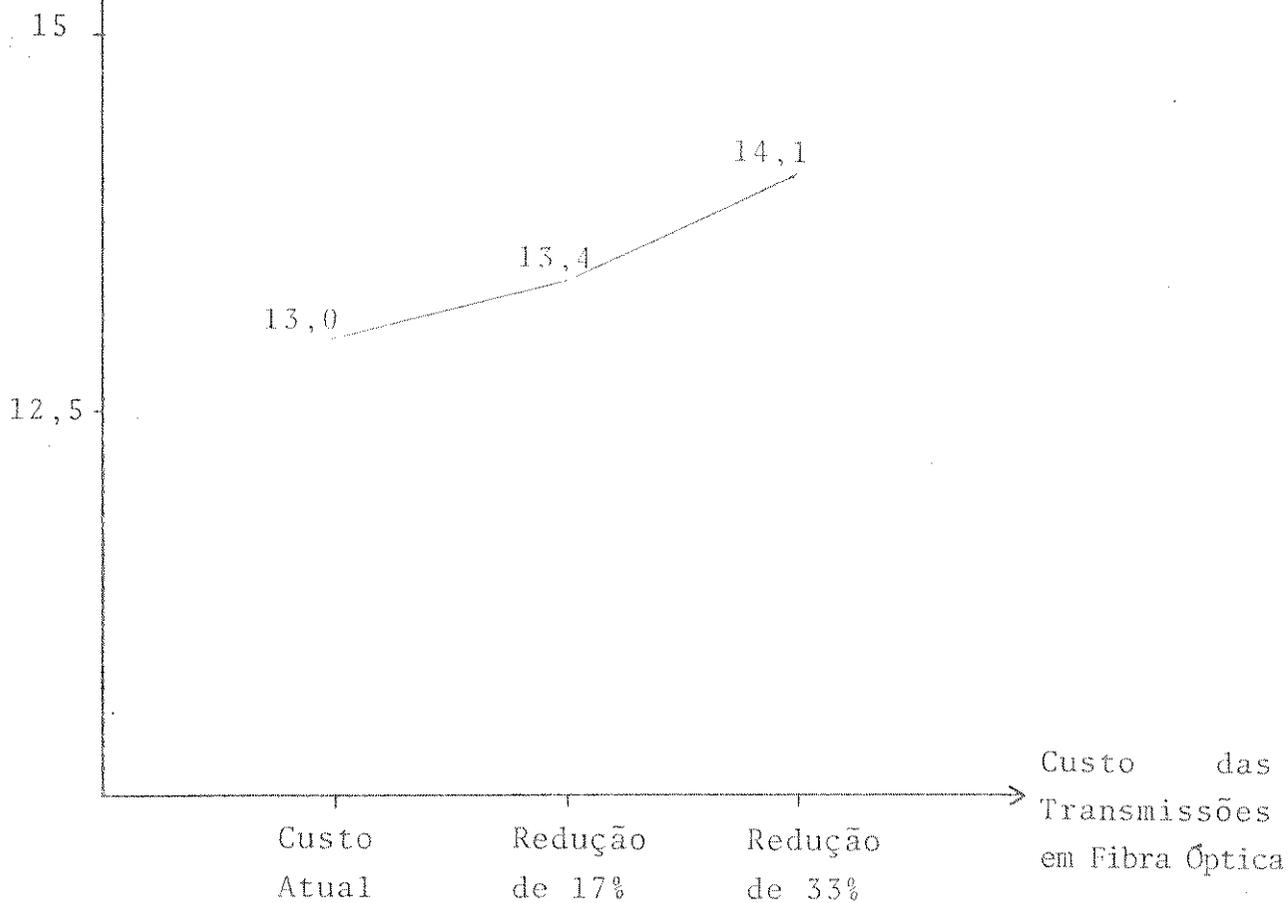


Figura V.4. - Aumento na Relação PAR x KM de Fibra Óptica/Repetidores Ópticos.

Há rotas utilizando o plano PTF, que também tem um trecho no plano PTP. Considerando a relação entre os comprimentos em cada plano (comprimento no plano PTP/comprimento no plano PTF), aquelas em que este valor é pequeno, são mais sensíveis às reduções de custo nas transmissões em fibra óptica. Assim, é possível que mesmo tendo um comprimento total maior, uma rota com uma pequena relação passe a escoar fluxo de outra a medida que forem barateados os custos de transmissão no plano PTF, por ter seu custo total reduzido mais rapidamente.

### V.3 CRITÉRIOS PARA ESCOLHA DE PORTAS

A utilização deste modelo, implica na escolha prévia por parte do planejador, das centrais que serão portas. Com o objetivo de fornecer subsídios a esta atividade foram feitos estudos para um mesmo número de portas, escolhidas segundo diferentes critérios conforme definido abaixo:

#### 1. Critério de Grau :

Classificação das estações em ordem decrescente, de acordo com o número de galerias diretamente ligadas a cada uma.

#### 2. Critério de Demanda:

Classificação das estações em ordem decrescente, de acordo com a soma total das demandas originadas ou destinadas a cada uma.

#### 3. Critério combinado de Grau e Demanda:

Classificação das estações em ordem decrescente, de acordo com sua posição nos critérios anteriores. É utilizada a mesma ponderação para grau e demanda.

Foram consideradas as dez e quinze primeiras classificadas em cada critério. Os resultados são apresentados nas tabelas V.2. e V.3. respectivamente.

Nos dois casos o critério de demanda levou a melhores resultados, e deve ser sempre considerado pelo planejador na escolha dos pontos de mudança de hierarquia.

A diferença de resultados para 15 portas é pequena porque 13 são comuns a todos os critérios.

	CRITÉRIOS		
	GRAU	DEMANDA	GRAU E DEMANDA
Custo Cz\$	1368.10 <sup>5</sup>	1184.10 <sup>5</sup>	1214.10 <sup>5</sup>
Sistemas roteados	461	505	507
Arcos não Nulos	24	29	30
Sistemas 3. <sup>a</sup> Ordem	68	84	80
Sistemas 2. <sup>a</sup> Ordem	236	266	268
PAR x KM Fibra Óptica	496,4	774,6	644,3
Repetidores Ópticos	32	56	45
Portas Consideradas	FLO ARC BOT BRB RAM CIN ENN MAR LEB IPA	FLO ARC BOT BRB RAM CIN END PRA CGD CDS	FLO ARC BOT BRB RAM CIN END MAR ENN CDS

Tabela V.2. - Resultados com 10 Portas.

	CRITÉRIO		
	GRAU	DEMANDA	GRAU E DEMANDA
Custo Cz\$	1044.10 <sup>5</sup>	1032.10 <sup>5</sup>	1038.10 <sup>5</sup>
Sistemas roteados	535	556	536
Arcos não Nulos	41	42	41
Sistemas 3 <sup>a</sup> Ordem	96	96	94
Sistemas 2 <sup>a</sup> Ordem	290	302	288
PAR x KM Fibra Óptica	897,8	853,6	864,9
Repetidores Ópticos	65	64	63
Portas Consideradas	FLO ARC BOT BRB RAM CIN MAR CDS END ENN LEB PRA CGD IPA SCR	FLO ARC BOT BRB RAM CIN MAR CDS END ENN LEB PRA CGD LEM TIR	FLO ARC BOT BRB RAM CIN MAR CDS END ENN LEB PRA CGD IPA TIR

Tabela V.3. - Resultados com 15 Portas.

#### V.4 CONSIDERAÇÕES COMPUTACIONAIS

Para facilidade de análise, os programas computacionais foram divididos em duas partes, conforme descrito a seguir. Não se considerou a emissão de relatórios, por estar diretamente relacionada com as necessidades de cada usuário.

Parte 1: Determinação de caminhos entre Estações e Portas , e preparação para Otimização.

Parte 2: Otimização.

A tabela V.4 a seguir, apresenta os tempos de CPU para cada parte do programa. Os tempos de otimização se referem a aplicação da sequência de heurísticas 1.3.2.3.2.3.2.3.

	TEMPOS EM MINUTOS	
	Rio de Janeiro 15 Portas	São Paulo 9 Portas
Parte 1	3,4	41,8
Parte 2	6,3	29,1

Tabela V.4. - Tempos de CPU para Execução dos Programas.

Para efeito de comparação, foram resumidos na tabela V.5. alguns dados sobre as redes do Rio de Janeiro e São Paulo.

As diferenças nos tempos de CPU da parte 2 decorrem do maior porte da rede de São Paulo, e da maior quantidade de produtos nesta rede. Embora estes fatores também afetem os tempos da parte 1, foi observada uma inadequação no programa que determina caminhos  $\epsilon$ -mínimos, o que provoca consideráveis aumentos nos tempos de CPU em redes de grande porte. Este programa deverá ser alterado para evitar este problema. Isto não foi efetuado neste trabalho por não fazer parte do seu corpo central.

A rede de São Paulo já apresenta um porte grande para a aplicação dos recursos computacionais disponíveis, e com a in

	Rio de Janeiro	São Paulo
Número de Estações	33	44
Número de Arcos	42	81
Número de Produtos	145	426

Tabela V.5. - Parâmetros das Redes do Rio de Janeiro, e São Paulo.

clusão de novas centrais e portas, serão necessários aperfeiçoamentos nos programas, para torna-los adequados às suas dimensões.

Na tabela V.6. é feito um comparativo dos tempos de CPU para a rede de São Paulo, com diferentes quantidades de portas.

	TEMPOS EM MINUTOS	
	São Paulo 9 Portas	São Paulo 14 Portas
Parte 1	41,8	42,2
Parte 2	29,1	33,4

Tabela V.6. - Comparação dos Tempos de CPU para diferentes Quantidades de Portas.

A diferença entre os tempos de CPU para 9 e 14 portas não foi expressiva, mas com a inclusão de um maior número de pontos de mudança de hierarquia, as diferenças podem se tornar significativas, devido ao rápido crescimento do número de arcos ( $C_n^2$ ), com um conseqüente aumento nas dimensões do problema.

Com relação ao número de iterações, são verificadas algumas diferenças entre as seqüências 1-2-3 e 1-3-2. Quando a heurística 3 é aplicada após a 2, o número de iterações é bastante menor do que se ela fosse aplicada após a 1. O mesmo não ocorre quando se aplica a heurística 2 após a 3.

As tabelas V.7 e V.8 apresentam o número de iterações para as duas seqüências. Foram consideradas as redes do Rio de Janeiro e São Paulo Figuras III.16 e V.5.

	Número de Iterações em Cada Heurística
Seqüência 1-2-3-2-3-2-3	212-96-8-5-3-2-2
Seqüência 1-3-2-3-2-3-2-3	212-44-82-2-5-4-2-2-

Tabela V.7. - Número de Iterações para Rede de São Paulo com 14 Portas.

	Número de Iterações em Cada Heurística
Seqüência 1-2-3-2-3-2-3	59-60-4-3-56-2-46
Seqüência 1-3-2-3-2-3-2-3	59-24-42-3-3-56-2-46

Tabela V.8. - Número de Iterações para Rede do Rio de Janeiro com 15 Portas.



Na tabela V.8., o grande número de iterações nas últimas heurísticas da sequência (56 e 46 iterações), se deve a mudanças de base com bloqueio nulo.

A aplicação das heurísticas em sequência requer alguns cuidados, porque elas tem pontos de quebra em locais diferentes, e ao se aplicar uma após a outra algumas variáveis podem perder a característica não básica, e ficar fora de um ponto de quebra. Para se evitar isto deve-se criar, sempre que necessário, pontos de quebra com inclinação desprezível para estas variáveis.

#### V.5 PROPOSTA DE ROTEAMENTO PARA AS CIDADES DO RIO DE JANEIRO E SÃO PAULO

A seguir são apresentados os resultados obtidos para as redes do Rio de Janeiro com 15 portas, Fig. III.16, e São Paulo com 14 portas, Fig. V.5. Nos dois casos foi utilizada a sequência 1-3-2-3-2-3.

Foram considerados os dados de custo do Anexo II.

##### a) Roteamento em Fibra Óptica para o Rio de Janeiro:

Na tabela V.9 são fornecidos os fluxos escoados em cada arco de fibra óptica.

Também são fornecidos os dados de custo e os equipamentos necessários ao roteamento indicado.

ARCO	COMPRIMENTO KM	FLUXO SISTEMAS PCM
1 ARC-END	15,1	16
2 ARC-BRB	23,4	16
3 ARC-LEB	16,5	12
4 ARC-PRA	14,2	16
5 ARC-CDS	35,4	16
6 BOT-BRB	29,4	14
7 BOT-ENN	17,2	16
8 BOT-CDS	41,4	12
9 MAR-BRB	17,7	16
10 MAR-ALV	38,3	16
11 MAR-CDS	29,7	15
12 BRB-ALV	20,5	14
TOTAL DE SISTEMAS		179

Tabela V.9. - Fluxo em cada Arco - Rio de Janeiro.

Custo Total . . . . .	Cz $5,3 \times 10^7$
Custo Fibra Óptica . . . . .	Cz $1,6 \times 10^7$
Equipamentos de 3ª Ordem . . . . .	24
Equipamentos de 2ª Ordem . . . . .	92
PAR x KM de Fibra Óptica . . . . .	298,7
Repetidores Ópticos . . . . .	23

b) Roteamento em Fibra Óptica para São Paulo

Na tabela V.10 são fornecidos os fluxos escoados em cada arco de fibra óptica.

ARCO	COMPRIMENTO KM	FLUXO SISTEMAS PCM
1 PD-AM	22,1	16
2 PD-PE	18,4	10
3 PD-SNE	32,1	10
4 PA-SNE	24,5	16
5 BG-AM	18,7	28
6 BG-SNE	27,6	12
7 LI-CB	11,3	16
8 LI-SNE	23,4	15
9 CB-AM	11,5	48
10 AM-SNE	23,2	10
11 PE-SM	16,2	12
TOTAL DE SISTEMAS		193

Tabela V.10. - Fluxo em cada Arco - São Paulo

A seguir são indicados os dados de custo e equipamentos necessários ao roteamento indicado na tabela V.10.

Custo Total . . . . .	Cz 9,2 . 10 <sup>7</sup>
Custo Fobra Óptica . . . . .	Cz 1,6 . 10 <sup>7</sup>
Equipamentos 3 <sup>a</sup> Ordem . . . . .	28
Equipamentos 2 <sup>a</sup> Ordem . . . . .	100
PAR x KM de Fibra Óptica . . . . .	270,7
Repetidores Ópticos . . . . .	21

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

A metodologia descrita utilizando a formulação arco rota, permite o estudo do roteamento digital com utilização de fibras ópticas. Alternativas podem ser facilmente geradas para diferentes localizações destes equipamentos, ou para variações em outros parâmetros do problema como o número de rotas oferecidas a cada produto, simplificando consideravelmente o trabalho do planejador.

Para isto são utilizadas heurísticas que linearizam a estrutura de custos discreta das transmissões em fibra óptica, e permitem resolver o problema utilizando-se técnicas de programação linear. Estas heurísticas devem ser aplicadas em sequência, começando por aquelas em que a penalização é menos severa, conforme descrito no capítulo III. Observa-se uma redução nos custos reais do problema a medida que são aplicadas as heurísticas. O comprimento de sequência depende do grau de competição existente entre os arcos de fibra óptica. As penalizações individuais podem levar a resultados melhores, mas com um esforço computacional maior.

As análises efetuadas no capítulo IV demonstram que o aumento no número de rotas oferecidas ao escoamento de cada produto, possibilita um melhor aproveitamento de eventuais folgas nos equipamentos para transmissão em fibra óptica. Por outro lado, ao se oferecer mais rotas para todos os produtos, as dimensões do problema podem aumentar consideravelmente. Assim, sugere-se um tratamento diferenciado a cada produto, de acordo com o número de portas no caminho mínimo, e o comprimento dos demais caminhos. Em estudos de evolução da rede, a medida que se aumenta o número de portas, devem ser oferecidas a cada produto as mesmas rotas utilizadas anteriormente, acrescentando-se as novas decorrentes do aumento no número de pontos de mudança de hierarquia. Isto evita que se obtenha soluções de pior qualidade.

Nos estudos efetuados, observou-se que a utilização de equipamentos para transmissão em 34 M b/s com fibra óptica cres

ce rapidamente, com a diminuição de seus custos em relação aos equipamentos PCM, conforme resultados apresentados no capítulo V. Mantida a tendência atual de redução nesses custos, as cidades brasileiras de médio porte também se tornarão potenciais candidatas a utilização de fibras ópticas. Assim, com a crescente utilização destes equipamentos, em breve serão necessários modelos que permitam estudar a evolução de redes onde já existe roteamento em fibras ópticas.

Devem ser estudadas formulações alternativas que permitam solucionar os problemas decorrentes do número de rotas oferecidas a cada produto, e também possibilitem a consideração de disponibilidade de equipamentos para transmissão em 34 M b/s em cada galeria da rede.

Acreditamos que o modelo utilizado, e os resultados apresentados devem servir de base para estas evoluções futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GARCIA, A.S., "Planejamento do Entrocamento em Redes Telefônicas Urbanas em processo de Digitalização", Tese de Doutorado em elaboração, FEE, UNICAMP.
- [2] RAPP, Y., "Planning of Junction Network in a Multi-Exchange Area: General Principles", Ericsson Technics , N° 1, pp. 77-130, 1964.
- [3] WILKINSON, R.I., "Theories for Tool Traffic Engineering in the USA", Bell Systems Technical Journal, vol. 35, N° 2, pp. 421-514, 1956.
- [4] WALLSTROM, B. "Methods for Optimizing Alternative Routing Networks", Ericsson Technics, N° 1, 1969.
- [5] SOLON, L.R., TIBA, C.R., UEHARA, J.M., "Otimização do Entrocamento Local-OTELLO", Relatório Interno, TELESP , 1981.
- [6] CARLSON, C.M. Fº, FERNANDES, J.F.R., TAVARES, H.M.F., YAMAKAMI, A., "ECIC - Programa Estimador do Custo de Interligação de Centrais", Relatório Técnico, RT-11, Convênio UNICAMP/TELEBRÁS, Redes Digitais, 1982.
- [7] MORENO, A.O., "Planejamento de Redes Telefônicas: Determinação do Circuito de Junção", Tese de Mestrado, ITA , 1974.
- [8] RAPP, Y., "Planning of Junction Network in a Multi-Exchange Area: Extensions of the Principles and Applications" , Ericsson Technics, N° 2, pp.187-240, 1965.

- [9] ROBIN, G., TREVES, S.R., "Pragmatic Introduction of Digital Switching and Transmission in Existing Networks", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-27, N° 7, Julho 1979.
- [10] TELEBRÁS, Diretoria de Planejamento e Engenharia, Departamento de Planejamento, Divisão de Desenvolvimento, "Transição da Rede Analógica para a Rede Digital", Março, 1984.
- [11] OKAZAKI, H., "Planning an Urban Area Digital Telephone Junction Network", NEC Res. and Develop., N° 73, pp. 43-52, Abril, 1984.
- [12] ELSNER, W.B., "Dimensioning Trunk Groups for Digital Networks", The Bell System Technical Journal, Vol. 59, N° 7, pp. 1123-1138, setembro, 1980.
- [13] CLOSE, W., DARLING, P., O'NEILL, P. "Development of the Australian Integrated Digital Network and Strategy Towards ISDN", ISS'84, Florence, Sessão 21C, Artigo 2, Maio, 1984.
- [14] LABANDEIRA, A., "Digitalization of Telephone Network in a Large City", ISS'84, Florence, Sessão 21C, Artigo 5, Maio, 1984.
- [15] COMBOT, J.P., TSUI, M.S.C., WEIHMABER, R., "Optimal Digital Switching Introduction into the Local Network", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-29, N° 10, pp. 1446-1454, Outubro, 1981.
- [16] COMBOT, J.P., EPSTEIN, N., "The Introduction of Digital Switching to the Local Network", IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-27, N° 7, pp. 1056-1064, Julho 1979.

- [17] CAMPBELL , L.H. HILING, S.F., IMHOFF, D.M., LAING, R.F., SESKO, R.C., "EPS-2, Planning for New Services in a Multi-Technology Network", Int. Symp. on Subscriber Loops and Services, Nice, Outubro, 1984.
- [18] FORD, L.R., FULKERSON, D.R., "Flows in Networks", Princeton University Press, New Jersey, 1962.
- [19] BIM, T.M.F., GARCIA, A.S., RIBEIRO, R.V., "Porrus - Programa de Otimização do Roteamento em Redes Urbanas com Segurança", Relatório Técnico, RT-23, Convênio UNICAMP/TELEBRÁS, Redes Digitais, Outubro, 1983.
- [20] LASDON, L.S., "Optimization Theory for Large Systems", Macmillan, New York, 1970.
- [21] McCALLUN, C.J. JR., "A Generalized Upper Bounding Approach to a Communications Network Planning Problem", Networks, 7, pp. 1-23, 1977.

ANEXO I

CAMINHOS  $\epsilon$ -MÍNIMOS

A seguir é apresentado o algoritmo para determinação de caminhos  $\epsilon$ -mínimos. Este material baseia-se na apostila "Otimização em Grafos", de G. Authiê, publicada em 1976 na UNICAMP.

Considerando-se um caminho mínimo  $c$  entre dois nós de uma rede, com comprimento  $D(c)$ , o conjunto de caminhos cujo comprimento é menor ou igual a  $D(c) + \epsilon$ ,  $\epsilon > 0$ , é chamado de conjunto de caminhos  $\epsilon$ -mínimos.

$\epsilon$  também pode ser definido como uma porcentagem de  $D(c)$ .

Algoritmo:

1. Calcular o caminho mínimo entre os nós.
2. Reconstituir todos os caminhos entre os dois nós. Adotando-se um algoritmo do tipo Branch and Bound, o procedimento começa pelo nó inicial (raiz), e são percorridos todos os caminhos da rede a partir da raiz. A cada nó atingido é avaliado o comprimento desde a raiz. A exploração é interrompida nos caminhos que atingiram um comprimento maior que  $D(c) + \epsilon$ .
3. Se o nó considerado é o destino, então foi obtido um caminho  $\epsilon$ -mínimo.

Observações:

- . Um caminho não pode passar duas vezes pelo mesmo nó.
- . No modelo considerado neste trabalho, todos os arcos tem comprimento maior ou igual a zero.
- . Quando não se dispuser de um caminho mínimo, pode-se atribuir zero para este valor, e escolher um  $\epsilon$  suficientemente grande para conter o número necessário de caminhos entre os nós considerados.

ANEXO II

CUSTO DOS EQUIPAMENTOS

A seguir são apresentados os custos considerados:

- Equipamentos para transmissão em PCM.

- . PAR x KM de cabo                   Cz2.200,00
- . Regenerador para 2M b/s   Cz5.200,00

- Equipamento para transmissão em Fibra Óptica.

- . PAR x KM de Fibra Óptica   Cz 15.800,00
- . Repetidor Óptico               Cz135.000,00
- . MUX 3<sup>a</sup> Ordem                   Cz 63.800,00
- . TL 3<sup>a</sup> Ordem                    Cz104.000,00
- . MUX 2<sup>a</sup> Ordem                   Cz 44.500,00

Fonte: TELERJ, 10/86.