

1. Publicação nº <i>INPE-4504-PRE/1259</i>	2. Versão	3. Data	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>CD/LAC</i>	Programa <i>POPES</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA HEURÍSTICA MANUAL</i> <i>PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS</i>			
7. C.D.U.: <i>519.816:556</i>			
8. Título <i>UMA PROPOSTA METODOLÓGICA PARA DAR SUBSÍDIO À TOMADA DE DECISÃO RELATIVA À DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DE CARROS-PIPAS</i>		10. Páginas: <i>53</i>	
		11. Última página: <i>45</i>	
9. Autoria <i>José Iram Mota Barbosa</i> <i>Iamara Virgínia de Mendonça Motta</i> <i>Horácio Hideki Yanasse</i>		12. Revisada por <i>Paulo Renato de Moraes</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por <i>Marco Antonio Haupp</i> <i>Dir. Ger. Geral</i>	
14. Resumo/Notas <i>Apresenta-se uma proposta metodológica para o controle da distribuição de água por carros-pipas em situações emergenciais que utiliza modelos matemáticos e procedimentos heurísticos. Com o uso desta metodologia obtém-se subsídios à tomada de decisão relativa ao planejamento e à programação do transporte de água.</i>			
15. Observações			

ABSTRACT

A methodological procedure is presented to monitor water distribution by special delivery trucks in periods of extreme droughts. This methodology uses mathematical models and heuristic procedures. It gives support to the decision making process concerning water transportation planning and scheduling.

•
• •

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	<i>x</i>
LISTA DE TABELAS.....	<i>xi</i>
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MODELO AGREGADO.....	7
3. MODELO OPERACIONAL.....	10
4. EXEMPLO ILUSTRATIVO.....	13
5. ROTEAMENTO.....	33
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

x

•

• •

LISTA DE FIGURAS

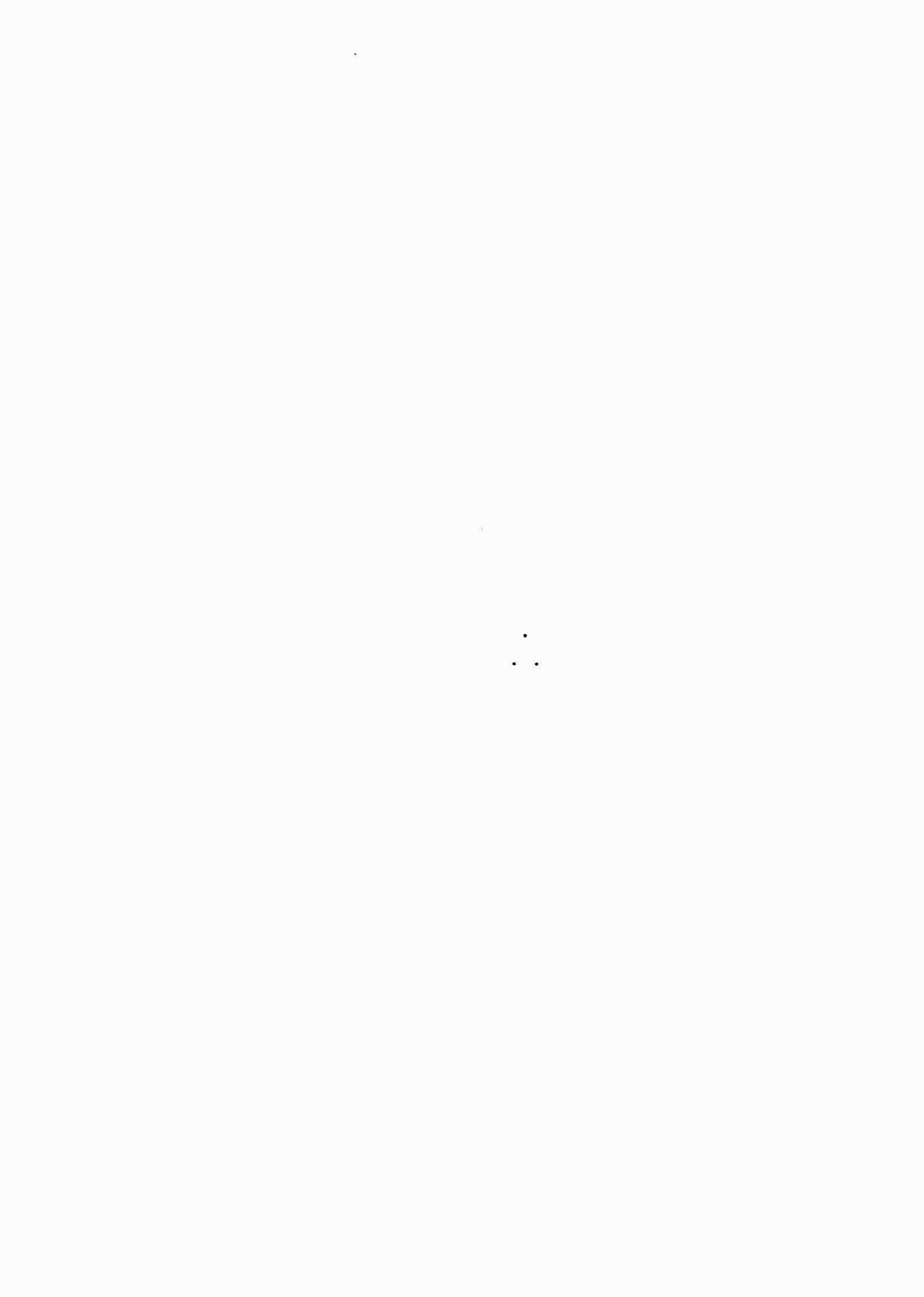
	<u>Pág.</u>
1.1 - Estratégia a ser adotada.....	4
2.1 - Mapa da região de Redenção (Ceará) e Acarapê.....	8
2.2 - Grafo parcial representativo da região de Redenção (Ceará) e Acarapê.....	9
4.1 - Rede que caracteriza o problema de Quixadá-CE.....	15
4.2 - Solução apresentada pelo modelo agregado.....	18
4.3 - Solução sem o nó de transbordo 17.....	23
4.4 - Solução após atualizar T nos nós F3 e 1.....	25
4.5 - Solução com 6 motos-bombas instaladas em F3.....	30
5.1 - Passos consecutivos do método geométrico.....	35
5.2 - Agrupamento dos pontos de demanda.....	37
5.3 - Alocação dos pontos de demanda aos depósitos.....	39

•
• •



LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 - Localidades com suas respectivas demandas.....	16
4.2 - Distribuição das motos-bombas nos nós que abastecem os veículos.....	17
4.3 - Determinação das rotas.....	19
4.4 - Detalhamento das rotas constantes na Tabela 4.3.....	20
4.5 - Conjunto de rotas obtido da Figura 4.3.....	24
4.6 - Rotas depois de atualizados os tempos.....	26
4.7 - Detalhamento das rotas constantes da Tabela 4.6.....	27
4.8 - Veículos requeridos para implementar a solução mostrada na Figura 4.4.....	28
4.9 - Rotas determinadas a partir da Figura 4.5.....	31
4.10 - Detalhamento das rotas constantes na Tabela 4.9.....	32



1. INTRODUÇÃO

Durante o ano de 1983 o Governo do Estado do Ceará procurou o INPE em busca de apoio técnico e científico que pudesse auxiliá-lo na solução de diversos problemas enfrentados, decorrentes da situação complexa e emergencial de seca que se abatia sobre aquele Estado.

Naquela ocasião foram propostas algumas atividades de apoio à administração daquele Estado, no sentido de fornecer subsídios para a implantação dos planos estratégicos de atendimento às vítimas da seca.

Neste relatório tem-se como objetivo divulgar uma possível maneira de obter informações complementares acerca da distribuição de água através de carros-pipas que, conseqüentemente, podem dar subsídios à tomada de decisão relativa ao planejamento e à programação do transporte de água, no caso da ocorrência de uma nova situação emergencial de seca. Modelos e procedimentos são sugeridos, baseados nos trabalhos desenvolvidos no INPE por Barbosa (1985) e Motta (1986), os quais utilizam ferramentas da pesquisa operacional.

O problema de transporte de água focalizado refere-se a situações reais vividas em épocas de grande seca, onde a partir de inúmeras fontes (poços, açudes, reservatórios etc) transporta-se água através de carros-pipas para um conjunto de localidades (pontos de entrega).

O esquema outrora montado para esse transporte era muito deficiente em informações e, conseqüentemente, impedia que os órgãos governamentais competentes tivessem uma visão global da situação. Como consequência, o gerenciamento dos escassos recursos hídricos disponíveis tornava-se difícil de ser melhorado.

Não havia informações disponíveis ao nível agregado quanto à quantidade de água transportada de uma fonte

para os pontos de demanda, nem quanto à distância percorrida para levar esta água das fontes a seus pontos de distribuição. Tais dados eram gerados localmente e serviam apenas às pessoas envolvidas na distribuição de água para cada região, não sendo repassados aos níveis hierárquicos superiores, o que dificultava o estabelecimento de parâmetros de avaliação do sistema. Por exemplo, não havia dados suficientes para o cálculo do custo do metro cúbico de água transportada numa situação emergencial.

Parâmetros de avaliação dão subsídios à tomada de decisão, pois fornecem informações importantes que levam o decisor a adotar medidas corretivas e também alertam para a necessidade de efetuar investimentos na infra-estrutura de abastecimento de água.

O primeiro modelo matemático, desenvolvido em Barbosa (1985), permite colher informações ao nível agregado. Ele foi elaborado levando em conta diversas características reais observadas durante a última seca, numa região onde o sistema de abastecimento de água através de carros-pipas foi implementado. Estas características estão listadas a seguir:

a) Modos diferenciados de transporte

Existiam basicamente dois tipos de veículos de transporte, o carro-pipa e a jamanta, ambos com capacidades e condições de trabalho diferentes. As jamantas não podiam trafegar em vias não-asfadas, ao passo que os carros-pipas não tinham restrições deste tipo. Os custos operacionais destes veículos eram diferentes.

b) Restrições de abastecimento

Apenas um número limitado de caminhões podia a bastecer-se simultaneamente numa mesma fonte, limitado geral mente pelo número de moto-bombas instaladas.

c) Possibilidade de entregas compartilhadas

O transporte de água da fonte ao consumidor podia ser feito por tipos diferentes de veículos, ou seja, transportava-se a água de uma fonte a uma certa localidade intermediária onde, então, um outro tipo de veículo recebia esta água e a transportava até o destino final.

d) Custos de distribuição

O custo da água distribuída era simplesmente o custo referente ao transporte da fonte ao ponto de demanda. Tal custo era dado pelo total de quilômetros rodados vezes o custo operacional por quilômetro rodado associado a cada tipo de veículo. Numa situação emergencial a água destina-se ao consumo humano, sem fins lucrativos. O critério de minimização dos custos de transporte de água de modo a atender à demanda existente para ser o mais apropriado.

A filosofia adotada para focalizar o problema baseia-se em aspectos teóricos de sistemas e modelos hierárquicos. Com isto, retratam-se os aspectos hierárquicos observados na administração pública e objetiva-se uma simplicidade de operação e manutenção, assim como uma versatilidade de aplicação.

Ao nível de Secretaria, propõe-se um modelo agregado que, além de fornecer subsídios para este nível hierárquico, define os recursos para os níveis subalternos correspondentes aos órgãos encarregados da operação do sistema.

A Figura 1 ilustra esta estratégia descrita anteriormente.

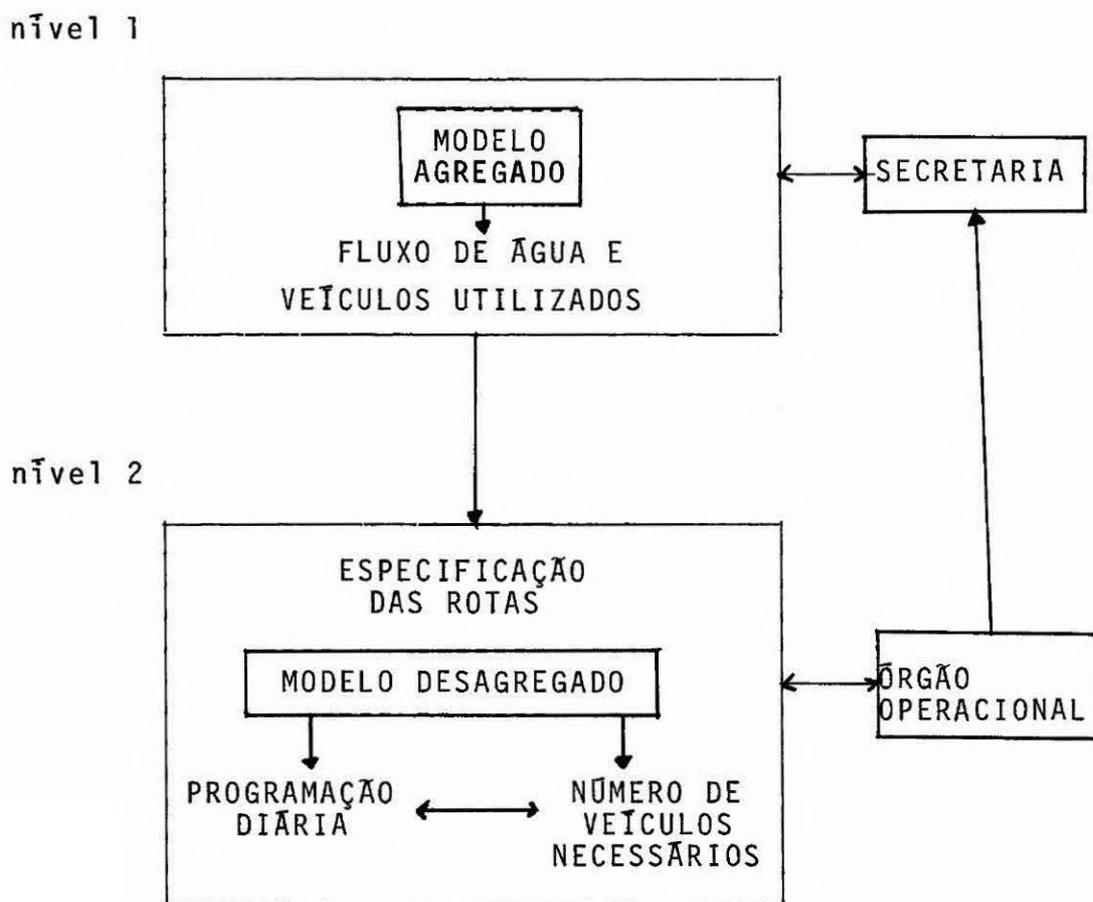


Fig. 1.1 - Estratégia a ser adotada.

O problema geral foi particionado hierarquicamente em dois subproblemas e modelado como tal. No primeiro nível, sugere-se um modelo de programação linear e no segundo, a utilização de heurísticas para a alocação de rotas de transporte aos veículos. Através de simulação são feitos alguns ajustes de parâmetros de tempo no modelo.

Uma vez implementado, o modelo pode ser utilizado de maneira conveniente de modo a fornecer uma série de informações de interesse aos tomadores de decisão. Algumas delas são:

- possibilidade de ter um controle maior da quilometragem percorrida pelos carros-pipas;
- sugestão de um roteiro diário para o transporte de água pa

ra cada carro-pipa;

- dimensionamento da frota necessária para abastecer toda a população de uma determinada região dentro de um determinado horizonte de planejamento;
- custo da água transportada em cada ponto de demanda;
- quantidade de água a ser retirada de cada fonte de abastecimento, o que permite prever sua vida útil e planejar a remoção das motos-bombas para outras fontes;
- indicação de locais potencialmente interessantes para a construção de tanques de armazenamento para o transbordo da água, levando-se em conta apenas o critério de custo de transporte de água;
- possibilidade de simular o efeito da distribuição no abastecimento quando uma determinada fonte seca;
- possibilidade de estimar o benefício em termos de custo de transporte de água no caso de alguns trechos de rodovia serem asfaltados.

Para a implementação do modelo são necessários vários dados, tais como:

- a demanda de água (por exemplo, em metros cúbicos) requerida em cada localidade durante o horizonte de planejamento considerado (por exemplo, um mês);
- a capacidade de carga de cada tipo de veículo;
- a ligação de fontes/nós de transbordo com os pontos de demanda e todas as distâncias (em quilômetros, por exemplo) entre pontos adjacentes, bem como as condições das estradas (asfaltadas ou não);
- o custo operacional (por quilômetro) de cada tipo de veículo;
- o tempo de carregamento/descarregamento de cada tipo de veículo por uma moto-bomba em cada localidade (fonte ou ponto de transbordo);

- o número de motos-bombas instaladas nas fontes ou nos nós de transbordo;
- o limite de horas trabalhadas por uma moto-bomba durante o horizonte de planejamento.

Para o modelo operacional, admite-se que exista uma restrição quanto à jornada de trabalho dos motoristas dos carros-pipas e sejam conhecidas as velocidades médias de cada tipo de veículo em cada tipo de estrada.

A segunda situação, focalizada em Motta(1986), considera a distribuição de água a um nível mais microscópico, ou seja, a distribuição por pedidos em uma cidade. Vários destes pequenos pedidos são necessários para preencher a capacidade de um carro-pipa. A cada dia, uma lista de pedidos acumulados do dia anterior é distribuída aos motoristas dos carros-pipas para os pedidos serem atendidos nesse dia.

Com os mesmos objetivos anteriores, ou seja, a distribuição de água ao mínimo custo, sugere-se alguns procedimentos heurísticos para o roteamento destes veículos.

O cuidado na elaboração desses procedimentos levou em conta diversas dificuldades que eventualmente a implementação de qualquer sistema computadorizado poderia ocasionar. Procurou-se estabelecer um procedimento simples, manual e de fácil aprendizado. O resultado foi um procedimento que leva bastante em conta a distribuição geométrica dos pontos de demanda.

Para fazer uso destas heurísticas, são necessários como dados de entrada um mapa em escala da cidade, a localização dos reservatórios ou das fontes neste mapa e dos pontos de demanda, juntamente com as quantidades demandadas e a capacidade do carro-pipa. Com o uso de alguns procedimentos heurísticos, estabelecem-se rotas viáveis de distribuição de água que sugerem uma possível solução ao órgão opera

cional encarregado da distribuição e, conseqüentemente, fornece uma estimativa do total de quilômetros rodados necessários para fazer toda a distribuição de água na cidade.

Uma explicação adicional dos modelos e procedimentos heurísticos desenvolvidos é apresentada a seguir.

2. MODELO AGREGADO

O modelo agregado é um problema de programação linear, montado em cima de um grafo correspondente a um esquema representativo de rodovias, pontos de demanda e fontes de água da região que está sendo focalizada.

Os nós do grafo representam as fontes de abastecimento, as localidades de transbordo de água, os reservatórios, entroncamentos e pontos de demanda. Os arcos que unem os pares de nós neste grafo representam as rodovias existentes entre as duas localidades correspondentes a cada par de nós, sejam elas asfaltadas ou não. Em outras palavras, o grafo representa basicamente as localidades de interesse para o problema que está sendo estudado e o sistema rodoviário existente. A título de ilustração é apresentado na Figura 2.1 um mapa da região de Redenção e Acarapé no Estado do Ceará e, na Figura 2.2, um grafo parcial representativo desta região.



- SINAIS CONVENCIONAIS**
- RODOVIAS**
- Transitável todo ano:
 - Revestimento sólido, duas ou mais vias
 - Revestimento sólido ou ligeiro, duas ou mais vias
 - Revestimento sólido, uma via
 - Revestimento cético ou ligeiro, uma via
 - Transitável em tempo bom e seco, revestimento sólido
 - Caminho, Trilho
 - Preto de estrada: federal, estadual

Fig. 2.1 - Mapa da Região de Redenção (Ceará) e Acarapê.

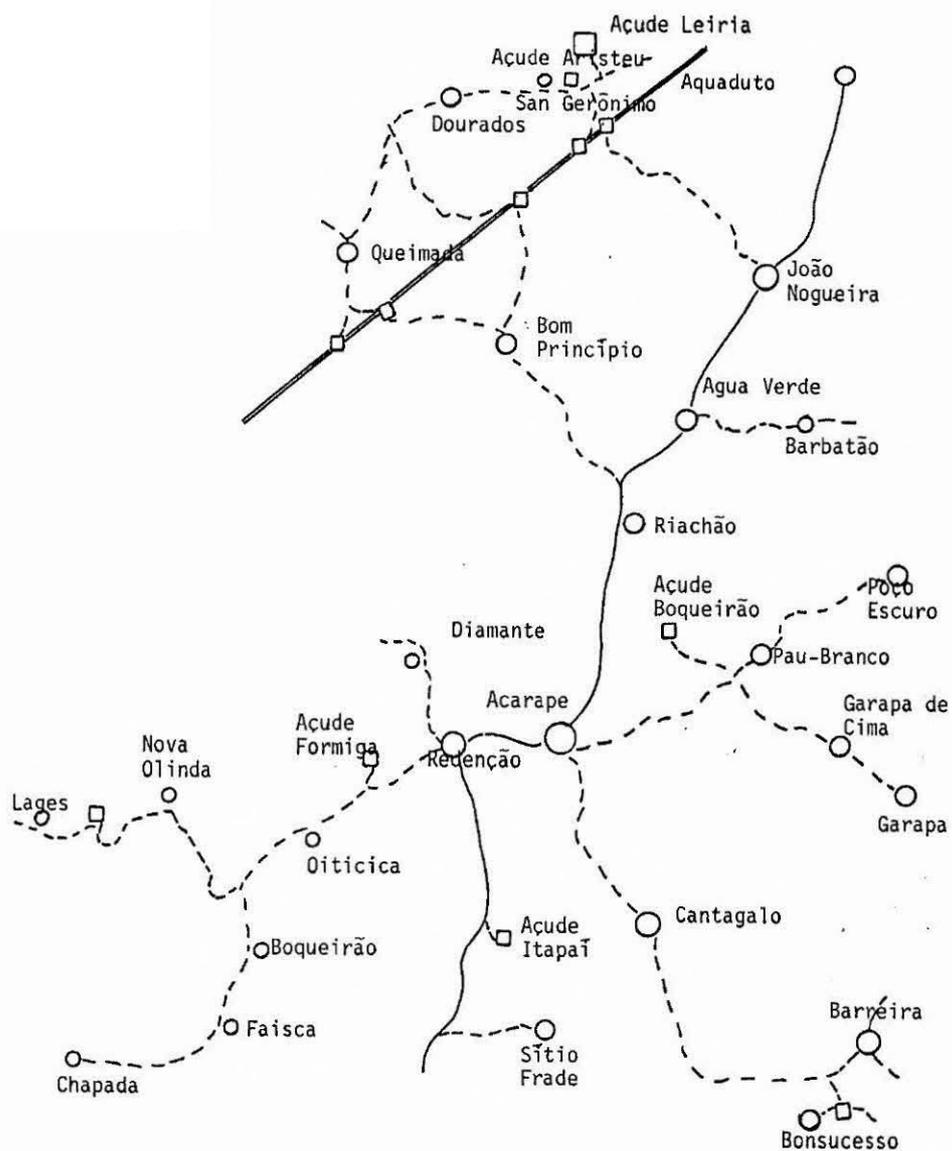


Fig. 2.2 - Grafo parcial representativo da região de Reden_ ção (Ceará) e Acarapê.

- Legenda:
- estradas asfaltadas
 - estradas não-asfaltadas
 - pontos de demanda
 - fontes de abastecimento

Como critério de otimização, utiliza-se a minimização dos custos do transporte que são calculados com base na quilometragem rodada, independentemente do veículo estar vazio ou cheio. As seguintes condições são levadas em conta no modelo:

- a) circulação dos veículos, ou seja, admite-se que o veículo sempre retorna à sua fonte abastecedora de origem;
- b) tempo limitado para o carregamento de um veículo que é feito por uma moto-bomba que demanda um certo tempo para executar este serviço;
- c) tipo de estrada de rodagem.

O modelo resultante (Barbosa, 1985) pode ser resolvido facilmente utilizando pacotes comerciais do método simplex de programação linear.

Observe-se que se não houvesse restrições quanto ao abastecimento em qualquer fonte, a solução para o problema seria simplesmente transportar a água para cada ponto de demanda a partir de sua fonte mais próxima. Existem, entretanto, restrições operacionais em cada fonte, o que impede que uma estratégia deste tipo seja adotada. Alguns pontos de demanda devem ser supridos a partir de outras fontes mais distantes, e a solução do modelo apresentado dá a resposta para isto

3. MODELO OPERACIONAL

O modelo esquematizado no nível 1 da Figura 1 fornecerá uma solução útil para as Secretarias e, também, as entradas para o nível 2. Como entrada do nível 2, tem-se a especificação das rotas com os correspondentes números de viagens a serem dadas pelos veículos durante o período em consideração.

Para operacionalizar a solução do problema, é necessário elaborar um mecanismo de desagregação da solução apresentada no nível 1. Com a resposta do modelo agregado é fácil especificar as rotas; com estas rotas determinadas, obtêm-se o número de viagens a serem dadas em cada uma delas, dentro do horizonte de planejamento em consideração, e, então, pode-se elaborar uma lista de viagens que devem ser feitas cada dia, a partir dos nós fontes de de transbordo.

Admitem-se as seguintes hipóteses de operação: as viagens a serem feitas em um dado dia são independentes (todas disponíveis no início da jornada de trabalho); não admitem interrupção, i.e., uma vez iniciada uma viagem por um dado veículo, este só ficará disponível após completar totalmente a viagem iniciada; toda a lista do dia deve ser completada (todas as entregas feitas) no final da jornada de trabalho considerada.

O problema consiste em encontrar o número mínimo de veículos que execute a lista de viagens diárias.

Para a determinação da programação diária dos veículos, consideram-se as rotas especificadas no nível 1 e seus respectivos números de viagens. A alocação das rotas a cada veículo é feita usando um procedimento heurístico, de modo a utilizar o menor número possível deles. A partir de uma lista de rotas que devem ser percorridas no dia (cada uma das rotas levando um certo tempo), alocam-se estas aos veículos, de modo que não ultrapassem a sua jornada de trabalho diária.

Várias heurísticas existem para este problema (Coffman et alii, 1976) e a seleção de alguma delas dependerá da simplicidade de sua utilização, do seu desempenho e da sua aceitação por parte do usuário encarregado da operação do modelo.

Alguns parâmetros de tempo no modelo são calibrados através de uma simulação. No modelo agregado, admitiu-se que tanto as motos-bombas como os carros-pipas estão sendo efetivamente utilizados 100% da jornada diária de trabalho. Como consequência, os carros-pipas não poderiam ficar esperando na fila para ser enchidos pelas motos-bombas e estas não poderiam ficar ociosas esperando que algum veículo retornasse para ser enchido. Como é pouco provável que seja sempre conseguida uma programação que respeite as observações anteriores, é necessário introduzir um fator de correção no parâmetro que representa a jornada de trabalho das motos-bombas no modelo agregado. Este fator de correção dá o tempo de aproveitamento ou tempo efetivamente útil dentro da jornada de trabalho.

Calcular analiticamente os tempos de aproveitamento é uma tarefa difícil. Assim, sugere-se uma maneira prática de estimar tal tempo de modo a viabilizar a programação dos veículos. Inicialmente, faz-se uma corrida do modelo agregado admitindo um aproveitamento de 100% da jornada de trabalho. A seguir, utiliza-se uma das heurísticas para determinar o número de veículos (com a respectiva programação) que devem ser alocados em cada fonte de abastecimento e não de transbordo. Simula-se o funcionamento de cada subsistema instalado nos nós de transbordo e nas fontes de abastecimento, de acordo com políticas definidas. Desta simulação retira-se o tempo médio que as motos-bombas ficaram ociosas e o tempo médio que os veículos permaneceram em fila; a primeira quantidade é utilizada para calibrar o tempo de aproveitamento da moto-bomba no modelo agregado e a segunda, para calibrar o tempo de aproveitamento de cada veículo. Novas corridas são realizadas até que se encontre uma solução cuja programação seja viável.

Observe-se que na simulação existe uma flexibilidade para programar a ordem em que as rotas serão percorridas pelos veículos em cada dia. Esta ordem influencia o tem

po útil de cada veículo e das motos-bombas, pois, após percorrer cada rota, o veículo retorna à fonte onde será prontamente reabastecido, se houver alguma moto-bomba disponível, ou permanecerá em uma fila até que alguma moto-bomba fique ociosa.

Na prática, políticas de despacho de veículos que se mostrarem efetivas na simulação deverão também ser adotadas. Algumas políticas simples são, por exemplo, despachar primeiro os veículos que fazem as maiores rotas e redespachá-los na ordem de chegada; despachar primeiro os veículos que fazem as menores rotas e redespachá-los na ordem de chegada etc.

Um exemplo ilustrativo desta metodologia é apresentado a seguir.

4. EXEMPLO ILUSTRATIVO

A título de ilustração focaliza-se o município de Quixadá-CE, com dados de março de 1984.

Na Figura 4.1 apresenta-se a rede que caracteriza este exemplo. Nesta rede os pontos de demanda e nós de transbordo são representados por círculos numerados e as fontes de abastecimento são representados pelos quadrados. As estradas asfaltadas são representadas pelas linhas cheias e as estradas de terra, pelas linhas pontilhadas. O número escrito ao lado do arco que liga dois pontos representa a distância (em km) entre eles. A Tabela 4.1 mostra, além dos nós de transbordo, os centros de demanda e suas respectivas quantidades de água demandada durante um mês. Finalmente, a tabela 4.2 mostra a quantidade de motos-bombas existentes nos nós que abastecem os veículos.

Além dos dados constantes na Figura 4.1 e Tabe

las 4.1 e 4.2 são também relevantes as seguintes informações: tempo de abastecimento do veículo do tipo 1: 28 minutos; tempo de abastecimento do veículo do tipo 2: 7 minutos; jornada diária de trabalho: 8 horas; horizonte de planejamento: 1 mês; custo por km para o veículo do tipo 1: Cz\$ 0,550 (março de 1984); custo por km para o veículo do tipo 2: Cz\$ 0,165 (março de 1984); velocidade média dos veículos dos tipos 1 e 2: 60 km/h; capacidade de carga de um veículo do tipo 1: 30 metros cúbicos; capacidade de carga de um veículo do tipo 2: 7 metros cúbicos; demanda média por habitante por dia: 30 litros (Ceará, 1983). Na prática esta demanda média precisa ser ajustada. O exemplo focaliza a pior situação, ou seja, aquele período em que todas as reservas de água mantidas pela população já foram esgotadas. Na prática, a demanda evolui com o tempo de um mínimo (marca o início da implantação do sistema) até um máximo que é atingido na época crítica da seca.

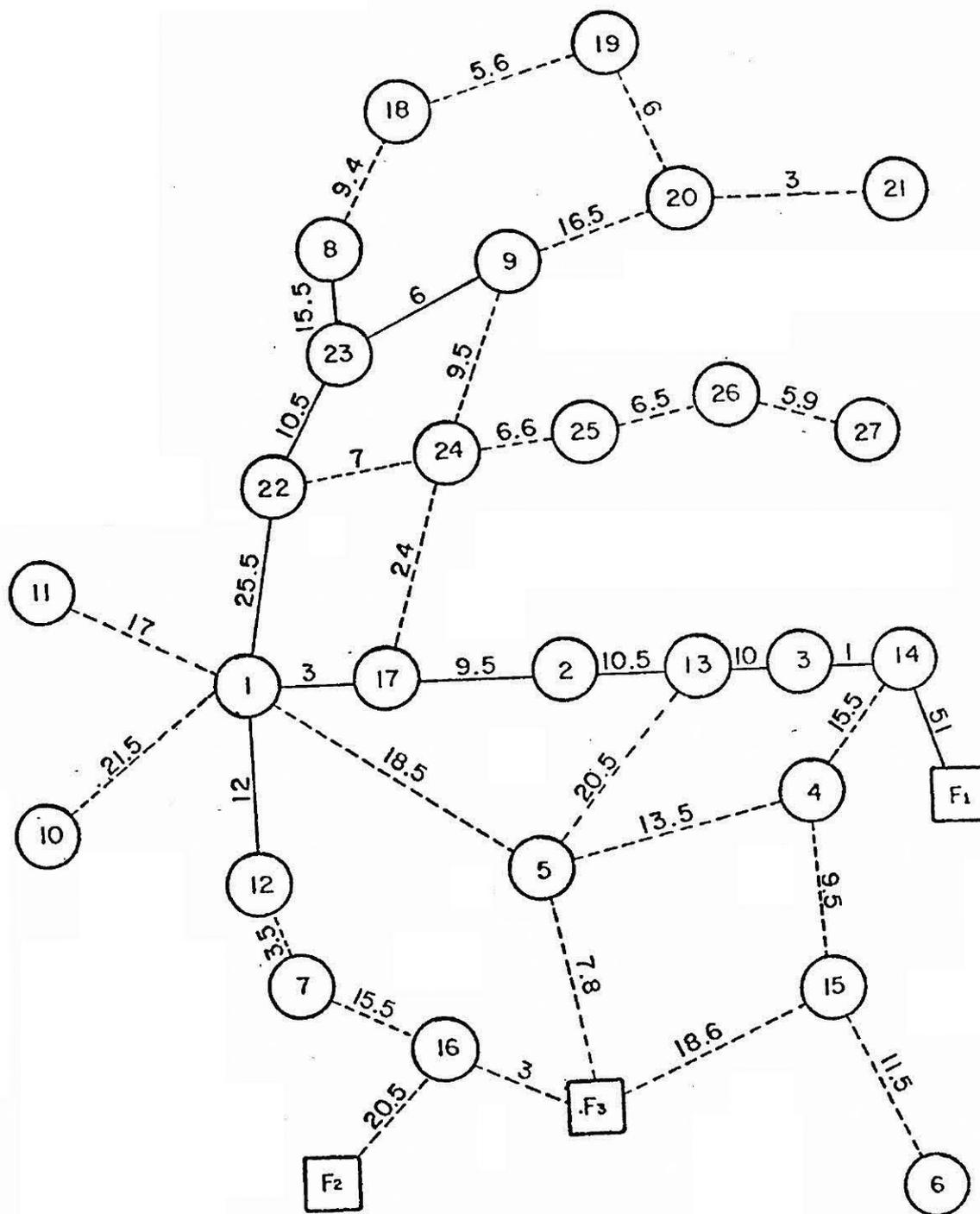


Fig. 4.1 - Rede que caracteriza o problema de Quixadá-CE.

TABELA 4.1

LOCALIDADES COM SUAS RESPECTIVAS DEMANDAS

Nº	LOCALIDADE	QUANTIDADE DE ÁGUA DEMANDADA/MÊS
1	Quixadá	28665.9
2	Café campestre	3600.0
3	Vila Rica	3600.0
4	Cipó Anjos	3807.1
5	Tapuiarã	3177.0
6	Sitiã	3491.0
7	Joatama	2930.4
8	Pirangi	3600.0
9	Oiticica	3600.0
10	Custódio	3798.9
11	Daniel de Queiroz	8877.6
12	Tranbordo	-
13	Transbordo	-
14	Transbordo	-
15	Transbordo	-
16	Transbordo	-
17	Transbordo	-
18	Nova Vida	210.0
19	Serrote	250.0
20	Extremo	210.0
21	Boqueirão	240.0
22	Transbordo	-
23	Transbordo	-
24	Carnaúba	260.0
25	Timbaúba	250.0
26	Campo Grande	245.0
27	Vertente	206.0

Total: 71019.0

TABELA 4.2

DISTRIBUIÇÃO DAS MOTOS-BOMBAS NOS NÓS QUE ABASTECEM OS VEÍCULOS

NÓ	QUANTIDADE DE MOTOS-BOMBAS
F1	1
F2	2
F3	5
1	1
8	1
9	1
12	2
13	1
22	1

Para os testes computacionais foi utilizado o computador Burroughs 6800 do INPE; para o modelo agregado utilizou-se o pacote "MPS/ALL" de programação linear, disponível neste computador.

Na Figura 4.2, apresenta-se uma forma gráfica da solução. Nesta figura as setas indicam o sentido do fluxo dos veículos. Utiliza-se a notação A-B escrita ao longo de todos os arcos para representar, respectivamente, o tipo de veículo que trafega no arco (A=1 para veículos com capacidade de 30 metros cúbicos e A=2 para veículos com capacidade de 7 metros cúbicos) e o correspondente número de viagens dadas durante o período em consideração.

A Figura 4.2 mostra também as fontes de abastecimento e os nós de transbordo selecionados pelo modelo. A Tabela 4.3 mostra todas as rotas com os correspondentes números de viagens, e a Tabela 4.4 mostra uma desagregação possível por dia do número de viagens que devem ser efetuadas durante um mês.

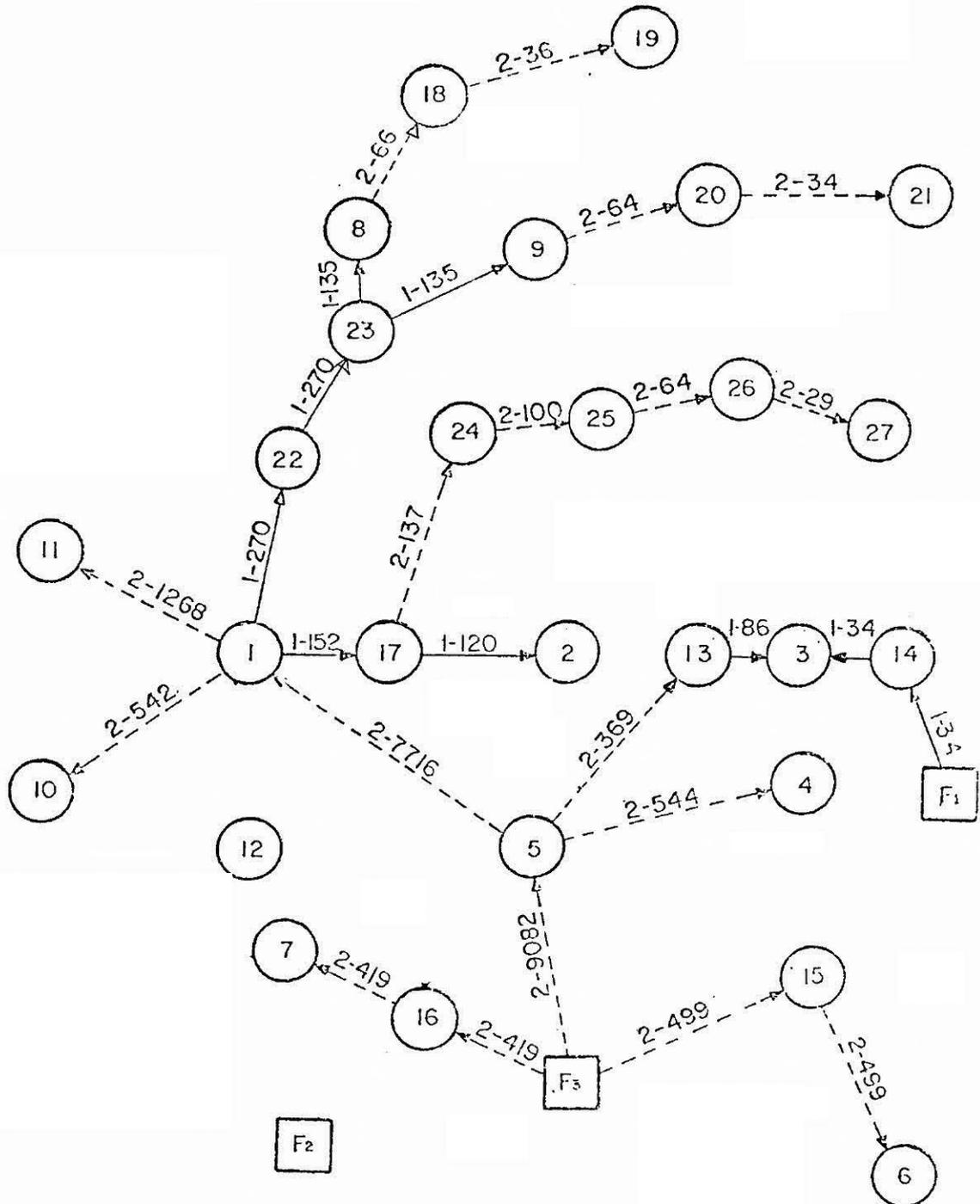


Fig. 4.2 - Solução apresentada pelo modelo agregado.

TABELA 4.3

DETERMINAÇÃO DAS ROTAS

Nº	ROTA	COMPOSIÇÃO	NÚMERO DE VIAGENS POR MÊS	TIPO DE VEÍCULO
F3	1	F3-5-1-11	1268	2
	2	F3-5-1-10	542	2
	3	F3-5-1	5906	2
	4	F3-5-13	369	2
	5	F3-5-4	544	2
	6	F3-5	453	2
	7	F3-15-6	499	2
	8	F3-16-7	419	2
F1	9	F1-14-3	34	1
1	10	1-22-23-8	135	1
	11	1-22-23-9	135	1
	12	1-17-2	120	1
	13	1-17	32	1
8	14	8-18-19	36	2
	15	8-18	30	2
9	16	9-20-21	34	2
	17	9-20	30	2
13	18	13-3	86	1
	19	17-24-25-26-27	29	2
	20	17-24-25-26	35	2
	21	17-24-25	36	2
	22	17-24	37	2

TABELA 4.4

DETALHAMENTO DAS ROTAS CONSTANTES NA TABELA 4.3

ROTA	NÚMERO DE DIAS NO MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	NÚMERO DE DIAS NO MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	Nº DE VIAGENS POR MÊS
1	8	43	22	42	1268
2	2	19	28	18	542
3	26	197	4	196	.
4	9	13	21	12	.
5	4	19	26	18	.
6	3	16	27	15	.
7	19	17	11	16	.
8	29	14	1	13	.
9	4	2	26	1	.
10	15	5	15	4	.
11	15	5	15	4	.
12	30	4	-	-	.
13	2	2	28	1	.
14	6	2	24	1	.
15	30	1	-	-	.
16	4	2	26	1	.
17	30	1	-	-	.
18	26	3	4	2	.
19	29	1	-	-	.
20	5	2	25	1	.
21	6	2	24	1	.
22	7	2	23	1	37

Como pode ser visto através da Figura 4.2, na primeira corrida, as fontes F1 e F3 abasteceram toda a rede. O custo para esta entrega foi de Cz\$ 114.581,59.

Nota-se que na presente solução do modelo agregado, o veículo do tipo 1 se abastece no nó 1 e leva a água até o nó 17, a três quilômetros de distância deste; a partir daí, a água é transportada por veículos do tipo 2 para o nó 24. Dada a pequena distância para a ocorrência de dois transbordos com a mesma água (o veículo do tipo 2 transporta água até o nó 1, o veículo do tipo 1 a transporta do nó 1 até o 17 e o veículo do tipo 2 a transporta do nó 17 ao nó 24), esta solução parece não ser muito "desejável" em termos práticos. Para evitar este transbordo é possível incorporar-se restrições adicionais ao modelo. Introduzindo tais ajustes e fazendo uma nova corrida do modelo agregado, chega-se à solução apresentada na Figura 4.3 que tem uma configuração um pouco diferente da anterior e teve seu custo majorado para Cz\$ 114.603,52. A Tabela 4.5 mostra as novas rotas com os correspondentes números de viagens e tempos de execução. As novas rotas quando desagregadas coincidiram com aquelas mostradas na Tabela 4.4 (Observe que esta alteração foi feita através de uma participação do usuário do modelo que verificou a conveniência das rotas a qual não é de maneira alguma identificada automaticamente pela metodologia proposta).

A determinação da programação diária dos carros-pipas em cada nó que abastece os veículos (F3, F1, 1, 8, 9, 13 e 22) é feita através de um procedimento heurístico. Para implementar a solução apresentada na Figura 4.3 e nas Tabelas 4.4 e 4.5, chegou-se à conclusão de que são necessários 5 veículos do tipo 1 e 43 veículos do tipo 2.

Através da simulação do funcionamento de cada subsistema, comprovou-se que a programação dos subsistemas instalados em F1, 8, 9, 13 e 22 é viável, isto é, podem ser

feitas todas as entregas diárias (de cada um dos subsistemas) dentro do período de 8 horas. A simulação mostrou também que a programação dos subsistemas instalados em F3 e 1 não são exequíveis dentro de um período de 8 horas. O aproveitamento do tempo das motos-bombas instaladas em F3 foi de 66,1% e de 19,2% para a moto-bomba instalada em 1.

Atualizado o tempo de aproveitamento nos nós F3 e 1 do modelo agregado e feita uma nova corrida, obteve-se a solução apresentada na Figura 4.4, cujo custo foi de Cz\$ 135.134,44. Na Tabela 4.6 têm-se as rotas relativas à nova solução com os correspondentes números de viagens (mensais) e tempos de execução; na Tabela 4.7 tem-se o detalhamento destas rotas. Para esta solução são necessários 8 veículos do tipo 1 e 45 veículos do tipo 2, alocados de acordo com o mostrado na Tabela 4.8.

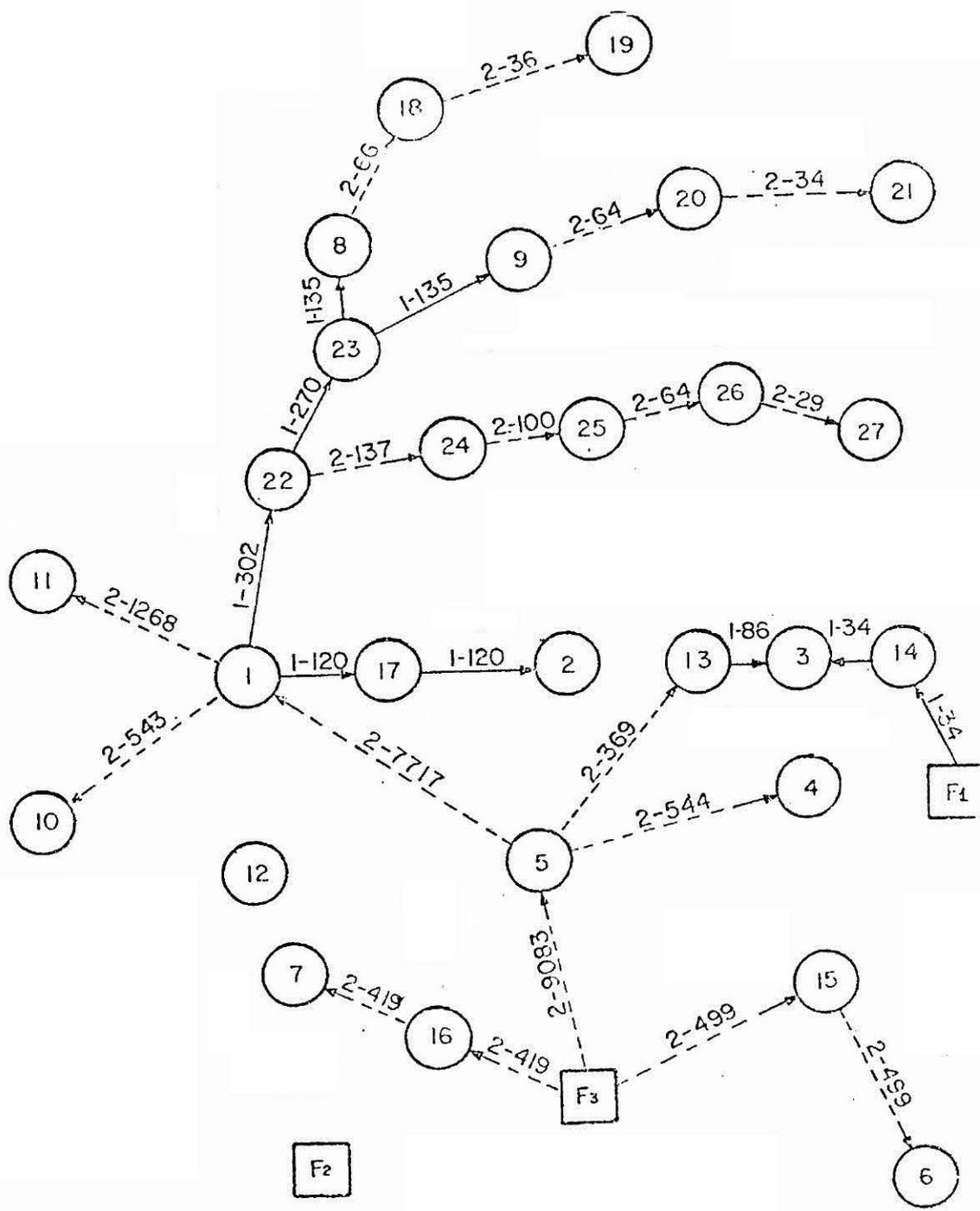


Fig. 4.3 - Solução sem o n̄o de transbordo 17.

TABELA 4.5

CONJUNTO DE ROTAS OBTIDO DA FIGURA 4.3

Nº	ROTA	COMPOSIÇÃO DAS ROTAS	NÚMERO DE VIAGENS POR MÊS	TIPO DE VEÍCULO	TEMPO (MIN)
F3	1	F3-5-1-11	1268	2	86
	2	F3-5-1-10	543	2	95
	3	F3-5-1	5906	2	52
	4	F3-5-13	369	2	28
	5	F3-5-4	544	2	42
	6	F3-5	453	2	16
	7	F3-15-6	499	2	60
	8	F3-16-7	419	2	37
F1	9	F1-14-3	34	1	104
1	10	1-22-23-8	135	1	103
	11	1-22-23-9	135	1	84
	12	1-17-2	120	1	25
	13	1-22	32	1	51
8	14	8-18-19	36	2	30
	15	8-18	30	2	19
9	16	9-20-21	34	2	39
	17	9-20	30	2	33
13	18	13-3	86	1	20
22	19	22-24-25-26-27	29	2	52
	20	22-24-25-26	35	2	40
	21	22-24-25	36	2	27
	22	22-24	37	2	14

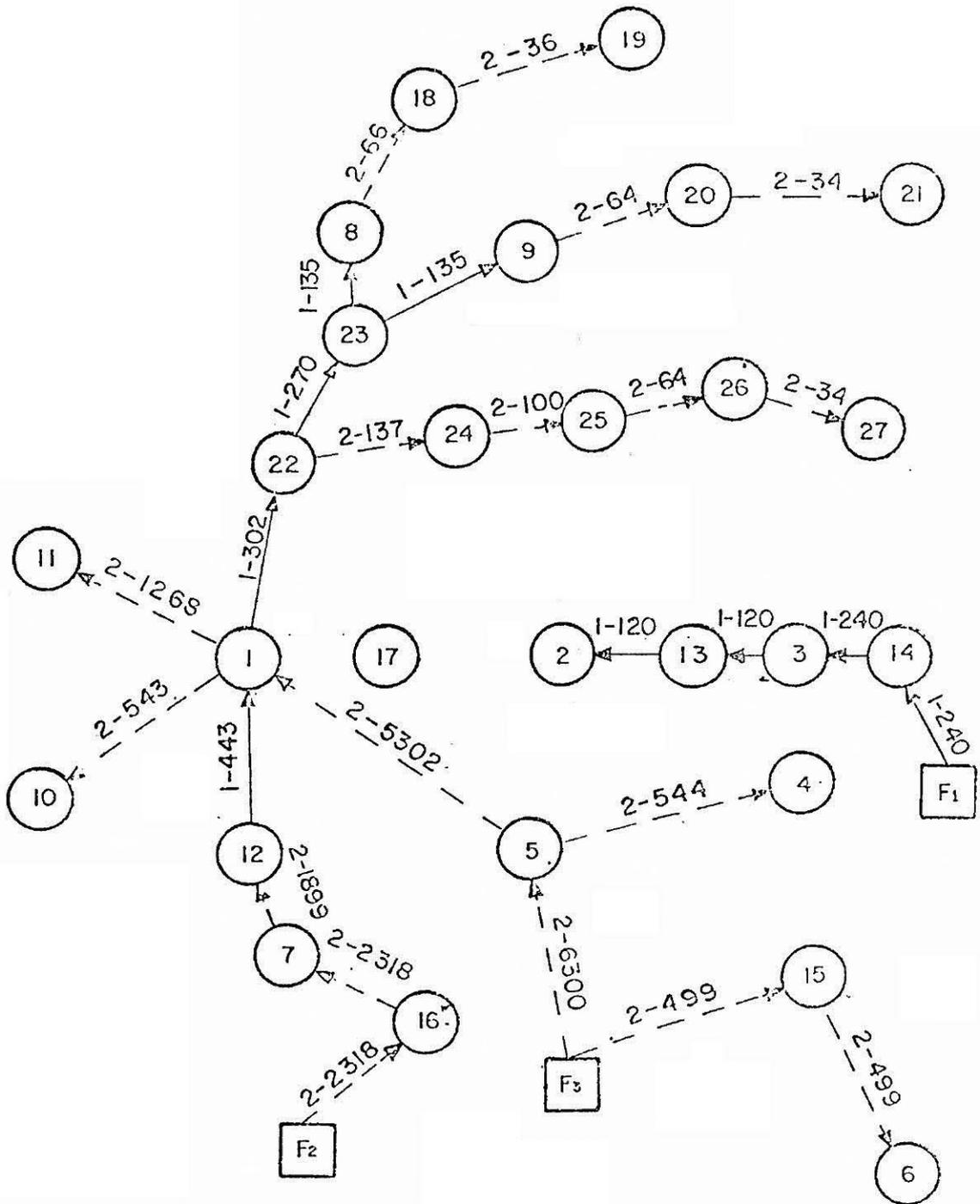


Fig. 4.4 - Solução após atualizar T nos nós F3 e 1.

TABELA 4.6

ROTAS DEPOIS DE ATUALIZADOS OS TEMPOS

Nº	ROTA	COMPOSIÇÃO DA ROTA	NÚMERO DE VIAGENS POR MÊS	TIPO DE VEÍCULO	TEMPO (MIN)
F3	1	F3-5-1-11	1268	2	86
	2	F3-5-1-10	543	2	95
	3	F3-5-1	3491	2	52
	4	F3-5-4	544	2	42
	5	F3-5	454	2	16
	6	F3-15-16	499	2	60
F2	7	F2-16-7-12	1899	2	79
	8	F2-16-7	419	2	72
12	9	12-1-22-23-8	135	1	127
	10	12-1-22-23-9	135	1	108
	11	12-1-22	32	1	50
	12	12-1	141	1	24
22	13	22-24-25-26-27	29	2	52
	14	22-24-25-26	35	2	40
	15	22-24-25	36	2	27
	16	22-24	37	2	14
9	17	9-20-21	34	2	39
	18	9-20	30	2	33
8	19	8-18-19	36	2	30
	20	8-18	30	2	19
F1	21	F1-14-3-13-2	120	1	145
	22	F1-14-3	120	1	124

TABELA 4.7

DETALHAMENTO DAS ROTAS CONSTANTES DA TABELA 4.6

ROTA	NÚMERO DE DIAS POR MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	NÚMERO DE DIAS POR MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	Nº DE VIAGENS POR MÊS
1	8	43	22	42	1268
2	3	19	27	18	.
3	11	117	19	116	.
4	4	19	26	18	.
5	4	16	26	15	.
6	19	17	11	16	.
7	9	64	21	63	.
8	29	14	1	13	.
9	15	5	15	4	.
10	15	5	15	4	.
11	2	2	28	1	.
12	21	5	9	4	.
13	29	1	-	-	.
14	5	2	25	1	.
15	6	2	15	1	.
16	7	2	23	1	.
17	4	2	26	1	.
18	30	1	-	-	.
19	6	2	24	1	.
20	30	1	-	-	.
21	30	4	-	-	.
22	30	4	-	-	120

TABELA 4.8

VEÍCULOS REQUERIDOS PARA IMPLEMENTAR A SOLUÇÃO MOSTRADA NA FIGURA 4.4

N ^o	NÚMERO DE VEÍCULOS	
	TIPO 1	TIPO 2
F1	3	0
F2	0	13
F3	0	29
8	0	1
9	0	1
12	5	0
22	0	1
TOTAL	8	45

Como pode ser observado a partir das soluções encontradas, algumas motos-bombas instaladas inicialmente nos diversos locais ficaram totalmente ociosas. É possível que tais motos-bombas possam ser deslocadas para outros pontos onde seriam mais úteis.

A título de ilustração, analisa-se a seguir o efeito econômico decorrente da transferência de uma moto-bomba não-utilizada na solução anterior. Ao invés de atualizar os tempos relativos aos nós F3 e 1, considera-se a existência de uma sexta bomba no nó F3 e faz-se uma nova corrida no modelo agregado. A nova solução encontrada tem um custo de Cz\$ 114.394,48. Simulado o funcionamento dos subsistemas, a programação não é viável em dois subsistemas, F3 e 1. Fez-se então a atualização dos tempos e uma nova corrida do modelo agregado, cuja solução é apresentada na Figura 4.5 e nas Tabelas 4.9 e 4.10. O custo desta solução foi de Cz\$ 120.653,07 e a programação mostrada na Tabela 4.10 foi viável. Quatro veículos do tipo 1 e 41 veículos do tipo 2 foram requeridos. Como pode ser visto, esta solução tem um custo menor. Este tipo de comparação em termos de custos associados a possíveis soluções alternativas pode ser facilmente realizado utilizando a metodologia aqui proposta.

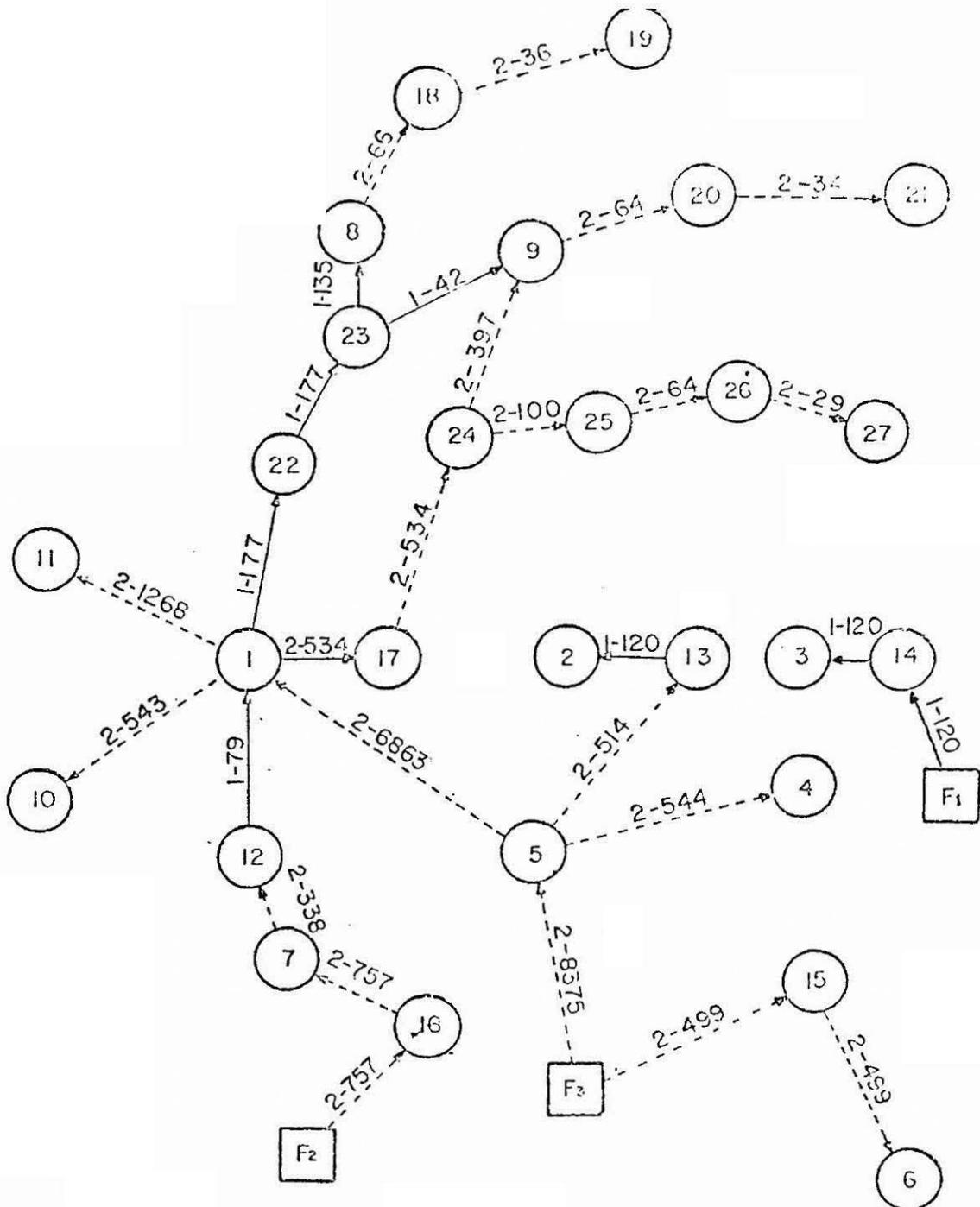


Fig. 4.5 - Solução com 6 motos-bombas instaladas em F3.

TABELA 4.9

ROTAS DETERMINADAS A PARTIR DA FIGURA 4.5

Nº	ROTA	COMPOSIÇÃO	NÚMERO DE VIAGENS POR MÊS	TIPO DE VEÍCULO
F3	1	F3-5-1-17-24-9-20-21	34	2
	2	F3-5-1-17-24-9-20	30	2
	3	F3-5-1-17-24-9	333	2
	4	F3-5-1-17-24-25-26-27	29	2
	5	F3-5-1-17-24-25-26	35	2
	6	F3-5-1-17-24-25	36	2
	7	F3-5-1-17-24	37	2
	8	F3-5-1-11	1268	2
	9	F3-5-1-10	543	2
	10	F3-5-1	4518	2
	11	F3-5-13	514	2
	12	F3-5-4	544	2
	13	F3-5	454	2
	14	F3-15-6	499	2
F2	15	F2-16-7-12	338	2
	16	F2-16-7	419	2
F1	17	F1-14-3	120	1
12	18	12-1-22-23-8	79	1
1	19	1-22-23-8	56	1
	20	1-22-23-9	42	1
13	21	13-2	120	1

TABELA 4.10

DETALHAMENTO DAS ROTAS CONSTANTES NA TABELA 4.9

ROTA	NÚMERO DE DIAS POR MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	NÚMERO DE DIAS POR MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	TEMPO (MIN)	Nº DE VIAGENS POR MÊS
1	4	2	26	1	165	34
2	30	1	-	-	159	.
3	3	12	27	11	116	.
4	29	1	-	-	133	.
5	5	2	25	1	133	.
6	6	2	24	1	120	.
7	7	2	23	1	107	.
8	8	43	22	42	87	.
9	3	19	27	18	96	.
10	18	151	12	150	53	.
11	4	18	26	17	57	.
12	4	19	26	18	43	.
13	4	16	26	15	18	.
14	19	17	11	16	60	.
15	8	12	22	11	79	.
16	29	14	1	13	72	.
17	30	4	-	-	104	.
18	19	3	11	2	127	.
19	26	2	4	1	103	.
20	12	2	18	1	84	.
21	30	4	-	-	21	120

5. ROTEAMENTO

Focaliza-se agora a distribuição de água a partir de fontes/reservatórios localizados em diversos pontos da cidade (veja Motta, 1986).

Considere-se a situação particular onde a fonte/reservatório de água encontra-se a uma distância cuja ordem de grandeza supera bastante as distâncias entre os pontos de demanda. É o caso observado, por exemplo, quando a fonte/reservatório encontra-se afastada da cidade e, portanto, o percurso do veículo da fonte à cidade e vice-versa é a parte mais significativa da rota a ser seguida pelo caminho para a distribuição d'água.

Neste caso, sugere-se que a estratégia a ser adotada seja simplesmente a alocação dos pontos de demanda, de modo a se obter o menor número de rotas (ou viagens). Com isto, minimiza-se o total de quilômetros percorridos pelos veículos.

Levando em conta as circunstâncias do local onde tal programação deverá ser realizada, sugere-se que a alocação dos pontos de demanda para as rotas seja feita através de um procedimento heurístico que seja simples, interativo e tenha um bom desempenho. Observe-se que este problema de alocação apresentado é similar ao apresentado anteriormente para a programação de rotas. Uma heurística simples que aparece em Coffman et alii (1976) é: "ordene os pedidos em ordem decrescente de volume. Seguindo esta lista, designa-se cada um dos pedidos para a rota de menor índice na qual ela pode ser encaixada". Este procedimento apresenta no final os pontos de demanda a serem satisfeitos em cada viagem.

A programação de entrega de água de cada veículo poderá ser feita pelo próprio motorista, caso as distân

cias entre os pontos de demanda não sejam significativas, Caso contrário, sugere-se que a programação seja feita de maneira heurística. Levando em conta as circunstâncias do local onde esta programação deve ser realizada, sugere-se, por exemplo, o procedimento indicado por Norback e Love (1977), cuja idéia é apresentada a seguir de maneira simplificada.

Os pontos de demanda e o depósito são plotados num plano. O método consiste em determinar um polígono que contém todos os pontos em seu interior e cujos vértices representam pontos de uma rota parcial. Em seguida, são medidos todos os ângulos formados de modo que o vértice seja um ponto não-pertencente à rota parcial e cujos lados sejam formados ligando este vértice diretamente a dois pontos consecutivos da rota. O ponto interior correspondente ao maior ângulo é inserido entre aqueles dois pontos consecutivos da rota que formam este ângulo. Isto formará a próxima rota parcial que terá um ponto a mais que a rota parcial anterior. O processo de medir ângulos e escolher o maior é repetido com a nova rota parcial e os pontos interiores restantes, até que todos os pontos estejam na rota. Este método é ilustrado na Figura 5.1.

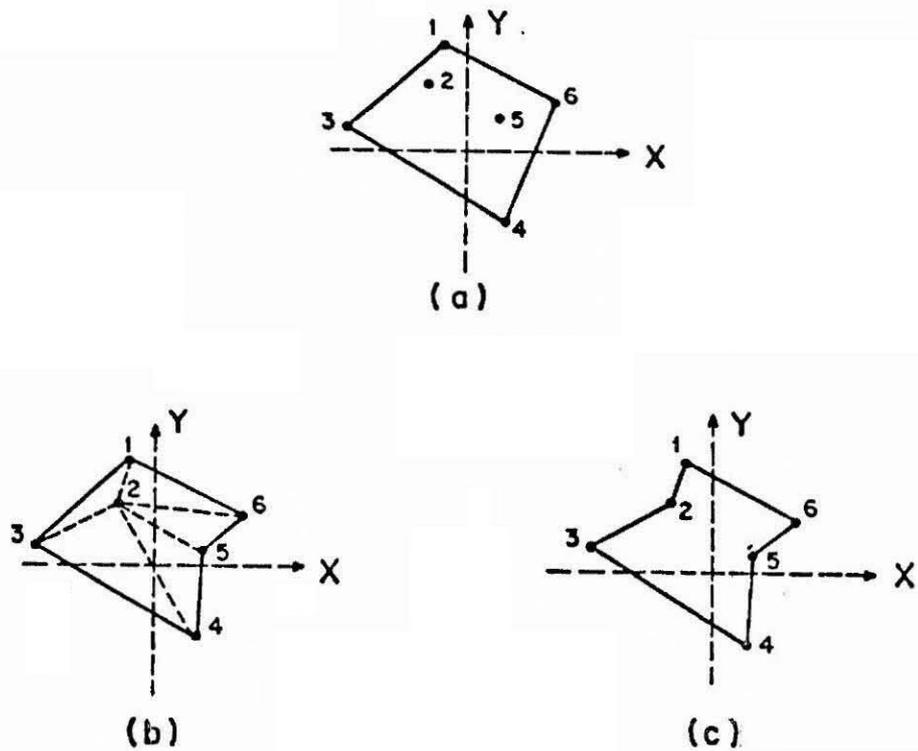


Fig. 5.1 - Passos consecutivos do método geométrico:

(a) rota parcial inicial = 3-4-6-1-3:

(b) a nova rota parcial é 1-3-4-5-6-1

(c) rota final = 1-2-3-4-5-6-1.

Tal procedimento pode ser realizado manualmente, precisando-se apenas de um mapa da cidade, uma régua e um lápis, e da comparação de ângulos (maior ou menor) que pode ser feita visualmente.

Considere-se agora a situação onde a fonte/reservatório está na cidade, e, portanto, a distância total das rotas a serem percorridas é fortemente dependente do roteamento feito.

Sugere-se neste caso que a atribuição de pontos de demanda para as rotas seja feita de maneira completamente diferente; uma vez feita a atribuição, a programação das rotas deve seguir o procedimento heurístico geométrico apresentado anteriormente. Sugere-se que a atribuição dos pontos para as rotas seja feita utilizando o método das varreduras (Gillet e Miller, 1974) de forma simplificada. Para isto, considere-se que os pontos de demanda estejam representados num sistema de coordenadas polares com origem no depósito. Faz-se uma varredura por um raio que parte da origem e vai até um ponto inicial arbitrário, segundo um ângulo crescente. Os pontos de demanda são atribuídos para uma dada rota à medida que são varridos até imediatamente antes da restrição da capacidade do veículo ser violada. Este processo de formar rotas continua até que todas as localizações sejam atribuídas para alguma rota. A Figura 5.2 ilustra a aplicação deste método em um exemplo de 10 pontos de demanda e um depósito, cuja capacidade do veículo é quatro mil unidades.

Esta versão mencionada do método da varredura é propositalmente simples, pois visa utilizá-lo manualmente. A idéia de utilizar o método da varredura manualmente não é nova; por exemplo, uma outra versão deste mesmo método foi aplicada a um problema prático apresentado em Robbins e Turner (1975), onde se obteve uma economia substancial de combustível ao ser reduzido de 10 a 20 por cento a distância total percorrida diariamente por ônibus escolares num região rural dos Estados Unidos da América.

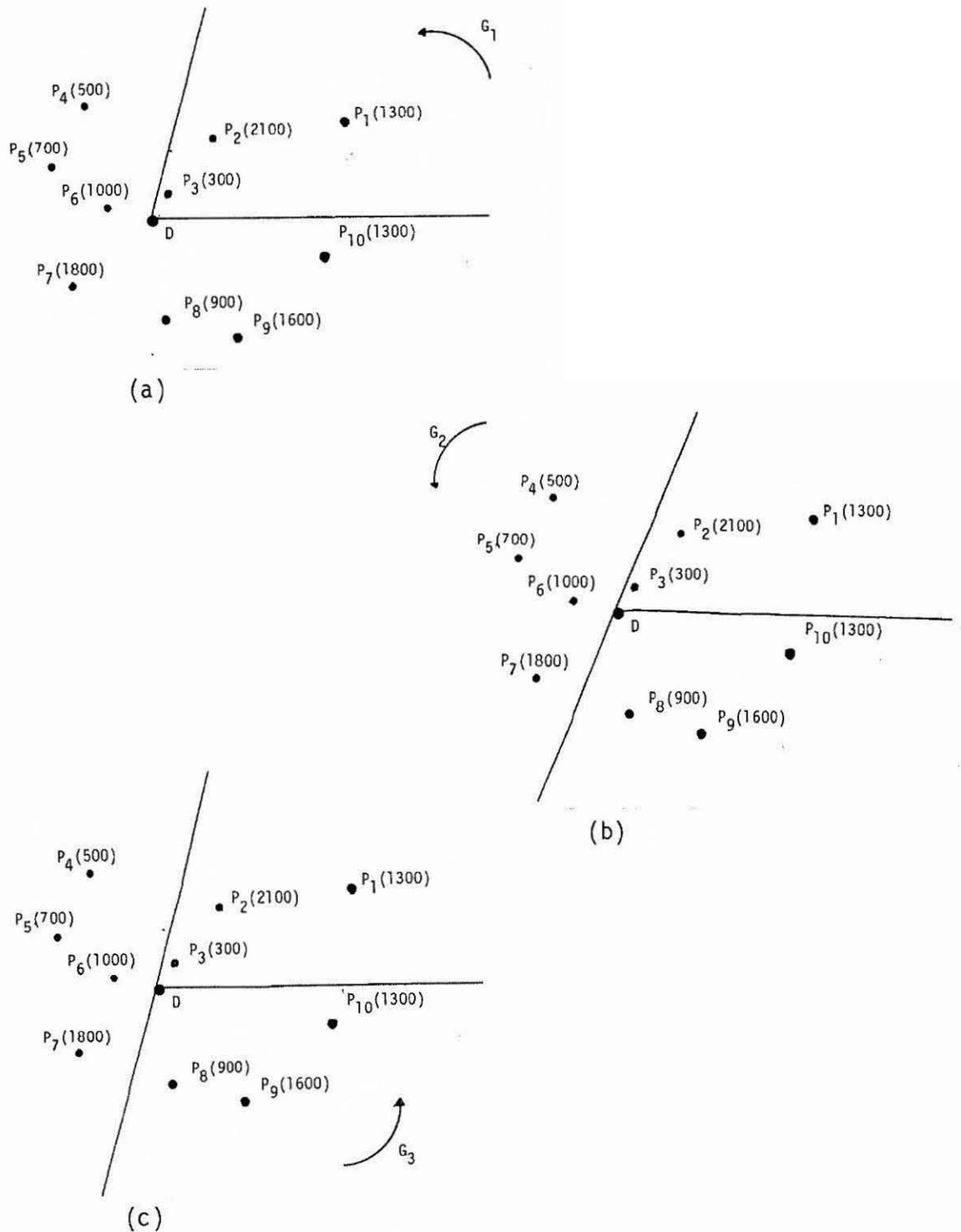


Fig. 5.2 - Agrupamento dos pontos de demanda.

(a) G_1 contém P_1, P_2 e P_3

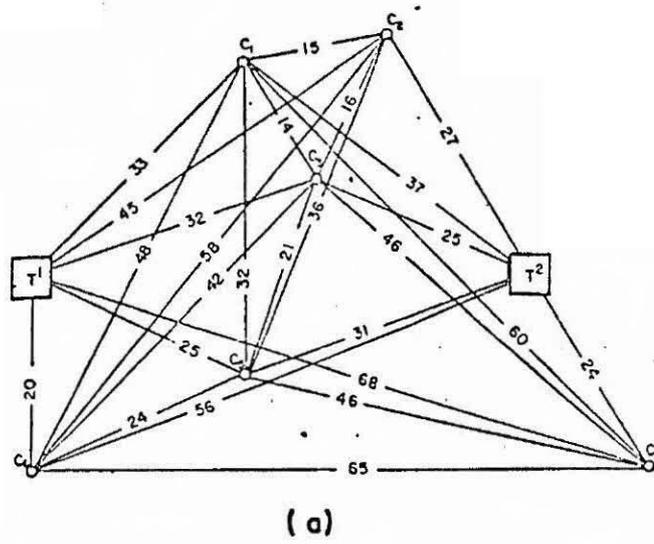
(b) G_2 contém P_6 e P_7

(c) G_3 contém P_8, P_9 e P_{10}

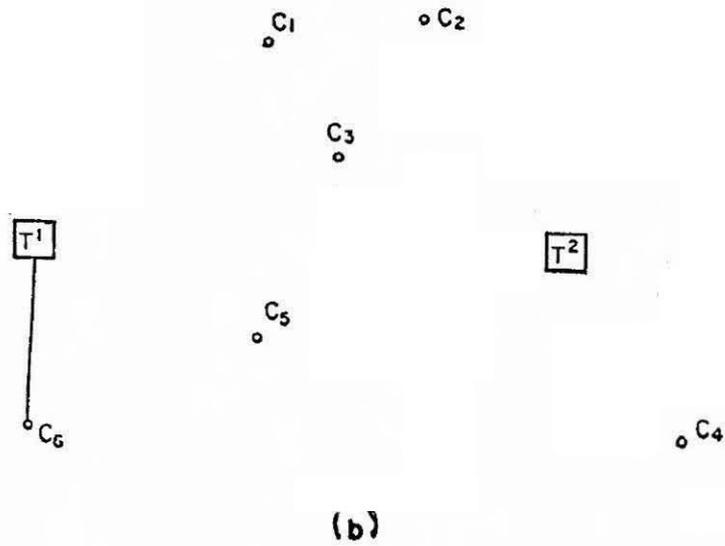
- D = depósito

$P_i(J)$ = ponto de demanda i com capacidade J .

No caso de haver várias fontes/reservatórios na cidade, é preciso que se faça inicialmente uma atribuição dos pontos de demanda às fontes de onde serão servidos. Várias propostas foram analisadas para este caso e pelos resultados obtidos experimentalmente sugere-se o procedimento apresentado em Gillet e Johnson (1976) de forma modificada. Cada ponto de demanda é atribuído à fonte que tenha um ponto de demanda já atribuído a ele e esteja mais próximo do ponto em questão do que qualquer outro ponto, desde que a distância entre estes dois pontos não exceda a distância do ponto em questão a sua fonte mais próxima. Caso esta distância exceda, o ponto será atribuído a sua fonte mais próxima. Esta regra não é aplicada ao primeiro ponto a ser considerado na heurística, devido à falta de algum ponto já atribuído à sua fonte mais próxima. Após todos os pontos de demanda terem sido atribuídos às fontes, o problema subdivide-se em vários problemas de roteamento com um único depósito; aplica-se para cada um deles o procedimento sugerido anteriormente. Um exemplo ilustrativo deste procedimento é mostrado na Figura 5.3.

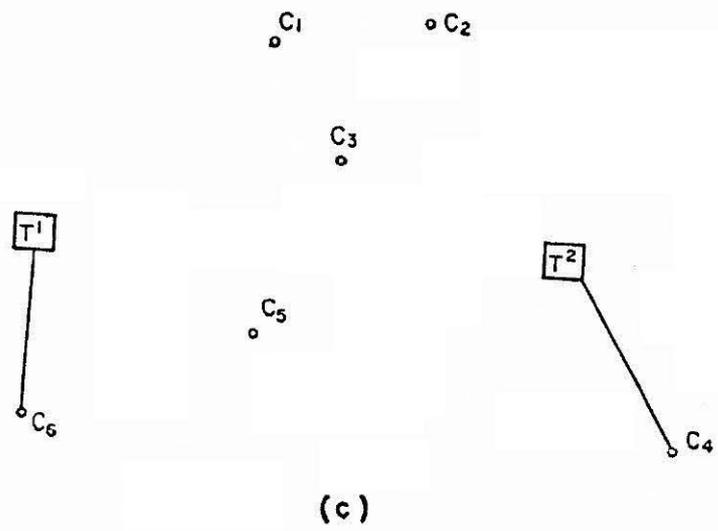


(a)

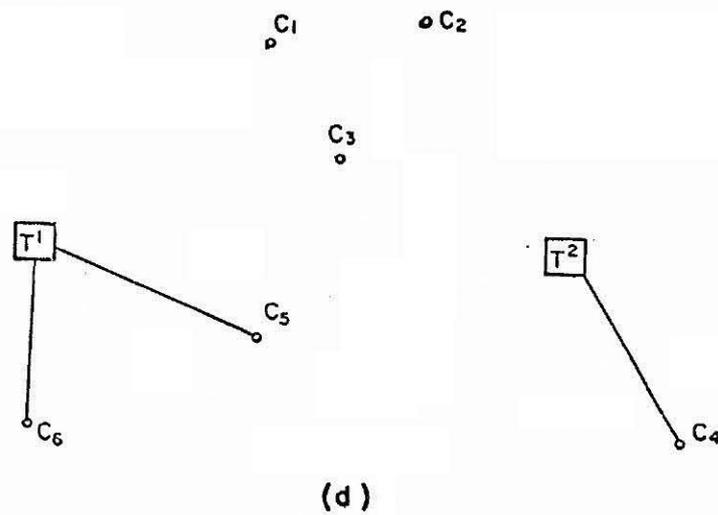


(b)

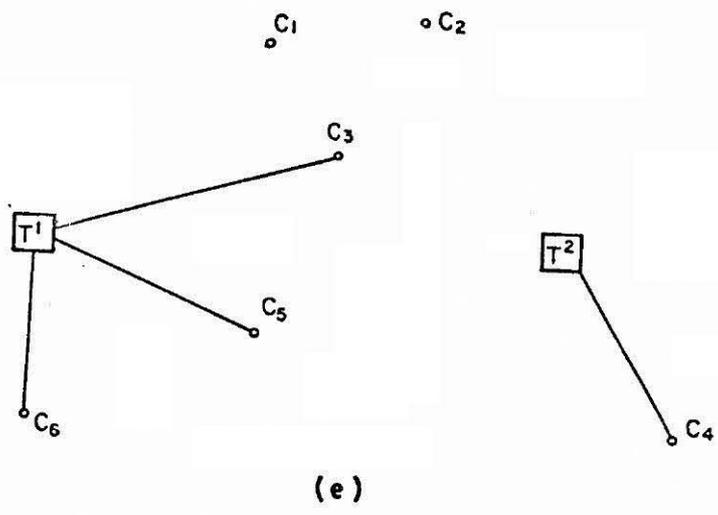
Fig. 5.3 - Alocação dos pontos de demanda aos depósitos:
(a) Exemplo com seis pontos de demanda e dois depósitos;
(b) c_6 é atribuído a T^1 ;
(c) c_4 é atribuído a T^2 ;
(d) c_5 é atribuído a T^1 ;
(e) c_3 é atribuído a T^1 ;
(f) c_2 é atribuído a T^1 e
(g) c_1 é atribuído a T^1 .



(c)

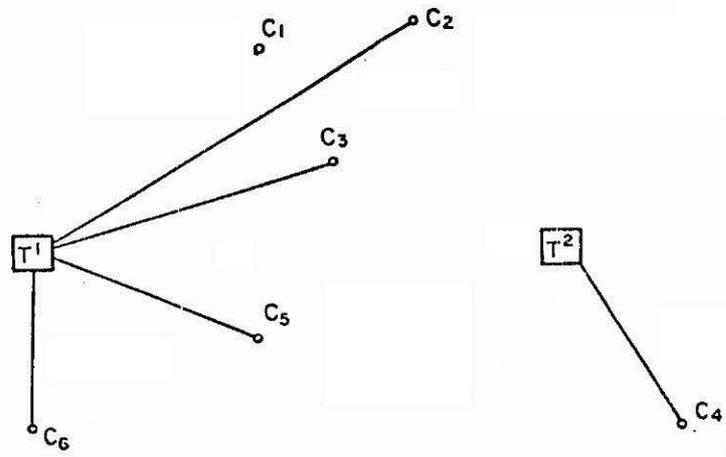


(d)

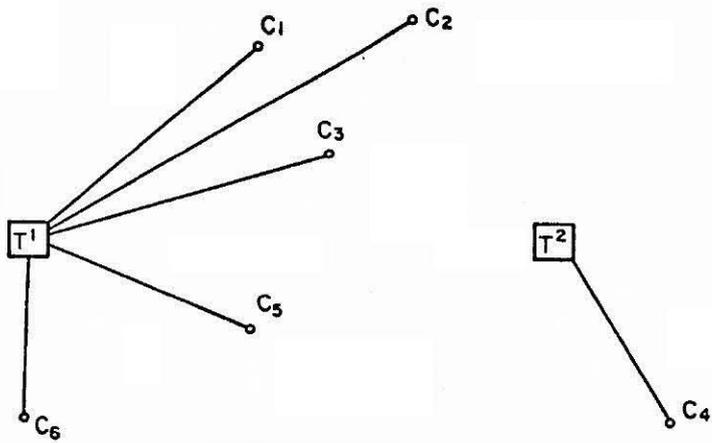


(e)

Fig. 5.3 - Continuação



(f)



(g)

Fig. 5.3 - Conclusão

Cumpre observar que o método heurístico geométrico apresentado é fortemente dependente da condição de que, na prática, a geometria dos pontos de demanda do problema refletem a distância relativa a ser percorrida pelo carro-pipa. Caso isto não se verifique, o uso de tais procedimentos fica comprometido.

Em alguns casos é possível que esta condição não seja satisfeita na região vista em sua totalidade, mas seja viável a utilização do conceito de regiões homogêneas (veja Manso et alii, 1979) e seja possível a divisão da cidade em partes homogêneas, de modo que em cada uma delas a metodologia proposta possa ser utilizada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta é uma tentativa de fornecer informações importantes aos decisores para auxiliá-los no planejamento e controle da distribuição de água.

Para implantar o que é proposto neste trabalho são necessárias várias informações e recursos que provavelmente não estão disponíveis de imediato. A modelagem matemática do problema agregado e da parte operacional exige a presença de uma pessoa familiarizada com os conceitos básicos de algumas ferramentas da pesquisa operacional.

A utilização do modelo para explorar todo o seu potencial pode exigir pequenos ajustes nas restrições do programa linear, o que implica a presença de uma pessoa familiarizada com o modelo. Para as demais heurísticas sugeridas, um manual de utilização, visando facilitar sua aplicação por leigos no assunto, foi elaborado (vide Motta, 1986). Vale lembrar que a dificuldade em se obter pessoal qualificado em determinadas regiões do País foi, na medida do possível, considerada por ocasião da elaboração da metodologia proposta. Modelos mais fiéis ãs situações reais podem tamém

bem ser desenvolvidos, caso seja verificada a necessidade para tal e haja interesse em se prosseguir nesta direção.

Apresentou-se aqui um exemplo de como o uso de algumas ferramentas da pesquisa operacional pode auxiliar o tomador de decisão no planejamento e na programação do transporte de água em situações emergenciais. Deve-se alertar que outras ferramentas da pesquisa operacional podem auxiliá-lo ainda mais nesta tarefa. É possível, por exemplo, realizar estudos para determinar a prioridade de perfuração de poços, dada uma série de locais potencialmente favoráveis à localização de água, levando-se em conta os custos de perfuração dos poços e os da distribuição d'água, caso ela seja encontrada.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, J.I.M. Um modelo de distribuição de água utilizando a abordagem hierárquica. São José dos Campos, SP, INPE, Set. 1985, 92 p. (INPE-3889-TDL/221).
- CEARÁ: Secretaria de Obras e Serviço Público. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Comissão Especial de Recursos Hídricos. Levantamento da situação de abastecimento de água no Estado do Ceará face a atual crise climática. Fortaleza, Ceará, 1983.
- COFFMAN JR., E.G.; BRUNO, J.L.; GRAHAM, R.L.; KOHLER, W.H.; SETHI, R.; STEIGLITZ, K.; ULLMAN, J.D. Computer and Job shop scheduling theory. New York, John Wiley, 1976.
- GILLET, B.E.; JOHNSON, J.G. Multi-terminal vehicle dispatch algorithm. OMEGA, The International Journal of Management Science, 4(6): 711-718, 1976.
- GILLET, B.E.; MILLER, L.E. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. Operations Research, 22:340-349, 1974.
- MANSO, A.P.; OLIVEIRA, M.L.N.; BARROS, M.S.S. Determinação de zonas homogêneas através de sensoriamento remoto. São José dos Campos, SP, INPE, 1979, (INPE-1470-RPE/021).
- MOTTA, I.V.M. Roteamento de veículos para a distribuição de água. São José dos Campos, SP, INPE, Jun. 1986, 125 p. (INPE-4318-TDL/285).
- NORBACK, J.P.; LOVE, R.F. Geometric approaches to solving the travelling salesman problem. Management Science, 23(11):1208-1223, 1977.
- ROBBINS, J.A.; TURNER, W.C. A manual method for routing school buses. ORSA/TIMS National Meeting, Las Vegas, 1975.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

PROPOSTA PARA
PUBLICAÇÃO

- DISSERTAÇÃO
 TESE
 RELATÓRIO
 OUTROS

TÍTULO

Uma proposta metodológica para dar subsídios à tomada de decisões
relativa à distribuição de água através de carros-pipas

AUTOR(ES)

José Tram Arta Barbosa
Tamara Virgínia de Mendonça Motta
Hércules Hidelki Yanesse 201

ORIENTADOR

CO-ORIENTADOR

IDENTIFICAÇÃO

LIMITE DEFESA CURSO ORGÃO

— / — / — / — / —

DIVULGAÇÃO

EXTERNA INTERNA RESTRITA

EVENTO/MEIO

CONGRESSO REVISTA OUTROS

PRE

NOME DO REVISOR

PAULO RENATO DE MORAIS

NOME DO RESPONSÁVEL

Deon Siqueira

REV. TÉCNICA

RECEBIDO DEVOLVIDO ASSINATURA

— / — / 29/09/87

APROVADO DATA ASSINATURA

SIM NÃO 08/10/87

REV. LINGUAGEM

Nº PRIOR. RECEBIDO NOME DO REVISOR

247 1 14/10/87 Reusa Maria Siqueira

OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRU-
ÇÕES ESPECÍFICAS, ANEXANDO NORMAS, SE HOUVER

PÁG. DEVOLVIDO ASSINATURA

16/10/87 Reusa Maria Siqueira

RECEBIDO DEVOLVIDO NOME DA DATILOGRAFA

— / — / — / — /

Nº DA PUBLICAÇÃO: 4504 PRE/1258 PÁG.:

CÓPIAS: Nº DISCO: LOCAL:

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

SIM NÃO — / — /

OBSERVAÇÕES E NOTAS

19 MAR 1988

Relatório elaborado para fins de divulgação de trabalhos realizados
no INPE que podem auxiliar o gerenciamento de recursos hídricos,
em situações emergenciais.

543/298