1. Publicação nº	2. Versão	3. Data	5. Distribuição
INPE-3889-TDL/221		*Maio, 1986*	☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita

4. Origem	Programa
DRH/GDT	*FRH/ANS*

6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es)
BIN-PACKING
FLUXO EM REDE
PLANEJAMENTO HIERÁRQUICO

7. C.D.U.: *519.816:556(813.1)*

8. Título *INPE-3889-TDL/221*

UM MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO ABORDAGEM HIERÁRQUICA

10. Páginas: *92*

11. Última página: *A.9*

12. Revisada por

Horácio Hideki Yanasse

9. Autoria *José Iram Mota Barbosa*

Assinatura responsável

13. Autorizada por

Marco Antonio Raupp
Diretor Geral

14. Resumo/Notas

Neste trabalho é proposta uma metodologia para fornecer subsídios à tomada de decisão quanto ao transporte de água existente no Estado do Ceará durante o período de grandes secas. Esta metodologia é fundamentada na abordagem hierárquica, aqui composta por dois modelos, um endereçado ao planejamento tático e o outro a operações, correspondentes a cada nível de decisão. O modelo tático é um modelo de fluxo em rede com algumas restrições adicionais, e o modelo operacional é resolvido pela combinação do problema do "bin-packing" com a simulação do funcionamento diário do sistema.

15. Observações *Dissertação de Mestrado em Análise de Sistemas e Aplicações aprovada em setembro de 1985.*

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Análise de Sistemas e Aplicações

Dr. Paulo Renato de Morais — Presidente

Dr. Horácio Hideki Yanasse — Orientador

Dr. Joffre Dan Swait Jr. — Membro da Banca -convidado-

Engº Flávio Freitas Faria, Mestre — Membro da Banca -convidado

Candidato: José Iram Mota Barbosa

São José dos Campos, 10 de setembro de 1985

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS ..... *ix*

LISTA DE TABELAS ..... *xi*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 2 - CENÁRIO DO PROBLEMA 5

2.1 - História da seca 5

2.2 - Apresentação do funcionamento do sistema 7

2.3 - Identificação dos níveis de decisão 10

2.4 - Definição do problema 11

CAPÍTULO 3 - REVISÃO DE LITERATURA 15

CAPÍTULO 4 - MODELOS 21

4.1 - Modelo agregado 21

4.2 - Modelo operacional 33

CAPÍTULO 5 - TESTES E CONCLUSÕES 43

5.1 - Testes computacionais 43

5.2 - Conclusões 57

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

APÊNDICE A - LISTAGEM DOS PROGRAMAS

ABSTRACT

In this paper a methodology to support decision making about the water supply problem in Ceará State during periods of extreme droughts is suggested. This methodology is based on a hierarchical approach, here composed of two models, one addressed to the tatical planning and the other to operations, corresponding to each level of decision making. The tactical model is a network flow problem with some side constraints, and the operational model is solved by a combination of bin-packing heuristics with a simulation of the system's daily functioning.

LISTA DE TABELAS

Pág.

4.1 - Saída do modelo agregado 39

4.2 - Composição dos veículos determinada pela heurística de melhor ajuste com decrescimento 40

4.3 - Matriz das rotas 40

4.4 - Aplicação das políticas 41

5.1 - Localidades com suas respectivas demandas 45

5.2 - Distribuição das motos-bombas nos nós que abastecem os veículos 46

5.3 - Estatísticas 46

5.4 - Determinação das rotas 49

5.5 - Detalhamento das rotas 50

5.6 - Conjunto de rotas obtido da figura 5.3 53

5.7 - Rotas depois de atualizados os tempos 55

5.8 - Detalhamento das rotas constantes na tabela 5.7 56

5.9 - Veículos requeridos para implementar a solução mostrada na figura 5.4 57

5.10 - Rotas determinadas a partir da figura 5.5 59

5.11 - Detalhamento das rotas constantes na tabela 5.10 60

AGRADECIMENTOS

Diversas pessoas contribuíram para a realização deste trabalho e por ocasião de sua conclusão torna-se oportuno expressar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Dr. Nelson de Jesus Parada pelo apoio financeiro.

Ao Dr. Celso de Renna e Souza e ao Dr. Paulo Renato de Morais pela intercessão junto à direção do INPE para a liberação da passagem aérea São Paulo - Fortaleza - São Paulo.

Ao corpo docente do programa de mestrado em Análise de Sistemas e Aplicações, responsável pela minha formação teórica e a banca que julgou este trabalho, pelas suas valiosas sugestões.

Ao orientador Dr. Horácio Hideke Yanasse, pela sua orientação segura e dedicada.

A minha esposa, Iamara Virgínia de Mendonça Motta pela sua compreensão, ajuda e apoio.

LISTA DE TABELAS

Pag.

4.1 - Saída do modelo agregado 39

4.2 - Composição dos veículos determinada pela heurística de melhor ajuste com decrescimento 40

4.3 - Matriz das rotas 40

4.4 - Aplicação das políticas 41

5.1 - Localidades com suas respectivas demandas 45

5.2 - Distribuição das motos-bombas nos nós que abastecem os veículos 46

5.3 - Estatísticas 46

5.4 - Determinação das rotas 49

5.5 - Detalhamento das rotas 50

5.6 - Conjunto de rotas obtido da figura 5.3 53

5.7 - Rotas depois de atualizados os tempos 55

5.8 - Detalhamento das rotas constantes na tabela 5.7 56

5.9 - Veículos requeridos para implementar a solução mostrada na figura 5.4 57

5.10 - Rotas determinadas a partir da figura 5.5 59

5.11 - Detalhamento das rotas constantes na tabela 5.10 60

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 - Sistema de transporte d'água 4
2.1 - Zona semi-árida do nordeste brasileiro 6
2.2 - Rede típica 11
2.3 - Estratégia a ser adotada 14
4.1 - Esquema inicial para explicar a restrição de tempo nos nós de transbordo 26
4.2 - Esquema final para explicar a restrição de tempo nos nós de transbordo 26
4.3 - Solução encontrada pelo algoritmo 1 36
4.4 - Solução encontrada pelo algoritmo 2 36
4.5 - Solução encontrada pelos algoritmos 3 ou 4 36
5.1 - Rede que caracteriza o problema de Quixadá-CE 44
5.2 - Solução apresentada pelo modelo agregado 48
5.3 - Solução sem o nó do transbordo 17 52
5.4 - Solução após atualizar T nos nós F3 e 1 54
5.5 - Solução com 6 motos bombas instaladas em F3 58

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Durante o ano de 1983 o Governo do Estado do Ceará recorreu ao INPE em busca de apoio técnico e científico que viesse a auxiliar na solução de diversos problemas enfrentados, decorrentes da situação complexa e emergencial de seca que se abatia sobre aquele Estado.

Dentre as diversas atividades propostas pelo INPE, a Divisão de Estatística e Pesquisa Operacional do Departamento de Informática prontificou-se em colaborar com a administração daquele Estado no sentido de fornecer subsídios para a implantação dos planos estratégicos (emergencial e permanente) de atendimento às vítimas da seca no Estado. Neste trabalho pretende-se analisar apenas um pequeno aspecto do plano emergencial na parte referente ao transporte de água às populações carentes.

Para atender às populações carentes d'água, foi implantado na última seca, em caráter emergencial, um sistema de transporte d'água através de carros-pipas. Este sistema de emergência não pode ter um planejamento detalhado, visto que o problema da falta d'água exigia uma solução imediata a ser implantada. Desta forma, acredita-se que este sistema possa ser melhorado através de um estudo mais aprofundado. Isto ficou aparente depois de uma visita feita àquele Estado e de discussões e troca de idéias com membros do Governo acerca de tal sistema.

Um dos problemas levantados pelo pessoal encarregado da implantação do plano emergencial no Estado do Ceará foi a dificuldade em controlar o sistema de transporte d'água para atender às populações carentes. No tocante a este sistema seu funcionamento pode ser descrito como mostra a Figura 1.1.

As populações carentes d'água de alguma maneira recorreiam às Secretarias Estaduais em busca de água, as Secretarias conseguiam com a SUDENE a liberação de carros-pipas os quais eram repassados para a Coordenadoria Estadual de Defesa Civil - CEDEC (órgão encarregado de fazer o transporte d'água)que elaborava efetivamente a programação do transporte

de água e eventualmente avisava às Secretarias que a frota não era suficiente para o atendimento destas populações carentes.

Sabendo do interesse do Governo em melhorar tal sistema, propõe-se este estudo visando a sua otimização de modo que mediante uma futura situação emergencial o Governo possa oferecer à população carente d'água um melhor atendimento sem incorrer em gastos desnecessários.

Inicialmente acreditava-se que o problema poderia ser caracterizado como um problema de roteamento de veículos. Posteriormente, quando se analisaram as características inerentes tanto ao transporte propriamente dito como às informações desejadas pelos decisores, notou-se que uma abordagem hierárquica tal como a apresentada por Bradley et alli (1977) adequava-se muito bem para os propósitos do trabalho.

Neste trabalho propõem-se modelos matemáticos hierarquizados que dêem subsídios às Secretarias e à CEDEC, no sentido de fornecer a estes organismos informações relevantes ao planejamento e programação do transporte d'água, no caso de uma situação emergencial.

No Capítulo 2 faz-se um breve histórico da seca no Nordeste, descreve-se detalhadamente todo o processo de montagem do sistema de transporte d'água utilizado na última situação emergencial até o seu funcionamento completo e apresenta-se a definição do problema abordado.

O Capítulo 3 é dedicado à revisão da literatura. Faz-se revisão superficial dos trabalhos que abordam o problema do roteamento de veículos e uma revisão um pouco mais detalhada sobre abordagem hierárquica.

No Capítulo 4 apresenta-se um modelo agregado, que é endereçado ao nível mais elevado de decisão do sistema, e algumas discussões acerca de tal modelo. Apresenta-se também o modelo operacional que servirá para a determinação da programação diária dos veículos que transportam a água.

O Capítulo 5 é destinado aos testes computacionais. Neste capítulo a metodologia é implementada para o município de Quixadá no Estado do Ceará. Além disso, são identificadas as potencialidades dos modelos quanto ao tipo de informações que poderão fornecer para que os usuários possam fazer bom uso deles.

Além dos cinco capítulos apresentados resumidamente acima, o trabalho traz um apêndice que contém as listagens de dois programas. A primeira listagem é a implementação do algoritmo 4 (melhor ajuste com decrescimento) descrito na Seção 4.2, que serve para calcular o número de veículos necessário para fazer um determinado número de entregas, e a segunda listagem é a simulação do funcionamento diário do sistema.

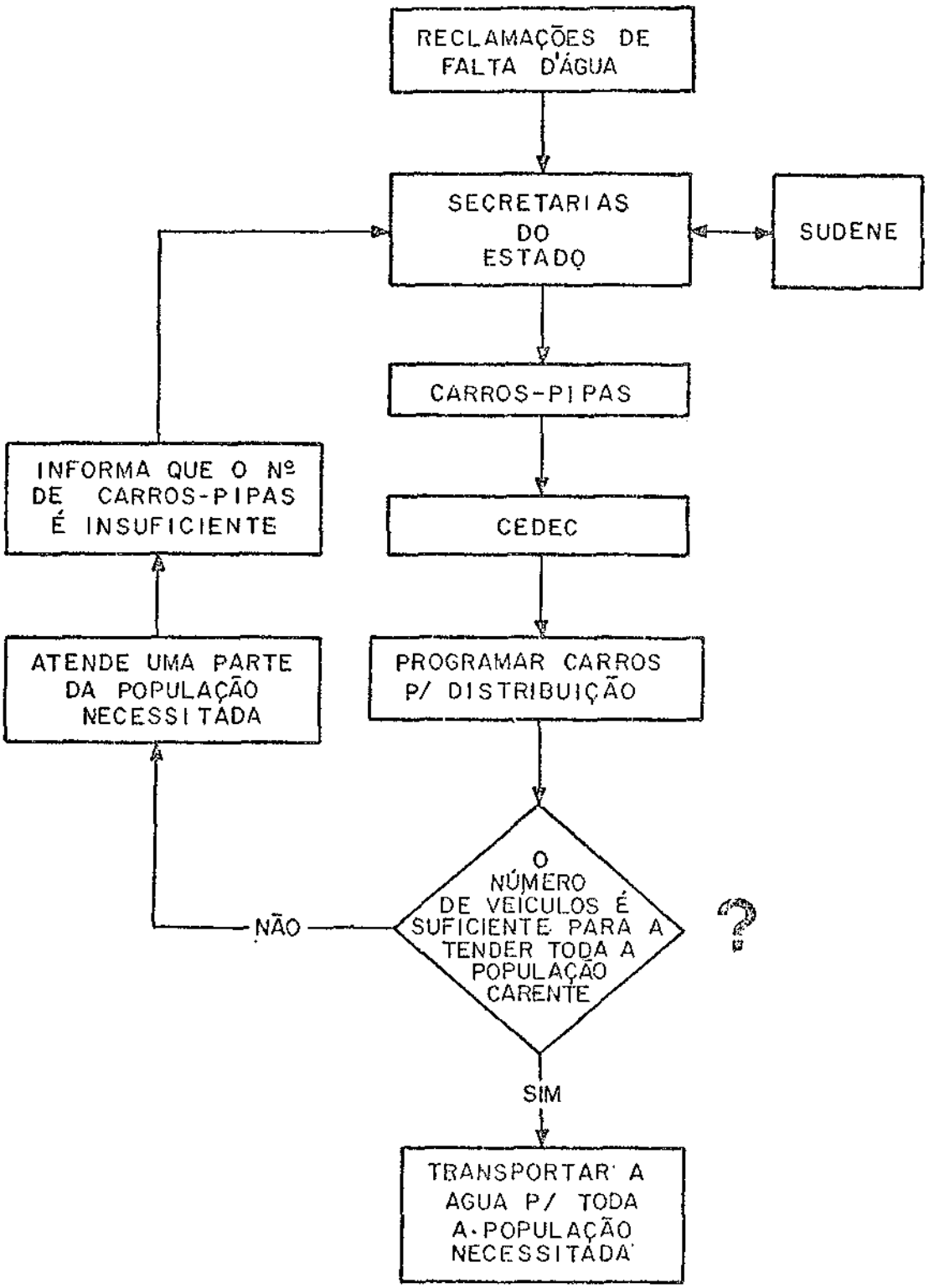

Fig. 1.1 - Sistema de transporte d'água.

CAPÍTULO 2

CENÁRIO DO PROBLEMA

2.1 - HISTÓRIA DA SECA

O Nordeste brasileiro, abrangendo uma área de 1.640.000km², situado entre $1^{o}00'$ e $18^{o}30'$ de Latitude Sul e $34^{o}30'$ e $48^{o}20'$ de Longitude Oeste, compreende um quinto da superfície total do Brasil, com uma população de 35 milhões de habitantes.

No Nordeste insere-se a Zona Semi-árida (vide Figura 2.1), com 860.000km², caracterizada por um regime de chuvas escassas, irregulares e concentradas em um curto período de três ou quatro meses.

Provavelmente, devido ao regime das chuvas, às características do clima e do solo nordestino, à não-existência de reservatórios d'água em número suficiente e/ou local apropriado que garantam o abastecimento d'água da população local, a falta d'água é logo sentida pelas populações que habitam as régiões cristalinas.

Historicamente, a região nordestina sempre foi marcada pela presença de secas ou irregularidades climáticas periódicas. Este fenômeno, já sentido na pela por milhões de nordestinos, tem sido por demais descrito em todos os seus aspectos, com realidade e com lirismo, por escritores, cientistas e poetas. Acerca deste fenômeno escreveram Brito (1913), Guerra (1980), SUDENE (1981), Guerra (1909), Almeida (1981), Fournier (1820), Meira (1982), Rosado (1981), Guerra (1981) e Ceará (1983).

As secas conduzem a alterações sociais e perdas de bens econômicos, que entravam o progresso e o desenvolviemnto regional, com reflexos nocivos à própria economia nacional. Nas situações de secas, tudo o que foi construído nos anos de "fartura" é basicamente destruído causando fome, morte e desespero. É a tragédia das populações de áreas semi-áridas.

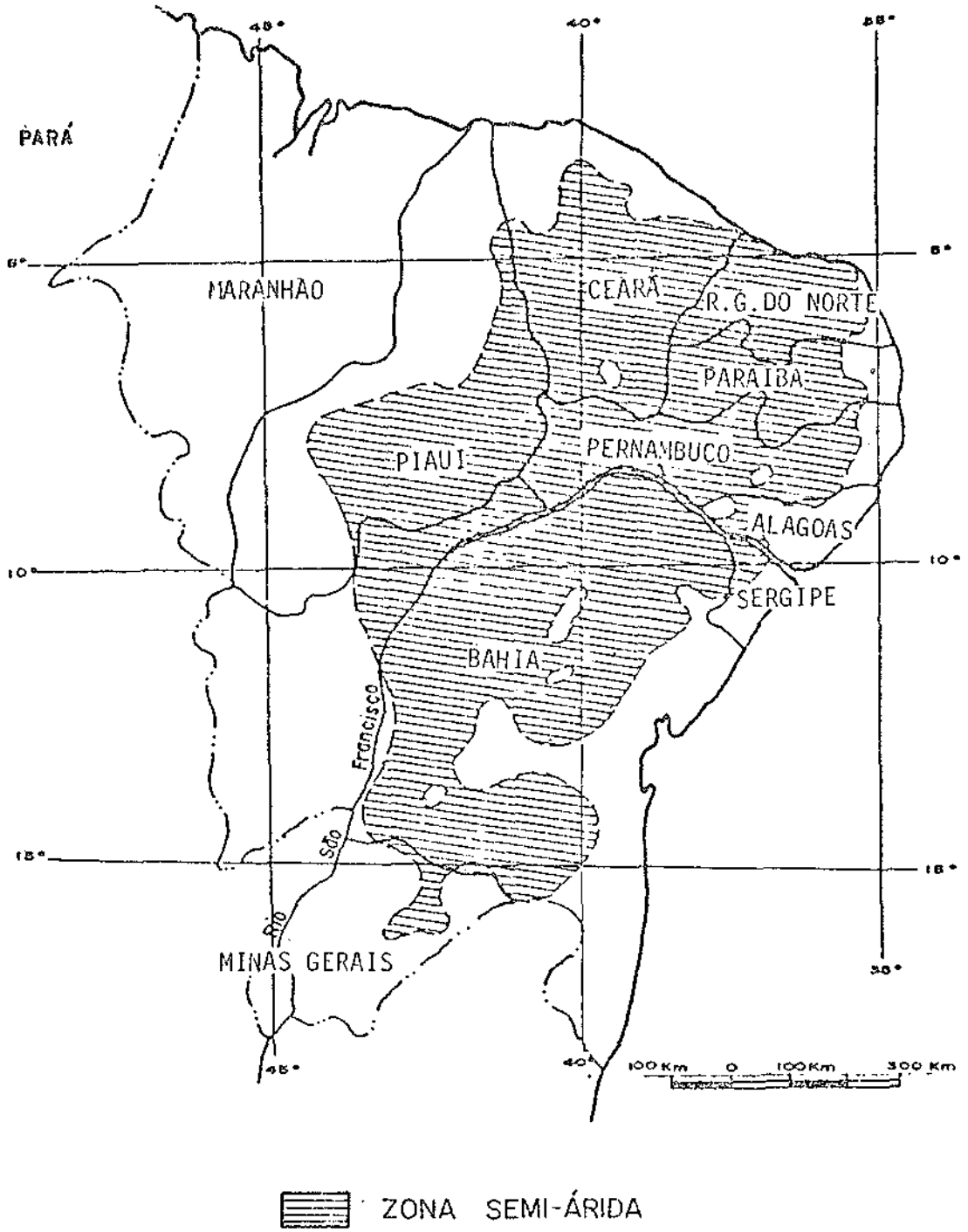

Fig. 2.1 - Zona semi-árida do nordeste brasileiro.

Parece que as ações de combate à seca pouco evoluíram até hoje. É bem verdade que na ausência de uma estratégia de combate aos efeitos das secas, com caráter preventivo, torna-se muito difícil exercer, nesses anos, ações diferentes. Na realidade, o importante a considerar nesse caso é que as atividades desenvolvidas nos anos anormais sejam complementares às que já vêm sendo executadas em anos normais.

O combate aos efeitos das secas tem de ser feito mediante um programa interdisciplinar, com caráter de preventividade, e deve ser uma atividade constante e normal através do tempo, até que seus efeitos alcancem um nível aceitável.

Outro aspecto negativo que se nota na política das secas é que os diversos programas emergenciais não sofrem um tratamento otimizado, acarretando com isto deficiência no programa e grande desperdício de recursos, o que contribui para aumentar o descrédito quanto às ações dos setores públicos orientados para o combate às secas.

2.2 - APRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Com a ocorrência de períodos secos no Estado do Ceará ressurge o antigo problema de falta d'água para o abastecimento das populações carentes que, até o presente, não foi resolvido de forma satisfatória.

As populações afetadas pela escassez d'água recorrem aos órgãos responsáveis através de seus políticos em busca de soluções emergenciais. Nos últimos anos, a estratégia usada por estes órgãos tem sido a utilização de veículos para o transporte da água. Inicialmente é feita a liberação de contratos para carros-pipas, os quais devem ser alocados às regiões carentes.

Os carros-pipas que fazem o transporte d'água são, geralmente, veículos particulares que, nas épocas normais, ofertam outros tipos de serviços. Com a seca, suas demandas tradicionais se exaurem, sendo facilmente atraídos para o serviço emergencial de transporte d'água.

Estes veículos transportam a água das fontes distantes diretamente para a casa do rurícola ou a armazena em tanques construídos em locais convenientes.

A SUDENE contrata o uso destes veículos, equipa-os com os tanques necessários para o novo serviço e paga-os por quilômetro rodado. Com os veículos, que são transformados em carros-pipas, tenta-se, através do transporte d'água, minimizar o sofrimento do sertanejo.

Somente no Estado do Ceará existem atualmente em estoque 1028 tanques de 7000 litros. Este investimento parece ser um bom indicador de que em secas futuras este sistema de transporte d'água será reativado.

O problema da falta d'água surge inicialmente naquelas regiões impróprias para a perfuração de poços artesianos, as quais ficam distantes dos grandes açudes. Este problema pode se expandir, dependendo da extensão do período seco, para quase todo o Estado. A solução emergencial adotada pelos governantes tem sido o transporte d'água de regiões mais favorecidas para estas regiões carentes.

Os centros de demandas são compostos por agregados de pessoas que congregam fazendeiros, arrendatários, moradores etc. Desta forma, estes centros de demandas compõem-se de pessoas com diferentes poderes aquisitivos. Aquelas pessoas mais abastadas geralmente constroem tanques em suas próprias casas para armazenar a água e, dependendo do tamanho destes tanques, esta água satisfaz a demanda durante 10, 20 ou até 30 dias. Os menos privilegiados financeiramente necessitam, entretanto, do abastecimento diário. Assim, nas áreas territoriais onde predominam os grandes fazendeiros, o abastecimento pode ser mais espaçado, enquando naquelas áreas onde predominam pessoas de outras classes, o abastecimento tende a ser mais amiúde.

A instalação e a operação do sistema de transporte d'água requerem a mobilização de grande quantidade de recursos humanos, equipamentos etc., acarretando com isto a necessidade de expressiva soma monetária. Por outro lado, a própria característica social do problema, levar

água a quem tem sede, já justifica sua importância. Daí a relevância em sistematizar este serviço, visando uma melhoria social para aquela gente e otimizando seus custos operacionais.

O que tem sido observado nas últimas situações emergenciais é que as populações carentes d'água, na tentativa de solucionar o problema, recorriam aos políticos que lhes eram mais ligados, geralmente vereadores ou o prefeito, e exigiam destes uma solução rápida para o problema. Estes políticos, através das Secretarias estaduais, conseguiam junto à SUDENE, a liberação de alguns contratos para carros-pipas. Uma vez liberada uma certa quantidade de contratos para uma dada localidade, este mesmo político que iniciou o processo escolhia dentre os habitantes desta região aqueles que possuíam veículos adequados para o serviço (geralmente seus "afilhados").

A etapa seguinte consistia em um contrato entre a SUDENE e os "carros" selecionados. Depois do contrato firmado, os veículos eram transformados em carros-pipas (a SUDENE equipava cada carro com uma motobomba e um tanque de 7000 l) e alocados exatamente naquela região que os solicitara, ficando sob o controle da Coordenadoria Estadual de Defesa Civil (CEDEC), coordenadoria esta ligada à Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado do Ceará (SAAb).

A CEDEC instalou escritórios nas sedes de cada um daqueles municípios carentes, e nestes escritórios locais era elaborado o esquema de abastecimento d'água para o município baseado no conhecimento que os proprietários dos carros-pipas tinham da região.

Inicialmente o transporte d'água era feito de açudes próximos àqueles centros de demanda. Porém, com a extensão da seca, estes açudes iam secando e novas (e mais distantes) fontes de abastecimento eram buscadas. A partir de um certo momento as fontes de oferta d'água ficavam muito distantes e o transporte, através dos carros-pipas com capacidade de 7000 l, ficava ineficiente. Neste caso eram solicitados carros maiores com capacidade de 23000 ou 30000 l, chamados "jamantas" que só trafegam em estradas asfaltadas.

As jamantas se encarregavam de fazer o transporte de longa distância. Tanques com capacidade de 30000 l foram construídos em locais adequados ao longo das estradas asfaltadas. As jamantas colocavam a água dentro destes tanques e os carros-pipas se abasteciam nestes e distribuíam pelas fazendas. O controle das jamantas era da competência da própria SUDENE.

O que realmente ocorre é que este abastecimento em situações emergenciais tem sido posto em prática sem nenhum planejamento detalhado, de forma que o controle do sistema tem deixado muito a desejar. Informações tais como quantidade de água transportada, rotas utilizadas pelos carros, distância entre os pontos de oferta e demanda etc. não estão disponíveis ou, se elas existem, não são facilmente obteníveis. Tais informações, se existem, encontram-se apenas na memória daquelas pessoas envolvidas ativamente na elaboração do esquema de abastecimento d'água da região. Assim sendo, os órgãos responsáveis não têm idéia de qual foi o custo por m³ de água transportada durante as últimas situações emergenciais, não havendo também outros índices indicadores da qualidade do serviço prestado.

2.3 - IDENTIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE DECISÃO

Podem-se identificar dois níveis hierárquicos de decisão interessados em informações que dêem subsídios às decisões relativas ao abastecimento d'água às populações em situações emergenciais: no primeiro nível ficam a Secretaria de Agricultura, Secretaria de Planejamento etc., que estão interessadas em saber, dentro de um determinado período, a quantidade de recursos que serão necessários para atender à demanda d'água das populações carentes. O segundo nível preocupa-se com a execução das operações relativas ao transporte d'água propriamente dito. As informações que interessam são bem detalhadas, por exemplo, para atender a demanda na localidade A, de onde se deve trazer a água, que rota se deve seguir e que veículo deve ser utilizado.

No que se apresenta a seguir admite-se que diante do surgimento de uma nova situação emergencial, a nível de planejamento estratégico, as políticas a serem adotadas para o atendimento das populações

carentes d'água já estão definidas e a estratégia a ser adotada será o transporte d'água através de carros-pipas.

Acredita-se que esta suposição não seja irreal, pelo menos para os próximos anos, visto que uma mudança no quadro apresentado só será possível mediante uma vultosa injeção de recursos na região.

2.4 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Considera-se um conjunto de n localidades L1,...,Ln ou pontos de entrega, que devem ser abastecidos de água cujas fontes ou pontos de oferta se localizam nos lugares F1,...,Fr. Representam-se por D1,..,Dn as quantidades de água (em metros cúbicos) que devem ser recebidas respectivamente por L1,...,Ln dentro dos respectivos períodos de tempo T1,..,Tn.

As fontes de abastecimento nem sempre se ligam diretamente com todas as localidades. Por exemplo, pode ocorrer que uma entrega da fonte Fr para a localidade Lk não possa ser feita sem antes passar, pelo menos, por uma localidade intermediária Lj. Além disso pode existir entre dois nós da rede duas estradas diferentes: uma afastada e outra de terra. Um exemplo típico de uma rede pode ser visto na Figura 2.2.

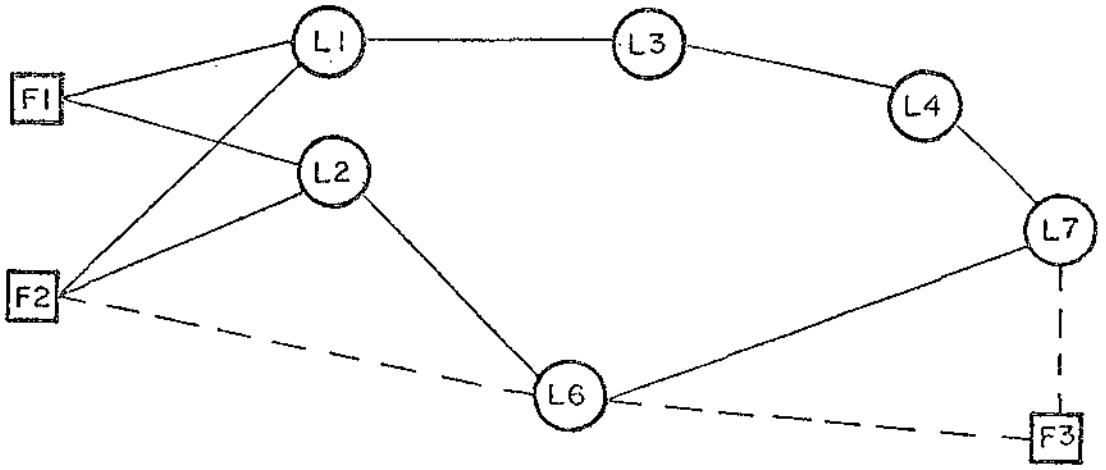

Fig. 2.2 - Rede típica.

Nesta rede a fonte F1 tem ligação direta, através de estrada asfaltada, somente com as localidades L1 e L2; a fonte F2 tem ligação direta, através de estrada asfaltada, somente com as localidades L1 e L2 e através de estrada de terra com a localidade L6; e a fonte F3 tem ligação direta, através de estrada de terra, somente com as localidades L6 e L7. Desta forma, como nenhuma fonte se liga diretamente com as localidades L3 e L4, então uma entrega a qualquer uma delas tem obrigatoriamente que passar por localidades intermediárias.

Não existe frota própria para executar o transporte de água. No entanto existem veículos disponíveis no mercado que podem ser facilmente contratados para compor a frota. Esses veículos são de tipos diferentes, cada tipo com características próprias em termos de capacidade de carga, vias de acesso e custo de operação. O órgão que aluga o uso destes veículos impõe uma restrição quanto à quilometragem máxima que ele paga por mês a cada veículo.

Por questões operacionais não é possível abastecer simultaneamente, numa mesma fonte Fj, mais que Nj veículos (Nj é o número de motos-bombas instaladas na fonte Fj).

O sistema admite também entregas compartilhadas por tipos diferentes de veículos, ou seja, o transporte d'água da fonte Fj para a localidade Lj pode ser compartilhado por veículos de diferentes tipos, da seguinte maneira: um tipo de veículo se abastece em Fj e descarrega sua carga em uma localidade intermediária Lk onde um outro tipo de veículo se abastece e leva a água até Lj. É èvidente que este tipo de entrega só pode ser feito se em Lk exister infra-estrutura para manuseio da água, por exemplo, capacidade de armazenamento.

O problema é minimizar os custos de transporte d'água para atender a demanda dentro de um determinado horizonte de planejamento; determinar locais potencialmente interessantes para a construção de tanques de transbordo; quantificar a água retirada de cada fonte; além de elaborar uma programação diária de distribuição que satisfaça todas as restrições de funcionamento do sistema.

Motta(1985) trata um problema de roteamento de veículos para distribuição de água em cidades a partir de vários reservatórios nela existentes. Uma de suas hipóteses é a existência de água armazenada nos reservatórios em quantidade suficiente para suprir a demanda urbana. O seu trabalho também foi inspirado em situações reais que ocorrem em cidades do interior do Estado do Ceará em épocas de seca extrema.

A demanda de toda uma cidade representa apenas um ponto de demanda para o problema apresentado neste trabalho. Considera-se o transporte de água das fontes distantes para tanques receptores. No caso particular de o tanque receptor for o de uma cidade, há uma necessidade posterior de distribuição da água pela cidade, a partir destes tanques receptores. Portanto, as considerações feitas em Motta(1985) complementam a deste trabalho.

A Figura 2.3 ilustra a estratégia adotada, considerando os dois níveis hierárquicos identificados na Seção 2.3.

No nível 1 tem-se um modelo agregado que fornece o custo total, o fluxo da água e consequentemente o correspondente número de voltas dadas pelos diversos tipos de veículos necessários para a exeução deste serviço.

O nível 2 utiliza os dados fornecidos pelo nível 1 e outros parâmetros referentes às características dos veículos e das entradas e determina as rotas que compõem todo o esquema ótimo. Para calcular o número de veículos necessários para a execução do serviço diário, em cada fonte de abastecimento, mostra-se que para este cálculo pode-se resolver equivalentemente um problema de seqüência de tarefas independentes que não admitem interrupção e que devem ser processados em máquinas idênticas. O objetivo neste problema de programação é minimizar o número de máquinas necessárias para processar todas as tarefas, respeitando um prazo W comum a todas as tarefas. Este problema é conhecido também como o problema do "bin-packing". Para verificar se a programação é viável realiza-se uma simulação do funcionamento do sistema, relativa à programação proposta.

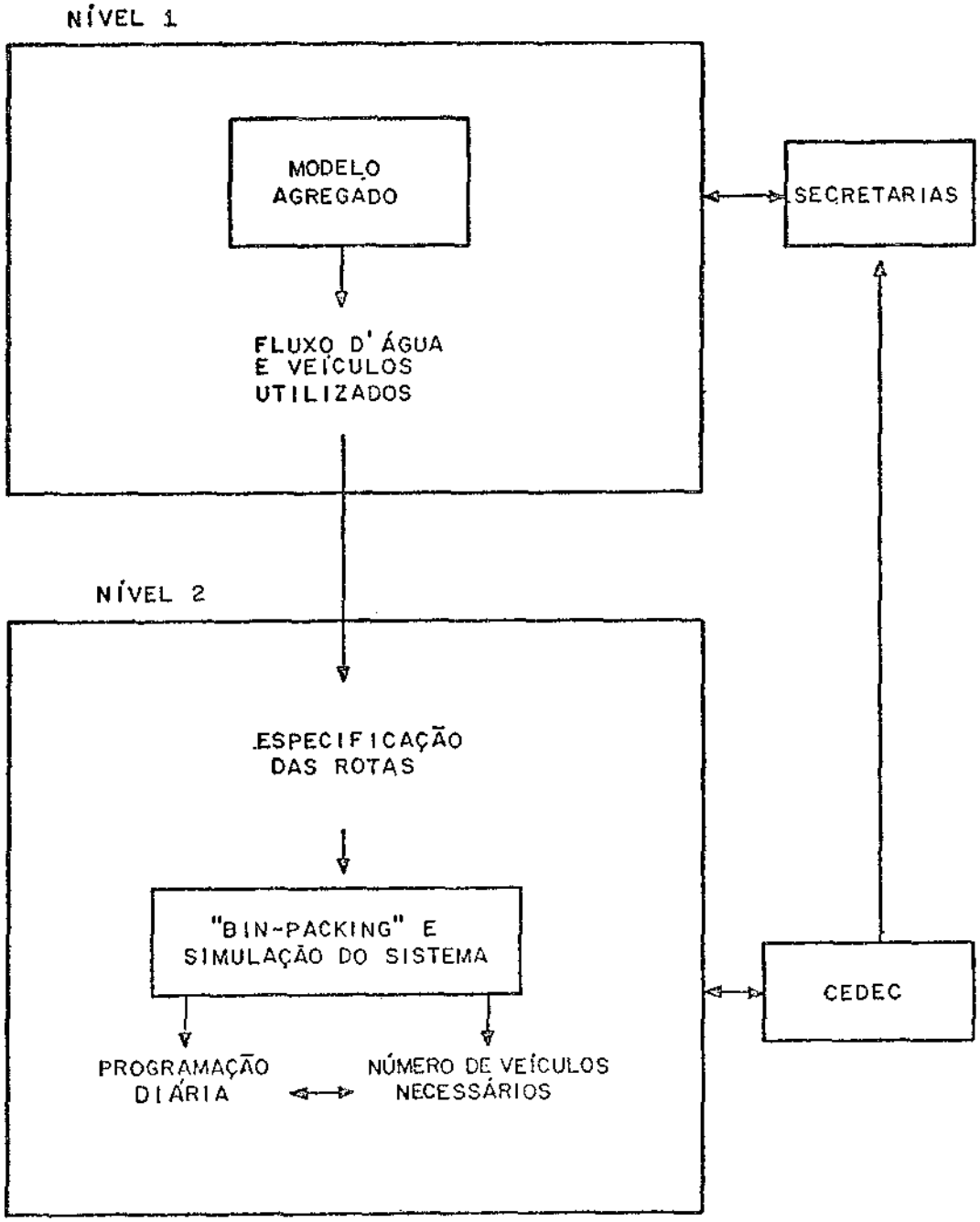

Fig. 2.3 - Estratégia a ser adotada.

CAPÍTULO 3

REVISÃO DA LITERATURA

Uma tarefa bastante trabalhosa e demorada para o analista é identificar corretamente o problema através do estudo do sistema e das informações fornecidas pelos administradores.

O decisor muitas vezes identifica a necessidade de uma análise, dada a ineficiência e falta de controle do sistema. Porém, o problema que origina o funcionamento não-satisfatório do sistema não é claramente identificado pelo decisor.

No sistema abordado não foi possível identificar inicialmente que tipo de informações eram relevantes para os gerenciadores e usuários do sistema.

Um primeiro diagnóstico mostrou o sistema composto basicamente pelas fontes de abastecimento, os pontos de entrega com suas respectivas demandas, as estradas que ligam as fontes de oferta aos pontos de entrega e as características dos veículos disponíveis para a execução do serviço.

Sob este aspecto acreditava-se que a otimização das rotas era o problema a ser resolvido e, neste caso, o problema apresentava-se como um problema de roteamento de veículos (PRV). Assim, alguns trabalhos que abordavam o PRV foram pesquisados. Dentre eles, podem-se citar os trabalhos de Dantzig e Ramser(1959) que apresentaram uma primeira definiçao do PRV; Christofides e Eilon(1969) que definem uma série de novos problemas a partir do problema padrão de Dantzig e apresentam os prodecimentos de solução desenvolvidos até então, propondo também uma heurística para o PRV; Bodin e Golden(1981) que apresentam um sistema referencial através do qual qualquer PRV específico pode ser enquadrado e sugerem separação dos trabalhos de acordo com o tipo de solução apresentada na literatura Outros trabalhos pesquisados foram os de Gillett e Miller(1974), Gillett e Johnson(1976), Newton e Thomas(1974), Bodin e Berman(1979), Bodin e Krush(1978,1979), Clarke e Wrisht(1964), Norback e Love(1977), Gaskell

(1967), Holmes e Parker(1976), Golden et alii(1980), Olivo e Yanasse (1984), Croes(1958), Lin(1965), Lin e Kernighan(1973), Russel(1977), Stewart e Golden(1984), Fisher e Jaikumar(1981), Christofides et alli(1981), Sampron e Faria(1982), Lenstra e Rinnooy Kan(1981), Krolak et alli(1972)e Magnanti(1981).

Com o amadurecimento das idéias acerca do problema, o funcionamento do sistema tornou-se mais aparente e pode-se então questionar e analisar que tipo de informações seriam relevantes para as Secretarias e usuários do sistema. Desta análise notou-se que para as Secretarias não eram necessárias informações detalhadas ao nível da rotina diária dos veículos como o que se pretendia com o PRV, mas sim informações globais que auxiliassem no gerenciamento do sistema. Além disto, existe uma hierarquia ao nível governamental onde as Secretarias estão a um nível mais elevado que as Coordenadorias e estas últimas fazem a programação de acordo com normas ditadas pelas Secretarias. Sob este aspecto uma abordagem hierarquizada composta por dois modelos, um modelo agregado de transporte d'água endereçado às Secretarias e um outro modelo da programação diária de distribuição d'água endereçado aos operadores do sistema, pareceu adequar-se bem ao problema enfocado.

A abordagem hierárquica aqui utilizada tem paralelo com os cargos hierárquicos nos sistemas governados pelo homem e, recentemente, após o perfeito entendimento do conceito de sistemas, passou a receber maior cuidado científico, constituindo-se hoje num campo fértil de pesquisa.

Decisões que são tomadas em níveis mais altos impõem restrições sobre a ação de níveis mais baixos, e as decisões tomadas em níveis mais baixos resultam em determinadas saídas que são analisadas para reavaliar as ações dos níveis mais altos.

É oportuno apresentar os enfoques na abordagem hierárquica que deram subsídios para seu aparecimento neste trabalho.

Bradley et alli(1977) apresentam para a Ciência da Administração, uma hierarquia de três níveis: planejamento estratégico, planejamento tático e operações de controle.

O planejamento estratégico cuida do estabelecimento de políticas administrativas e do desenvolvimento de recursos necessários à organização para satisfazer seus requerimentos externos de maneira consistente com seus objetivos.

As decisões tomadas ao nível de planejamento estratégico são extremamente importantes, pois delas depende a existência da própria organização. Por isto essas decisões são tomadas pelas pessoas que ocupam o nível mais alto da organização. São decisões tomadas para longo prazo, e os detalhes das informações são altamente agregados.

O planejamento tático cuida de atender a demanda e as restrições tecnológicas da organização pela efetiva alocação dos recursos, levando em conta o custo e a recompensa associados com a operação dos recursos.

Decisões tomadas no planejamento tático ficam a cargo de pessoas que ocupam, dentro da organização, um nível hierárquico médio. São também tomadas para um horizonte médio, e o nível de agregação dos detalhes já é moderado.

As operações de controle cuidam da vida da organização no dia a dia. Isto requer uma desagregação completa das informações geradas em níveis superiores, em detalhes consistentes com os procedimentos administrativos para as atividades diárias. São decisões tomadas para curto prazo por pessoas que ocupam um baixo nível hierárquico na organização.

A abordagem hierárquica está encontrando adeptos principalmente na análise de problemas que envolvem decisões em vários níveis. Discussões gerais sobre planejamento hierárquico podem ser encontradas em Bitran e Hax(1977) e Bradley et alli(1977).

Um sistema hierarquizado usa, por exemplo, modelos separados de programação matemática para tomar as decisões em cada nível. A solução de um modelo em um nível mais alto fornece informações e/ou cria restrições para o modelo que fica abaixo.

Dempster et alli(1981) justificam o uso da abordagem hierárquica na redução da complexidade, pois quebrar um problema em sub-problemas é um método padrão usado para simplificar o processo de solução. É interessante que esta partição seja feita de modo que haja uma realimentação de informações entre os modelos relacionados com os diversos níveis de decisão. Esta falta de realimentação constitui uma fraqueza dos sistemas de planejamento hierárquico que impede muitas vezes a otimização global do sistema.

Dempster et alli(1981) fazem uma revisão de alguns sistemas hierárquicos que foram desenvolvidos e apresentam uma avaliação de um sistema de planejamento hierárquico, a qual infelizmente parece ser de difícil extensão a outros sistemas hierarquizados. Alguns exemplos destes sistemas são apresentados abaixo:

1) Planejamento de produção agregado/detalhado

Um enfoque hierarquizado composto de dois níveis (planejamento agregado e planejamento detalhado) tem sido sugerido para este problema. O planejamento agregado é extensivamente discutido por Buffa e Taubert(1972), Hax(1978), Silver(1967) e Contador e Yanasse(1984), e o planejamento detalhado é discutido por Hax e Meal(1975), Winters(1962), Bitran e Hax(1977) e Bitran et alii(1981).

2) Programação/planejamento de "Job Shop"

Este problema trata da especificação do número de máquinas e a atribuição de tarefas para as máquinas. No enfoque hierárquico, o nível mais alto determina o número de máquinas, e o nível mais baixo faz à atribuição das tarefas. Armstrong e Hax(1977) apresentam uma estrutura hierárquica para este problema.

3) Controle/planejamento de sistema de distribuição

No nível mais alto estão as questões de alocação de fábrica, armazéns etc. e no nível mais baixo estão questões como alocação de

clientes para armazéns e a determinação do fluxo de comodidades através do sistema. Hax(1977) apresenta uma abordagem composta de dois níveis para este problema.

4) Roteamento/programação de veículos

Este problema trata o sistema de entrega de produtos de uma organização aos seus clientes, através de uma frota própria de veículos Abordagens hierárquicas para este problema foram sugeridas por Fisher e Jaikumar(1981) e Golden e Yee(1979).

No sistema abordado existe uma hierarquia evidente entre as Secretarias e a CEDEC, portanto a abordagem hierárquica se adequa justamente a esta situação. Esta abordagem é constituída por um modelo agregado, que é endereçado às Secretarias (nível mais elevado), e por um modelo operacional que é endereçado à CEDEC.

O modelo agregado é um modelo de fluxo em rede com restrições adicionais. Sobre modelos de fluxo em rede muitos trabalhos já foram desenvolvidos. Em particular, Magnanti e Wong(1984) apresentam um excelente estudo do uso e limitações de modelos de fluxo em rede e descrevem vários algoritmos; Brooks(1981) e Debanne(1975) desenvolveram modelos de fluxo em rede para analisar o efeito das mudanças na distribuição e alocação de gás natural nos Estados Unidos; Kennington(1978) apresenta uma revisão dos modelos de fluxo em rede para transporte de várias comodidades com custos lineares; e Garvin et alli(1957) apresentam aplicações de modelos de fluxo em rede na indústria de petróleo.

O modelo operacional resulta num problema do "bin-packing" (veja Johnson et alii, 1974) cuja discussão é feita com maiores detalhes na Seção 4.2, combinado com a simulação do funcionamento do sistema ao nível operacional.

CAPÍTULO 4

MODELOS

4.1 - MODELO AGREGADO

Uma das primeiras dificuldades na elaboração do modelo é a seleção do horizonte de tempo que deve ser considerado. O horizonte é escolhido de modo que cubra todos os períodos onde fatores significantes podem afetar o processo de decisão em estudo.

No problema abordado existem diferentes freqüências para as entregas da água nos diversos centros de demanda; a menor delas fica em torno de trinta dias. Um horizonte menor que trinta dias não deve ser escolhido para o planejamento porque deixa de incluir alguns fatores, talvez importantes, para a tomada de decisão. Assim, o horizonte deve ser pelo menos tão grande quanto o maior dos períodos de entrega, no caso trinta dias.

O objetivo do modelo agregado é determinar um esquema de fluxo da água das diversas fontes para os diversos pontos de demanda a um menor custo. Com o conhecimento deste esquema a SAAb disporá de informações quanto a pontos onde é interessante a construção de tanques receptores, quais tipos de veículos usar para o transporte d'água e a quantidade d'água que deveria ser retirada de cada fonte que abastece o sistema.

Antes de apresentar a formulação matemática do modelo agregado, será útil introduzir a notação simbólica usada e descrever os parâmetros e as variáveis de decisão do modelo.

PARÂMETROS

Di = quantidade de água (em metros cúbicos) demandada pela localidade i durante o horizonte considerado,

Qk = capacidade de carga de um veículo do tipo k,

Di,j,k = distância (em km) entre os nós i-j para veículos do tipo k,

Ck = custo total (por quilômetro) de um veículo do tipo k,

Ti,k = tempo que um veículo do tipo k leva para ser recarregado por uma moto-bomba instalada no nó i (i pode ser uma fonte ou um nó de transbordo).

Ni = número de motos-bombas instaladas no nó de recarregamento i,

T = número limite de horas trabalhadas por uma moto-bomba durante o horizonte considerado.

VARIÁVEIS DE DECISÃO

xi,j,k = número de viagens de veículos do tipo k que saem do nó i e chegam ao nó j através do arco (i,j) durante o horizonte considerado,

yi,j,k = quantidade de água (em metros cúbicos) a ser transportada do nó i para o nó j através do arco (i,j) pelos veículos do tipo k, durante o horizonte considerado.

Definem-se ainda os conjuntos:

Aj = {i/i é um nó da rede e o arco (i,j) pertence à rede} ;

Bj = {i/i é um nó da rede e o arco (j,i) pertence à rede} ;

S = conjunto de todas as fontes que abastecem o sistema.

FUNÇÃO OBJETIVO

O sistema de transporte d'água implantado pelo Governo visa apenas atender às populações carentes, no sentido de ofertar água (gratuita) a estas populações. Desta forma, o objetivo não é o lucro. A função objetivo deverá ser a minimização dos custos do transporte d'água.

O custo incorrido por todos os veículos do tipo k que trafegam no arco (i,j) durante o horizonte considerado é dado por

$$\sum_{i \in A_j} Ck.\ Di,j,k\ .\ xi,j,k,$$

e o custo total incorrido pelo tráfego total, durante o horizonte considerado, dos veículos tipo k é dado por

$$\sum_{j} \sum_{i \in A_j} Ck\ .\ Di,j,k\ .\ xi,j,k\ .$$

O custo total incorrido por toda a frota durante o horizonte considerado é dado por

$$\sum_{k} \sum_{j} \sum_{i \in A_j} Ck.\ Di,j,k\ .\ xi,j,k\ .$$

RESTRIÇÃO DE SATISFAÇÃO DA DEMANDA

Para que a demanda num nó j seja satisfeita, é necessário que toda a água transportada para este nó menos toda a água que for transportada deste nó seja igual à quantidade d'água demandada por este nó.

A quantidade de água transportada para um nó j é representada por

$$\sum_{k} \sum_{i \in A_j} yi,j,k,$$

e a quantidade de água que é transportada de um nó j é representada por

$$\sum_{k} \sum_{h \in B_j} yj,h,k\ .$$

Assim, para que a demanda no nó j seja satisfeita deve-se ter

$$\sum_{k}\sum_{i\in A_j} y_{i,j,k} \quad - \quad \sum_{k}\sum_{h\in B_j} y_{j,h,k} \quad = D_j.$$

Como o sistema admite a existência de nós que servem apenas para fazer o transbordo da água, então as restrições de equilíbrio de massa são:

$$\sum_{k}\left(\sum_{i\in A_j} y_{i,j,k} - \sum_{i\in A_j} y_{j,h,k}\right) = \begin{cases} D_j, \text{ se } j \text{ for um centro de demanda,} \\ \\ \\ 0, \text{ se não existir demanda no nó } j. \end{cases}$$

Serão chamados *nós de transbordo* aqueles onde é possível fazer o transbordo da água independentemente de haver ou não demanda nos referidos nós.

RESTRIÇÃO DE CIRCULAÇÃO DOS VEÍCULOS

A próxima restrição evita que veículos que chegam em um nó permaneçam parados neste nó durante todo o período de consideração.

O número de vezes que veículos do tipo k chegam no nó j durante o horizonte considerado é representado por

$$\sum_{i\in A_j} x_{i,j,k}$$

e o número de vezes que veículos do tipo k saem do nó j durante o horizonte considerado é dado por

$$\sum_{h\in B_j} x_{j,h,k}.$$

Para que haja uma circulação dos veículos, deve-se estabelecer para um mesmo tipo de caminhão, que o número total de chegadas em um nó j seja igual ao número total de saídas, ou seja,

$$\sum_{i \in A_j} x_{i,j,k} = \sum_{h \in B_j} x_{j,h,k} \quad \text{para todo } j \text{ e para todo } k.$$

RESTRIÇÃO DE CAPACIDADE

Para assegurar que a capacidade de carga dos veículos que trafegam em um arco (i,j) é suficiente para transportar a água neste arco, deve-se ter

$$y_{i,k,j} \leq Q_k \cdot x_{i,j,k} \quad \text{para todo arco } (i,j) \text{ pertencente à rede e para todo } k.$$

RESTRIÇÃO DE TEMPO

O carregamento de um veículo é feito por uma moto-bomba que demanda um certo tempo para executar este serviço. Para assegurar a viabilidade do carregamento da frota é necessário introduzir uma restrição de tempo naqueles nós onde os veículos se abastecem.

Nas fontes de abastecimento, o tempo total gasto durante todo o período em consideração para recarregar os veículos que se abastecem em um nó i deve ser no máximo igual ao tempo disponível das motos-bombas neste nó. Para as fontes de abastecimento tem-se:

$$\sum_{k} \sum_{j \in B_i} T_{i,k} \cdot x_{i,j,k} \leq T \cdot N_i \quad \text{para toda fonte } i \text{ de abastecimento.}$$

Para os nós de transbordo, esta restrição fica um pouco diferente. Com efeito, admita-se que na Figura 4.1 o nó F representa uma fonte de abastecimento que se liga, através de estrada asfaltada, com o nó de transbordo 1, e este se liga, através de estrada asfaltada com o centro de demanda 2 e através de estrada de terra com o centro de

demanda 3. Além disto, admita-se que o nó de transbordo 1 também possui uma certa demanda. Admita-se também que toda a água que chega no nó 1 é transportada por veículo do tipo 1.

O esquema de abastecimento da Figura 4.1 pode ser visto mais detalhadamente na Figura 4.2. Neste último esquema o arco (F,2) representa a rota para os veículos que abastecem 2, o arco (F,1) representa a rota para os veículos que atendem a demanda de 1, e o arco (F,1')representa a rota dos veículos tipo 1 que levam a água que fica provisoriamente armazenada em 1 antes de ser transportada daí até 3, por veículo do tipo 2.

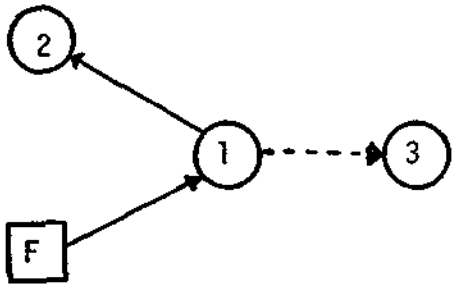

Fig. 4.1 - Esquema inicial para explicar a restrição de tempo nos nós de transbordo.

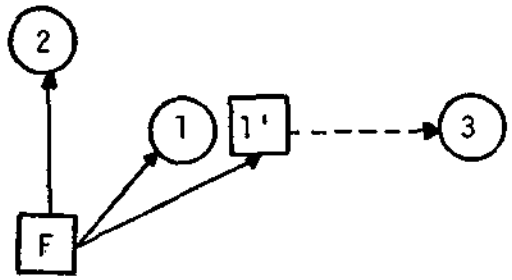

Fig. 4.2 - Esquema final para explicar a restrição de tempo nos nós de transbordo.

Como pode ser visto na Figura 4.1, pelo nó 1 passam os veículos que abastecem 2, os que atendem a demanda de 1 e aqueles que levam a água até 1 para ser posteriormente transportada até 3. Na figura 4.2 pode ser visto que os veículos que se abastecem em 1 (os que efetivamente utilizam o tempo disponível pelas motos-bombas aí instaladas) são apenas aqueles que trafegam no arco (1',3) cujo número de viagens de veículos cheios é dado por

$$y_{1',3,2}/Q_2 - y_{F,1,2}/Q_2 - y_{2,1,2}/Q_2 .$$

A quantidade acima seleciona, dentre todos os veículos que atingem o nó 1, aqueles que efetivamente se abastecem aí. Desta forma a restrição de tempo para o nó 1 poderia ser escrita com o auxílio de um limitante superior $z_{1,2}$ para o número de viagens de veículos do tipo 1 que trafegam carregados de 1 para 3. Com o auxílio desta variável a restrição de tempo é escrita como

$$T_{1,2} \cdot z_{1,2} \leq T \cdot N_1,$$

onde

$$z_{1,2} \geq 0 \text{ e}$$

$$z_{1,2} \geq y_{1',3,2}/Q_2 - y_{F,1,2}/Q_2 - y_{2,1,2}/Q_2 .$$

Para um nó de transbordo qualquer a restrição de tempo é generalizada para

$$z_{j,k} \geq \sum_{h \in B_j} y_{j,h,k}/Q_k - \sum_{i \in A_j} y_{i,j,k}/Q_k$$

$$\sum_K T_{j,k} \cdot z_{j,k} \leq T \cdot N_j$$

$z_{j,k} \geq 0$ para todo nó j de transbordo e todo k.

Além das restrições acima, deve-se ter também as restrições de não-negatividade das variáveis $x_{i,j,k}$; $y_{i,j,k}$ para todo i,j,k.

Apresenta-se a seguir toda a formulação matemática do modelo:

$$\text{MIN} \sum_k \sum_j \sum_{i \in A_j} Ck \cdot Di,j,k \cdot xi,j,k$$

S.A.

$$1. \sum_k \left(\sum_{i \in A_j} yi,j,k - \sum_{h \in B_j} yj,h,k \right) = \begin{cases} D_j, & \text{se } j \text{ for um centro de demanda} \\ 0, & \text{se } j \text{ for nó de transbordo} \end{cases}$$

$$2. \sum_{i \in A_j} xi,j,k = \sum_{h \in B_j} xj,h,k \quad \text{para todo } j \text{ e todo } k.$$

$$3. yi,j,k \leq Qk \cdot xi,j,k \quad \text{para todo arco } (i,j) \text{ pertencente à rede e para todo } k.$$

$$4. zj,k \geq \sum_{h \in B_j} yj,h,k/Qk - \sum_{i \in A_j} yi,j,k/Qk$$

$$\sum_k Tj,k \cdot zj,k \leq T \cdot Nj$$

$$zj,k \geq 0 \quad \text{para todo nó de transbordo } j \text{ e todo } k$$

$$5. \sum_k \sum_{j \in B_j} Ti,k \cdot xi,j,k \leq T \cdot Ni \quad \text{para todo nó } i \text{ fonte.}$$

$$6. xi,j,k \geq 0; \; yi,j,k \geq 0 \quad \text{para todo } i,j,k.$$

A seguir são feitas algumas discussões acerca do modelo proposto que é de fluxo em rede com algumas restrições adicionais. Para o problema de fluxo em rede existem algoritmos específicos que exploram a estrutura deste problema tornando-se extremamente eficientes.

Talvez seja possível explorar a estrutura do modelo de fluxo existente. Porém, não se tem por objetivo neste trabalho explorar esta característica deste modelo. O modelo de programação linear resultante pode ser resolvido utilizando os pacotes comerciais do método simplex existentes os quais fornecem também outras informações que se tenta buscar, tais como análise de sensitividade.

Vale salientar que a integridade das variáveis de decisão xi,j,k foi relaxada. Isto, além de simplificar razoavelmente a solução do modelo, não constitui uma aproximação comprometedora da veracidade do modelo, se se considerar que a solução encontrada é um valor médio e, como tal, deverá ser satisfeito em média. Por outro lado, frações encontradas podem sempre ser ajustadas aos números inteiros mais próximos. Dependendo da magnitude dos xi,j,k, isto pode não mudar significativamente o custo incorrido. Além disso, variações e erros dos próprios dados utilizados podem estar afetando a solução ótima mais que a da própria simplificação feita, de modo que um esforço maior ao considerar variáveis inteiras perderia seu significado.

O fato de se ter um modelo agregado linear torna possível realizar uma análise de sensitividade paramétrica com relativa facilidade. Além disso, os preços sombras relacionados às restrições são disponíveis por ocasião da solução do problema e fornecem subsídios adicionais à tomada de decisão. No modelo proposto, por exemplo, os preços sombras associados ao conjunto de restrições de satisfação da demanda representam o valor que tem um metro cúbico d'água para o sistema, em cada centro de demanda.

Um outro ponto que merece alguns comentários é quando à capacidade de armazenamento d'água nos nós de transbordo e receptores que não foram considerados explicitamente. Admite-se que para os nós de transbordo onde há capacidade de armazenamento, esta é sempre suficiente. Quando em um determinado nó não se tem capacidade para armazenar água além da própria demanda insere-se a restrição

$$z_{j,k} \geq \sum_{h \in B_j} y_{j,h,k}/Q_k - \sum_{i \in A_j} y_{i,j,k}/Q_k$$

$z_{j,k} = 0$ para todo k, para este nó.

Poder-se-iam utilizar as duas estruturas do modelo com e sem a inserção da restrição acima e comparar os custos incorridos. Com isto poder-se-ia ter uma estimativa do valor econômico de haver tanques de armazenamento instalados estrategicamente em determinados nós da rede.

Uma potencialidade do modelo que de certa forma é similar à quela observada acima é que ele possibilita responder à pergunta (levando em consideração apenas os custos da distribuição da água): quão interes sante será para o sistema se um determinado trecho da rede fosse asfal tado? Esta informação pode ser fornecida pela comparação dos custos de duas corridas do modelo, onde em uma delas é permitido o tráfego de veí culos do tipo 1 (jamantas) no trecho em questão.

Ainda como discussão acerca do modelo desenvolvido aborda-se agora a possibilidade de simplificá-lo quando aplicado a problemas simé tricos.

DEFINIÇÃO

Dados dois nós i e j numa rede R diz-se que estes nós têm distância simétrica se a distância de ir do nó i para o nó j é igual à distância de ir do nó j para o nó i. Diz-se que uma rede R tem distância simétrica se todos os seus nós que se ligam têm distância simétrica. Diz -se que um problema è simétrico se a rede que o caracteriza tem distância simétrica.

PROPOSIÇÃO

Para um modelo agregado simétrico a distância medida ao lon go da rota ótima a partir da fonte de abastecimento por um veículo do ti po k até um centro de demanda é igual à distância medida ao longo da rota ótima de retorno a partir do centro de demanda até a fonte onde este se abasteceu.

Prova

Sejam i1 a fonte de abastecimento, ir ($r \geq 2$) o centro de manda e i2,...,ir-1, os nós intermediários pelos quais passa a rota ótima que atinge ir.

Se dk(i,j) representa a distância do nó i ao nó j para o veículo tipo k, então a distância de i1 a ir é dada por

$$D_1^k = \sum_{k=1}^{r-1} dk(ik, ik+1),$$

e a distância de ir a il seguindo o mesmo caminho é dada por

$$D_2^k = \sum_{k=0}^{r-2} dk(ir-k,\ ir-(k+1)).$$

A rota ótima de retorno poderá ser a mesma que a da ida ou uma diferente onde $D_2^k \leq D_1^k$ (maior não poderia ser, pois já existe uma rota com distância igual a D_1^k).

Se $D_1^k > D_2^k$, então existe um caminho que liga ir a il cuja distância é menor que a distância da rota ótima. Dada a simetria do problema isto não pode ocorrer, pois violaria a otimalidade da rota ótima. Portanto $D_1^k = D_2^k$ na solução ótima.

Pela proposição acima conclui-se que em problemas simétricos, o conhecimento do caminho ótimo que liga uma fonte a um centro de demanda é suficiente para estabelecer a rota ótima; pois a volta, do centro de demanda para a fonte de abastecimento, é exatamente pelo mesmo caminho ou um caminho alternativo de mesma distância. Assim, em problemas simétricos, basta levar em consideração apenas a ida dos veículos e computar duplamente o custo.

As restrições do problema geral serão omitidas ou modificadas apropriadamente levando em consideração as observações acima.

No caso em que as distâncias não são simétricas, existe a possibilidade de os veículos retornarem por rotas diferentes daquelas que eles trafegaram quando cheios e, neste caso, só o conhecimento destas últimas não é suficiente para apresentar a solução ótima.

Para exemplos de problemas com distância simétrica, o modelo reduz-se ao apresentado a seguir. Neste modelo a variável xi,j,k representa o número de viagens de veículos do tipo k que saem carregados do nó i para o nó j através do arco (i,j) durante o horizonte considerado:

$$\text{MIN} \sum_k \sum_j \sum_{i \in Aj} 2.\, Ck.Di,j,k \;.\; xi,j,k$$

S.A.

$$1.\ \sum_k \left(\sum_{i \in Aj} Qk.xi,j,k - \sum_{h \in B} Qk.xj,h,k, \right) = \begin{cases} Dj, & \text{se } j \text{ for um centro de demanda.} \\ 0, & \text{se } j \text{ for um nó de transbordo.} \end{cases}$$

$$2.\ \sum_k \sum_{j \in B_i} Ti,k \;.\; xi,j,k \leq T.Ni \quad \text{para toda fonte } i \text{ de abastecimento.}$$

$$3.\ zj,k \geq \sum_{h \in Bj} xj,h,k - \sum_{i \in Aj} xi,j,k \quad \text{para todo nó de transbordo } j.$$

$$4.\ \sum_k Tj,k \;.\; zj,k \leq T \;.\; Nj \quad \text{para todo nó de transbordo } j.$$

$$5.\ xi,j,k \geq 0, \quad zj,k \geq 0 \quad \text{para todo } i,j,k.$$

Foi admitido que dentro do horizonte de planejamento (trinta dias) os elementos dinâmicos do sistema permanecerão constantes. Admitir isto significa, por exemplo, que neste período as fontes de abastecimento não secarão, os centros de demanda não se modificarão etc. Esta hipótese pode ser justificada porque o sistema evolui lentamente (conforme descrição na Seção 2.2), e o horizonte foi escolhido de tal maneira que considera estas particularidades. Este horizonte não pode ser muito grande devido à dinâmica do sistema, ou seja, dentro de um horizonte muito grande pode haver mudanças de alguns dos elementos dinâmicos, e a solução, neste caso, não estaria compatível com a realidade do sistema. Por outro lado, um horizonte muito curto pode deixar de fora elementos que afetam a decisão dentro do horizonte de planejamento. A escolha do horizonte deve considerar estes pontos. Para o sistema abordado um horizonte de 30 dias parece atender estas especificidades. Além disto, se dentro deste período ocorrer alguma mudança radical, nada impede que o sistema seja atualizado e feita nova corrida.

No final de cada trinta dias é feita uma reavaliação da evolução do sistema e ajustados seus elementos mutantes para a repetição do processo que norteará o período seguinte.

No modelo simétrico a variável $x_{i,j,k}$ é multiplicada por um fator 2 na função objetivo para considerar o retorno do carro-pipa pela mesma rota da ida. Há pois, implicitamente, a hipótese de que os carros-pipas sempre retornarão para aquela fonte de onde saíram carregados. Já no modelo não-simétrico não se exige o retorno do veículo para a fonte de onde saiu carregado, mas o número de veículos de cada tipo que entra e sai das fontes é o mesmo.

Como última observação, talvez seja interessante comentar o parâmetro T nos modelos, o tempo limite que uma moto-bomba pode trabalhar durante o horizonte de planejamento. Se houvesse sempre um veículo disponível em cada fonte ou nó de transbordo para ser abastecido pela moto-bomba, realmente poder-se-ia aproveitar ao máximo o limite de horas de operação da moto-bomba durante o horizonte de planejamento. Acontece que os veículos "circulam" e não há garantia de que as motos-bombas não fiquem ociosas. O parâmetro T, portanto, deve ser determinado levando em conta estas possíveis ociosidades.

Levantar o parâmetro T parece uma tarefa complexa, se feita analiticamente. Na Seção 4.2 sugere-se uma maneira operacional de levar em conta as possíveis ociosidades das motos-bombas.

4.2 - MODELO OPERACIONAL

O modelo apresentado anteriormente resolve o "nível 1" da Figura 2.3, fornecendo informações requeridas pelas Secretarias. Para completar a solução do problema é necessário elaborar um mecanismo que desagregue a solução apresentada no nível 1 e forneça todas as informações operacionais requeridas pela CEDEC. Com as informações disponíveis a CEDEC poderá fornecer às Secretarias informações adicionais de ordem prática. Nesta seção será mostrado o modelo operacional destinado ao detalhamento da solução apresentada pelo modelo tático descrito anteriormente.

Utilizando as rotas dos veículos relativas ao fluxo d' água ditado pelo modelo agregado é elaborada uma metodologia para encontrar o número mínimo de veículos que executarão as tarefas no dia a dia. Tal metodologia é baseada na solução do problema do "bin-packing" encontrado em Johnson et alii(1974) (a formulação deste problema encontra-se mais adiante nesta seção).

Com a resposta do modelo agregado em mãos, torna-se fácil especificar as rotas porque há a disponibilidade do fluxo dos carros que entram e saem dos diversos nós, dentro do horizonte considerado (as rotas são determinadas em função deste fluxo). Com estas rotas determinadas tem-se o número de viagens a serem dadas em cada uma delas dentro do horizonte em consideração e, a partir daí, pode-se elaborar uma lista das viagens que devem ser feitas cada dia a partir dos nós fontes e de transbordo.

As seguintes hipóteses são colocadas. As viagens a serem feitas em um dado dia são independentes (todas disponíveis no início da jornada de trabalho); não admitem interrupção, i.é., uma vez iniciada uma viagem por um dado veículo este só ficará disponível após completar inteiramente a viagem iniciada e toda a lista do dia deve ser completada (todas as entregas feitas) no final da jornada diária de trabalho considerada. O problema é encontrar o número mínimo de veículos que executem a lista diária de viagens.

O problema apresentado acima é equivalente ao problema de sequenciamento proposto por Graham(1966) cuja solução sugerida por Coffman et alii(1976) é baseada na resolução do problema do "bin-packing" definido a seguir:

" Dada uma lista L = (a1,...,an) de números reais ($0 \leq a_i \leq d, i=1,...,n$ e d um número real positivo), colocar os elementos de L dentro de um número mínimo L* de "bins" de modo que nenhum "bin" contenha números cuja soma exceda d".

Coffman et alli(1976) mostraram que o problema do "bin-packing" definido acima é equivalente ao problema de sequenciamento proposto por Graham(1966).

O problema do "bin-packing" é NP-difícil (veja-se Cook,1971 e Karp, 1972). A solução proposta por Coffman et alii(1976), e também sugerida neste trabalho, consiste em explorar a similaridade do problema de sequenciamento proposto por Graham(1966) com o problema do "bin-packing" e aproveitar as heurísticas já desenvolvidas para esse problema.

As heurísticas do "bin-packing" mais estudadas são de fácil aplicação (veja-se Coffman et alii,1976) as quais estão relacionadas a seguir:

ALGORITMO 1: primeiro ajuste (first-fit). Sejam os "bins" indexados como B1,B2,... Considera-se inicialmente que cada "bin" esteja vazio (ocupando o nível zero). Os números a1,a2,...,an serão colocados nesta ordem. Cada ak ($1 \leq k \leq n$) é colocado em Bj, onde j é o primeiro índice tal que Bj ocupa o nível $B \leq d-ak$.

ALGORITMO 2: melhor ajuste (best-fit). Similar ao algoritmo 1 só que cada ak ($1 \leq k \leq n$) é colocado em Bj, onde j é tal que Bj ocupa o nível B, e B + ak minimiza a capacidade não usada do "bin" (sobre todos os "bins" já utilizados).

ALGORITMO 3: primeiro ajuste com decrescimento (first-fit decreasing). A lista L =(a1,...an) é inicialmente arranjada de forma que $ai \geq ai+1$, i = 1,...n, e o algoritmo 1 é aplicado nesta última lista.

ALGORITMO 4: melhor ajuste com decrescimento (best-fit decreasing). A lista L =(a1,...an) é arranjada como no algoritmo 3, e o algoritmo 2 é aplicado nesta última lista.

A título de ilustração imagine-se um exemplo do problema do "bin-packing" em que d=18 e a lista L dada por L =(13,15,9,6,6,8,6,3,2). A Figura 4.3 mostra a solução encontrada pelo algoritmo 1 e a Figura 4.4 mostra a solução encontrada pelo algoritmo 2. Para aplicar os outros dois algoritmos a lista L é transformada na lista L' = (15,13,9,8,6,6,6,3,2). A solução apresentada pelos algoritmos 3 e 4 está esboçada na Figura 4.5.

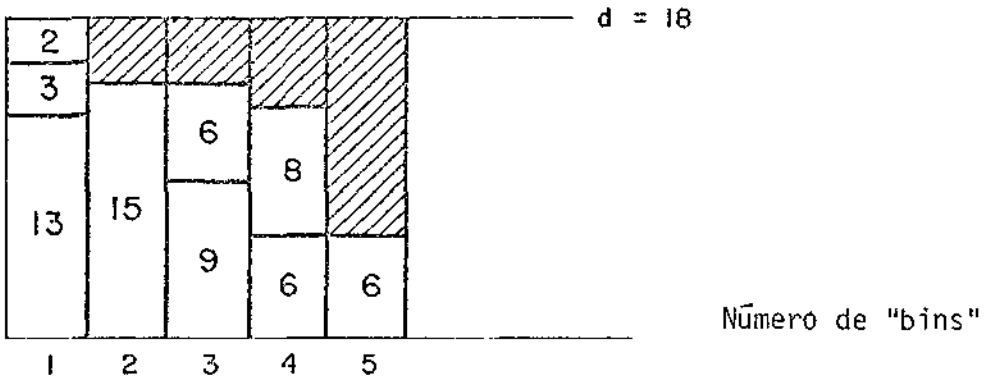

Fig. 4.3 - Solução encontrada pelo Algoritmo 1.

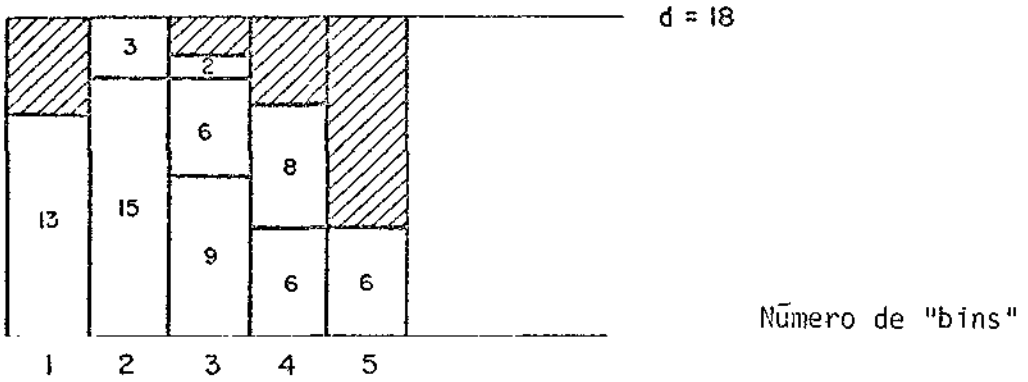

Fig. 4.4 - Solução encontrada pelo algoritmo 2.

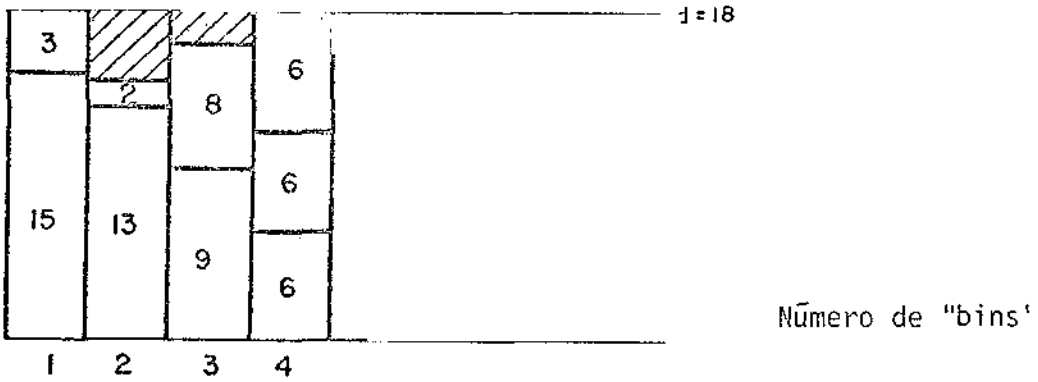

Fig. 4.5 - Solução encontrada pelos algoritmos 3 ou 4.

Dada a similaridade entre o problema da programação diária nas fontes de abastecimento e nos nós de transbordo e os trabalhos de Coffman, pode-se aplicar um dos quatro algoritmos heurísticos já desenvolvidos para o "bin-packing" e encontrar uma solução para a programação diária dos veículos.

Os trabalhos de Cook(1971) e Karp(1972) na teoria da complexidade indicam que o paroblema do "bin-packing" pode ser difícil de ser resolvido, no sentido de que sua solução otima exige uma quantidade proibitiva de tempo computacional mesmo para problemas não muito grandes. Assim, para resolver na prática tal problema, é necessário usar algoritmos aproximados que esperançosamente computem "boas" soluções em um tempo computacional aceitável.

A aplicação de algoritmos heurísticos para solucionar um determinado problema levanta a questão de qual é o erro que poderia estar sendo cometido ao utilizar estes procedimentos.

O trabalho de Johnson et alii(1974) mostra que as soluções dadas pelos quatro algoritmos apresentados anteriormente tendem a ser boas. Com efeito, seja L um exemplo de problema do "bin-packing" e Z(L) o valor ótimo de L. Será usada a notação ZPA(L), ZMA(L), ZPAD(L) e ZMAD(L) para denotar o número de "bins" requeridos quando for aplicado ao problema L respectivamente os algoritmos 1, 2, 3 e 4.

São os seguintes os resultados apresentados por Johnson et alii(1974):

1) Para todo L $ZPA(L) \leq 1.7xZ(L) + 2$ e
$ZMA(L) \leq 1.7xZ(L) + 2.$

2) Para toda lista L $ZPAD(L) \leq 11/9xZ(L) + 4$ e
$ZMAD(L) \leq 11/9xZ(L) + 4.$

Pode-se escolher o algoritmo heurístico a ser empregado dependendo do problema L (se Z(L) for grande parece ser preferível os algoritmos 3 e 4).

Recapitulando, dado um exemplo de problema de distribuição definido na Seção 2.4, será necessário em primeiro lugar montar a rede que o caracteriza e a seguir alimentar o modelo descrito no "nível 1" com os dados relativos ao exemplo do problema.

O nível 1 fornecerá uma solução útil para as Secretarias Estaduais e também "entradas" para o "nível 2".

Como "entradas" do nível 2 tem-se a especificação das rotas com os correspondentes números de viagens a serem dadas pelos carros-pipas durante o período em consideração. Uma vez feita a especificação das rotas invoca-se uma das heurísticas do "bin-packing" para fornecer a programação diária dos veículos.

Na restrição de tempo do modelo agregado admite-se inicialmente que tanto as motos-bombas como os carros-pipas estão efetivamente sendo utilizados em 100% da jornada diária de trabalho. Como conseqüência, os carros-pipas não poderiam ficar esperando na fila para serem enchidos pelas motos-bombas e estas não poderiam ficar ociosas esperando que algum veículo retorne para ser enchido. É pouco provável que seja sempre conseguida uma programação que respeite as observações acima. O exemplo abaixo é útil para esclarecer este ponto.

Seja F1 uma determinada fonte de abastecimento que dispõe de duas motos-bombas. Admite-se que a saída do modelo agregado possibilitou a especificação das cinco rotas detalhadas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1

SAÍDA DO MODELO AGREGADO

ROTA	TEMPO (MIN)	NÚMERO DE VIAGENS
1	60	16
2	48	20
3	34	28
4	30	32
5	24	40
	TOTAL:	136

Foi suposta uma jornada diária de trabalho de oito horas para os carros-pipas. Admitindo que cada carro-pipa leve sete minutos para ser enchido por uma das moto-bomba, então as motos-bombas têm capacidade suficiente para encher 136 veículos se também tiverem uma jornada de trabalho igual a oito horas. Visto que o número de viagens totaliza 136, seria possível tal programação desde que as motos-bombas não fiquem ociosas em nenhum instante.

Para determinar a programação diária dos carros-pipas foi utilizada a heurística de "melhor ajuste com decrescimento", a qual determinou um mínimo de dez veículos cuja composição está mostrada na Tabela 4.2

Para efetivar a programação dos veículos mostrada na Tabela 4.2 estabeleceram-se políticas para despachar os veículos. Para o estabelecimento destas políticas, monta-se inicialmente a matriz R cuja i-ésima linha dá a composição de rotas do i-ésimo veículo, bastando verificar o elemento da j-ésima coluna que mostra quantas viagens da j-ésima rota estão atribuídas ao i-ésimo veículo. Serão formuladas políticas em função desta matriz. Admite-se que na matriz R rotas especificadas por números maiores correspondem a percursos de tempos menores. A matriz das rotas referente ao exemplo anterior é mostrada na Tabela 4.3.

TABELA 4.2

COMPOSIÇÃO DOS VEÍCULOS DETERMINADA PELA HEURÍSTICA DO MELHOR AJUSTE COM DECRESCIMENTO

VEÍCULO	NÚMERO DE VIAGENS	ROTA
1	8	1
2	8	1
3	10	2
4	10	2
5	14	3
6	14	3
7	16	4
8	16	4
9	20	5
10	21	5

TABELA 4.3

MATRIZ DAS ROTAS

NÚMERO DO VEÍCULO	NÚMERO DA ROTA 1	2	3	4	5	=Nr
1	8	0	0	0	0	
2	8	0	0	0	0	
3	0	10	0	0	0	
4	0	10	0	0	0	
5	0	0	14	0	0	
6	0	0	14	0	0	
7	0	0	0	16	0	
8	0	0	0	16	0	
9	0	0	0	0	20	
Nv=10	0	0	0	0	20	

As políticas formuladas foram as seguintes:

1) despachar os veículos na ordem 1,2,...,Nv e redespachá-los na ordem de retorno; cada veículo faz suas entregas percorrendo as rotas no sentido 1,2,...,Nr;

2) despachar os veículos na ordem 1,2,...,Nv e redespachá-los na ordem de retorno; cada veículo faz suas entregas percorrendo as rotas no sentido Nr, Nr-1,...,1;

3) despachar os veículos na ordem Nv, Nv-1...,1 e redespachá-los na ordem de retorno; cada veículo faz suas entregas percorrendo as rotas no sentido 1,2,...,Nr;

4) despachar os veículos na ordem Nv, Nv-1,...,1 e redespachá-los na ordem de retorno; cada veículo faz suas entregas percorrendo as rotas no sentido Nr, Nr-1,...,1.

A Tabela 4.4 resume o resultado das políticas 1 e 3 aplicadas ao exemplo do texto. Os resultados para as políticas 2 e 4 não diferiram das políticas 1 e 3, razão pela qual não são apresentados.

TABELA 4.4

APLICAÇÃO DAS POLÍTICAS

POLÍTICA	TEMPO MÉDIO DA OCIOSIDADE DA MOTO-BOMBA	TEMPO MÉDIO DE ESPERA PELO VEÍCULO
1	184	88
3	135	74

Como pode ser visto na Tabela 4.4, nenhuma das duas políticas possibilitou a utilização sem ociosidade dos carros-pipas e das motos-bombas durante toda a jornada diária de trabalho. As programações não seriam viáveis para nenhuma das duas políticas testadas acima, dentro da jornada de trabalho considerada.

Outras políticas poderão ser definidas. Por exemplo, definição de horário escalonado para os motoristas dos carros-pipas. Esta política evitaria a formação de fila no início da jornada de trabalho e consequentemente diminuiria o tempo de espera dos carros-pipas. Uma outra possibilidade seria a formação de uma política híbrida composta pela combinação, por exemplo, dos políticos 1 e 3 definidas anteriormente.

Pelo exposto até aqui nota-se a necessidade de introduzir um fator de correção no parâmetro que representa a jornada diária de trabalho das motos-bombas na restrição de tempo do modelo agregado. Este fator de correção dá o tempo de aproveitamento ou tempo efetivamente útil dentro da jornada de trabalho. O mesmo deve ser feito para a jornada de trabalho dos carros-pipas.

Calcular analiticamente os tempos de aproveitamento aparenta ser um tanto difícil. Aqui é sugerida uma maneira prática de estimar tal tempo de modo a viabilizar a programação dos carros-pipas.

Inicialmente faz-se uma corrida do modelo agregado admitindo um aproveitamento de 100% da jornada diária de trabalho. A seguir utiliza-se uma heurística do "bin-packing" para determinar o número de veículos (com respectiva composição) que devem ser alocados em cada fonte de abastecimento e nó de transbordo. O passo seguinte será a simulação do funcionamento de cada subsistema instalado nos nós de transbordo e fontes de abastecimento, de acordo com a forma das políticas definidas anteriormente. 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 do modelo agregado e a segunda, para calibrar o tempo de aproveitamento de cada veículo. Novas corridas serão feitas até que se encontre uma solução cuja programação seja aceitável.

Um exemplo completo desta metodologia é mostrado mais adiante na Secção 5.1. Neste exemplo faz-se mais de uma corrida do modelo agregado com as devidas calibragens da jornada de trabalho das motos-bombas.

CAPÍTULO 5

TESTES E CONCLUSÕES

5.1 - TESTES COMPUTACIONAIS

Neste capítulo será testado um exemplo do problema de distribuição de água. Tal exemplo de problema refere-se à situação em que se encontrava o município de Quixadá-CE em Março de 1984.

Na Figura 5.1 e Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados os dados deste problema. Na Figura 5.1 apresenta-se a rede que caracteriza este exemplo de problema. Nesta rede os pontos de demanda e nós de transbordo são representados por círculos numerados e as fontes de abastecimento são representadas 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 5.1 mostra, além dos nós de transbordo, os centros de demanda com suas respectivas quantidades de água demandada durante um mês. Finalmente, a Tabela 5.2 mostra a quantidade de motos-bombas existentes nos nós que abastecem os veículos.

Além dos dados constantes na Figura 5.1 e Tabelas 5.1 e 5.2 são também relevantes as seguintes informações: tempo de abastecimento do veículo tipo 1: 28 minutos (dado fornecido pela CEDEC(1984); tempo de abastecimento do veículo tipo 2: 7 minutos (dado fornecido pela CEDEC (1984); jornada diária de trabalho: 8 horas (hipótese); horizonte de planejamento: 1 mês (hipótese); custo/km para veículo tipo 1: Cr$ 550 (março de 1984); custo/km para veículo tipo 2: Cr$ 165 (março de 1984); velocidade média dos veículos tipo 1 e 2 60km/h (hipótese); capacidade de carga de um veículo tipo 1: 30 m^3 (dado fornecido por Bezerra, 1984)capacidade de carga de um veículo tipo 2: 7m^3 (dado fornecido por Bezerra, 1984)demanda por habitante dia: 30 litros (CEARÁ, 1983).

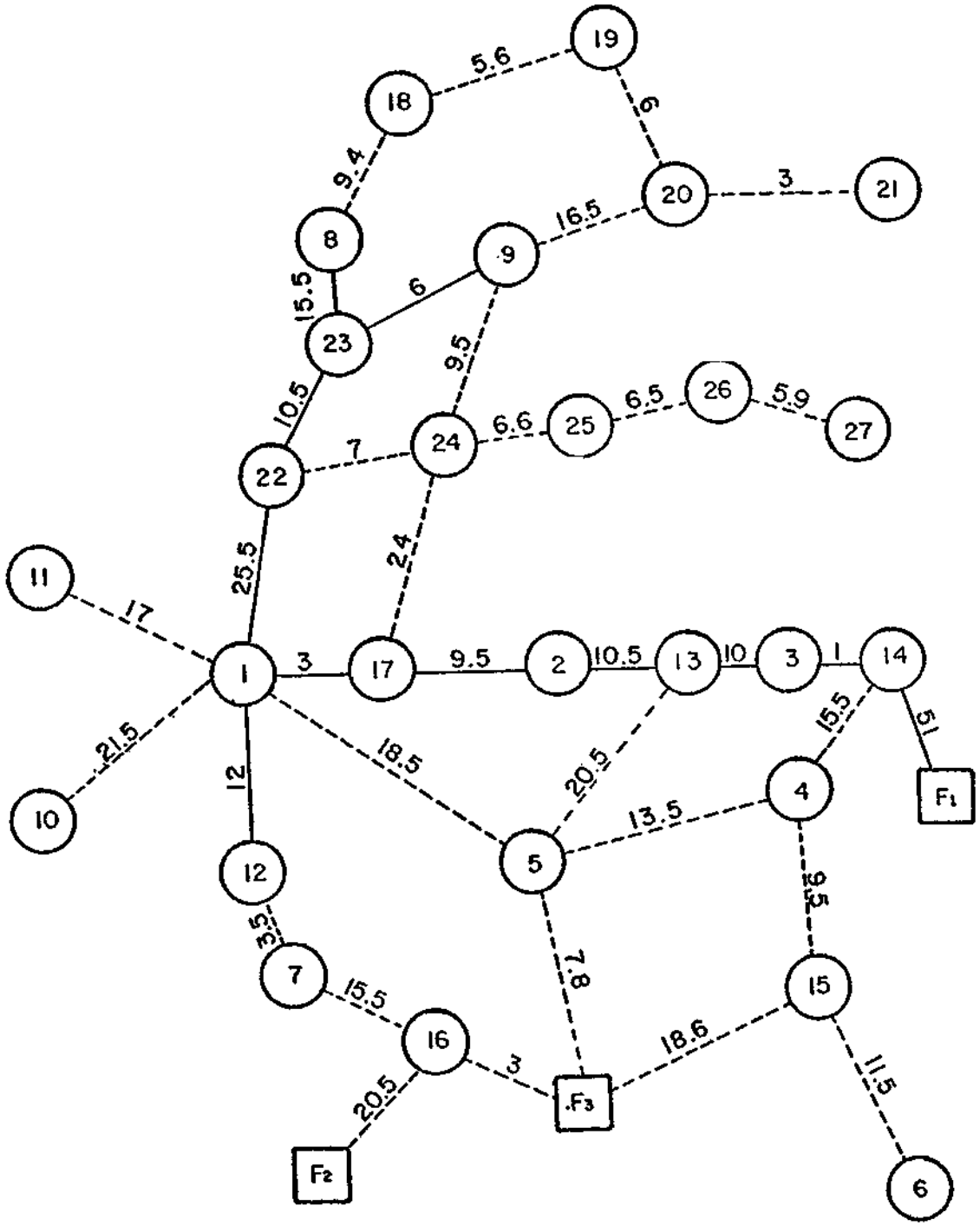

Fig. 5.1 - Rede que caracteriza o problema de Quixadã-CE.

TABELA 5.1

LOCALIDADES COM SUAS RESPECTIVAS DEMANDAS

NÓ	LOCALIDADE	QUANTIDADE DE ÁGUA DEMANDADA/MÊS
1	Quixadá	28665.9
2	Café Camp.	3600.0
3	V. Rica	3600.0
4	C. Anjos	3807.1
5	Tapuiará	3177.0
6	Sitiá	3491.0
7	Joatama	2930.4
8	Pirangi	3600.0
9	Oiticica	3600.0
10	Custódio	3798.9
11	D. Queiroz	8877.6
12	Transbordo	-
13	Transborbo	-
14	Transbordo	-
15	Transbordo	-
16	Transbordo	-
17	Transbordo	-
18	N. 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	C. Grande	245.0
27	Vertente	206.0

Total: 71019.0

TABELA 5.2

DISTRIBUIÇÃO DAS MOTOS-BOMBAS NOS NÓS QUE ABASTECEM OS VEÍCULOS

NÓ	QUANTIDADE DE MOTO-BOMBA
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.

Como se trata de um problema simétrico, o exemplo foi testado utilizando o modelo reduzido. Para efeito de comparação, em termos de dimensão, na Tabela 5.3 mostram-se as estatísticas do exemplo relativas aos dois modelos.

TABELA 5.3

ESTATÍSTICAS

	NÚMERO DE LINHAS	NÚMERO DE COLUNAS
Modelo Geral	165	349
Modelo Reduzido	36	129

A solução para este exemplo de problema foi obtida após 9.33 segundos.

Na Figura 5.2 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 veículo com capacidade de $30m^3$ e A=2 para veículos com capacidade de $7m^3$) e o correspondente número de viagens dadas durante o período em consideração.

A Figura 5.2 mostra também as fontes de abastecimento e os nós de transbordo selecionados pelo modelo. A Tabela 5.4 mostra todas as rotas com os correspondentes números de viagens e a Tabela 5.5 mostra detalhadamente estas rotas.

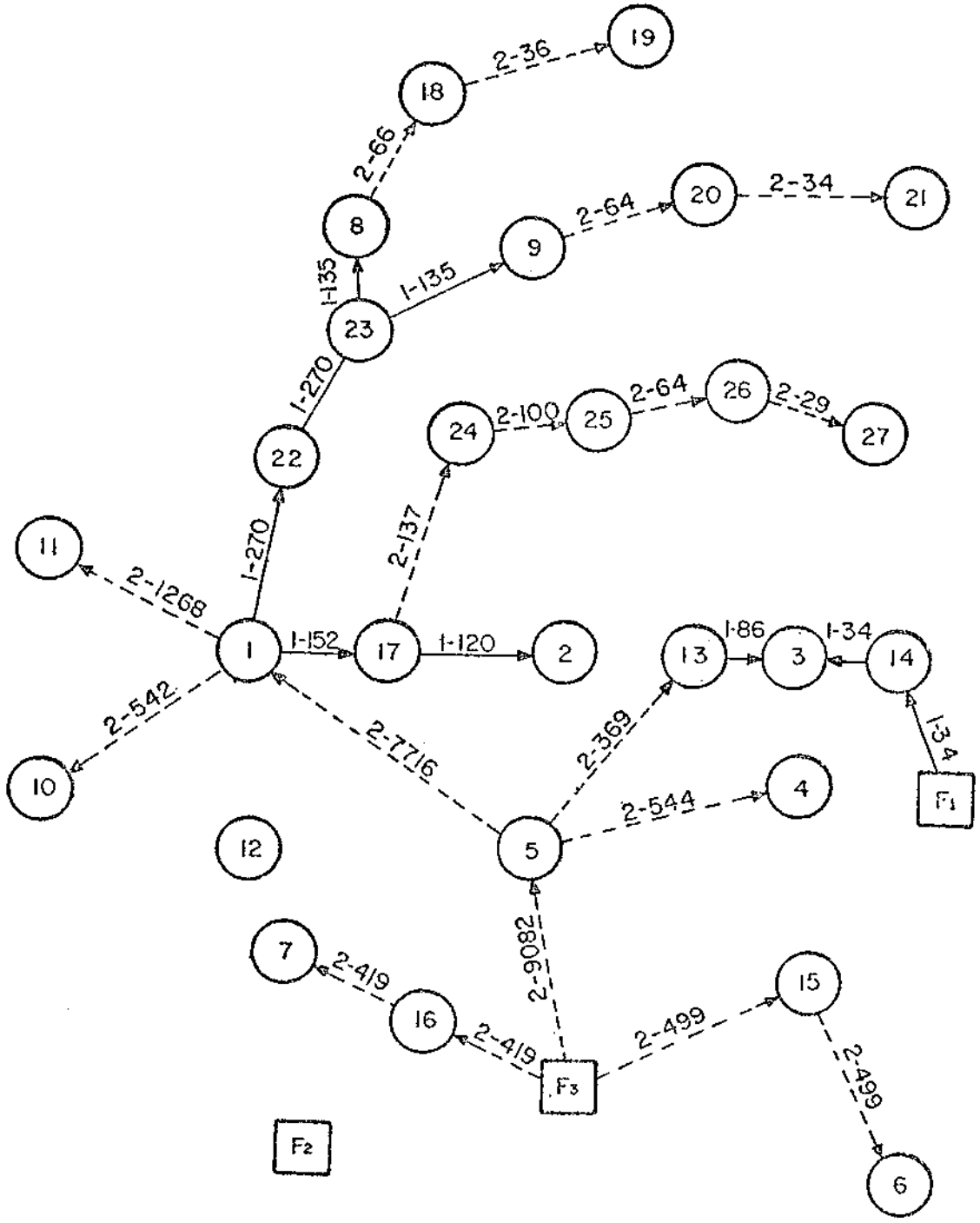

Fig. 5.2 - Solução apresentada pelo modelo agregado

TABELA 5.4

DETERMINAÇÃO DAS ROTAS

NÓ	ROTA	COMPOSIÇÃO	NÚMERO DE VIAGENS 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 5.5

DETALHAMENTO DAS ROTAS

ROTA	NÚMERO DE VEZES/ MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	NÚMERO DE VEZES/ MÊS	NÚMERO DE VIAGENS
1	8	43	22	42
2	2	19	28	18
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

Como pode ser visto através da Figura 5.2, na primeira corrida as fontes F1 e F3 abasteceram toda a rede. O custo para esta entrega foi de Cr$ 114.581.591.

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, e, a partir daí, a água é transportada por veículos do tipo 2. Dada a pequena distância para a ocorrência de dois transbordos com a mesma água (veículo do tipo 2 transporta até 1, veículo do tipo 1 transporta de 1 para 17 e veículo do tipo 2 transporta de 17 para o destino final), esta solução não é muito "desejável" em termos práticos.

Para evitar o transbordo no nõ 17 introduziu-se o conjunto de restrição abaixo:

$$x17,1,1 + x17,2,1 - x1,17,1 - x2,17,1 - z17,1 \leq 0$$

$$x17,1,2 + x17,2,2 + x17,24,2 - x2,17,2 - x1,17,2 - z17,2 \leq 0$$

$$28 \cdot z17,1 + 7 \cdot z17,2 = 0,$$

e fez-se uma nova corrida do modelo agregado. A nova solução, que está apresentada na Figura 5.3 tem uma configuração um pouco diferente da outra e seu custo foi majorado para Cr$ 114.603.516. A Tabela 5.6 mostra as novas rotas com os correspondentes números de viagens e tempos de execução. As novas rotas quando detalhadas coincidiram com aquelas mostradas na Tabela 5.5.(Esta alteração foi feita através de uma interação do usuário do modelo que verificou a conveniência das rotas e não será de maneira alguma identificada simplesmente pela metodologia proposta.)

Para determinar a programação diária dos carros-pipas foi utilizado, em cada nõ que abastece veículos (F3, F1, 1, 8, 9, 13 e 22) , o algoritmo 4 combinado com a política 1 definida na Seção 4.2

Para implementar a solução apresentada na Figura 5.3 e Tabelas 5.5 e 5.6 foram necessários 5 veículos do tipo 1 e 43 veículos do tipo 2. Feita a simulação do funcionamento de cada subsistema ficou comprovado 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 executáveis 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 nõs F1 e 1 do modelo agregado e feita uma nova corrida, obteve-se a solução apresentada na Figura 5.4 cujo custo foi de Cr$ 135.134.443. Na Tabela 5.7 têm-se as rotas relativas à nova solução com os correspondentes números de viagens (mensais) e tempo de execução, e na Tabela 5.8 tem-se o detalhamento destas rotas.

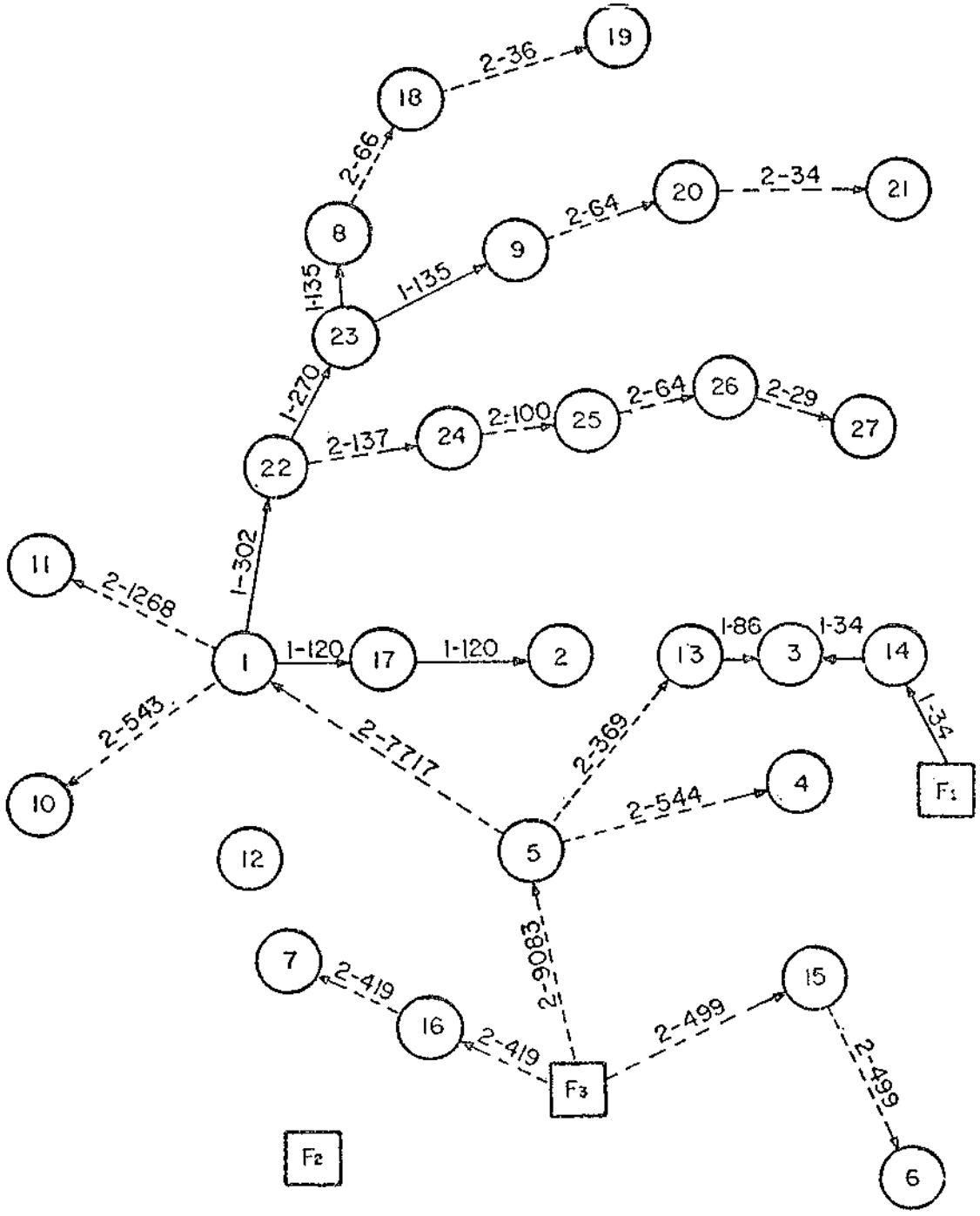

Fig. 5.3 - Solução sem o nó do transbordo 17.

TABELA 5.6

CONJUNTO DE ROTAS OBTIDO DA FIGURA 5.3

NÓ	ROTA	COMPOSIÇÃO DAS ROTAS	NÚMERO DE VIAGEN 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

Como pode ser visto na Figura 5.4, esta solução utiliza água das três fontes de abastecimento (F1, F2 e F3). A Tabela 5.7 mostra que nos nós 8, 9, 12 e 22 há transbordo da água, o que totaliza 7 subsistemas.

Feito o cálculo do número de veículos através do algoritmo 4, concluiu-se que seriam necessários 8 veículos do tipo 1 e 45 veículos do tipo 2 alocados de acordo com o mostrado na Tabela 5.9.

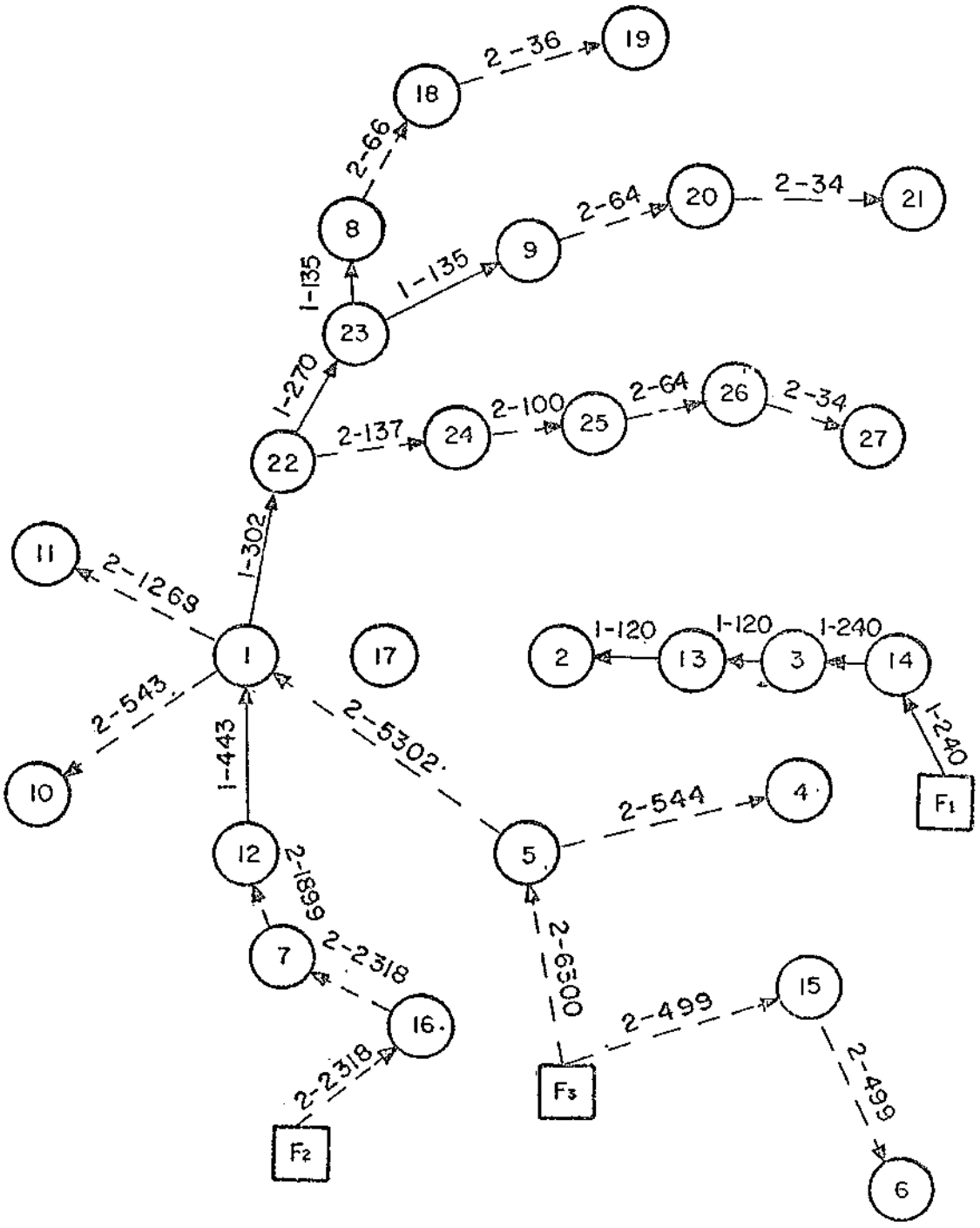

Fig. 5.4 - Solução após atualizar T nos nós F3 e 1.

Feita a simulação do funcionamento de cada um dos subsistemas, ambos foram viáveis e assim a presente solução pode ser sugerida.

TABELA 5.7

ROTAS DEPOIS DE ATUALIZADOS OS TEMPOS

NÓ	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 5.8

DETALHAMENTO DAS ROTAS CONSTANTES NA TABELA 5.7

ROTA	COMPOSIÇÃO			
	NÚMERO DE VEZES POR MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	NÚMERO DE VEZES POR MÊS	NÚMERO DE VIAGENS
1	8	43	22	42
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	-	-

TABELA 5.9

VEÍCULOS REQUERIDOS PARA IMPLEMENTAR A SOLUCÃO MOSTRADA NA FIGURA 5.4.

NÓ	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

5.2 - CONCLUSÕES

Apesar da inexistência de resultados reais que permitam a comparação com os resultados obtidos na Seção 5.1 acredita-se que a metodologia proposta seja coerente e satisfatória.

Pode ser observado que o método possibilita a avaliação econômica da instalação de motos-bombas e construção e/ou expansão de tanques de transbordos. Este tipo de informação pode ser obtido mediante nova corrida do modelo agregado depois de ajustado convenientemente.

Para verificar como isto pode ser feito, pode-se considerar, por exemplo, o caso de Quixadá apresentado na Seção 5.1. Ao invés de atualizar os tempos nos nós F3 e 1 para obter a solução mostrada na Figura 5.4 e Tabelas 5.7 e 5.8, verifica-se o efeito de introduzir uma sexta moto-bomba no nó F3 e faz-se nova corrida do modelo agregado. A nova solução encontrada tem um custo de Cr$ 114.394.475. Feita a simulação do 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 está mostrada na Figura 5.5 e Tabelas 5.10 e 5.11. O custo desta solução foi de Cr$ 120.653.065 e a programação mostrada na

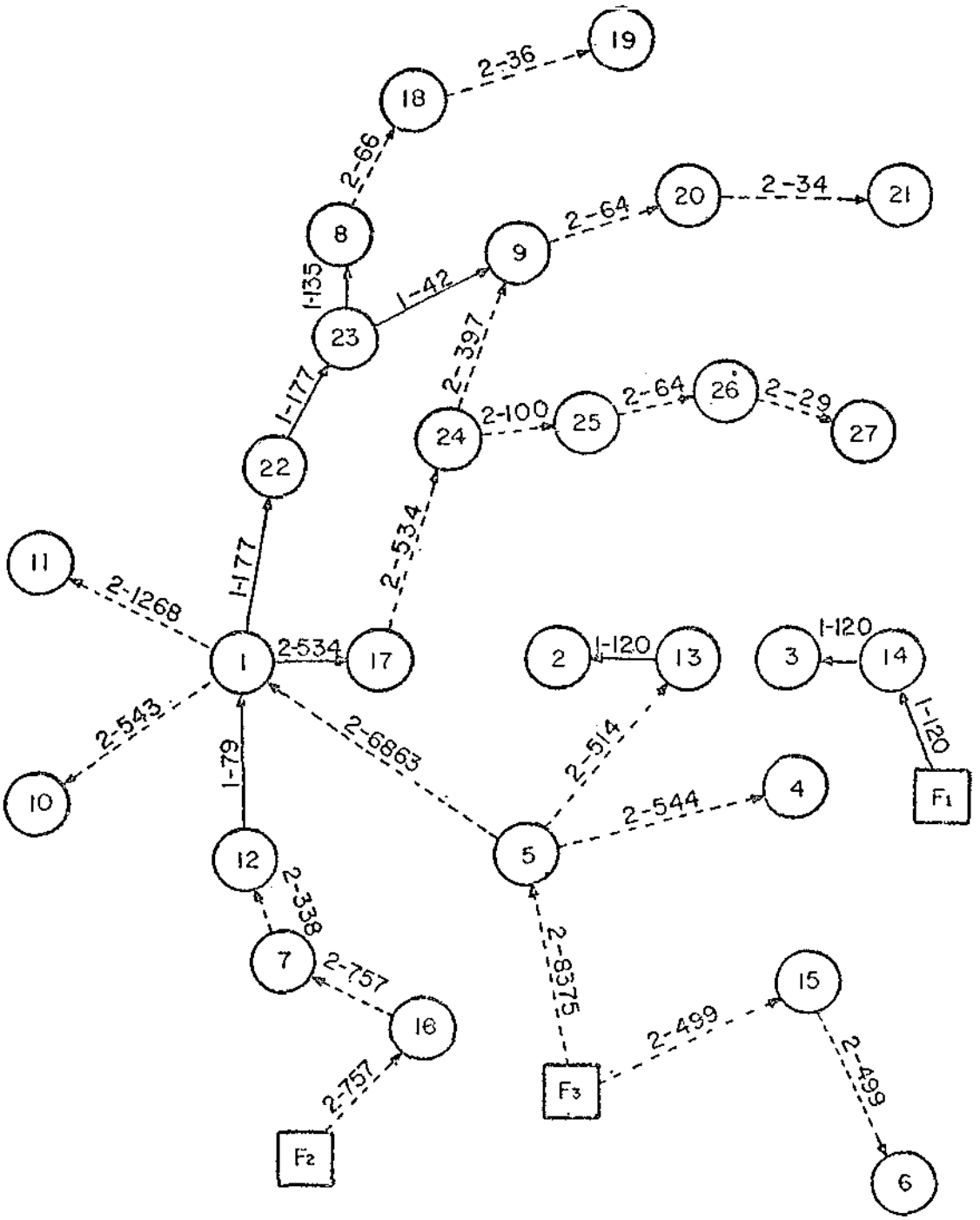

Fig. 5.5 - Solução com 6 motos bombas instaladas em F3.

Tabela 5.11 foi viável Foram requeridos 4 veículos do tipo 1 e 41 do tipo 2. Como pode ser vista, esta nova solução, além de ter um custo menor, utiliza um número total de motos-bombas menor.

TABELA 5.10

ROTAS DETERMINADAS A PARTIR DA FIGURA 5.5

NÓ	ROTA	COMPOSIÇÃO	NÚMERO DE VIAGENS / 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 5.11

DETALHAMENTO DAS ROTAS CONSTANTES NA TABELA 5.10

ROTA	COMPOSIÇÃO				
	NÚMERO DE VEZES POR MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	NÚMERO DE VEZES POR MÊS	NÚMERO DE VIAGENS	TEMPO (MIN)
1	4	2	26	1	165
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

A parte computacional pode ser melhorada através da ligação dos programas relativos ao algoritmo do "bin-packing" e simulação do sistema. Esta ligação poderá ser feita mediante uma manipulação conveniente dos arquivos, isto é, a saída fornecida pelo algoritmo do "bin-packing" fica armazenada em um arquivo que alimentará automaticamente o programa que faz a simulação. Com isto, a interação homem-máquina fica limitada, cabendo ao homem somente os ajustes (minimizando sua parte braçal), ficando à máquina todo o processo de manipulação de dados.

Convém lembrar que na definição do problema (Seção 2.4) existe uma restrição relativa à quantidade máxima de quilômetros que um determinado veículo pode rodar por mês. Esta restrição foi introduzida pelas Secretarias para minimizar possíveis artimanhas por parte dos caminhoneiros. Estas existiam porque não havia um instrumento de controle do sistema. Para se ter uma idéia, um dos truques que ocorria com freqüência consistia em ligar um motor de liquidificador no velocímetro do veículo e alterar sua quilometragem através deste processo.

No modelo agregado foi omitida a restrição de quilometragem pois cada veículo é designado para rotas bem definidas, e o número de viagens nestas rotas também é bem definido. Assim sendo, é possível controlar a quilometragem dos veículos e pode-se prescindir daquela restrição. Poderão ocorrer atritos entre os proprietários dos veículos caso o sistema de pagamento por quilômetro rodado seja mantido, isto porque o ganho mensal pode variar dependendo da programação feita. Para evitar isto é possível fazer um rodízio dos caminhões de maneira que a quilometragem mensal, em média, seja equilibrada para todos os veículos de um mesmo tipo.

Para a operacionalização do sistema são necessários alguns cuidados. O usuário do sistema deverá ser capaz (ou ter alguém capaz) de escrever as equações matemáticas do modelo agregado relativas ao exemplo do problema em questão. Isto requerirá dele um levantamento de todas as informações relativas ao município em consideração, por exemplo, reservatórios disponíveis, número de motos-bombas instaladas nas fontes e nos nós de transbordo, custos, velocidade média dos veículos em cada trecho etc.

Uma vez levantadas as informações acima o usuário deverá estar capacitado a escrever todas as equações matemáticas do modelo agregado. Há necessidade de possuir um "software" que resolva problemas de programação linear pois o modelo matemático construído é desta forma. É bom lembrar que a grande maioria dos pacotes comerciais disponíveis nos computadores exigem uma formatação dos dados de entrada, o que dificulta algumas vezes a sua utilização por um usuário principiante. É necessário entender bem o que o pacote oferece como opções de saída. Muitos pacotes oferecem vários outros dados úteis, além da própria solução, que têm va

lor econômico. Estão incluídos aí os preços sombras.

Informações tais como pontos potencialmente interessantes para instalação de reservatórios, asfaltamento de trechos de estradas, mudança de motos-bombas entre fontes e/ou reservatórios, supressão e/ou introdução de nós de transbordo etc. exigem uma intervenção do analista (usuário) que deverá acrescentar ou modificar convenientemente algumas restrições do modelo e rodá-lo novamente para comparar os resultados obtidos. Para tanto, o analista (usuário) deverá estar profundamente familiarizado com o modelo matemático.

Com a solução do modelo agregado em mãos, é feita a explicitação das rotas, o cálculo do número de viagens em cada uma destas rotas e do tempo médio que os veículos levam para percorrer as rotas. Estas rotas podem ser facilmente obtidas a partir da rede inicial e da solução. Isto pode ser feito manualmente, sem grandes dificuldades ou, automaticamente. Neste trabalho não foi desenvolvido um programa computacional para isso.

De posse das rotas, número de viagens e tempo de percurso, utiliza-se uma das heurísticas do "bin-packing" que fornece o número de veículos e sua programação correspondente. As heurísticas sugeridas para o "bin-packing" são facilmente implementáveis.

O número de veículos e a correspondente programação, encontrada no passo anterior, servem de entrada para o programa que simula o funcionamento do sistema. Para esta simulação é necessário estipular uma política de despacho dos veículos. Algumas destas políticas simples, foram sugeridas na Seção 4.2.

Feita a simulação é necessário verificar se a programação proposta é executável dentro da jornada diária de trabalho. Esta informação é obtida diretamente da saída do programa que faz a simulação. Caso a programação não seja viável é necessário que o usuário utilize as estatísticas fornecidas por este programa e ajuste convenientemente, conforme o caso, as restrições de tempo do modelo agregado e/ou jornada diária de trabalho.

Na implementação feita neste trabalho, cabe ao usuário fazer a ligação entre os "softwares" utilizados. Com isto, há uma grande manipulação de dados por parte do usuário, exigindo uma maior capacitação, caso o sistema for operacionalizado da mesma maneira. Contudo, os modelos podem ser facilmente interligados de modo que se minimize a manipulação de dados pelo usuário. Com isto ele se tornará mais conveniente para o uso por pessoas não-familiarizadas com a metodologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J.A. . *As secas do Nordeste*. 2 ed. s.l. Fundação Casa de José Américo, Fundação Guimarães Duque, 1981. (Coleção Mossoense, v. 178).

ARMSTRONG, R.J.; HAX, A.C. A hierarchical approach for a naval tender job-shop design. In: BRADLEY, S.P.; HAX, A.C.; MAGNANTI, T.L., ed. *Applied mathematical programming*. Reading, MA, Addison-Wesley, cap. 10, p. 425-451.

BEZERRA, M.D. *Transporte de água para as populações carentes*. Fortaleza, 1984. Reunião sobre abastecimento de água em Quixadá-CE realizada na Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado do Ceará.

BITRAN, G.R.; HAAS, E.A.; HAX, A.C. Hierarchical production planing: A single stage system. *Operations Research* 29(4): 718 - 743, 1981.

BITRAN, G.R.; HAX, A.C. On the design of hierarchical production planning systems. *Decision Science*, 8(1): 28-55, 1977.

BITRAN, G.R.; HAX, A.C. Disaggregation and resource allocation using convex knapsack problem. *Management Science*, 27(4): 431-441, 1981.

BODIN, L.; BERMAN, L. Routing and scheduling of school buses by computer. *Transportation Science*, 13(2): 113-129, 1979.

BODIN, L.; GOLDEN, B. Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11(2): 97-108, 1981.

BODIN, L.; KRUSH, S. A computer-assisted system for the routing and scheduling of street sweepers. *Operations Research*, 26(4): 525-537, 1978.

BODIN, L.; KRUSH, S. A detailed description of a computer system for the routing and scheduling of street sweepers. *Computers and Operations Research*, 6: 181-198, 1979.

BRADLEY, S.P.; HAX, A.C.; MAGNANTI, T.L. *Applied mathematical programming*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1977.

BRITO, F.S.R. de *As Secas do Nordeste*. Imprensa Industrial. Recife, 1913.

BROOKS, R.E. Using generalized networks to forecast natural gas distribution and allocation during periods of shortage. *Mathematical Programming Study*, 15: 23-42, 1981.

BUFFA, E.S.; TAUBERT, W.H. *Production inventory systems: planning and control*. Richard D. Irwin, 1972.

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 à atual crise climática*. Fortaleza, Ceará, 1983.

CHRISTOFIDES, N.; EILON, S. An algorithm for the vehicle dispatching problem. *Operational Research Quarterly*, 20(3): 309-318, 1969.

CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A.; TOTH, P. State-space relaxation procedures for the computation of bounds to routing problems. *Networks*, 11(2): 145-164, 1981.

CLARKE, G.; WRIGHT, W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 11: 568-581, 1964.

COFFMAN, E.G.JR.; 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 & Sons. 1976.

CONTADOR, J.L.; YANASSE, H.H. *Sistemas de planejamento hierárquico aplicado a produção: um estudo*. Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, (INPE-2766-PRE/339), 1984.

COOK, S.A. The complexity of theorem-proving procedures. In: ANNUAL ACM SYMPOSIUM, 3, 1971. *Proceedings*. p. 151-158.

CROES, G.A. A method for solving traveling salesman problems. *Operations Research*, 6: 791-812, 1958.

DANTZIG, G.B.; RAMSER, J.H. The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1): 80-91, 1959.

DEBANNE, J.G. A regional tecno-economic energy supply-distribution demand model for North America. *Computers and Operations Research*, 2: 153-193, 1975.

DEMPSTER, M.A.H.; FISHER, M.L.; JANSEN, L.; LAGEWEG, B.J.; LENSTRA, J.K.; RINNOY KAN, A.H.G. Analytical evaluation of hierarchical planning systems. *Operations Research*, 29(4): 707-716, 1981.

FISHER, M.L.; JAIKUMAR, R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11(2): 109-124, 1981.

FOURNIER, L.M.B. *O problema das secas do Nordeste*. Rio de Janeiro. Pap. e Typ. Villas Boas & C. 1820.

GARVIN, W.W.; CRANDALL, H.W.; JOHN, J.B.; SPELLMAN, R.A. Application of linear programming in the oil industry. *Management Science*, 3(4): 407-430, 1957.

GASKELL, T.J. Bases for vehicle fleet scheduling. *Operational Research Quarterly*, 18(2): 281-295, 1967.

GILLETT, B.; JOHNSON, T. Multi-terminal vehicle - dispatch algorithm. *Omega, the international journal of management science*, 4: 711-718, 1976.

GILLETT, B.; MILLER, L. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *Operations Research*, 22(2):340-349, 1974.

GOLDEN, B.; BODIN, L.; DOYLE, T.; STEWART, W. Approximate traveling salesman algorithms. *Operations Research*, 28(3): 694-711, 1980.

GOLDEN, B.; YEE, J. A framework for probabilistic vehicle routing. *AIEE Transactions*, 11: 109-112, 1979.

GRAHAM, R.L. Bounds for certain multiprocessing anomalies. *The Bell Systems Technical Journal*, 45: 1563-1581, 1966.

GUERRA, F. *Nordeste semi-árido*. Natal, Escola Superior de Agricultura de Mossorõ - Fundação Guimarães Duque. 1980. (Coleção Mossoroense, v.85).

GUERRA, P.B. *A civilização da seca; o Nordeste é uma história mal contada*. Fortaleza, DNOCS, 1981.

GUERRA, P.; GUERRA, T. *Secas contra as secas*. 3 ed. Escola Superior de Agricultura de Mossorõ. 1909.

HAX, A.C. Integration of strategic and tactical planning in the aluminum industry. In: BRADLEY, S.P.; HAX, A.C.; MAGNANTI, T.L., ed. *Applied mathematical programming*. Readings, MA, Addison - Wesley, 1977, cap.6, p. 269-308.

HAX, A.C. Aggregate production planning. *Handbook of Operations Research*, J. Moder and S.E. Elmaghraby (eds). Van Nostrand Heinhold, N.Y., 1978.

HAX, A.C.; MEAL, H.C. Hierarchical integration of production planning and scheduling. In: GEISLER, M.A., ed. *Management Science*. New York, North Holland. 1975, v.1, p.53-67.

HOLMES, R.A.; PARKER, R.G. A vehicle scheduling procedure based upon saving and a solution pertubation scheme. *Operational Research Quarterly*, 27(1): 83-92, 1976.

JOHNSON, D.S.; DEMERS, A.; ULLMAN, J.D.; GAREY, M.R., GRAHAM, R.L. Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms. *SIAM Journal on Computing*, 3(4): 299-326, 1974.

KARP, R.M. Reducibility among combinatorial problems. In: MILLER, R.E.; THATCHER, J.W., ed. *Complexity of Computer Computations*. New York. Plenun Press, 1972. p. 85-104.

KENNINGTON, J.L. A survey of linear cost multicommodity network flows. *Operations Research*, 26(2): 209-236, 1978.

KROLAK, P.; FELTS, W.; NELSON, J. A man-machine approach toward solving the generalized truck-dispatching problem. *Transportation Science*, 6(2): 149-170, 1972.

LENSTRA, J.K.; RINNOOY KAN, A.H.G. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2): 221-227, 1981.

LIN, S. Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technology Journal*, 44: 2245-2269, 1965.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 21(2): 498-516, 1973.

MAGNANTI, T.L. Combinatorial optimization and vehicle fleet planning: perspectives and prospects. *Networks*, 11(2): 179-213, 1981.

MAGNANTI, T.L.; WONG, R.T. Network design and transportation planning: models and algorithms. *Transportation Science*, 18(1): 1-55, 1984.

MEIRA, O.J. *As secas do Nordeste, suas causas e remédios*. s.l. Fundação Guimarães Duque. 1982.

MOTTA, I.V.M. *Roteamento de veículos para a distribuição de água*. Dissertação de mestrado em Análise de Sistema e Aplicações. São José dos Campos, INPE, 1985. Em preparação.

NEWTON, R.; THOMAS, W. Bus routing in a multi-school system. *Computers and Operations Reserach*, 1: 213-222, 1974.

NORBACK, J.; LOVE, R. Heuristic geometric approaches to solving the traveling salesman problem. *Management Science*, 23(11): 1208-1223, 1977.

OLIVO, A.A.; YANASSE, H.H. Uma heurística para distribuição de cargas perecíveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 17; Rio de Janeiro, 7-9 nov. 1984. *Anais*. Rio de Janeiro, SBPO, 1984, v.2, p. 308-325.

ROSADO, V. *Memorial da seca*. s.l. Fundação Guimarães Duque. 1981. (Coleção Mossoroense, v. 63).

RUSSEL, R. An effective heuristic for the M-tour traveling salesman with some side conditions. *Operations Research*, 25(3): 517-524, 1977.

SAMPROM, D.A.; FARIA, F.F. Um modelo para a minimização de custo de transporte na distribuição de cargas perecíveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 15; Rio de Janeiro, 1982. *Anais*. SBPO, 1982, v.1, p. 305-319.

SILVER, E.A. A tutorial on production smoothing and work force balancing. *Operations Research*, 15: 985-1010, 1967.

STEWART, W.; GOLDEN, B.A. Lagrangean relaxation heuristic for vehicle routing. *European Journal of Operations Research*, 15: 84-88, 1984.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE *As secas do Nordeste (uma abordagem histórica de suas causas e efeitos)*. Recife, 1981.

WINTERS, P.R. Constrained inventory rules for production smoothing. *Management Science*, 8(4): 470-481, 1962.

APÊNDICE A

LISTAGEM DOS PROGRAMAS

```
      $SET LIST
      FILE  1(KIND=REMOTE)
      FILE  2(KIND=PRINTER)
      INTEGER R,U,NV,D,V,K
      DIMENSION B(20),MR(100,20),T(100),CT(100),L(20)


C*    JT = JORNADA DE TRABALHO/DIA (MIN)
C*    B(I) = TEMPO DA I-ESIMA ROTA
C*    L(I) = NUMERO DE VIAGENS DA I-ESIMA ROTA
C*    NR   = NUMERO DE VIAGENS DA I-ESIMA ROTA
C*    MR(R,I) = NUMERO DE VIAGENS QUE O R-ESIMO VEICULO FARA'
C*
C*
C*    INICIO DO PROGRAMA
      NV = 1
      DO 5 I = 1, NR
C
         MR(NV,I)=0
C*
5     CONTINUE
      I = 1
C*
      IF(L(I).LE.0) GO TO 10
C*
      R = 1
      GO TO 15
C*
10    I = I + 1
C*
      IF(I - NR)25,25,20
15    DO 23 K = 1, NV
      T(K) = 0
C*
      DO 30 V = 1, NR
      K = L(V)*MR(K,V)
C*
      T(R) = T(R) + K
C*    CONTINUE
23    CONTINUE
C*
      U = 0
      R = 1
C*
40    IF(T(R) - (JT - B(I)))40,40,35
45    CT(R) = JT - T(R)
      R = R + 1
      IF(R - NV)50,50,46
50    U = U + 1
      GO TO 60
46    IF(U.EQ.NV)GO TO 55
C*
      R = 1
C*
71    IF( CT(R).EQ.0 ) GO TO 72
C*
      MAX = CT(R)
```

```
      MARK = 0
   75 IF(MEN - CT(K))63,63,60
C
   72 K = K + 1
      IF( K - NV )71,71,75
C
C
   63 IF(MARK.EQ.1) GO TO 65
      A = K
      MARK = 1
C
   65 K = K + 1
      IF( K - NV )75,75,70
   70 NV = NV + 1
      K = NV
      DO 80 J = 1, NR
C
         MR(K,J) = 0
   80 CONTINUE
      GO TO 10
C
   60 IF( CT(K).EQ.0 ) GO TO 65
      MEN = CT(K)
      GO TO 63
C
   71    IF(MEN-B(I))90,90,85
   90    CT(A) = 0
      GO TO 72
C
   85    MR(A,I) = MR(A,I) + 1
C
      L(I) = A(I) = I
      GO TO 99
C
   99 WRITE(2,95)
   95    FORMAT(//,'    MATRIZ DAS ROTAS')
C
         DO 100 I = 1, NR
C
C
C
                  DO 105 K = 1, NV
C
      WRITE(2,110)((MR(K,I),I=1,NR),K = 1, NV)
C  O FORMATO SEGUINTE DEVERA' SER ATUALIZADO DEPENDENDO DO
C  NUMERO DE ROTAS (NR). ELE E'(NRI3).
  110       FORMAT(6I3)
  105       CONTINUE
  100 CONTINUE
      END
```

```
      $SET LIST
      FILE  1(KIND=REMOTE)
      FILE  2(KIND=PRINTER)
      INTEGER C,P,Q,X,KONT(10), OC(50),VOLT(50),TESP(50),A(10),F(11,51)
      DIMENSION R(50,10),IP(50,10),B(10),DMAK(10)
C*    **********************************************
C*      DETERMINAR OS PARAMETROS:
C*      NE = NUMERO DE ESTACOES
C*      NV = NUMERO DE VEICULOS
C*      NR = NUMERO DE ROTAS
C*      L  = TAMANHO DA MAIOR FILA INICIAL MAIS 1
C*      **********************************************
C*
C*
C*
C*
      DO 1 I= 1, NE
      KONT(I) = 0
1     CONTINUE
      DO 2 I=1,NE
      DO 3 J=1,NV
      TESP(J)=0
      OC(J)=0
      VOLT(J)=0
      F(I,J)=0
3     CONTINUE
2     CONTINUE
C*    ***************************************************************
C*        DISTRIBUIR INICIALMENTE OS VEICULOS NAS FILAS
C*        F(I,J) = K DENOTA QUE A ESTACAO I TEM      NA
C*        POSICAO J O VEICULO DE NUMERO K.
C*    ***************************************************************
C*
C*
C*
C*    A(I) = TAMANHO INICIAL DA FILA DA ESTACAO I.
C*
C*    B(J) = TEMPO QUE O VEICULO GASTA PARA PERCORRER
C*           A ROTA J
C*
C*    R(I,J) = NUMERO DE VIAGENS QUE O VEICULO I
C*             TEM QUE FAZER NA ROTA J
C*
C*
C*  ***************************************************
C*
C*
      DO 4 P = 1, NV
          DO 5 Q = 1,NR
      R(P,Q)=0
5     CONTINUE
4     CONTINUE
      TXD=0
      DO 6 I=1,NE
      KONT(I)=7
       DMAK(I)=0
```

```
 6920     6          CONTINUE
14403     WRITE(2,11)
14405     11 FORMAT(//,'  MATRIZ INICIAL DAS ROTAS')
14407        DO 13 I = 1, NR
14409           DO 14 J = 1, NV
14411              WRITE(2,16)((R(J,I),I=1,NR),J=1,NV)
14413      16             FORMAT(4I3)
14415      14          CONTINUE
14417     13 CONTINUE
1451.
14515      DISP = 0
14516     C* *************************************************
14517     C*
14518     C*   INICIO DO PROGRAMA
14519     C*
1452.     C* *************************************************
14521     C*
14522     C*
14523     C*
1452.                    DO 1000 T = 0, 3 6
14525     C*
14527     C*
14529     C* *************************************************
14531     C*
14533     C* KONT(I) = RELOGIO QUE DIZ QUANDO A ESTACAO I PODE
14535     C*             RECEBER UM VEICULO
14537     C*
14539     C* OC(I) = CALCULA A OCIOSIDADE DA ESTACAO I
14541     C*
14543     C*
14545     C* O TRECHO  COMPREENDIDO ENTRE AS LINHAS 14750 E 16490
14547     C*
14549     C* CONTROLA AS ESTACOES ATRAVES DOS RELOGIOS KONT(I) E
14551     C* CALCULA A OCIOSIDADE
14553     C*
14555     C*
14557     C* *****************************************************
14559     C*
14561     C*
14563     C
1473.     I = NE
1484.     7? IF(A(I).EQ.0) IF(T-KONT(I))? ,20,30
1495.     40 IF(T-KONT(I))40,40,50
1506.     30 I=I-1
1517.     IF(I-1)60,70,70
15175      IF(T.GT.77) GO TO 133
1528.     60 IF(IND.EQ.2) GO TO 500
1539.     GO TO 80
1550.     20 OC(I)=OC(I)+1
1561.     GO TO 30
1572.     50 I = I -1
1583.     IF(I-1)310,70,70
1649.     4  IF(IND.EQ.2) GO TO 120
16495     C*
16496     C*
16498     C*
1660.     IND=1
1671.     GO TO 120
16713     C*
16715     C* *************************************************
```

```
16721     C*
16724     C*
16727     C* O TRECHO COMPREENDIDO ENTRE AS LINHAS 1682  E 16910
1673.     C* ATUALIZA A MATRIZ DAS ROTAS E CALCULA O RETORNO  DOS
16733     C* VEICULOS DESPACHADOS
16736     C*
16739     C*
16742     C* ***************************************************
16745     C*
16748     C*
1682.     120 N=1
1693.     130 IF(R(F(I,1),N))130,130,140
1704.     140 N= N+1
1715.     IF(NR-N)200,150,150
1726.     150 P(F(I,1),N)=P(F(I,1),N)-1
1737.     KONT(I)=0
17375     DISP = 1
1748.     160 IF(R(F(I,1),N))160,160,170
1759.     160 N=N+1
1770.     IF(NR-N)175,100,100
1781.     170 VD_T(F(I,1)) = T + R(N)
1792.     175 IF(IND.EQ.2) GO TO 550
1803.     550 I = I -1
1814.     IF(I-1)200,21.,210
1825      200 IF(I.EQ.0)GO TO 570
1836.     IND = 2
1847.     GO TO 510
1858.
1869.     210 IF(IND-1)220,220,230
1880.     230 C=I
1891.     GO TO 520
18912     C*
18913     C*
18914     C*
18917     C* ***************************************************
18919     C*
18921     C*
18923     C*  O TRECHO COMPREENDIDO ENTRE AS LINHAS 1682  E 2010
18925     C*  CALCULA OS TEMPOS DE ESPERA PARA OS VEICULOS QUE
18927     C*  FICAM NA FILA
18929     C*
18931     C*
18933     C* ***************************************************
18935     C*
18937     C*
18939     C*
1902.     510 I=NE
1913.     290 IF(KONT(I))240,240,250
1924.     240 J=2
1935.       GO TO 310
1946.     250 J=1
1957.     310 IF(F(I,J))260,260,270
1968.     260 I = I -1
1979.     IF(I -1)280,290,290
1990.     270 TESP(F(I,J))=TESP(F(I,J)) + 1
2001      J = J + 1
2012.     IF(L - J)260,310,310
20125     C*
20126     C*
20127     C*
```

```
20230     260 IF(IND.EQ.3) GO TO 570
20235     C*
20237     C*
20239     C* ***************************************************
20241     C*
20243     C*
20245     C*  O TRECHO COMPREENDIDO ENTRE AS LINHAS 20450 E 22870
20247     C*  ATUALIZA A FILA QUANDO AS ESTACOES     DESPACHAM
20249     C*  VEICULOS
20251     C*
20253     C*
20255     C* ***************************************************
20257     C*
20259     C*
20261     C*
20340
20345      IF(DISP.EQ.1)GO TO 570
2045.      GO TO 500
2056.     570 I = 1
2067.     550 J=2
2078.     350 K=0
2078
2155.       IF(KOVI(I))300,300,300
2156.     310 IF(F(I,J))330,330,320
2177.     330 A(I) = K
2189.     F(I,J-1)=0
2199.      IF(IND.EQ.2)GO TO 561
2210.     J = 2
2221.     320 I = I + 1
2232.     IF(NE - 1)500,350,350
2243.
22435.     561 C = C-1
22436      IF(C-1)253,520,520
22437      253 C = NE
22438      GO TO  20
2254.     340 K = K + 1
2265.     F(I,J-1) = F(I,J)
2276      J = J + 1
2287.     GO TO 300
22871     C*
22872     C*
22873     C*
22875
22878     C* ***************************************************
22881     C*
22882     C*
22884     C* TRECHO COMPREENDIDO ENTRE AS LINHAS 23090 E 25950
22886     C*
22888     C* ATUALIZA AS FILAS QUANDO OS VEICULOS RETORNAM DAS
22889     C* VIAGENS. ( OS VEICULOS QUE RETORNAM SAO INTRODUZIDOS
22891     C* NAS MENORES FILAS)
22892     C*
22894     C*
22896     C* ***************************************************
22898     C*
22900     C*
22902     C*
22980     500 IR=1
23090     C*NL
2320.     350 IF((I+1).EQ.VOLI(IR))GO TO 363
```

```
      520 IR = IR + 1
       IF(NV.GE.IR) GO TO 360
      370 X=1
      410 IF(KONT(X).EQ.7) GO TO 390
      KONT(X)=KONT(X) + 1
      390 X = X + 1
      IF(NE-X)400,410,410
      363 IF(KONT(C).EQ.7)GO TO 360
      C = C - 1
      IF(C.GE.1)GO TO 363
      I=1
      M = 1
      51 IF(A(M)-A(I+1))54,54,56
       56 IF(DMAK(I+1).EQ.1)GO TO 54
       M = I + 1
       DMAK(M) = 1
       54 I = I + 1
      IF(NE-I)57,57,51
      57 I=1
      55 IF(A(I).EQ.A(M))GO TO 66
      65 I = I+1
      IF(NE-I)59,55,55
      66 IF(DMAK(I).EQ.1)GO TO 68
      IF(KONT(M).GE.KONT(I))GO TO 65
      DMAK(M)=0
      M = I
      DMAK(M) = 1

       59 F(M,A(M)+1) = IR
      A(M)=A(M)+1
       VOLT(IR) = 0
       C=NE
      GO TO 520
      360 F(C,A(C)+1)=IR
      A(C)=A(C)+1
      VOLT(IR)=0
      INC=2
      I.C
      GO TO 520
       400 INC = 0
       DISP = 0
       DO 447 I =1,NE
       DMAK(I) = 0
       447 CONTINUE
        GO TO 1000
       133 WRITE(2,122)
      122 FORMAT(//,' TEMPO  ESTACAO  OCIOSIDADE  T.FILA  KONT.  V.NA FILA')
      DO 123 I = 1,NE
      WRITE(2,124)T,I,OC(I),A(I),KONT(I),(F(I,J),J=1,L)
      124 FORMAT(2X,I3,6X,I2,7X,I3,5X,I2,4X,I2,2X,1L(I2,2X))
      123 CONTINUE
      1000 CONTINUE
      C-

      C-
      C-
      999 SOMA = 0
      DO 1100 I=1,NE
      SOMA = SOMA + OC(I)
      1100 CONTINUE
      MEDIA=SOMA/NE
```

```
      SUM = 0
      DO 1200 J=1,NV
      SUM = SUM + TESP(J)
      1200 CONTINUE
      MEDV = SUM/NV
      WRITE(2,*/)MEDV
      WRITE(2,*/)MEDTA
      WRITE(2,88)
      88 FORMAT(//,'          MATRIZ DAS ROTAS')
                    DO 2040 I = 1, NR
                           DO 2003 J = 1, NV
                            WRITE(2,99)((R(J,I),I=1,NR),J=1,NV)
      99 FORMAT(4I3)
      2003 CONTINUE
      2040 CONTINUE
      WRITE(2,101)
      101 FORMAT(//,'    ESTACAO   T.FILA     OCIOSIDADE')
      DO 61 I = 1,NE
      WRITE(2,64)I,A(I),OC(I)
       64 FORMAT(3X,I2,11X,I2,10X,I3)
      61 CONTINUE
      WRITE(2,82)
      82 FORMAT(' ESTACAO        VEICULOS')
      DO 83 I=1,NE

       WRITE(2,86)I,(F(I,J),J=1,L)
      86 FORMAT(3X,I2,4X,10(I2,2X))

      83 CONTINUE


      2004 CONTINUE
      WRITE(2,69)
       69 FORMAT( '    NO.DO VEICULO    INST. DO RETORNO')
          DO 2020 J = 1, NV

        WRITE(2,79)J,VOLT(J)
        79 FORMAT(10X,I3,13X,I4)
      2020 CONTINUE
       END
```