

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

**SISTEMA DE APOIO AO PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DA
OPERAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA**

EUNICE PASSAGLIA NASCIMENTO, M.Sc.

ORIENTADOR: PROF. NERI DOS SANTOS, Dr. Ing., UFSC



0.215.128-3

UFSC-BU

FLORIANÓPOLIS, SC, OUTUBRO DE 1993

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS

**SISTEMA DE APOIO AO PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DA
OPERAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do
título de Doutor em Engenharia de Produção.

EUNICE PASSAGLIA NASCIMENTO, M.Sc.

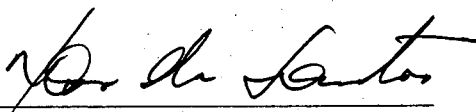
ORIENTADOR: PROF. NERI DOS SANTOS, Dr. Ing., UFSC

FLORIANÓPOLIS, SC, OUTUBRO DE 1993

SISTEMA DE APOIO AO PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DA OPERAÇÃO DO
TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA

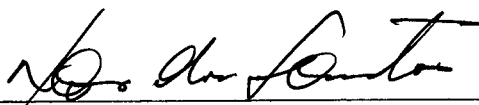
Eunice Passaglia Nascimento

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
DOUTOR EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação.



Prof. Neri dos Santos, Dr.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:



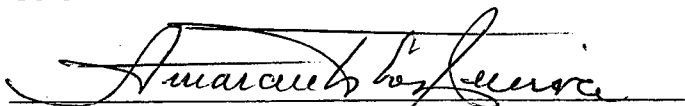
Prof. Neri dos Santos, Dr.

Orientador - UFSC



Prof. José Eugênio Leal, Dr.

Co-orientador - PUC/RJ



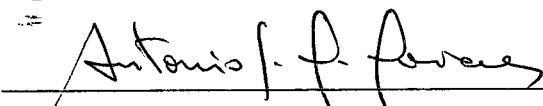
Prof. Amaranto Lopes Pereira, Dr.

Examinador Externo - COPPE/RJ



Prof.^a Maria Cristina Fogliatti de Sinay, Ph.D.

Examinador Externo - IME/RJ



Prof. Antônio Galvão Novaes, Dr.



Prof. Ismael Ulysséa Neto, Ph.D.

Moderador - UFSC

À memória de meus pais e às minhas filhas
Lilian, Letícia e Luiza.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Departamento de Engenharia Civil da UFSC e ao Departamento de Engenharia de Produção da UFSC pela oportunidade de realização do curso e apoio recebidos.

Ao professor Neri dos Santos, orientador, pelas sugestões dadas, pelo apoio e amizade demonstrados, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor José Eugenio Leal, co-orientador, pela amizade, interesse e colaboração dispensados durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos professores Antonio Galvão Novaes, Amaranto Lopes Pereira e Ismael Ulysséa Neto, pela dedicada participação na banca.

À professora Maria Cristina Fogliatti de Sinay, por toda a amizade e confiança e pela dedicada participação na banca.

À Rede Ferroviária Federal S.A., por intermédio dos componentes de seu corpo técnico, pelas informações recebidas e apoio prestado durante a elaboração do trabalho.

Aos colegas, amigos e companheiros de curso pelo incentivo, troca de informações e amizade dispensados ao longo destes anos de trabalho.

À minha irmã e grande amiga Augusta por todo o apoio e amizade.

Às minhas queridas filhas Lilian, Letícia e Luiza pelo carinho e compreensão demonstrados ao longo destes anos.

E a todos que de uma maneira geral contribuíram para a realização desta Tese.

SUMÁRIO

CAPITULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 - ASPECTOS GERAIS	1
1.2 - JUSTIFICATIVA DO TRABALHO PROPOSTO.....	2
1.3 - OBJETIVO DO TRABALHO PROPOSTO	5
1.4 - CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS.....	7
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA.....	8
CAPITULO 2.....	9
SISTEMAS GERENCIAIS DE APOIO À OPERAÇÃO FERROVIÁRIA	9
2.1 - ASPECTOS GERAIS	9
2.2 - SISTEMAS GERENCIAIS DE APOIO À OPERAÇÃO EMPREGADOS EM FERROVIAS ESTRANGEIRAS.....	13
2.2.1 - SOUTHERN PACIFIC	13
2.2.2 - FERROCARRILES NACIONALES DE MÉXICO	15
2.2.3 - CANADIAN NATIONAL.....	15
2.2.4 - BRITISH RAILWAYS.....	16
2.2.5 - SOCIÉTÉ NATIONAL DES CHEMINS DE FER	17
2.2.6 - OUTRAS FERROVIAS	20
2.3 - SISTEMAS GERENCIAIS DE APOIO À OPERAÇÃO EMPREGADOS NO BRASIL	21
2.3.1 - FERROVIAS PAULISTAS S.A.	21
2.3.2 - REDE FERROVIÁRIA FEDERAL (RFFSA).....	23
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA.....	26
CAPITULO 3.....	28
PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DA OPERAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA.....	28

3.1 - ASPECTOS GERAIS	28
3.2 - O SISTEMA OPERACIONAL PROPOSTO.....	30
3.2.1 - MÓDULO DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS.....	32
3.2.2 - MÓDULO DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES.....	33
3.2.3 - MÓDULO DE FORMAÇÃO DE TRENS.....	35
3.2.4 - MÓDULO DE PROGRAMAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS.....	39
3.3 - CONCLUSÃO	42
CAPITULO 4.....	43
DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS.....	43
4.1 - IMPORTÂNCIA NO PLANEJAMENTO FERROVIÁRIO.....	43
4.2 - ASPECTOS GERAIS DO CONTROLE E DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS.....	44
4.3 - UMA CLASSIFICAÇÃO PARA OS PROBLEMAS DE FLUXO VAZIO	46
4.4 - MODELOS OPERACIONAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS	47
4.4.1 - MODELOS DETERMINISTICOS	48
4.4.2 - MODELOS ESTOCÁSTICOS.....	49
4.4.3 - MODELOS DE SIMULAÇÃO	50
4.4.4 - MODELOS PARA VÁRIAS EMPRESAS (pool)	50
4.5 - COMENTÁRIOS SOBRE OS ENFOQUES DE MODELAGEM E PREVISÕES DETERMINISTICAS E ESTOCÁSTICAS.....	51
4.6 - PROPOSTA DE UM MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS ...	53
4.6.1 - A REDE ESPAÇO-TEMPO.....	53
4.6.2 - O MODELO PROPOSTO.....	59
4.7 - A RESOLUÇÃO DO MODELO	62
4.7.1 - O DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	62
4.7.2 - O ALGORITMO OUT-OF-KILTER.....	72
4.8 - A APLICAÇÃO DO MODELO	77

4.8.1 - A METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MODELO.....	77
4.8.2 - A APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO	80
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA.....	81
BIBLIOGRAFIA NÃO REFERENCIADA	83
CAPITULO 5.....	84
DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES.....	84
5.1 - O PROBLEMA DA DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES.....	84
5.2 - A METODOLOGIA PROPOSTA PARA A DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES.....	85
5.3 - A REDE ESPAÇO-TEMPO E O PROGRAMA COMPUTACIONAL.....	89
5.4 - A APLICAÇÃO DO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES.....	93
BIBLIOGRAFIA NÃO REFERENCIADA	97
CAPITULO 6.....	98
FORMAÇÃO DE TRENS.....	98
6.1 - ASPECTOS GERAIS SOBRE A FORMAÇÃO DE TRENS	98
6.2 - MODELOS DE FORMAÇÃO DE TRENS.....	100
6.3 - COMENTÁRIOS SOBRE OS MODELOS.....	103
6.4 - PROPOSTA DE UM MODELO DE FORMAÇÃO DE TRENS	104
6.5 - O DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE FORMAÇÃO DE TRENS.....	108
6.5.1 - O MODELO DE FORMAÇÃO DE TRENS E O DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL	109
6.6 - A APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO.....	117
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA.....	121
BIBLIOGRAFIA NÃO REFERENCIADA	122
CAPITULO 7.....	124
PROGRAMAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS.....	124

7.1 - ASPECTOS GERAIS DO CONTROLE E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS	124
7.2 - MODELOS DE ROTEAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS	125
7.3 - COMENTÁRIOS SOBRE OS MODELOS	128
7.4 - PROPOSTA DE UM MODELO DE ROTEAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS	132
7.4.1 - ROTEAMENTO	132
7.4.1.1- DEFINIÇÕES	133
7.4.1.2 - DECOMPOSIÇÃO EM CADEIAS DE UM GRAFO ACICLICO (FORD e FULKERSON, 1962)	133
7.4.2 - DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DAS LOCOMOTIVAS	136
7.5 - A APLICAÇÃO DO MODELO	137
7.5.1 - A METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MODELO	137
7.5.2 - O DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL	141
7.5.3 - O ALGORITMO OUT-OF-KILTER	144
7.6 - A APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO	145
BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA	152
BIBLIOGRAFIA NÃO REFERENCIADA	153
CAPITULO 8	155
CONSIDERAÇÕES FINAIS	155
8.1 - CONCLUSÕES	155
8.2 - RECOMENDAÇÕES	157

Obs: os Apêndices estão no disquete anexo à Tese.

*Disquete está arquivado no
Setor de Microformas*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - O Sistema Proposto	7
Figura 2.1 - Sistemas de Informações Operacionais	9
Figura 2.2 - Comparação entre SIG e SAD	11
Figura 3.1 - Planejamento da Operação Ferroviária - Sistema Operacional.....	31
Figura 3.2 - Programas Computacionais que Compõem o Sistema.....	31
Figura 3.3 - Distribuição de Vagões Vazios - Sistema Operacional.....	32
Figura 3.4- Distribuição de Vagões Tanques - Sistema Operacional	34
Figura 3.5 - Formação de Trens - Programa FORMTREM.....	37
Figura 3.6 - Programação e Distribuição de Locomotivas - Sistema Operacional ...	40
Figura 4.1 - Rede Espaço-Tempo de 2 nós e 1 Período de Tempo ($t_2 - t_1 = 1$ período).....	54
Figura 4.2 - Exemplo de um Sistema de três Estações	55
Figura 4.3 - Rede Espaço-Tempo do Sistema Representado na Figura 4.2.....	55
Figura 4.4 - Ofertas/Demandas e Custos numa Rede de 2 Estações e 3 dias de Horizonte de Planejamento	56
Figura 4.5 - Representação dos Arcos de Falta.....	57
Figura 4.6 - Representação dos Arcos de Falta e dos Nós e Arcos Fantasma.....	58
Figura 4.7 - Rede Completa da Figura 4.4	59
Figura 4.8 - Sistema Ferroviário da SR.5.....	65
Figura 4.9 - Rede Física para o Exemplo da Distribuição de Vagões Vazios	66
Figura 4.10 - Rede Espaço-Tempo do Exemplo da Distribuição de Vagões Vazios	71
Figura 4.11 - Parte de uma Rede Direcionada (representando o fluxo de vagões vazios, por exemplo).....	72

Figura 4.12 - Fases do Processo de Distribuição de Vagões Vazios.....	77
Figura 5.1 - Divisão do Depósito do Cliente A na Estação E em Níveis Estratégicos.....	86
Figura 5.2 - Níveis Previstos no Tanque do Cliente A na Estação E nos Dias T1, T2 e T3 (N1, N2 e N3)	87
Figura 5.3 - Rede Espaço-Tempo para a Distribuição de Vagões Tanques (Horizonte de Planejamento de 4 dias)	90
Figura 5.4 - Rede Espaço-Tempo para a Distribuição de Vagões Tanques (horizonte de Planejamento de 4 dias com Tempo de Viagem Superior a 1 dia)....	91
Figura 5.5 - Rede Física e Clientes do Exemplo de Distribuição de Vagões Tanques.....	95
Figura 5.6 - Nós e Arcos da Rede Espaço-Tempo do Exemplo da Distribuição de Vagões Tanques	97
Figura 6.1 - Croquis Esquemático de uma Situação da Operação Ferroviária.....	116
Figura 6.2 - Rede Proposta	117
Figura 7.1 - Rede Representativa (4 trens)	129
Figura 7.2 - Rede Resolvida.....	130
Figura 7.3 - Grafo acíclico $G = [N,A]$	134
Figura 7.4 - Grafo bipartido $G^* = [S,T;A^*]$	135
Figura 7.5 - Exemplo de uma programação de trens.....	137
Figura 7.6 - Alocações possíveis para a locomotiva usada no serviço número 17. Este é um subgrafo do grafo acíclico completo da Figura 7.5	138
Figura 7.7 - O grafo bipartido para o exemplo da programação apresentada na Figura 7.5.....	139
Figura 7.8 - Grafo Bi-Partido (cadeias resultantes).....	141
Figura 7.9 - Grafo Bi-Partido (cadeia resultante).....	141

Figura 7.10 - Grafo Resultante do Grafo Bi-Partido da Figura 7.8.....	143
Figura 7.11 - Horários de Trens.....	145
Figura 7.12 - Sequências de Trens Determinadas pelo Programa ROTALOCO (14 sequências).....	148
Figura 7.13 - Exemplo 1 de Alocação de Locomotivas. Ofertas e Demandas e Movimentação das Locomotivas.....	150
Figura 7.14 - Exemplo 2 de Alocação de Locomotivas. Ofertas e Demandas e Movimentação das Locomotivas.....	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Relação das Estações Ferroviárias para o Exemplo da Distribuição de Vagões Vazios	67
Tabela 4.2 - Tempos de Viagem (TV) e Distâncias (DIST) entre as Estações Ferroviárias do Exemplo da Distribuição de Vagões Vazios.....	67
Tabela 4.3 - Possíveis Estados (Kilter) de um Arco (i,j). Obs.: Para simplificação foram omitidos os índices i,j	76
Tabela 7.1 - Programação das Viagens	130
Tabela 7.2 - Saída do Programa ROTALOCO: Sequências de Trens Servidos por uma mesma Locomotiva.....	147

SISTEMA DE APOIO AO PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA

(palavras chave: sistema de apoio à decisão; operação ferroviária; transporte ferroviário de carga)

RESUMO

Com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão no planejamento e gerenciamento da operação do transporte ferroviário de carga, é apresentado neste trabalho um sistema computacional de apoio à tomada de decisão, o qual trata os dados e informações de forma precisa e abrangente, considerando regras e modelos e considerando a intuição e visão subjetiva do tomador de decisão.

Os procedimentos propostos enunciam uma série de etapas que permitem a caracterização do sistema e sua modelagem. Foram desenvolvidos os seguintes modelos: distribuição de vagões vazios, distribuição de vagões tanques, formação de trens, programação e distribuição de locomotivas.

Neste planejamento é utilizado um sistema de informação em tempo real e um microcomputador, que acessará e processará as informações sobre vagões e cargas a serem movimentados.

Além de uma extensa pesquisa bibliográfica, foi feito um estudo bastante amplo sobre a operação do transporte de carga no sistema ferroviário brasileiro, assim como sobre todo o processo de tomada de decisão quanto ao planejamento e gerenciamento da operação.

Foram realizadas aplicações que demonstram a aplicabilidade da metodologia proposta. Tem-se a convicção de que o sistema desenvolvido é uma ferramenta de indiscutível valor para o gerente como apoio na tomada de decisão.

ABSTRACT

This work presents a computer-based method to assist the decision-making process within the rail freight transport management and operation sphere. Such system aims at the treatment of data and information with precision and completeness by means of rules and models which take into account the intuition and subjective vision of the decision-maker.

The proposed method encompasses a series of steps which allow for the system characterization and modelling. The following models have been developed: empty-wagons distribution, tank-wagons distribution, trains formation, locomotives scheduling and distribution.

A real-time information gathering scheme and a microcomputer are used to deal with information on wagons and cargo.

Apart from consulting an extensive bibliography, a broad study has been performed on the Brazilian freight rail transport system, as well as on the decision-making process of operational planning and management.

The proposed method has been applied to a simulated rail system to demonstrate its applicability. The developed method has been proven to be a valuable tool for helping the managers to take the most appropriate decisions.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - ASPECTOS GERAIS

O transporte é um setor muito importante da economia, que abrange dois grandes segmentos: de carga e de passageiros. Analisando-se de maneira global estes dois segmentos, o setor transporte chega a representar 25% do PIB (CUNHA, 1990), em alguns casos.

O transporte de cargas influencia a economia de duas maneiras essenciais:

- * sem ele não há circulação de riqueza;
- * o seu custo é um item agregado ao preço final de todos os produtos.

A influência desta parcela no custo pode ser desprezível no caso de produtos de alto preço por unidade de peso, tais como: minerais nobres (ouro, prata), de produtos industrializados e de determinados produtos agrícolas (flores, frutos, especiarias).

Entretanto, os produtos mais transportados, de maior consumo e que mais influência têm no custo de vida, de uma maneira global, são os de baixo custo específico (menos de US\$ 500/ton), tais como o petróleo e seus derivados, minérios não-beneficiados de ampla utilização (carvão, ferro, calcário, agregados para concreto), produtos siderúrgicos, cimento, produtos agrícolas e fertilizantes. A influência no preço final dos produtos dependerá da distância a ser percorrida e do tipo de transporte utilizado, tanto para os insumos quanto para o produto final.

O transporte deve ser em quantidade suficiente, a fim de permitir a circulação interna de mercadorias e de baixo custo para não influenciar, desnecessariamente, o preço final dos produtos. Através da quantificação e da análise desses itens em diversas nações, alguns conceitos foram estabelecidos (CUNHA, 1990):

- Em países do mesmo nível de desenvolvimento, o determinante principal das necessidades de transporte é sua área.
- Nações de grandes superfícies têm que cuidar mais do custo de seus transportes, pois a

influência no PIB é mais determinante.

- Países de grandes dimensões e áreas similares têm um índice de densidade de transporte (TKU/hab), diretamente relacionado com sua renda per capita.
- Países de baixa renda per capita têm maior influência do transporte em seu PIB.

No Brasil, a influência do transporte no PIB poderia ser significativamente reduzida com a diminuição do custo unitário do transporte. O Brasil tem esse custo (20 US\$/1000TKU) bem superior ao das demais nações de mesma dimensão (o dobro da China que é 10 US\$/1000TKU e do Canadá que é 9 US\$/1000TKU).

Esse alto custo decorre da predominância do setor rodoviário, que é responsável por 55% de todo o transporte, contra apenas 23% do setor ferroviário. Dentre nações de grande superfície, que são as que têm maior preocupação com o custo do transporte, apenas no Brasil verifica-se essa situação. Este fato tem um reflexo bastante negativo sobre a economia do país. Pode-se citar como exemplo o caso da exportação da soja brasileira: o produtor brasileiro de soja gasta em média 34,1% do valor do produto para poder colocá-lo no mercado externo. Nos Estados Unidos os gastos não passam de 8,2%. O preço do frete rodoviário é um dos principais problemas enfrentados pelo exportador. O gasto médio com transporte de soja no país é de US\$ 30/ton, o dobro dos EUA onde o frete custa em média US\$ 15/ton. O motivo é que 70% da produção nacional é transportada por caminhões. As ferrovias respondem pelos restantes 30%. Estes fatos diminuem a competitividade do produto brasileiro no mercado externo. Assim como com a soja, pode-se citar outros produtos, como o café, o cacau e os calçados, entre outros, os quais enfrentam os mesmos problemas (FOLHA DE SÃO PAULO, 1990). A eliminação desse desperdício é fundamental para uma nação que tem que crescer por seus próprios meios, pois sabe que nada, ou pouco, pode esperar da comunidade financeira internacional.

A existência de uma infra-estrutura adequada de transportes é pré-requisito básico para o desenvolvimento de uma economia. Assim, um plano de transporte para o Brasil passa necessariamente por uma revisão do sistema hoje existente. O caminho natural para isto é aumentar gradativamente a oferta de transporte dos meios econômicos alternativos, particularmente do modal ferroviário, permanecendo o transporte rodoviário ao nível atual.

1.2 - JUSTIFICATIVA DO TRABALHO PROPOSTO

Olhando-se o sistema ferroviário no Brasil de uma forma bem ampla, pode-se dizer que existem duas situações bem distintas: uma é a do transporte que ocorre dentro das

regiões metropolitanas e a outra é a do transporte que ocorre fora destas regiões.

Com a urbanização vivida pela sociedade brasileira nas últimas décadas e com o desenvolvimento da economia houve um crescimento acentuado da demanda de passageiros e de carga nas principais cidades. Uma das consequências dessas modificações sócio-econômicas foi a intensificação do tráfego ferroviário, tanto de passageiros como de carga. Entretanto, tal intensificação foi sendo absorvida pela capacidade de tráfego instalada sem maiores planejamentos e até mesmo sem a construção de novas linhas que permitissem a separação dos dois tipos de transporte.

Com o adensamento populacional, as áreas que margeiam as ferrovias foram ocupadas e muito valorizadas, praticamente inviabilizando a desapropriação que permitiria a recuperação do espaço físico necessário para a construção de novas linhas. Atualmente, em algumas regiões metropolitanas, como Rio de Janeiro e São Paulo, já ocorre a situação de esgotamento da capacidade das linhas, que aponta inclusive para a necessidade de investimentos em obras que separem completamente os tráfegos de subúrbio e de carga.

Nestas linhas, esta situação implica numa séria restrição ao atendimento da demanda, além de uma limitação da produtividade na utilização do material rodante, especialmente vagões.

A crescente demanda de passageiros do sistema de trens suburbanos tem exigido adequações nas linhas e modificações dos sistemas de sinalização, objetivando não só o aumento da velocidade, como também o acréscimo do número de trens em circulação através da redução do "headway" nos horários de pico. Este panorama vem contribuindo substancialmente para o estabelecimento de um conflito técnico entre os trens de passageiros e os de carga.

Tal situação tende a se agravar, na medida em que os trens de carga são obrigados a circular fora dos horários de pico e do período de paralisação da via para manutenção. Assim, pode-se observar claramente que os trens de carga, sendo obrigados a operar dentro de faixas cada vez mais restritas de horários, têm tido reduzido o seu quantitativo na operação diária.

Fora das áreas metropolitanas, devido à ausência dos trens suburbanos, a situação não é tão grave para o transporte de carga. Entretanto, tem havido uma preocupação comum de aumentar a produtividade da operação ferroviária e também de aumentar as facilidades para os clientes, de forma a absorver a maior quantidade possível de carga.

Diante deste quadro, o sistema ferroviário brasileiro iniciou, na última década, um processo de dinamização, após anos de lenta deterioração. Tal processo, detonado pelas ameaças ao sistema de transporte, provenientes da crise de energia, implicou, inicialmente, em

alguns investimentos em infraestrutura, na aquisição de material rodante e sistemas de controle de tráfego.

Todavia, os investimentos necessários às melhorias, tanto do material rodante quanto da via permanente, montam a valores elevados, que nem sempre estão disponíveis e nem sempre dão o retorno esperado. Melhorias significativas, entretanto, podem ser obtidas a um custo relativamente baixo, através do estabelecimento de regras operacionais adequadas. Este problema foi sentido em todo o mundo, dando início, então, aos estudos para a otimização da operação ferroviária através da reavaliação das técnicas e procedimentos operacionais empregados. Foram também modernizados os meios de informação, com a criação de sistemas de informações gerenciais em tempo real.

Com a introdução das técnicas de otimização, as estradas de ferro, em diversos países, experimentaram resultados significativos, levando, a curto prazo, a uma redução substancial no custo do sistema ferroviário (operação, manutenção e administração) e, a médio e longo prazo, a um aumento efetivo da carga transportada pela oferta de melhores serviços.

Assim, numa segunda etapa, dentro do processo de dinamização do sistema ferroviário brasileiro, esforços foram feitos para criar um sistema de informação computadorizado para controlar o parque de veículos e acompanhar os trens.

Entretanto, ainda hoje, o controle do tráfego e o gerenciamento do transporte é feito utilizando métodos empíricos, fruto da experiência e transmitidos oralmente, no próprio local de operação, de geração a geração de técnicos. Embora carregados de muita sabedoria prática, tais métodos não permitem receber e processar rapidamente toda a informação sobre o sistema, de modo a servir como base para a tomada de decisão. As decisões são tomadas considerando apenas uma parcela de informação sobre o sistema. A mudança de turnos implica, frequentemente, em perdas parciais de informação, além de quebra de rotina e do estilo de tomada de decisão.

Por esta razão, na etapa atual, os esforços principais concentram-se na busca da melhoria de métodos gerenciais, com a captação mais adequada de custos de operação e com a busca de maior produtividade na própria operação. Toda esta complexidade clama por sistemas de apoio à decisão na forma de modelos quantitativos. O potencial de retornos financeiros significativos, mesmo a partir de pequenos percentuais de economia, motivam um grande interesse em tais modelos.

Por todos esses motivos, torna-se interessante a existência de métodos de gerenciamento modernos que, baseados num sistema de informação abrangente, auxiliem os centros operacionais na tomada de decisão.

1.3 - OBJETIVO DO TRABALHO PROPOSTO

De uma forma bastante resumida, pode-se pensar no sistema ferroviário da seguinte forma: tem-se uma rede, onde as ligações desta rede são as linhas ferroviárias e os nós são as estações, ou então os pátios de classificação ou manobra, para o caso do transporte de carga; tem-se os vagões e as locomotivas; e tem-se a carga a ser transportada, com diversas origens e destinos, tudo isto numa área geográfica geralmente bastante extensa.

Para levar a carga da origem ao destino o vagão passa por diversas etapas que constituem o ciclo do vagão e que são:

- o cliente requisita um vagão vazio. O vagão é então colocado no pátio de carga do cliente.
- O vagão é carregado e levado para o pátio de classificação.
- os vagões são colocados em um trem e partem na direção de seus destinos.
- o trem chega ao pátio de triagem intermediário. Os vagões são desconectados e dirigidos para as vias do pátio onde serão formados novos trens. Os vagões partem em outro trem.
- o vagão chega ao destino e é desviado para descarga.
- o vagão é descarregado.

Cada uma destas etapas envolve uma série de operações, todas elas interligadas. Conseqüentemente, os problemas a serem estudados são muitos, e os resultados de uns são necessários à resolução dos outros.

A necessidade de considerar os muitos aspectos do problema simultaneamente, o volume de dados a tratar e a variedade de restrições (provenientes da tecnologia, de acordos de trabalhadores, de regulamentos governamentais, entre outros) tornam o gerenciamento do sistema ferroviário um problema de grande complexidade.

Diante do exposto acima e no item anterior, pode-se observar que atualmente há um consenso de que o gerenciamento do transporte de carga nas ferrovias requer a existência de um sistema de informação abrangente, interligando toda a rede ferroviária.

Tal sistema melhora a qualidade da informação colocada à disposição daqueles que tomam as decisões. Entretanto, não se pode ficar limitado somente a este aspecto do problema. Paralelamente aos progressos técnicos realizados na coleta, na transmissão e no tratamento dos dados, é preciso desenvolver métodos visando a otimização das decisões a curto, médio e longo prazo, no que diz respeito ao encaminhamento dos vagões.

Os problemas encontrados no gerenciamento do transporte ferroviário de carga são inúmeros e seria ilusória a busca de suas soluções pela utilização de um único modelo. É

necessária a divisão do estudo em um certo número de grupos de problemas, cada grupo sendo caracterizado por um modelo ou um conjunto de modelos específicos; é necessária também a definição do encaminhamento lógico destes estudos parciais, começando por aqueles cujos resultados são indispensáveis à solução dos outros.

Diante desta complexidade, torna-se importante a existência de um sistema computacional que trate os dados e informações de forma precisa e abrangente, considerando regras e modelos e considerando a intuição e visão subjetiva do tomador de decisão, isto é, um Sistema de Apoio à Decisão.

NASCIMENTO (1988), desenvolveu um sistema de apoio ao planejamento e gerenciamento de trens de carga, abrangendo dois modelos: Formação de Trens e Alocação de Locomotivas. Foi feita uma aplicação da metodologia proposta num estudo da operação da linha Santos-Jundiaí, situada em São Paulo, pertencente à Divisão Operacional de Santos (CSP.4) da RFFSA. Dado o compromisso de desenvolver um sistema que pudesse ser realmente implantado, como auxílio ao gerenciamento, foi necessário adaptá-lo às condições da organização do centro de controle (SR.4 - RFFSA - São Paulo - Centro Operacional da Luz). Tal fato conduziu ao desenvolvimento de uma heurística, que reproduz, basicamente, os critérios de decisão do centro de controle. O sistema concebido foi acompanhado pelos técnicos da RFFSA, que manifestaram o seu interesse em aperfeiçoá-lo e implantá-lo no centro de gerenciamento de carga.

A proposta, para este trabalho de doutoramento, é a de fazer um sistema mais completo e mais geral, abordando outros aspectos importantes para o gerenciamento, como: o controle de capacidade dos pátios para receber vagões com um determinado produto; o controle do fluxo de vagões de outros sistemas entrando na região; colocar o problema de programação e distribuição de locomotivas como problema de otimização; incorporar o problema de distribuição de vagões vazios, tratando-o também como um problema de otimização; incorporar o problema de distribuição de combustível a partir de uma refinaria aos distribuidores através de vagões tanques; e incorporar informações sobre grandes fluxos, como a chegada de navios e as condições do porto, no caso de corredores de exportação. Tudo isto considerando o fator tempo, que na tomada de decisão a nível operacional é fundamental, e as características operacionais do sistema ferroviário brasileiro.

A Figura 1.1 a seguir dá uma idéia clara do sistema proposto. Este sistema computacional de apoio ao gerenciamento é formado por quatro módulos, cada um deles abrangendo um problema da operação ferroviária, quais sejam: a distribuição de vagões vazios, a distribuição de vagões tanques, a formação de trens e a programação e distribuição de locomotivas. O que se propõe, é o uso de um microcomputador PC compatível que será ligado diretamente ao computador que processa as informações das estações em tempo real. O

microcomputador acessará então estas informações, alimentará e processará os programas. Desta forma, sempre que os mesmos forem executados, as últimas informações processadas no sistema é que estarão sendo consideradas, possibilitando assim um planejamento bastante dinâmico.

O SISTEMA PROPOSTO

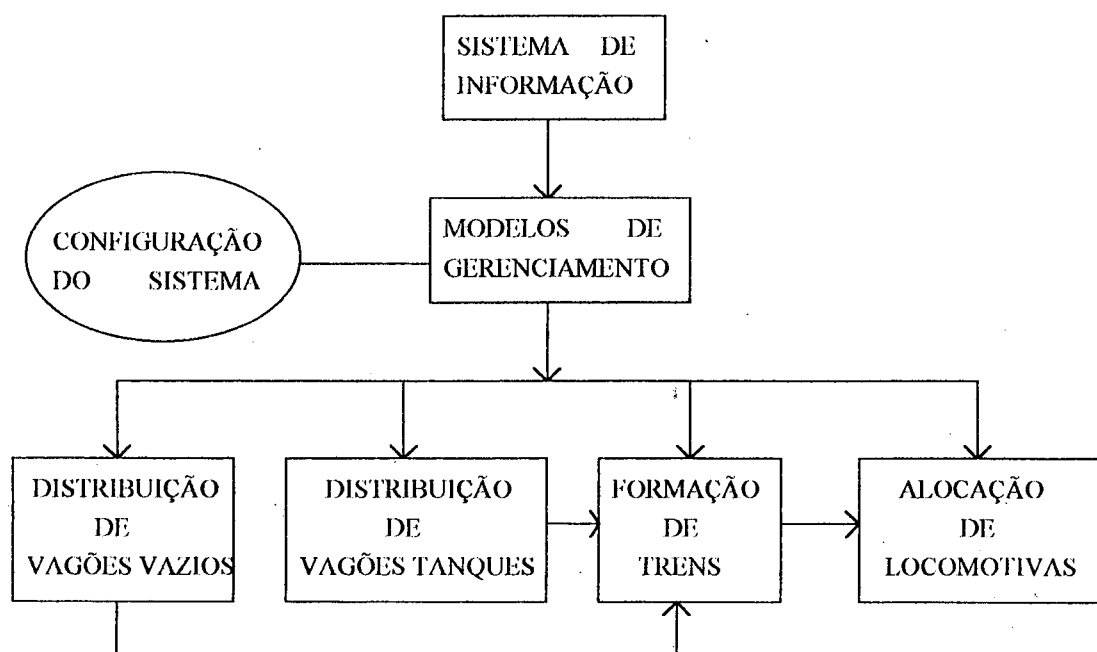


Figura 1.1 - O Sistema Proposto

A utilização de tal sistema permitirá o planejamento da operação num tempo ínfimo. Será possível então, simular o planejamento sob várias hipóteses com rapidez e precisão, o que permitirá ao gerente a escolha da melhor solução dentre várias soluções alternativas.

1.4 - CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS

O trabalho compreende oito capítulos, quatro Apêndices e as Referências Bibliográficas.

Neste primeiro capítulo, de introdução, são apresentados a concepção do tema,

o objetivo e a justificativa do trabalho.

O segundo capítulo compreende um estudo sobre os sistemas gerenciais de apoio à operação ferroviária existentes nas principais ferrovias estrangeiras e no Brasil, assim como uma descrição do processo de tomada de decisão na operação ferroviária na Rede Ferroviária Federal.

O terceiro capítulo apresenta o sistema operacional proposto.

No quarto capítulo é apresentado o problema de distribuição de vagões vazios, a revisão bibliográfica efetuada, o modelo proposto e a aplicação do modelo.

No quinto capítulo, da mesma forma que no terceiro, é apresentado o problema de distribuição de combustível a partir de uma refinaria aos distribuidores através de vagões tanques.

No sexto capítulo é apresentado o problema de formação de trens com a revisão bibliográfica feita, o modelo proposto e a aplicação do modelo.

O sétimo capítulo é constituído pela apresentação dos problemas de programação e distribuição de locomotivas, a revisão bibliográfica efetuada, o modelo proposto e a aplicação do modelo.

No oitavo capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos posteriores, decorrentes do presente estudo.

Os Apêndices apresentam as listagens dos programas computacionais, os arquivos e as saídas dos programas. O Apêndice A se refere ao modelo de distribuição de vagões vazios; o Apêndice B ao modelo de distribuição de vagões tanques; o Apêndice C ao modelo de formação de trens e o Apêndice D ao modelo de programação e distribuição de locomotivas.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

CUNHA JR., F. (1990), A Batalha dos Trilhos - Base para uma Política Nacional de Transporte, Ed. Terceiro Mundo.

FOLHA DE SÃO PAULO (1990), Custo do Transporte Prejudica Exportação da Soja Brasileira, 04 de Julho.

NASCIMENTO, E.P. (1988), Operação de Trens em Linhas de Alta Densidade, tese de mestrado, IME - Instituto Militar de Engenharia, RJ, Brasil.

CAPITULO 2

SISTEMAS GERENCIAIS DE APOIO À OPERAÇÃO FERROVIÁRIA

2.1 - ASPECTOS GERAIS

Para se obter os benefícios de um sistema de transporte moderno, os departamentos responsáveis pela direção, transporte, controle e planejamento da ferrovia devem manter-se constantemente informados sobre o movimento de trens e vagões.

Todas as principais ferrovias do mundo já possuem sistemas de gerenciamento avançados, onde computadores muito potentes são utilizados como ferramenta básica na coleta, processamento, difusão e armazenamento das informações geradas pela malha ferroviária, de forma a prover os diversos níveis de decisão da estrada com informações suficientes para a tomada de decisão, não só na área operacional mas também na administração, manutenção e contabilidade da ferrovia.

Os Sistemas de Informações Operacionais ferroviários, baseados em computadores, podem ser representados conforme a Figura 2.1 (RFFSA, 1981):

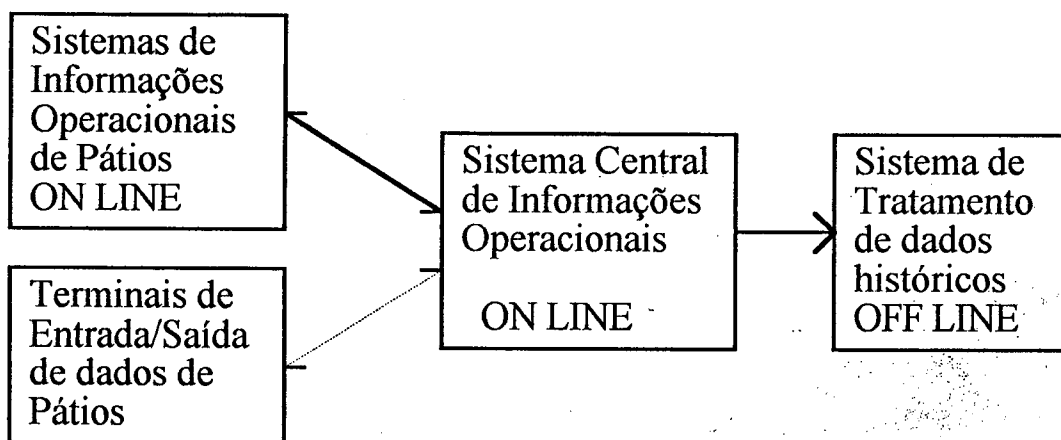


Figura 2.1 - Sistemas de Informações Operacionais

Em um sentido mais amplo, o propósito dos Sistemas de Informações Operacionais é dar suporte aos vários níveis de gerenciamento operacional na tomada de

decisões a curto e médio prazos. Algumas situações em que os sistemas poderão ser utilizados são:

- Quando determinado trem deverá trafegar?
- Que vagões deverão ser incluídos em determinado trem?
- Existe uma locomotiva disponível para o trem?
- Qual o destino que se deverá dar aos vagões vazios quando eles forem descarregados ou recebidos de outras regionais?
- Quais instruções e prioridades deverão ser dadas às equipes de manobra de pátios, baseadas no tráfego de vagões esperado para o pátio e na movimentação dos vagões que deverão ser despachados do pátio?

Por outro lado, o propósito do Sistema de Tratamento de Dados Históricos é dar suporte, aos responsáveis pela operação, no julgamento das tendências de performance da estrada e nas tomadas de decisão de estratégia operacional, tais como:

- Há necessidade de se adquirir novos vagões de carga ou locomotivas?
- Há necessidade de se aumentar o número de vias de determinado pátio?
- Há necessidade de se aumentar ou diminuir a equipe de manobra?
- Em que local o serviço de transporte deverá ser melhorado para atender determinado cliente ou atrair novos clientes?
- Há necessidade de se aumentar o número de pátios da estrada?
- Onde eles serão localizados e com que capacidade de classificação?

Nestas ferrovias, tais sistemas já atingiram um estágio mais avançado: consideram modelos matemáticos e regras operacionais e permitem uma interação com o gerente, possibilitando a análise de um maior número de soluções alternativas para os problemas encontrados, de forma rápida e precisa, melhorando portanto a tomada de decisão. Na linguagem de Sistemas de Informação, estes sistemas são conhecidos como Sistemas de Apoio à Decisão (SAD).

Nos países menos desenvolvidos, onde o sistema ferroviário conseqüentemente é também menos desenvolvido, os sistemas de informação utilizados são empregados principalmente para o controle de trens e vagões - são os chamados Sistemas de Informação Gerencial (SIG).

Segundo PARKER e AL-UTAIBI (1986), KEEN e SCOTT-MORTON (1978) apresentam as diferenças entre o SIG e o SAD, através da seguinte classificação:

* Área de Impacto nas Organizações

SIG - tarefas estruturadas onde procedimentos operacionais padrão, regras de decisão e fluxos de informação podem ser perfeitamente predefinidos.

SAD - decisão para a qual existe uma estrutura que permite uma valiosa ajuda computacional e analítica, mas onde o julgamento do gerente é essencial.

* Orçamento da Organização

SIG - aumento da eficiência pela redução de custos.

SAD - aumento da capacidade do processo de decisão do gerente, ajudando-o a melhorar sua eficácia.

* Importância para o Gerente na Tomada de Decisão

SIG - indireta, isto é, fornecendo relatórios e permitindo o acesso a dados.

SAD - criação de uma ferramenta de suporte, sob seu controle, a qual não tenta automatizar o processo de decisão, nem predefinir os objetivos ou impor soluções.

Segundo FLEURY et al (1984), SPRAGUE (1980) analisou algumas características que diferenciam os dois sistemas, chegando a conclusão que os SAD são uma evolução do conceito de SIG, da mesma forma que os SIG evoluíram a partir do Processamento Eletrônico de Dados (PED), conforme a Figura 2.2:

Sistemas	Área de Impacto	Objetivo	Flexibilidade	Tecnologia	Enfoque
PED/SIG	* Decisões estruturadas * Processamento de transações	Aumentar a eficiência das operações	* Baixa * Relatórios pré-definidos * Não interativo * Armaz. Inform.	* Proces. batch * arq. em fita/Bancos de Dados * Linguagens convencionais	Dados e informação
SAD	Suporte a decisões semi-estruturadas	Aumentar a eficácia do processo decisório	* Alta * Relat. c/ formatos livres * Interativo. Gerar inf. * Simulação	* Terminais interativos * Bancos de dados * Mod. Matemat. * Linguagem de alto nível (APL, LISP) * Proc. gráfico	Decisão

Figura 2.2 - Comparação entre SIG e SAD

O uso de um SAD pode melhorar os resultados do planejamento, porque, com o computador, a rotina de planejamento pode ser realizada num curto período de tempo, dando ao gerente a oportunidade de usar sua habilidade e experiência para comparar vários planos alternativos. Um SAD permite ao tomador de decisão perguntar: "o que-se" e "o que fazer". Desta forma, os resultados do planejamento podem ser melhorados. Adicionalmente, é possível que o tomador de decisão, envolvido no processo de planejamento e gerenciamento da operação, não esteja necessariamente interessado numa alternativa ótima. As conseqüências de alternativas simples poderiam estar claramente ligadas aos objetivos.

Segundo REYNOLDS (1988), uma ferramenta é tão efetiva quanto o seu usuário. Portanto, o usuário deve entender os modelos disponíveis no SAD - não somente como usá-los, mas também os pressupostos básicos nos quais eles se baseiam. Da mesma forma, deve entender os dados usados no modelo, e fazer a escolha certa dos mesmos para o problema em estudo.

Pelo acima exposto, um campo de aplicação para os SADs seria no planejamento e gerenciamento de ferrovias. Por exemplo: na Rede Ferroviária Federal, a programação de trens é realizada em três escalas: anual, mensal e diária. Na escala anual a programação de trens é reavaliada de acordo com os dados obtidos no exercício findo, objetivando o planejamento global do transporte na malha. Na escala mensal, a programação de trens é ajustada aos pedidos mensais dos clientes com produção planejada. Na escala diária, a programação de trens é ajustada às variações diárias da demanda de transporte. De fato, o planejamento tem a característica de um processo contínuo. Com bastante freqüência, uma mudança inesperada ocorre como resultado de diversos fatores, tais como: mau tempo, interrupção da linha, quebra de locomotivas e vagões, entrada de trens de outras ferrovias no sistema, mudanças nas prioridades da carga transportada, atendimento aos interesses dos clientes, entre outros, e com isto o planejamento ou uma parte dele precisa ser reconsiderado. Especialmente em períodos de grande movimento, isto representa um grande consumo de tempo, e a conseqüente falta de tempo impede o gerente de levar em consideração - possivelmente de uma melhor forma - outras programações alternativas.

Campos de aplicação, semelhantes ao acima descrito, são encontrados no caso de planejamento e gerenciamento de portos (VAN DER HEYDEN e OTTJES, 1985), (WAGSCHAL, 1985).

2.2 - SISTEMAS GERENCIAIS DE APOIO À OPERAÇÃO EMPREGADOS EM FERROVIAS ESTRANGEIRAS

2.2.1 - SOUTHERN PACIFIC

A Southern Pacific desenvolveu um sistema de gerenciamento operacional, a nível de SAD, denominado TOPS (Total Operating Processing System), que através de um sistema de computadores recebe, edita e armazena informações de vagões e trens que são difundidas assim que o evento ocorre. A informação é processada e distribuída (ou armazenada) de forma que toda a malha tenha acesso a mesma, imediatamente após ela ter ocorrido (RFFSA, 1981).

A introdução do TOPS permitiu à Southern Pacific aumentar a taxa de utilização do vagão de 80 vazios/1 carregado para 12 vazios/1 carregado. Após a implantação do sistema, verificou-se que uma economia de 240.000 vagões poderia ter sido feita.

O sistema TOPS foi integralmente introduzido nas demais ferrovias americanas, e uma versão simplificada foi introduzida no **Canadá** e no **México**. Esses sistemas foram integrados através de redes de computadores, de tal forma que em qualquer ponto do Canadá, México e Estados Unidos o cliente poderá obter informações sobre o movimento de sua mercadoria, simultaneamente ao acontecimento do evento.

O sistema TOPS promove a integração dos diversos elementos de operação do transporte de carga, além de proporcionar o completo controle operacional aos gerentes da operação. O sistema utiliza modelos matemáticos e mantém uma interação constante com o gerente. Especificamente isto é realizado através do controle das seguintes funções:

- a) Serviços de trens
- b) Operações de pátios
- c) Distribuição de vagões vazios
- d) Controle de locomotivas

Para a descrição da metodologia, será dado um exemplo simples através do seguimento do movimento de um vagão, conforme mostrado no quadro a seguir:

PASSO	MOVIMENTO DO VAGÃO	FUNÇÃO DO TOPS
1	O cliente requisita um vagão vazio através do Centro de Carga local.	A requisição é colocada no TOPS pelo Centro de Carga; TOPS dirige um vagão para o cliente.
2	O vagão vazio é colocado no pátio de carga do cliente	TOPS é informado do número do vagão e de que ele está no local para carga.
3	O vagão é carregado, desembarçado e fica pronto para ser despachado.	TOPS é informado. O relatório inclui mercadoria, destino e, se necessário, instruções sobre cuidados especiais.
4	O vagão parte para o pátio de classificação.	TOPS avisa ao pátio de classificação que o trem está a caminho, o horário de partida e todos os vagões da formação.
5	O trem chega ao pátio de triagem intermediário. Os vagões são desconectados e dirigidos para as vias do pátio onde serão formados novos trens. Os vagões partem em outro trem.	TOPS é avisado da chegada no pátio, o trem em que o vagão será incluído, e quando ele parte. A formação do trem é gerada e transmitida automaticamente para o próximo pátio com as instruções corretas de classificação para cada vagão.
6	O vagão chega ao destino e é desviado para descarga.	TOPS avisa ao cliente que o vagão está em posição de descarga.
7	O vagão é descarregado.	TOPS é avisado do desembarço do vagão e fornece instruções para a movimentação do vagão vazio.

2.2.2 - FERROCARRILES NACIONALES DE MÉXICO

O gerenciamento de vagões surgiu como uma necessidade imperiosa nas Ferrocarriles Nacionales de México (FNM), já que nas décadas de 60 e 70 seu tráfego cresceu numa taxa média anual de 5,8%. Assim como muitas outras ferrovias no mundo, a FNM se deu conta que os meios tradicionais de enfrentar os aumentos na demanda por transporte ferroviário, mediante a aquisição de vagões adicionais, resultavam cada vez mais onerosos e pouco rentáveis. Além disso, o custo do capital investido no material rodante em uso tem maior incidência nos custos totais de produção dos serviços ferroviários. Estes aspectos, como constataram a maioria das empresas, atualmente têm maior importância em vista da escassez de financiamento e das altas taxas de juros existentes. Assim, a FNM viu a possibilidade de obter significativos aumentos de sua capacidade, através de investimentos para o melhoramento do gerenciamento de seu material rodante existente, de forma que, em 1976, foi feito um contrato com a firma TOPS on Line para obter o sistema TOPS, ajuda na sua adaptação às condições operativas mexicanas e treinamento para o seu uso.

O resultado deste convênio foi a criação do SCINCO (Sistema Central de Informação e Controle da Operação), cujos principais objetivos são: informar sobre o intercâmbio de vagões com outras ferrovias, sobre o movimento de trens, sobre as características e o estado dos vagões e locomotivas, controlar a manutenção de locomotivas, controlar os vagões que se deslocam em grupos, e transmitir mensagens entre as estações.

Devido à proximidade com a Southern Pacific, com a qual tem interconexões, a FNM conhecia o TOPS e as reduções de 20% ou mais no tempo de rotação de vagões de serviço geral que esta empresa havia obtido com a sua instalação. O sistema proporcionaria, desta forma, a ferramenta necessária para agilizar o gerenciamento da operação que a FNM estava buscando. Já que a implantação de uma versão do TOPS, modificada para as condições mexicanas, custaria bem menos do que o desenvolvimento de um sistema completamente novo, que ofereceria as mesmas vantagens, foi decidido tomar o TOPS para a criação do SCINCO (CEPAL, 1983).

2.2.3 - CANADIAN NATIONAL

Um moderno sistema de controle de tráfego ferroviário vem sendo usado pela Canadian National desde 1976. O sistema, operado pelo computador, denominado TRACS

(Traffic Reporting and Control System), possibilita a distribuição de vagões e operações de trens, oferecendo, aos usuários, transporte e informações eficientes.

O centro do sistema é um complexo de comunicações, integrado pelo computador, interligando todos os pátios, estações de carga, escritórios de vendas e outras localidades-chaves. É utilizado o software TOPS da Southern Pacific (REVISTA FERROVIÁRIA, 1976).

Uma das principais razões para o desenvolvimento do sistema pela ferrovia, apesar de seu alto custo inicial, foi a possibilidade que ofereceria para o controle perfeito do movimento e do gerenciamento do vagão vazio. A CN possui uma frota de vagões cujo valor de reposição passa os 2 bilhões de dólares e que pode produzir receitas anuais de 1 bilhão. Assim, um aumento, mesmo que pequeno, da taxa de rotação dos vagões, é bastante rentável. Por exemplo, uma melhora de 5% representa \$ 100 milhões de capital, ou \$ 8 milhões de lucro anual. Uma característica do sistema é que os usuários da ferrovia, no Canadá ou nos Estados Unidos, podem perguntar ao computador da CN a exata localização do vagão que conduz a sua carga naquele exato momento (TIVY, 1973).

2.2.4 - BRITISH RAILWAYS

O TOPS é o mesmo sistema de gerenciamento utilizado pela SOUTHERN PACIFIC no apoio à operação ferroviária. Este sistema foi comprado à SOUTHERN PACIFIC e adaptado às condições operacionais da ferrovia britânica. Com a decisão de comprar o know how americano, a BRITISH RAILWAYS obteve uma substancial redução nos recursos necessários, através da eliminação dos custos de desenvolvimento e uma redução significativa no tempo de implantação. Enquanto a SOUTHERN PACIFIC levou cerca de 10 anos no desenvolvimento do primeiro módulo do sistema (gerenciamento de vagões vazios), com um esforço de aproximadamente 600 homens-ano, a BRITISH RAILWAYS implantou todo o sistema em apenas 4 anos. O sistema foi completado em 1975 após 2 anos de implantação, precedidos de 2 anos de planejamento e preparação.

O investimento no sistema de gerenciamento computadorizado foi amplamente recompensado. Embora ele não tenha sido o único responsável, não pode ser considerada coincidência o fato de que de um prejuízo de 70 milhões de libras em 1974, o transporte de carga tenha apresentado lucro após a implantação do TOPS (RFFSA, 1981).

2.2.5 - SOCIÉTÉ NATIONAL DES CHEMINS DE FER

A Gestão Centralizada do Tráfego de Mercadorias é uma ferramenta da operação, de base informática, que visa a solução dos problemas técnicos e comerciais, que se apresentam à SNCF por ocasião do transporte de mercadorias (RFFSA, 1981). É um sistema operacional a nível de SAD.

Para se ter uma idéia do funcionamento da Gestão Centralizada do Tráfego de Mercadorias (GCTM), serão seguidos os diversos eventos que ocorrem no transporte da carga. Para os clientes, o transporte inicia no momento em que é requisitado um vagão vazio para a carga e termina assim que o destinatário descarrega-o e o coloca à disposição da ferrovia. Todavia, a menos que este vagão seja carregado no mesmo pátio de descarga, restará ainda encaminhá-lo ao novo pátio de carga, antes de iniciar a próxima viagem.

Um transporte consiste, portanto, de um ciclo na vida do vagão, constituído por um percurso carregado e, em seguida, por um percurso vazio.

- Percurso carregado:

- * A permanência do vagão em um pátio de carga (ou descarga) é seguida por meios informáticos através de "Arquivos de Estadia", armazenados em computadores e montados a partir de mensagens emitidas pelos Centros de Informação de Estadia (CIE), que são os responsáveis pela coleta de informações de determinada área.
- * O vagão é colocado à disposição do cliente. O CIE emite uma Mensagem de Movimento (MOV) indicando que o vagão não está vazio, mas sendo carregado na via de carga do pátio ou no desvio do cliente.
- * A partir das informações arquivadas no Arquivo de Estadia, o Sistema Central de Informática (SCI) fornece aos CIEs, uma listagem com os vagões vazios ou carregados, presentes, esperados ou recebidos em cada pátio: é o inventário da situação. Os responsáveis pelo CIE podem seguir e controlar a estadia dos vagões nos pátios de sua zona de ação.
- * Logo que o vagão é carregado, uma nova mensagem de movimento é emitida, informando que o vagão já está carregado e pronto para partir.
- * O vagão é agora enviado ao pátio de classificação, onde será formado o trem que o levará ao próximo pátio de triagem. O SCI é informado da movimentação do vagão, seja através de uma mensagem de saída emitida pelo CIE, seja através de uma mensagem de recebimento emitida

pelo pátio de triagem, quando da chegada do trem, pelo Centro de Informações de Triagem (CIT).

- * Ao receber a mensagem, O SCI armazena no Arquivo de Estadia a informação de que o vagão partiu do pátio A tendo como destino o pátio Z, com todos os pátios intermediários de triagem previstos em sua rota.

- * O vagão está a caminho do primeiro pátio de triagem. O SCI determina, com antecedência, para o segundo pátio de triagem, qual o trem em que esse vagão deverá ser incluído e a via sobre a qual ele deverá ser desviado para ser reagrupado com outros vagões de acordo com a formação do trem. O manobreiro conhece a via em que cada vagão deverá ser desviado, graças ao Plano de Manobras. Anteriormente, este plano era elaborado manualmente no local, após a chegada do trem. Atualmente, o Plano de Manobras é enviado antecipadamente e automaticamente ao pátio de classificação pelo SCI, sendo utilizado não somente para a classificação do vagão, mas também para que o Posto de Comando do Pátio possa decidir, em função da composição dos trens que são esperados para o pátio, a formação de trens suplementares.

- * Conhecendo o horário de chegada dos diversos trens, a ordem dos vagões nesses trens, e os trens nos quais os vagões devem partir, o SCI elabora a composição dos trens que deverão partir, enviando-a ao pátio sob a forma de listagem.

- * Progredindo de triagem em triagem, o vagão vai se aproximando do seu destino. Entretanto, não se espera ele chegar ao pátio de destino para o destinatário ser avisado de que ele pode descarregar o vagão. Vem um momento em que, ao registrar o vagão em um pátio de triagem suficientemente próximo ao pátio de destino, o SCI constata que é tempo do Posto de Comando do pátio ser avisado. O SCI calcula a rota teórica do vagão até o pátio de destino e fornece ao Posto de Comando do pátio uma lista de pré-aviso, que contém os trens e horários de chegada dos vagões, com as informações que estavam contidas na mensagem de saída do vagão (cliente, destinatário, tipo de mercadoria, pátio de destino, etc.).

- * Para o resto do percurso, os pátios de triagem devem se esforçar para respeitar o encaminhamento previsto (rota, tempo de classificação, etc.). Se por algum motivo isso não for possível, o SCI se apercebe e envia, ao pátio de destino, uma mensagem com as mudanças, o que permite prevenir o cliente com relação ao atraso na chegada da mercadoria.

- * Enfim, o vagão deixa o último pátio de triagem em um trem que o vai transportar até seu pátio de destino. Ele é, então, incluído no Arquivo de Estadia desse pátio, junto com os trens que ele formou e o horário real de chegada.

- * Na última etapa da viagem com carga, o vagão é devolvido pelo destinatário. Ele é registrado no Arquivo de Estadia do pátio como vagão vazio e disponível. Nesse instante é que

irá intervir o Órgão de Distribuição de Vagões Vazios. A viagem a vazio que terá lugar, será controlada, com relação à estadia em pátios e ao movimento, de forma idêntica àquela da viagem carregado.

- Percurso vazio:

* O Órgão de Distribuição, ligado à comercial, é o encarregado pelo comando dos movimentos dos vagões vazios, a fim de assegurar o fornecimento dos mesmos. Normalmente, os vagões não são deixados nos pátios onde foram descarregados, à espera de serem requisitados, pois caso o local que necessite de vagão fique distante do pátio de descarga, os vagões chegarão muito tarde ao local da demanda. Daí que o percurso vazio começa com o envio dos vagões vazios, que não serão utilizados localmente, a pátios de concentração de onde eles podem, em 24 horas no máximo, atender às necessidades dessa zona.

* A distribuição é feita em dois níveis:

1) Em âmbito nacional - o Órgão de Distribuição encaminha os vagões vazios para as regiões onde, em função do tipo de vagão, eles poderão suprir as necessidades previstas. O SCI elabora, diariamente, uma relação dos vagões disponíveis, por tipo e por zona, e a fornece ao Órgão de Distribuição Central, assim como um conjunto de informações estatísticas baseadas no número de vagões carregados na semana precedente. Ajudado por essas informações, o Órgão de Distribuição Central fornece as ordens permanentes de envio de vagões vazios (ordens para enviar uma média diária de vagões de determinado tipo para determinado lugar) ou as ordens diárias sobre um conjunto de vagões e válidas para somente um dia. O controle de execução das determinações do Órgão de Distribuição é assegurado pelo SCI, que conhece as partidas dos vagões vazios dos pátios de descarga e a sua chegada aos pátios de concentração e as fornece igualmente ao Órgão de Distribuição.

2) Em âmbito local - a SNCF é dividida em Zonas de Distribuição, que são responsáveis pela movimentação dos vagões nos seguintes casos:

- deslocamento do vagão diretamente do pátio de descarga para o pátio de carga, em todos os casos onde for possível;
- deslocamento do vagão do pátio de descarga ao pátio de concentração e, posteriormente, deste para o pátio de carga.

Cada zona de distribuição é dividida em sub-zonas, constituídas por um conjunto de pátios de características semelhantes, e que figuram para o Órgão de Distribuição por Zona como um macro-pátio. Em geral, a divisão em sub-zonas coincide com a divisão em zonas de

ação do CIE. A cada dia, o Órgão de Distribuição por Zona recebe do SCI a situação dos vagões disponíveis na área, por tipo e por sub-zona. Por outro lado, ele recebe diretamente das sub-zonas as necessidades para o dia seguinte, seja as que se tratam de pedidos fechados apresentados pelo cliente, seja de previsões expressas pelos pátios. Devidamente informado, o distribuidor é capaz de transmitir às sub-zonas e aos pátios de concentração, as ordens de envio de vagões vazios para os pátios, onde eles serão alocados à disposição dos clientes no dia seguinte. Como na distribuição central, o SCI fornece ao repartidor de zona as informações sobre os movimentos reais de vagões, permitindo a esse último verificar se suas ordens foram bem executadas.

2.2.6 - OUTRAS FERROVIAS

Com o mesmo objetivo e controlando as mesmas funções, conforme mostrado na descrição do TOPS, existem no Japão, Alemanha, Espanha, entre outros países, processos similares com a mesma filosofia de "ON-LINE" e redes de computadores centrais.

Na **JNR (Japanese National Railways)** são muitos os sistemas de gerenciamento (RFFSA, 1981):

- Sistema de Serviço de Passageiros:

MARS (Magnetic Electronic Automatic Reservation) - Sistema de Reserva Automática Magnética e Eletrônica.

- Sistema de Serviço de Mercadorias:

EPOCS (Effectual Planing and Operation of Containers) - Sistema de Planejamento e Operação Eficazes de Containers.

YACS (Yard Automatic Control System) - Sistema de Controle Automático de Pátios.

FOCS (Freight Operation Control System) - Sistema de Controle de Operação de Carga.

- Sistema de Operação de Trens:

COMTRAC (Computer Aided Traffic Control System) - Sistema de Controle de Tráfego com Apoio do Computador.

No **Sistema Ferroviário Federal Alemão** foi desenvolvido um Sistema de Gerenciamento de Operação de Trens (TOMS), que maneja todos os aspectos das operações

de despacho de rotina e então fornece informações sobre rotas, programações, conflitos, etc., para auxiliar o despachante a resolver problemas particularmente difíceis. Sempre que um conflito inesperado surge, uma solução potencial é determinada, a qual utiliza a melhor rota disponível. Entretanto, antes de implementar esta solução, o despachante é notificado sobre o conflito, sobre a solução potencial, e sobre seu efeito na operação. Ele tem então algum tempo, ou para mudar a solução, sendo que neste caso o sistema irá reavaliar os efeitos deste novo plano e expô-lo, ou para aceitá-la como tal (PROGRESSIVE RAILROADING, 1980).

A **Red Nacional de Ferrocarriles Españoles (RENFE)**, desenvolveu um sistema de gerenciamento ao qual deu o nome de Controle Integrado de Gestão. O modelo integrado de gestão da RENFE consta de três elementos: documentação de base; unidades de tratamento informático e resultados finais. Dentre os processos que formam o Plano Informático, destacam-se (REVISTA ALAF, 1982):

* **Sistemas de Controle e Informação sobre Mercadorias**

- Informação e seguimento do ciclo do vagão
- Automação da distribuição de vagões vazios
- Mecanização da tarifação

* **Sistema de Informação sobre o Tráfego**

- Controle da regularidade
- Gestão de locomotivas em tempo real
- Gestão de maquinistas em tempo real

2.3 - SISTEMAS GERENCIAIS DE APOIO À OPERAÇÃO EMPREGADOS NO BRASIL

2.3.1 - FERROVIAS PAULISTAS S.A.

A FEPASA (Ferrovias Paulistas S.A.) é uma companhia estatal brasileira responsável pela administração, operação e manutenção de um sistema ferroviário que abrange todo o Estado de São Paulo, totalizando cerca de 5.100 Km de vias.

Em vista do aumento que estava conseguindo em seu transporte, a FEPASA sentiu a necessidade de melhorar sua comercialização e sua operação ferroviária, baseando-se

na informática. Com o objetivo de obter, a nível mundial, a tecnologia que melhor se adaptasse às características próprias da empresa, foi contratada a assessoria técnica de um consórcio formado pela firma consultora TOPS ON LINE, pela firma Ingenieria y Economia de Transporte (INECO), ligada à Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles e a firma consultora brasileira TRANSCON. O sistema desenvolvido foi o **SUMO** - Sistema de Utilização do Material Operacional, que produz informações sobre carros, vagões e locomotivas. Outros sistemas desenvolvidos foram o **ECCO** - Estatística de Controle de Ciclos Operacionais, que obtém dados resumidos do SUMO e produz relatórios orientando os ciclos de movimento de um grande número de vagões, obtendo-se médias de tempos entre estações (são considerados todos os movimentos feitos em cada ciclo, o que leva a valores estatisticamente bons); o **SIM** - Sistema de Informações de Marketing, que reconhece os dados do sistema de faturas e do SUMO, produzindo relatórios específicos orientados aos produtos, seus ingressos e tipos de vagões usados em seu transporte; o **SIT** - Sistema de Informação de Trens, que informa sobre a marcha dos trens, sua composição, sua tração, suas demoras, atrasos e paradas, enfim uma série de informações que não constam do SUMO e que interessam ao controle e planejamento dos trens.

De todos estes sistemas, o SUMO recolhe o maior volume de dados e tem significativa importância no controle de vagões e locomotivas. Este controle é feito através de dados de modificação de situação, de intercâmbio de vagões com outras ferrovias e de partidas e de chegadas de trens, que são comunicados ao Centro de Processamento de Dados. Os dados de vagões oferecem detalhes do número do vagão, da mercadoria transportada e do cliente. Os arquivos obtidos permitem a elaboração dos mais variados relatórios de utilização de vagões e locomotivas, de trens e de intercâmbio. Um arquivo histórico possibilita análises de tendências e de comportamentos relativos a períodos prolongados.

No planejamento do SUMO foram previstas três etapas, com as seguintes características: na primeira, uso da rede de telex existente para a coleta de dados e o processamento por fita perfurada do telex por computador (completada em 1979); na segunda, retorno de relatórios gerenciais para as unidades regionais, cujas sedes estão longe de São Paulo (completada em 1982); na terceira, equipes conectadas diretamente ao computador, como nos Estados Unidos e Europa, que é a etapa atual (DOMINGUES, 1982).

É um sistema de gerenciamento a nível de SIG, pois apenas fornece relatórios e permite o acesso a dados.

2.3.2 - REDE FERROVIÁRIA FEDERAL (RFFSA)

A Rede Ferroviária Federal é uma empresa federal brasileira responsável pela administração, operação e manutenção de um sistema ferroviário que abrange praticamente todo o território brasileiro, totalizando 23.000 Km de vias.

Na Rede Ferroviária Federal S.A. o transporte de carga responde por mais de 90% de sua receita, razão pela qual merece atenção especial por parte de seus dirigentes.

Assim, a RFFSA procurou dinamizar sua Operação Ferroviária com a introdução da informatização no gerenciamento da empresa. O SIGO é um moderno sistema de informações "ON-LINE", desenvolvido a partir de 1983 por técnicos da própria empresa, utilizando tecnologia nacional. O sistema opera simultaneamente com dois equipamentos nacionais em cada superintendência, somando 18 computadores que concentram mais de 500 terminais de vídeo, estrategicamente distribuídos na malha ferroviária (RFFSA, 1987,1988).

Na primeira etapa do SIGO os engenheiros dedicaram seus trabalhos ao setor operacional, implantando um sistema de controle total para as regionais e divisões operacionais da empresa. Através desse sistema, toda a movimentação do trem é registrada e controlada pelos gerentes das estações. Nos vídeos dos terminais aparecem o BV-Boletim do Veículo (controla os vagões nos pátios); BO-Boletim de Operação (informa o carregamento dos vagões); BT-Boletim de Trem (composição do trem); BS-Boletim Suplementar (recomposição do trem em alguma estação intermediária); CT-Controle de Trens (movimentação dos trens); CT-CTC-Controle de Trens através do CTC; e BP-Boletim Pessoal (fornece o tempo de trabalho dos maquinistas). Esta etapa foi concluída com sucesso, trazendo como principal benefício à Rede uma maior agilidade do material rodante (REVISTA CARGA, 1988).

O SIGO melhorou muito a operação ferroviária, proporcionando ao Gerente uma ferramenta confiável para a sua atuação, com reflexos na venda de Transportes. A utilização do sistema pelos grandes clientes se dá por meio de terminais remotos instalados em seus escritórios, o que resultou num aumento de produtividade de 20% no terminal ferroviário do cliente, gerando um aumento de transporte proporcional (COSTA, 1990).

Antes da implantação do SIGO, o grande problema do gerenciamento operacional na RFFSA era a dificuldade de obtenção dos dados operacionais em tempo hábil para a tomada de decisão. Havia, na realidade, gerenciamento setorizado em cada Distrito de Produção, cabendo ao Departamento de Transportes a coordenação dos transportes interdistritais, num papel mais normativo do que realmente de controle da execução.

A implantação do SIGO, portanto, veio permitir a centralização do controle da execução dos transportes a nível regional, a partir do momento em que ficaram disponíveis aos

gerentes, dos diversos níveis, as informações sobre todos os eventos operacionais ocorridos na Regional.

Isso também possibilitou uma mudança no organograma da Regional, deixando de existir o Distrito de Produção e sendo criada uma Gerência de Controle Operacional que, a par da Gerência de Tráfego e Movimento e da Gerência de Tração, faz o gerenciamento dos transportes olhando a Regional como um todo (RFFSA, Relatório, 1990).

O gerenciamento operacional hoje tem no SIGO a sua principal ferramenta, sendo utilizadas as consultas em tela (on line) e os relatórios (batch) produzidos pelo sistema como base para a tomada de decisão, desde a distribuição de vagões e a programação de trens, até a programação das manobras de um determinado pátio - logicamente que envolvendo diversos níveis de gerenciamento (RFFSA, Maio/1990).

Para facilitar o gerenciamento via SIGO, foi elaborado um Manual de Gerenciamento Operacional, de forma a servir de guia aos gerentes, indicando o mínimo de consultas a serem efetuadas para permitir um melhor gerenciamento. Tal Manual visa também possibilitar uma relativa homogeneização de procedimentos nas Regionais (RFFSA, Manual, 1990).

Entretanto, apesar de todo o progresso conseguido, o sistema implantado poderia ser melhor explorado caso os dados obtidos em tempo real pudessem ser analisados e testados em modelos gerenciais implantados em computador, conforme é a proposta desenvolvida neste trabalho. Assim, além de um sistema de controle da operação, ter-se-ia um sistema efetivo de gerenciamento da operação.

Atualmente, o planejamento da operação é feito manualmente, utilizando os dados fornecidos pelo sistema SIGO e o conhecimento prático do gerente sobre a operação ferroviária. Depois de várias visitas efetuadas na RFFSA onde observou-se, por vários dias consecutivos, toda a operação e processo de tomada de decisão, pode-se descrever o planejamento da operação como segue:

* No planejamento da distribuição de vagões vazios, o gerente, de posse de uma previsão das necessidades de vagões para os próximos dez dias para os principais clientes e com as informações do SIGO sobre a oferta de vagões, elabora manualmente as ordens de distribuição duas vezes ao dia (06:00 h e 16:00 h). Os dados vão sendo atualizados a cada dia.

* No planejamento da distribuição de combustível a partir de uma refinaria aos distribuidores, os quais possuem os tanques de armazenamento em pontos diversos da rede ferroviária, as decisões fogem um pouco do controle do gerente, pois mensalmente é estabelecido pelo DNC

(Departamento Nacional de Combustível) as previsões de consumo mensal por região e a divisão deste volume entre as modalidades de transporte. Cabe à ferrovia transportar o que lhe foi destinado. Entretanto, o "pool" formado pelas companhias distribuidoras é que tem acesso às informações dos níveis de tancagem e determina, dia-a-dia, o que deve ser transportado. Este fato dificulta bastante o controle e o gerenciamento da operação por parte da ferrovia.

* No planejamento da formação dos trens, a RFFSA tem em seu Plano de Transportes (por Regional) uma programação diária dos trens que poderão circular, de acordo com a capacidade da ferrovia (gráfico saturado de circulação de trens). O Plano contém também um estudo da formação típica dos trens em função dos fluxos de transportes previstos para o ano em questão (o Plano de Transportes é revisado anualmente). Nesta formação são apresentados dados sobre a carga do trem, número de vagões por trem, comprimento do trem, tonelagem transportada, tipo e número de locomotivas no trem. Com base nos dados fornecidos pelo SIGO sobre os vagões vazios e carregados a espera de transporte nos vários terminais, o gerenciamento central da ferrovia estuda a formação dos trens procurando seguir o Plano de Transportes da Ferrovia. Entretanto, alguns problemas ocorrem, como por exemplo: como o Plano de Transportes contém um planejamento diário mas válido para todo o ano, no dia-a-dia tem-se quantidades e tipos de cargas a serem transportadas que variam bastante. Atendendo a esta variação, às vezes há necessidade de trens extras (época da safra) e às vezes há necessidade de suprimir certos trens por falta de carga. Outro problema que dificulta o planejamento da formação dos trens é o fato dos mesmos serem planejados somente com os vagões que já estão nos pátios e muitas vezes a posição que o vagão ocupa no pátio impede que o mesmo seja colocado no trem designado. Seria necessário que o chefe de pátio soubesse com uma certa antecedência em que trem o vagão irá prosseguir viagem, antes do mesmo chegar ao pátio, para então estacioná-lo na posição correta. A RFFSA procura manter fixos certos trens e seus horários de forma a ter um certo padrão de planejamento e operação.

* No planejamento da programação e alocação das locomotivas, existe no Plano de Transportes da Ferrovia a escala a ser seguida diariamente, mas também em bases anuais, de acordo com o gráfico de circulação dos trens. Como no dia-a-dia a programação dos trens se altera, isto leva a uma alteração da escala. Fica um problema de difícil solução. O gerente dispõe apenas de sua experiência e visão para decidir como proceder para uma melhor utilização das locomotivas.

Com o conhecimento prático adquirido ao longo destes anos através de várias visitas realizadas à RFFSA, onde teve-se a preocupação de acompanhar toda a operação ferroviária e o processo de tomada de decisão pelos vários gerentes envolvidos na operação, assim como os procedimentos operacionais adotados nos pátios, e com o estudo de inúmeras pesquisas nesta área, desenvolvidas em diversos países, foi possível desenvolver modelos de gerenciamento para cada um dos problemas apresentados acima. O conjunto destes modelos forma um sistema de apoio ao gerente na tomada de decisão quanto ao planejamento da operação, levando em conta as características do transporte ferroviário brasileiro. Os modelos e o sistema são apresentados nos capítulos a seguir.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

- CEPAL - Estudios e Informes (1983), La Gestion y la Informatica en las Empresas Ferroviarias de America Latina y España, Santiago de Chile.
- COSTA, P.A. (1990), Informática, Ferrovia e Crise, Revista Ferroviária, pág. 31-33, Março.
- DOMINGUES, M.H.A. (1982), SUMO - Sistema de Utilización del material Operacional, Revista Alaf, pág. 48-51, Abr/82 e pág. 10-30 Mai/82.
- FLEURY, A.C.C. et all (1984), SAD em Projetos de Engenharia, Revista de Administração, Vol. 19(3), pág. 28-33.
- KEEN, P.W.G. e SCOTT-MORTON, M.S. (1978), Decision Support Systems: An Organisational Perspective. Addison-Wesley, Reading, USA.
- PARKER, B.J. e AL-UTAIBI, G.A. (1986), DSS: The Reality that Seems Hard to Accept?, OMEGA, Int. J. of Mgmt. Sci., Vol. 14, Nº 2, pág. 135-143.
- PROGRESSIVE RAILROADING (1980), Computer System Aids Dispatchers, Janeiro.
- REVISTA ALAF (1982), Control Integrado de Gestion, pág. 18-26, Abril.
- REVISTA CARGA (1988), A RFFSA nos Trilhos da Informática, Maio.
- REVISTA FERROVIÁRIA (1976), Controle de Tráfego através de Computador, Vol. 37, Nº 10, pág. 43-44.
- RFFSA (Maio/1990), O SIGO na Regional Curitiba - Resumo da Situação Atual.
- RFFSA (1990), Relatório.
- RFFSA (1981), Sistemas Automáticos de Gerenciamento da Operação Ferroviária.
- RFFSA (1987/1988), Prospectos Informativos.

RFFSA (1990), Manual de Gerenciamento Operacional através do SIGO.

SPRAGUE JR., R.H. (1980), A Framework for the Development of Decision Support Systems, MIS Quarterly, Dezembro.

TIVY, R.H. (1973), Les systèmes de contrôle connexes au "TRACS", système d'information et de contrôle du mouvement, Rail International, pag. 1259-1264, Dezembro.

VAN DER HEYDEN, W.P.A. e OTTJES, J.A. (1985), A Decision Support System for the Planning of the Workload on a Grain Terminal, DSS 1:293-297, North-Holland.

WAGSCHAL, H.H. (1985), New Perspectives in Decision Support for Port Planning, DSS 1:277-292, North-Holland.

CAPITULO 3

PLANEJAMENTO E GERENCIAMENTO DA OPERAÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA

3.1 - ASPECTOS GERAIS

Conforme colocado nos capítulos 1 e 2, têm-se por objetivo, com o presente trabalho, o desenvolvimento de um sistema de apoio ao planejamento e gerenciamento da operação do transporte ferroviário de carga, que atenda as características operacionais do sistema ferroviário brasileiro.

São quatro os problemas a serem estudados e resolvidos e que irão compor o sistema proposto, quais sejam:

- a distribuição de vagões vazios
- a distribuição de vagões tanques
- a formação de trens
- e a programação e distribuição de locomotivas

Segundo as pesquisas publicadas e referenciadas nos Capítulos a seguir, estes são os problemas de maior impacto nos custos e na qualidade dos serviços oferecidos pela ferrovia aos seus clientes, pois envolvem aspectos como: a maior utilização dos equipamentos, o atendimento da demanda, o cumprimento dos horários e prazos de entrega das cargas, entre outros. Os gerentes da operação ferroviária, consultados durante estes anos de pesquisa, concordam também que estes são os problemas operacionais de maior importância e urgência de serem resolvidos no sistema ferroviário brasileiro.

Pela bibliografia levantada sobre os sistemas gerenciais de apoio à operação ferroviária existentes nas principais ferrovias do mundo (Capítulo 2), pode-se observar que, desde a década de 70, estas ferrovias já apresentavam grande preocupação com sistemas de informações gerenciais, possuindo já, na sua maioria, sistemas de gerenciamento mais avançados a nível de SADs. Com a utilização destes sistemas, estas ferrovias conseguiram grandes economias quanto aos equipamentos utilizados e uma melhor qualidade nos serviços

oferecidos, conforme os resultados apresentados, por exemplo, pelo sistema TOPS (Estados Unidos, Canadá, México, Inglaterra) e pelo sistema implantado na França.

Hoje, na França, como de resto na Europa e nos Estados Unidos, as ferrovias se vêm diante de uma demanda de transporte a cada ano menor, consequência do declínio de atividades geradoras de grandes volumes de carga. Não há nada de errado com estas economias. Simplesmente, a evolução da sociedade está levando a uma fase pós-industrial, onde a produção de aço é substituída pela de computadores e a demanda de bens pela de serviços.

Com estas mudanças, ocorreram também mudanças nos objetivos e modelos de gerenciamento. A ferrovia não é mais vista como se tivesse uma espécie de monopólio do transporte ou de um certo tipo de transporte, mas como sendo um transportador entre outros, que vai oferecer serviços ao seu cliente, serviços que o cliente escolherá porque terão qualidade e menor custo. Para isto estas ferrovias procuram melhorar a oferta oferecendo não somente o transporte, mas um serviço completo, que tomará conta da carga o mais próximo possível da fonte de produção indo até o mais próximo possível do centro de consumo. É oferecido ao cliente não somente o transporte mas também a estocagem, o acondicionamento, o faturamento, a distribuição. Outra mudança está ao nível da velocidade de circulação e da qualidade dos serviços no que diz respeito a prazos. Toda a tecnologia destas ferrovias foi reorientada para permitir a circulação de trens de carga de alta velocidade. São trens de 100, 120, 160 km/h.

No Brasil ainda se está longe disso, e por muitos anos continuará crescendo a necessidade de transportar minério, grão, carvão, cimento e outros insumos básicos. É o momento preciso onde a economia nacional é capaz de gerar grandes volumes de carga "ferroviável" e ainda não se desenvolveu a ponto de dispensá-la. Pode-se comparar as características de nosso sistema ferroviário atual com as dos sistemas das principais ferrovias do mundo na década de 70.

Hoje, a RFFSA já possui implantado e em operação o sistema SIGO, conforme descrito no Capítulo 2. Com este sistema de informação já consolidado, é o momento certo de passar-se para a etapa seguinte, isto é, para um sistema de apoio à decisão (SAD). Tal sistema permite a utilização de modelos matemáticos e regras operacionais (heurísticas) e permite uma interação com o gerente, o que é de extrema importância, pois o julgamento do gerente é essencial na tomada de decisão em problemas que apresentam alternativas para a escolha da solução. Desta forma, o gerente disporá de uma ferramenta de suporte, sob seu controle, a qual não tenta automatizar o processo de decisão, nem impor soluções. Para o planejamento à nível operacional (dia a dia) tem-se a convicção de que esta é a melhor solução.

3.2 - O SISTEMA OPERACIONAL PROPOSTO

No desenvolvimento deste sistema operacional alguns itens foram observados, quais sejam:

- qualquer modelo de sistema de gerenciamento a ser proposto não pode ser desenvolvido independentemente, mas sim, totalmente voltado e adaptado às condições da operação local.
- o sistema a ser proposto deve prestar um serviço realmente necessário, não sendo suficiente fornecer boas respostas, mas também ser usado e ser útil.
- para criar um sistema aceitável pelos usuários, é preciso familiarizar-se com as necessidades e desejos dos usuários, sua terminologia, rotinas diárias e principais preocupações e aborrecimentos. É preciso esforçar-se por manter os hábitos correntes dos usuários. A nova ferramenta deve causar o menor impacto possível, impondo poucas exigências e demandando pouco treinamento para seu uso e interpretação.

Com vistas a atender estes itens, manteve-se durante o tempo de desenvolvimento deste trabalho, visitas frequentes à RFFSA, para o acompanhamento dos trabalhos realizados pelos gerentes da operação ferroviária e o entendimento de todo o processo decisório envolvido.

Desta forma, com o conhecimento prático adquirido e com o estudo da bibliografia disponível sobre o assunto, foi possível fazer a escolha dos modelos de otimização mais adequados a cada um dos problemas levantados, assim como das regras operacionais utilizadas e das heurísticas desenvolvidas.

Conforme a Figura 1.1 (Capítulo 1), o sistema será composto por quatro módulos:

- 1) distribuição de vagões vazios
- 2) distribuição de vagões tanques
- 3) formação de trens
- 4) programação e distribuição de locomotivas

Do módulo 1 tem-se como produto os vagões vazios destinados e do módulo 2 os vagões tanques destinados. Estes vagões (vazios e tanques), mais os vagões carregados destinados serão utilizados pelo módulo 3 na formação dos trens, sendo este módulo a entrada para o módulo 4 de programação e distribuição de locomotivas, conforme esquematizado na Figura 3.1 a seguir:

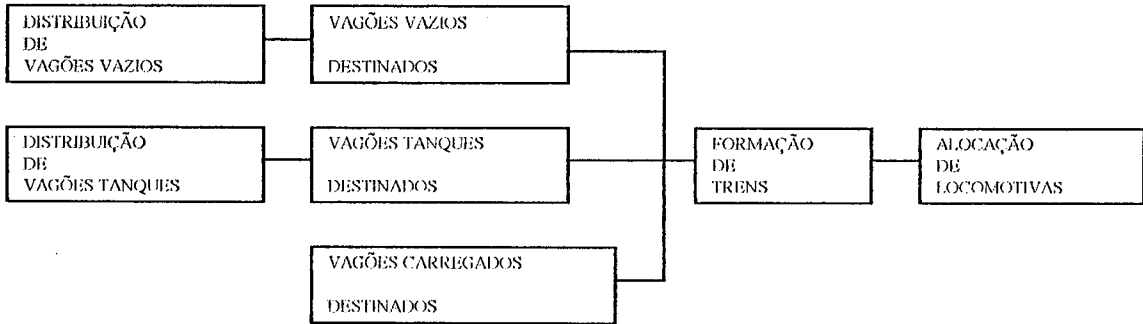


Figura 3.1 - Planejamento da Operação Ferroviária - Sistema Operacional

Para a operação deste sistema foram desenvolvidos seis programas computacionais que são executados na sequência mostrada na Figura 3.2 abaixo:

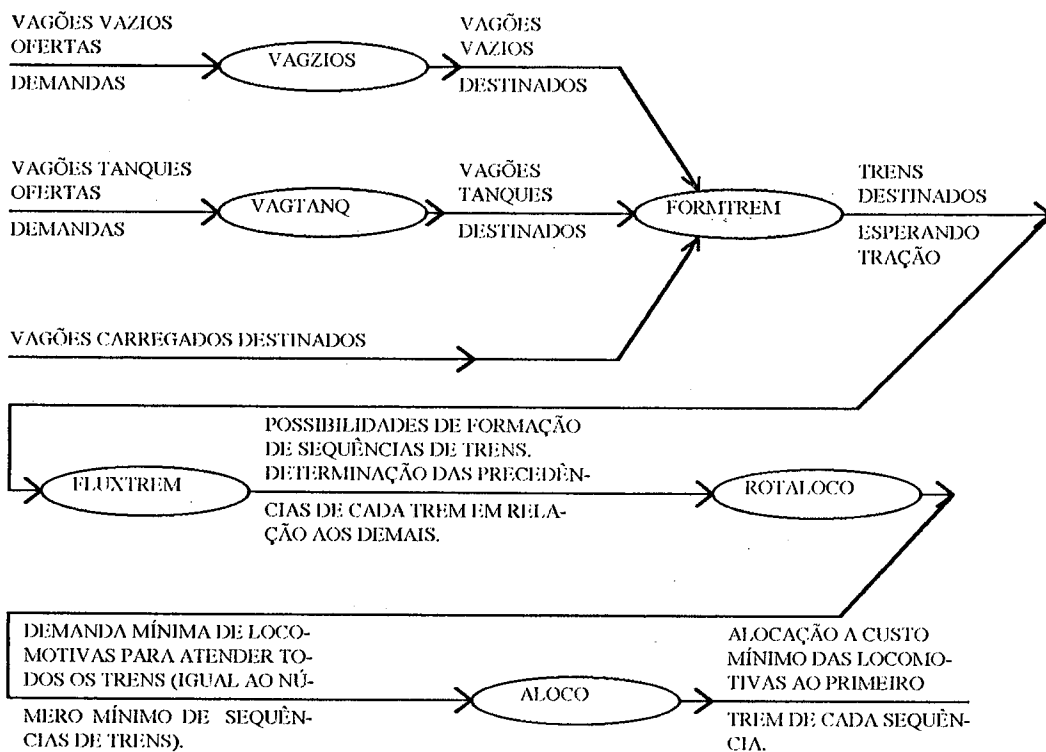


Figura 3.2 - Programas Computacionais que Compõem o Sistema

Resumidamente, pode-se descrever cada módulo como segue:

3.2.1 - MÓDULO DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS

O problema de distribuição de vagões vazios é resolvido de forma dinâmica, isto é, trabalha-se com uma rede espaço-tempo a qual, esquematicamente, representa os vários caminhos que os vagões podem percorrer para alcançar seus destinos num certo tempo. O modelo é indicado para frota homogênea e tem por objetivo satisfazer a demanda existente e prevista, minimizando os custos de movimento, de estoque e de falta. Na Figura 3.3 a seguir tem-se o sistema operacional proposto para a distribuição de vagões vazios:

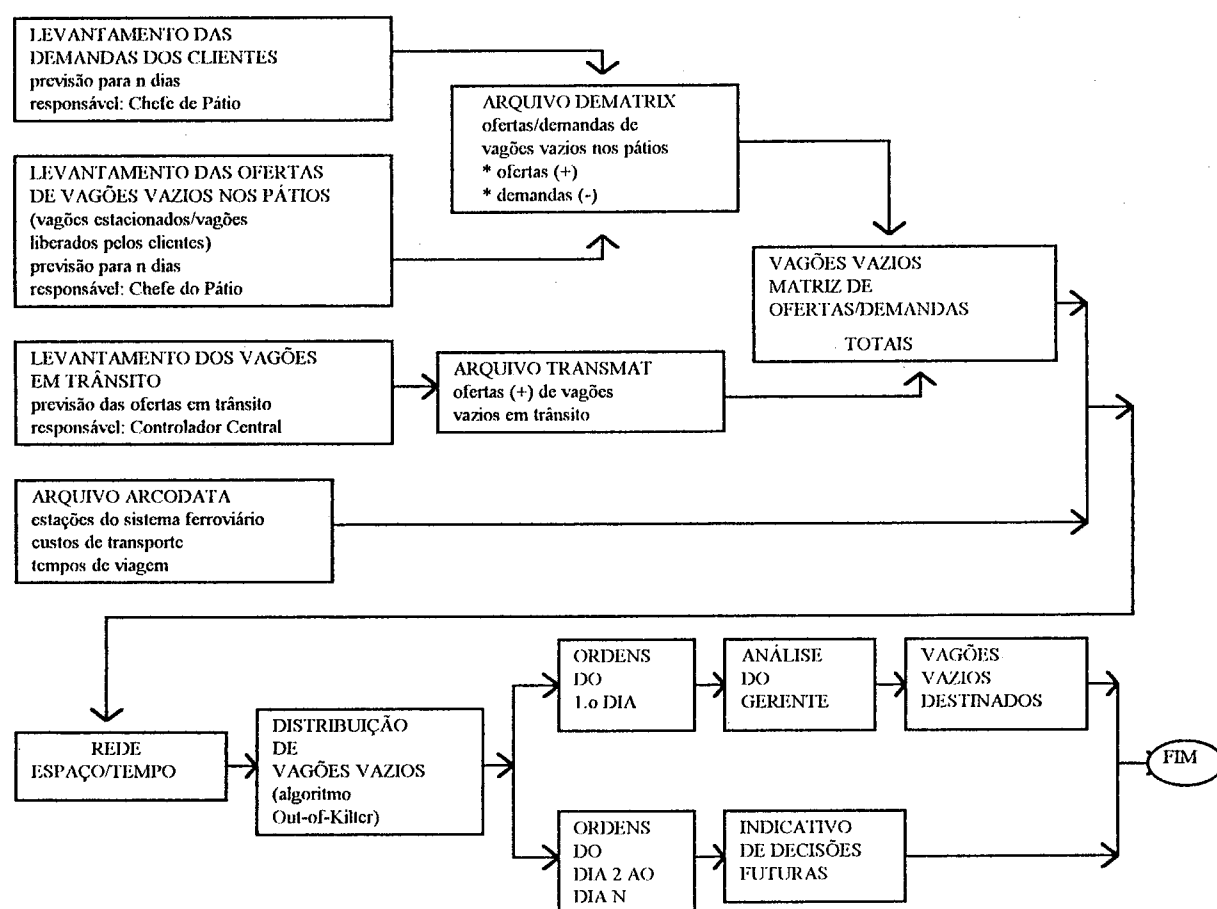


Figura 3.3 - Distribuição de Vagões Vazios - Sistema Operacional

Conforme mostrado na Figura 3.3, o procedimento de distribuição de vagões vazios segue as seguintes etapas:

1) levantamento das demandas dos clientes com previsão para n dias. O chefe de pátio é o responsável por este levantamento.

2) levantamento das ofertas de vagões vazios nos pátios, tanto dos vagões estacionados como dos vagões liberados pelos clientes, também com previsão para n dias, sendo o chefe de pátio o responsável por este levantamento.

3) levantamento dos vagões em trânsito. Estes vagões representam ofertas em trânsito. Este levantamento é feito pelo gerenciamento central.

4) com os dados das etapas 1 e 2 monta-se a matriz de ofertas/demandas de vagões vazios nos pátios. Com os dados da etapa 3 monta-se a matriz de ofertas de vagões vazios em trânsito. A soma destas duas matrizes fornece a matriz final de ofertas/demandas. Estes dados são atualizados a cada dia.

5) com a matriz de ofertas/demandas totais mais os dados do sistema ferroviário é montada a rede espaço-tempo. É um problema de circulação a custo mínimo cuja resolução é feita com o algoritmo Out-of-Kilter. Como saídas tem-se as ordens de distribuição para o primeiro dia do horizonte de planejamento, as quais, após analisadas pelos gerentes, resultarão nos vagões vazios destinados; e as ordens de distribuição do dia 2 ao dia n , as quais irão dar ao gerente um indicativo de decisões futuras. O programa é rodado a cada dia e as ordens do primeiro dia são colocadas em execução.

O gerente dispõe como alternativas de planejamento das seguintes opções: alterar o custo de falta de vagões em alguma estação com a finalidade de forçar o atendimento da demanda nesta estação; criar um nó fictício na rede espaço-tempo com a finalidade de forçar o atendimento da demanda do cliente representado por este nó.

O modelo dá como resposta quatro tipos de relatórios:

- a) relatório do movimento de vagões;
- b) relatório de falta de vagões;
- c) relatório dos arcos;
- d) matriz resultante das ordens de movimento de vagões no primeiro período.

A metodologia sobre este módulo de distribuição de vagões vazios encontra-se detalhada no Capítulo 4.

3.2.2 - MÓDULO DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES

O problema do atendimento da demanda por combustível a partir de centros de distribuição (refinarias) aos diversos pontos de estocagem (distribuidores) é resolvido de forma

semelhante ao problema de distribuição de vagões vazios: rede espaço-tempo e distribuição a custo mínimo. Na Figura 3.4 a seguir tem-se o sistema operacional proposto para a distribuição de vagões tanques.

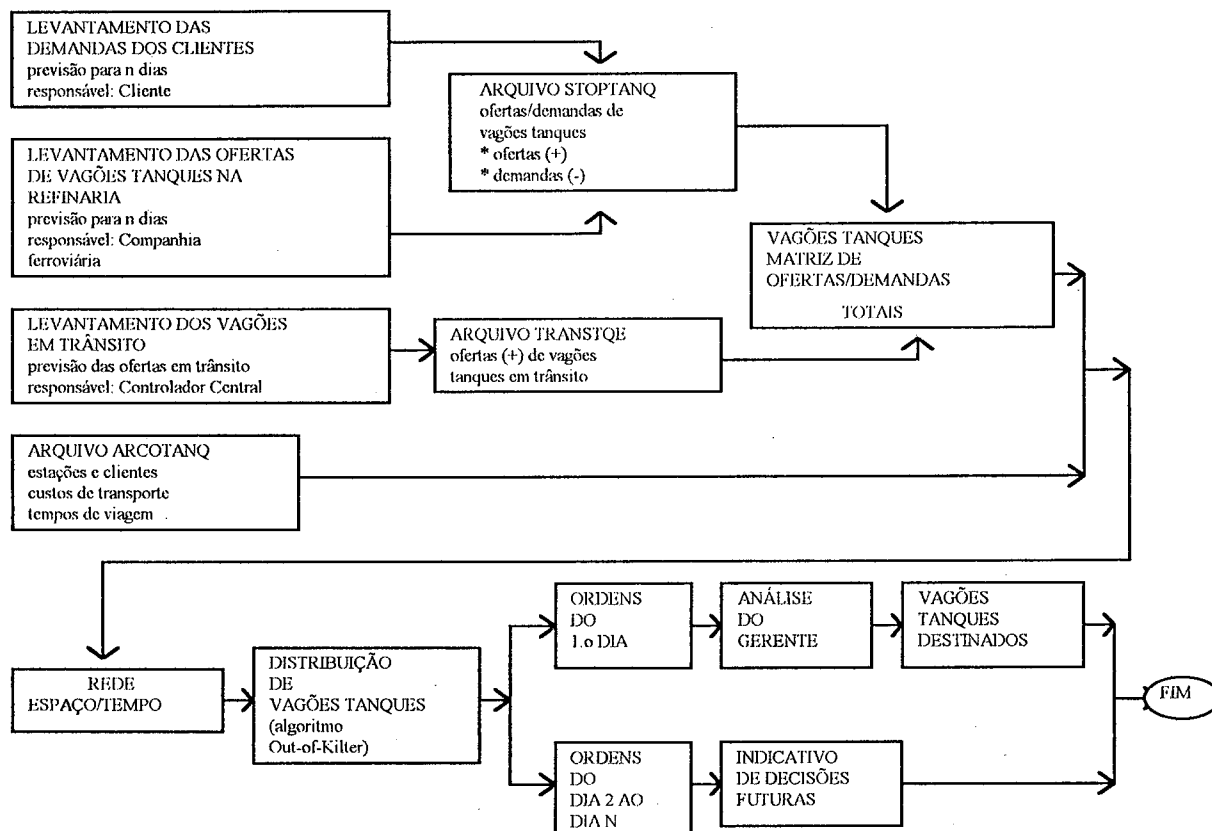


Figura 3.4- Distribuição de Vagões Tanques - Sistema Operacional

Conforme mostrado na Figura 3.4, o procedimento de distribuição de vagões tanques segue as seguintes etapas:

- 1) levantamento das demandas dos clientes com previsão para n dias. Os próprios clientes são responsáveis por este levantamento.
- 2) levantamento das ofertas de vagões tanques na refinaria com previsão para n dias. A companhia ferroviária é responsável por este levantamento.
- 3) levantamento dos vagões em trânsito. Estes vagões representam ofertas em trânsito. Este levantamento é feito pelo gerenciamento central.
- 4) com os dados das etapas 1 e 2 monta-se a matriz de ofertas/demandas de vagões tanques. Com os dados da etapa 3 monta-se a matriz de ofertas de vagões tanques em trânsito. A soma

destas duas matrizes fornece a matriz final de ofertas/demandas. Estes dados são atualizados a cada dia.

5) com a matriz de ofertas/demandas totais mais os dados do sistema ferroviário é montada a rede espaço-tempo. É um problema de circulação a custo mínimo cuja resolução é feita com o algoritmo Out-of-Kilter. Como saídas tem-se as ordens de distribuição para o primeiro dia do horizonte de planejamento, as quais, após analisadas pelos gerentes, resultarão nos vagões tanques destinados; e as ordens de distribuição do dia 2 ao dia n, as quais irão dar ao gerente um indicativo de decisões futuras. O programa é rodado a cada dia e as ordens do primeiro dia são colocadas em execução.

O modelo dá como resposta quatro tipos de relatórios:

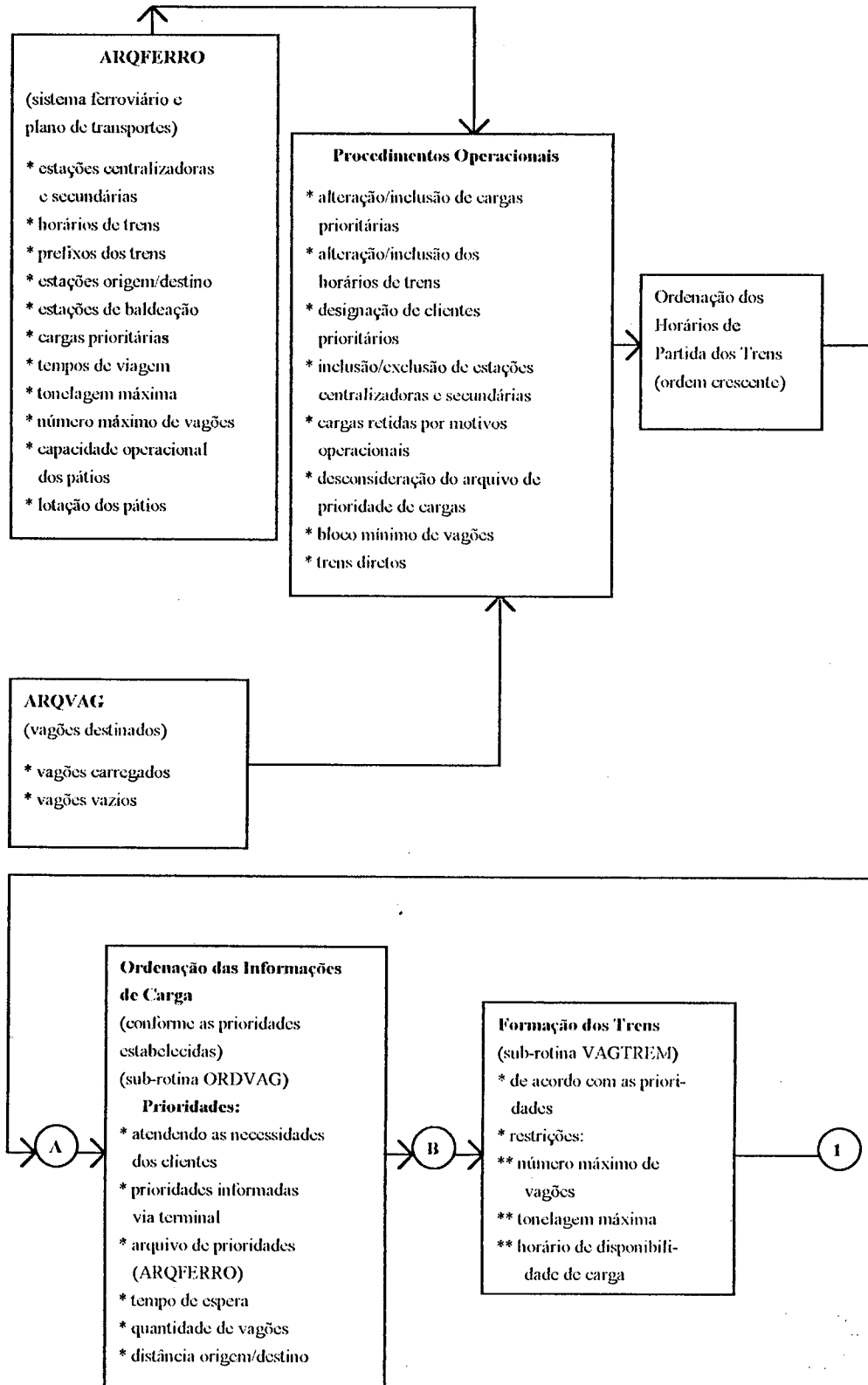
- a) relatório do movimento de vagões
- b) relatório sobre o balanço da movimentação de vagões (pedidos, atendidos, faltas)
- c) relatório dos arcos
- d) matriz resultante das ordens de movimento de vagões no primeiro período.

A metodologia sobre este módulo de distribuição de vagões tanques encontra-se detalhada no Capítulo 5.

3.2.3 - MÓDULO DE FORMAÇÃO DE TRENS

O problema de formação de trens é resolvido através de uma heurística composta por várias regras operacionais, que representam as decisões que ocorrem com mais frequência no dia-a-dia da operação. Estas regras foram observadas pela autora durante o acompanhamento dos trabalhos de gerenciamento da operação desenvolvidos no centro de controle operacional da ferrovia e na bibliografia consultada.

Na Figura 3.5 a seguir tem-se o sistema operacional proposto para a formação de trens (diagrama de blocos simplificado do programa de formação de trens).



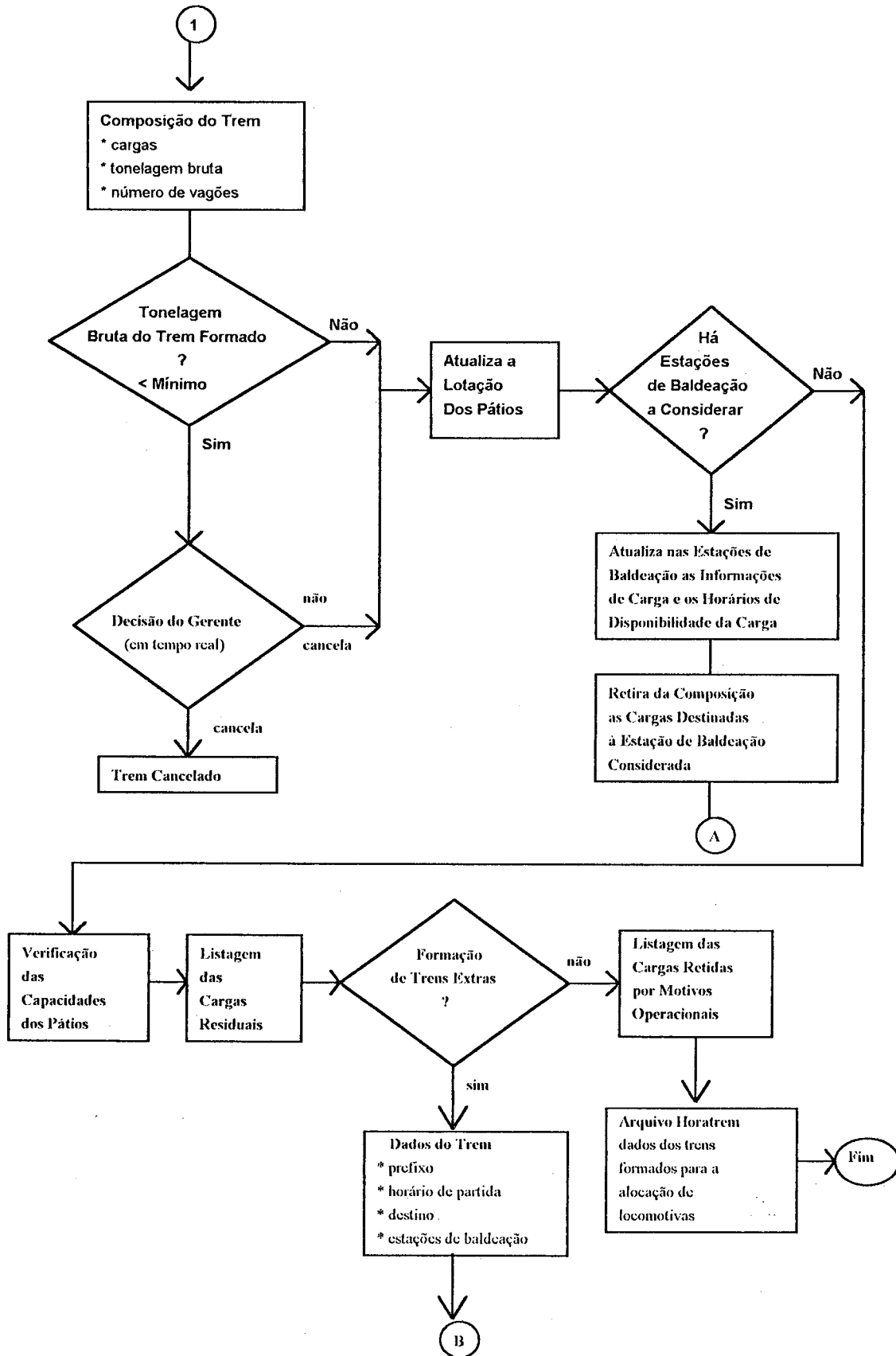


Figura 3.5 - Formação de Trens - Programa FORMTREM

Conforme mostrado na Figura 3.5, o procedimento de formação de trens segue as seguintes etapas:

- 1) o gerente, via terminal, informa os procedimentos operacionais que serão seguidos para a formação dos trens. O gerente dispõe das seguintes opções: alteração/inclusão de cargas prioritárias; alteração/inclusão de horários de trens; designação de clientes prioritários; inclusão/exclusão de estações centralizadoras e secundárias; estabelecimentos de cargas a serem retidas por motivos operacionais; desconsideração do arquivo de prioridade das cargas; estabelecimento de bloco mínimo de vagões; estabelecimento de trens diretos;
- 2) com os dados fornecidos pelos arquivos ARQFERRO e ARQVAG o programa ordena os horários de partida dos trens em ordem crescente e ordena as informações de carga conforme as prioridades estabelecidas, obedecendo a seguinte ordem: atendendo as necessidades dos clientes; atendendo as prioridades informadas via terminal; atendendo as prioridades estabelecidas no arquivo ARQFERRO; de acordo com o tempo de espera; de acordo com a quantidade de vagões; de acordo com a distância entre a origem e destino dos vagões;
- 3) os trens são formados obedecendo as prioridades estabelecidas e de acordo com as restrições: número máximo de vagões da composição; tonelage máxima permitida; e horário de disponibilidade da carga. O gerente analisa os resultados apresentados e tem a opção de cancelar ou não os trens cuja tonelage bruta é menor que a mínima estabelecida. São consideradas as operações nas estações de baldeação;
- 4) o programa verifica a capacidade dos pátios;
- 5) com os dados das cargas residuais, o gerente decide sobre a formação ou não de trens extras;
- 6) o programa forma o arquivo HORATREM que contém os dados dos trens formados e que será utilizado para a alocação de locomotivas.

O programa é rodado para cada turno da operação.

O modelo dá como resposta quatro tipos de relatórios:

- a) relatório sobre a formação dos trens;
- b) relatório sobre a ocupação dos pátios ao final da operação;
- c) relatório das cargas residuais;
- d) relatório das cargas retidas por motivos operacionais.

A metodologia sobre este módulo de formação de trens encontra-se detalhada no Capítulo 6.

3.2.4 - MÓDULO DE PROGRAMAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Neste módulo são resolvidos dois problemas: a determinação das escalas das locomotivas em função dos trens formados na etapa anterior e a distribuição das locomotivas para atender às escalas estabelecidas.

O problema da determinação das escalas das locomotivas é resolvido através da decomposição de um grafo em cadeias. A programação dos trens no tempo forma um grafo e as cadeias são as escalas das locomotivas. Desta forma é minimizado o número de locomotivas a serem utilizadas.

O problema de distribuição de locomotivas é resolvido de forma dinâmica, isto é, trabalha-se com uma rede espaço-tempo a qual, esquematicamente, representa os vários caminhos que as locomotivas podem percorrer para serem alocadas ao primeiro trem de cada uma das diversas escalas.

O modelo é indicado para frota homogênea e tem por objetivo satisfazer a demanda para as "n" horas do horizonte de planejamento, minimizando os custos de movimento, de estoque e de falta.

Na Figura 3.6 a seguir tem-se o sistema operacional proposto para a programação e distribuição de locomotivas.

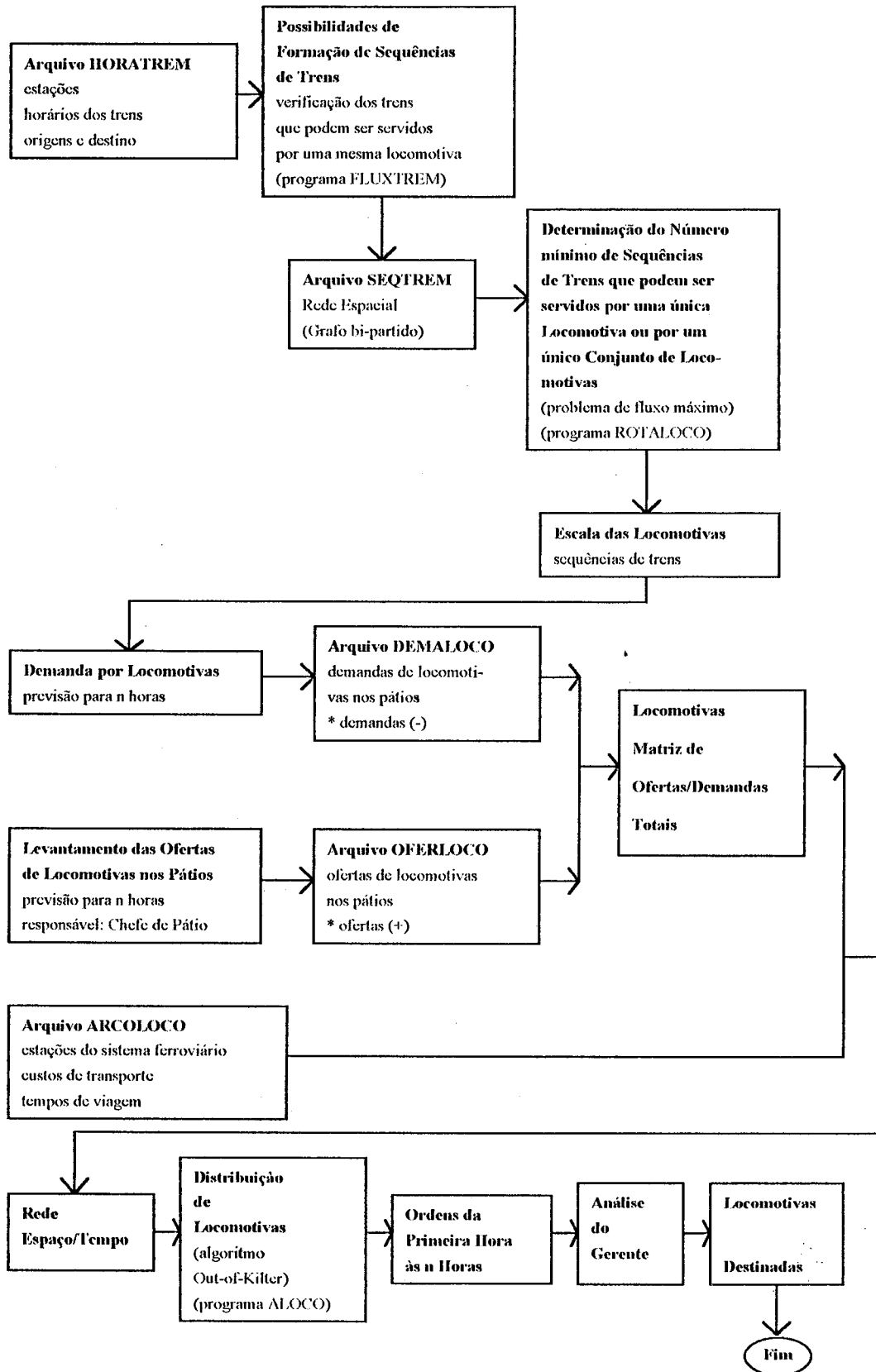


Figura 3.6 - Programação e Distribuição de Locomotivas - Sistema Operacional

Como há a necessidade, no dia-a-dia da operação, de refazer a escala, começa-se com este procedimento. Conforme mostrado na Figura 3.6, a alocação de locomotivas segue as seguintes etapas:

- 1) de acordo com a programação de trens feita para um determinado turno de planejamento, são levantadas todas as possibilidades de formação de seqüências de trens. É montado um grafo bi-partido.
- 2) É feita, então, a determinação do número mínimo de seqüências de trens que podem ser servidos por uma única locomotiva ou por um único conjunto de locomotivas. São determinadas também, as próprias seqüências de trens. É um problema de fluxo máximo cuja resolução é feita com o algoritmo Out-of-Kilter. O número mínimo de seqüências corresponderá ao número mínimo de locomotivas necessárias e as seqüências representam as escalas de locomotivas.
- 3) de posse da demanda por locomotivas para um determinado turno de operação, é feito o levantamento das ofertas de locomotivas nos pátios para este período. Com estes dados monta-se a matriz de ofertas/demandas de locomotivas nos pátios. Estes dados são atualizados a cada turno da operação.
- 4) com a matriz de ofertas/demandas mais os dados do sistema ferroviário é montada a rede espaço-tempo. A alocação das locomotivas aos trens é resolvida como um problema de circulação a custo mínimo cuja resolução é feita com o algoritmo Out-of-Kilter. Como saída tem-se as ordens de alocação para as "n" horas do turno de operação, as quais, após analisadas pelos gerentes, resultarão nas locomotivas destinadas. Os programas são rodados a cada turno.

O gerente dispõe, como alternativas de planejamento, das seguintes opções: alterar os custos de falta de locomotivas de determinadas estações com o objetivo de atender a demanda destas estações; criar um nó fictício na rede espaço-tempo com a finalidade de forçar o atendimento da demanda do trem representado por este nó.

O modelo dá como resposta os seguintes relatórios:

- a) relatório sobre as possibilidades de formação de seqüências de trens;
- b) relatório das seqüências de trens servidos por uma mesma locomotiva (opcional: relatório dos arcos);
- c) relatório da movimentação planejada das locomotivas;
- d) relatório de falta de locomotivas;
- e) relatório dos arcos.

3.3 - CONCLUSÃO

Olhando os exemplos colocados nos Apêndices, tem-se a convicção de que o Sistema de Apoio à Decisão aqui proposto, irá aumentar a eficácia do processo decisório com relação ao planejamento e gerenciamento da operação do transporte ferroviário de carga.

Esta convicção é baseada no fato de que os modelos foram desenvolvidos incorporando regras e procedimentos que deveriam ser observados no dia-a-dia, não fossem as dificuldades da preparação manual de um grande número de informações e dados. Além disso, os modelos independem da experiência e do sentimento dos operadores, respondendo de modo igual em situações iguais. É também de grande importância a rapidez com que os programas executam o planejamento da operação. Manualmente, seria praticamente impossível, fazer novamente, de modo eficiente, para um mesmo turno, toda a operação, isto é, a distribuição de vagões vazios, de vagões tanques, a formação dos trens e a alocação das locomotivas no caso de haver alguma mudança que deva ser considerada, tendo em vista o tempo necessário para a execução do planejamento. Com os modelos, cujos tempos de execução dos programas são ínfimos, estas mudanças podem ser consideradas com rapidez e precisão, aumentando a eficácia do planejamento.

CAPITULO 4

DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS

4.1 - IMPORTÂNCIA NO PLANEJAMENTO FERROVIÁRIO

A distribuição de vagões vazios constitui um sério problema na operação ferroviária em vista do alto montante dos custos envolvidos. O problema se verifica desde o momento da aquisição da frota de vagões até a sua distribuição, no dia a dia, entre os diversos clientes da ferrovia.

Vários estudos têm mostrado a pouca utilização dos vagões devido à falta de políticas de operação e de procedimentos de distribuição. Em consequência dos desequilíbrios dos fluxos de carga o transporte de bens, qualquer que seja a sua modalidade, usualmente gera um número significativo de veículos vazios. Citando alguns exemplos, (DEJAX e CRAINIC, 1987): na área rodoviária, um estudo detalhado realizado na Inglaterra mostrou que a terça parte dos caminhões, rodando a qualquer tempo, encontravam-se vazios. Na área de transporte de containers, um grande sistema europeu tem 40% dos custos totais de transporte, sobre os 200.000 movimentos realizados semanalmente, devido às viagens vazios. Na pequena rede ferroviária suíça, 12.000 vagões vazios, de 70 tipos diferentes, devem ser distribuídos a cada dia entre 850 pátios. No sistema ferroviário americano é estimado que durante 40% do tempo do ciclo médio do vagão, o mesmo encontra-se vazio.

Considerando-se que os vagões tem um preço alto - estima-se que a frota de vagões representa cerca de 40% do investimento ferroviário - e que o custo do processo de distribuição é uma parte significativa dos custos operacionais da ferrovia, o retorno de uma melhor distribuição é potencialmente grande. Por exemplo, no Canadá, a Canadian National possui uma frota de vagões cujo valor de reposição passa os 2 bilhões de dólares e que pode produzir receitas anuais de 1 bilhão. Assim, um aumento, mesmo que percentualmente pequeno, da taxa de rotação dos vagões, proporciona ganhos elevados.

Nos Estados Unidos, a Southern Pacific, após a implantação do sistema TOPS (Total Operation Processing System), conseguiu aumentar a taxa de utilização dos vagões de 80 vazios/1 carregado para 12 vazios/1 carregado, em uma ferrovia que conta com 80.000

vagões próprios e com uma grande quantidade de vagões de outras empresas que também circulam em sua malha.

Entender, portanto, e controlar o processo de distribuição de vagões é um dos principais objetivos do gerenciamento do transporte ferroviário, o qual se preocupa seriamente com o aumento da produtividade destes equipamentos. Uma distribuição efetiva, juntamente com bons sistemas de controle, não somente aumentam a disponibilidade de vagões para carregamento, como também oferecem oportunidades de uma maior utilização e de uma possível redução no tamanho da frota.

4.2 - ASPECTOS GERAIS DO CONTROLE E DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS

O problema básico envolve a redistribuição de vagões vazios a partir dos locais com oferta para aqueles em falta, em consequência dos desequilíbrios do transporte de carga. Os movimentos vazios geram custos e nenhuma receita e, portanto, o problema do transporte de carga "vazio" diz respeito à redução do tráfego de veículos vazios, ao mesmo tempo melhorando ou, pelo menos, não diminuindo a eficiência das operações das viagens carregadas. Em algumas situações o custo da falta pode ser tão alto que o transporte vazio é prioritário em relação ao carregado.

Nos últimos anos os modelos desenvolvidos na área ferroviária sobre o assunto apresentam como objetivos a serem alcançados: maximização da receita, maximização do atendimento da demanda, minimização da relação vagões-dia-vazios/carregados, minimização do pagamento de aluguel de vagões, minimização do percurso "vazio", fornecimento de um serviço equilibrado no sistema ou entre empresas. Entretanto, nenhum conjunto de decisões pode encontrar todos os objetivos de uma só vez. É também difícil um modelo capturar todas as complexidades do ambiente ferroviário. Há necessidade, portanto, de se estabelecer alguns critérios e objetivos principais.

Existem também grandes dificuldades para a implantação efetiva dos modelos de controle e otimização. Estas dificuldades são sentidas tanto pela dificuldade de obtenção dos dados de entrada dos modelos quanto pela cultura e tradição dos procedimentos operacionais em curso nas ferrovias. A simples implantação de um computador gera desconfiança. Uma situação clássica é a do agente do pátio que, por sua conta, estoca vagões para se prevenir de uma falta futura, prejudicando o sistema como um todo.

Em relação aos dados, as dificuldades estão em prever com antecedência as ofertas e demandas nos vários pontos do sistema, pois nelas estão as incertezas no processo de

decisão sobre as regras do fluxo de vagões. A qualidade destas decisões de fluxos é necessariamente limitada pela qualidade das previsões das ofertas e demandas no sistema. Estudos têm mostrado que a demanda varia bastante e, ainda mais importante, que esta demanda não é medida adequadamente pelas ferrovias e, com poucas exceções não é nem formalmente prevista.

A oferta de vagões também está sujeita a pelo menos tanta variação quanto a demanda, porque o recebimento dos vagões descarregados pelas indústrias é a principal fonte de vagões vazios. Na realidade, a oferta de vagões vazios parece variar até mais do que a demanda, devido às variações introduzidas pelos movimentos incertos dos vagões pelas próprias ferrovias.

Outra grande dificuldade na formulação dos modelos se refere ao desconhecimento dos custos: de transporte, de não atendimento da demanda, de estocar um vagão vazio para atendimento da demanda futura e assim por diante.

A falta destes dados ou a sua pouca confiabilidade dificultam a avaliação e validação dos modelos propostos na literatura, principalmente os de natureza estocástica, cujos parâmetros são estimados com base em observações ou realizações amostrais de uma variável aleatória (a oferta ou demanda de vagões vazios nos pátios, por exemplo). O não conhecimento dos custos reais também empobrecem a aplicação da função objetivo dos modelos de otimização, pois estes geralmente são formulados com o objetivo de minimizar custos ou maximizar ganhos.

Na distribuição de vagões vazios uma abordagem usual, quando os custos não são conhecidos, é utilizar as distâncias entre os diversos pontos do sistema, supondo que os custos de transporte entre eles são diretamente proporcionais às distâncias percorridas. Embora essa hipótese seja plausível, não há nenhum estudo mostrando o seu real impacto nos custos de atendimento de cada cliente. Nesta hipótese o custo/Km é o mesmo para todos os clientes, não importando trechos em auge ou declive, dificuldades em atender determinados clientes, volumes das demandas dos clientes, tempos de devolução dos vagões à ferrovia pelos clientes, entre outras variáveis.

No Brasil, embora existam apropriações de quantidades e custos, são muitas as dificuldades em se trabalhar com estes dados. Essas dificuldades, todavia, são sentidas em todo o mundo. Na literatura existem muitos modelos, com formulações consistentes, mas que não puderam ser utilizados e até mesmo testados na prática por absoluta falta de dados.

4.3 - UMA CLASSIFICAÇÃO PARA OS PROBLEMAS DE FLUXO VAZIO

O objetivo e a abrangência do estudo definem as principais características a serem consideradas na formulação dos problemas relacionados ao fluxo vazio. Assim, os modelos desenvolvidos são classificados em (DEJAX e CRAINIC, 1987):

- a) **MODELOS DE POLITICAS**, os quais abrangem os problemas de planejamento estratégico, de médio e longo prazo, como: previsão da demanda, tamanho da frota, plano de manutenção, planejamento nacional e regional, localização de depósitos e sistemas logísticos;
- b) **MODELOS OPERACIONAIS**, os quais abrangem os problemas de curto prazo, como: controle do estoque de veículos vazios, determinação da origem-destino dos fluxos vazios, previsão da oferta e da demanda nos pátios, despacho de veículos vazios e carregados. Os modelos, neste caso, para serem utilizados com eficiência, devem contar com sistemas computacionais de informação em tempo real.

Uma vez especificadas as características principais do problema, vários critérios adicionais são úteis para uma definição precisa do problema e da metodologia de solução.

- Os critérios para a definição do problema são:

- a) **TIPO DE FLUXO**: o problema considera somente o fluxo de veículos vazios, ou simultaneamente ou sequencialmente, os movimentos dos veículos vazios e carregados;
- b) **MODO DE TRANSPORTE**: o problema considera somente um modo de transporte ou vários modos são permitidos. No transporte ferroviário ocorre a variante: um modo de transporte e várias empresas interagindo ("pool").
- c) **HOMOGENEIDADE DA FROTA**: o problema considera uma frota homogênea ou vários tipos de veículos que podem ser totalmente, parcialmente ou não substituídos por outros e que devem ser gerenciados simultaneamente.

- Os critérios para a definição da metodologia são:

a) HIPÓTESES DE MODELAGEM:

- a.1) tempo: o problema pode ser estático, considerando um período de planejamento isolado ou típico, ou dinâmico, onde o problema deve ser resolvido considerando vários períodos consecutivos;
- a.2) hipóteses determinísticas ou estocásticas na oferta e na demanda ou nas medidas de desempenho da rede (o tempo de viagem, por exemplo).

b) FORMAS DE MODELAGEM:

b.1) formulação algébrica para subsequente otimização com técnicas de programação matemática;

b.2) modelos analíticos estocásticos, tais como modelos de fila;

b.3) modelos de simulação (Monte Carlo).

c) TÉCNICAS DE SOLUÇÃO

c.1) programação matemática de otimização (linear, não-linear, inteira, etc.);

c.2) algoritmos de rede;

c.3) otimização estocástica;

c.4) simulação.

4.4 - MODELOS OPERACIONAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS

Estes modelos estão relacionados com o dia-a-dia da operação ferroviária e têm como objetivo o gerenciamento efetivo de uma dada frota de veículos, visando diminuir os custos de viagem vazio e ao mesmo tempo satisfazer adequadamente a demanda, evitando atrasos, por exemplo.

Os problemas são usualmente definidos numa rede sobre a qual ocorrem os movimentos dos vagões vazios e carregados. Em alguns nós da rede, representados pelos pátios, terminais ou depósitos, demandas e ofertas de vagões vazios são especificadas.

Existem dois enfoques necessários e relacionados para a distribuição de vagões vazios. O primeiro, com ênfase no movimento destes vagões para equilibrar as áreas de oferta e demanda, tem sido adotado de alguma forma pela maioria das ferrovias. O segundo, com ênfase em ofertas variáveis para satisfazer demandas variáveis, considera a possibilidade de formação de estoque.

No primeiro caso (enfoque tradicional), a "essência da distribuição e alocação dos vagões é o processo de dar destinos aos vagões vazios e gerenciar seus movimentos na direção daqueles destinos" (PHILIP e SUSSMAN, 1977). Assim, um vagão descarregado num pátio da ferrovia, onde o mesmo não é necessário para novo carregamento, deve ser movimentado para outro pátio onde há carga. O processo de decidir para onde mandar os vagões torna-se a questão principal do problema.

No segundo caso, "a principal função dos sistemas de distribuição é o controle dos estoques de vagões vazios mantidos para equilibrar a oferta e a demanda nos pontos de carregamento" (PHILIP e SUSSMAN, 1977). Esta definição leva o enfoque de movimento

entre áreas para somente as áreas de oferta e demanda. O processo envolve menos otimização em rede e mais controle de estoque. Esta estrutura conceitual sugere que a variação natural da oferta e demanda de vagões vazios está relacionada com o estoque mantido nos terminais.

4.4.1 - MODELOS DETERMINISTICOS

Nestes modelos as ofertas e demandas, por exemplo, são consideradas variáveis conhecidas.

Segundo DEJAX e CRAINIC (1987) os estudos relacionados a seguir são citados como principais exemplos do segundo enfoque (gerenciamento do estoque de vagões vazios):

- * PHILIP e SUSSMAN (1977) desenvolveram um modelo de simulação para determinar o nível ótimo de estoque num terminal em função das variações diárias da oferta e da demanda e do custo de manter um vagão no terminal esperando por carregamento, quando comparado com o custo de não ter vagão disponível para satisfazer uma demanda.
- * MENDIRATTA e TURNQUIST (1982) desenvolveram um modelo geral para o gerenciamento do estoque de vagões vazios em uma rede ferroviária, sob o ponto de vista de que a falta de coordenação entre as decisões tomadas centralmente para toda a ferrovia e as decisões tomadas localmente em terminais individuais é o principal motivo dos problemas na distribuição dos vagões vazios.

Em relação ao enfoque tradicional (processo de dar destino aos vagões vazios), DEJAX e CRAINIC (1987) dão os seguintes estudos como exemplos:

- * WYRZYKOWSKI (1961) apresenta de forma detalhada o problema de distribuição de vagões vazios. Utiliza um modelo de programação linear numa rede espaço-tempo e frota homogênea.
- * GIGON e SCHLAEPFER (1967) resolvem o problema como um problema de transporte num grafo bipartido onde classes ou grupos de classes de vagões estão nos nós e os custos são calculados com algoritmos de caminho mínimo.
- * LEDDON e WRATHALL (1968) desenvolveram um modelo para a programação da frota de vagões vazios para a ferrovia de Louisville e Nashville. É um modelo de transporte linear estático, com ofertas e demandas de vagões vazios conhecidas e uma frota homogênea.
- * WHITE e BOMBERAULT (1969) estudaram o mesmo problema mas adicionaram a perspectiva do tempo, através de um diagrama espaço-tempo o qual, esquematicamente,

representa os vários caminhos que os vagões podem percorrer para alcançar seus destinos num certo tempo.

* OUIOMET (1972) propôs um modelo que segue as linhas do modelo acima: rede espaço-tempo, frota homogênea e o objetivo de satisfazer a demanda existente e prevista, minimizando o atraso (como um objetivo geral), a distância percorrida pelos vagões vazios e o número de vagões vazios mantidos nos pátios. Este modelo foi usado pela Canadian Pacific como parte de um sistema maior para alocação dos vagões de carga.

* MISRA (1972) desenvolveu um modelo que minimiza, num período específico, o custo total (em vagões-horas) do desequilíbrio de vagões vazios de uma frota homogênea nos nós de uma rede ferroviária.

* HERREN (1973, 1977) desenvolveu um modelo de distribuição para a Rede Federal Suíça (SBB) que objetiva maximizar o atendimento da demanda e minimizar os custos relacionados com manobras e a quilometragem de vagões vazios.

* HEIN (1975, 1978) desenvolveu um estudo para as ferrovias alemãs (DB), bastante semelhante ao da SBB, mas considerando a possibilidade de substituição entre diferentes tipos de vagões.

* DECISION SYSTEMS ASSOCIATES INC. (1978) desenvolveu um modelo de otimização de rede para a Federal Railroad Administration para a alocação ótima de vagões de carga com o objetivo de complementar um sistema de informação gerencial em tempo real - o TOPS.

* LEAL (1986) desenvolveu um algoritmo heurístico para reduzir a viagem do vagão vazio quando o mesmo é mandado de volta à origem do movimento carregado.

* HAGHANI (1989) propõe um modelo combinado de distribuição de vagões vazios, de composição do trem e de roteamento.

Os estudos acima descritos representam os principais exemplos de modelos de programação linear para a alocação de vagões vazios. Verifica-se que são usadas formulações de transportes ou de transbordo (transshipment), resolvidas por algoritmos gerais (simplex) ou especializados (transportes, out-of-kilter, etc.). Estes modelos determinísticos são ainda muito utilizados, sozinhos ou como parte de formulações mais sofisticadas.

4.4.2 - MODELOS ESTOCÁSTICOS

Atualmente esforços têm sido desenvolvidos no sentido de considerar elementos estocásticos na modelagem, principalmente no caso de concepção de "pool". O impacto significativo da variação da demanda e da oferta e, em consequência, a importância de boas

técnicas de previsão têm sido bastante reconhecidos na literatura. Outro importante fator é a inclusão da incerteza nos modelos de alocação.

O primeiro esforço nesta direção foi feito por TURNQUIST e JORDAN (JORDAN, 1982; TURNQUIST e JORDAN, 1982; JORDAN e TURNQUIST, 1983). Os estudos resultaram no MOV-EM, um modelo de otimização de rede para a distribuição de vagões vazios (TURNQUIST, 1986). Esta pesquisa foi inovadora de duas formas. Primeiro, enquanto visou a maximização dos lucros, os autores explicitamente consideraram e integraram vários itens de custos: receitas provenientes do atendimento da demanda, custos de manter vagões nos pátios, custos de não atender pedidos e custos de movimentar vagões entre pátios. Segundo, os autores desenvolveram o modelo considerando a demanda, a oferta e os tempos de viagem como variáveis estocásticas. O modelo não foi implantado em nenhuma ferrovia, conforme citação dos próprios autores, por não ter sido possível obter os dados necessários.

4.4.3 - MODELOS DE SIMULAÇÃO

As empresas ferroviárias têm, há bastante tempo, se utilizado de modelos de simulação para estudar o impacto total de políticas e procedimentos operacionais. Os modelos de simulação são geralmente representações detalhadas de pátios ou de estruturas de rede e operações, tendo assim, grande credibilidade. Estes modelos, entretanto, geralmente são muito caros (em termos de tempo de analista e tempo e capacidade computacional) para serem implementados e executados e, por outro lado, são incapazes de sugerir novas políticas ou otimizar as existentes.

RATCLIFFE, VINOD e SPARROW (1984) desenvolveram uma simulação interessante que tenta integrar a programação linear e a programação linear estocástica. O objetivo é aumentar a utilização dos vagões através de um maior número de viagens realizadas num dado período de tempo.

4.4.4 - MODELOS PARA VÁRIAS EMPRESAS (pool)

O conceito de "pool" de vagões entre empresas ferroviárias tem recebido uma atenção crescente nos últimos anos. O conceito está baseado num acordo entre ferrovias e, possivelmente, alguns clientes, que permitem que os vagões sejam reunidos em muitos pontos

de carga e que os vagões descarregados nos destinos possam ser enviados para qualquer ponto de carga.

A programação linear é a principal metodologia para estes modelos de alocação. Seguem alguns estudos:

- * AVI-ITZHAK, BENN e POWELL (1967) desenvolveram um modelo para um "pool" de vagões em um sistema ferroviário sujeito a uma demanda estocástica. É determinado o número de vagões necessários no "pool".
- * ALLMAN (1972) propõe o uso de programação linear para a alocação ótima de vagões de carga com taxas diárias de aluguel. O objetivo da alocação é maximizar a expressão "taxa recebida - taxa paga".
- * KIKUCHI (1985) propôs um modelo para uma frota homogênea de vagões, gerenciados e despachados continuamente e centralmente. O objetivo do modelo é desenvolver instruções diárias de despacho para cada vagão no sistema, de forma a minimizar os custos totais de estoque, de viagem e de falta de vagões, no período de análise.
- * GLICKMAN e SHERALI (1985) estudaram o mesmo problema mas levando em conta diferentes tipos de vagões com substituição limitada.

4.5 - COMENTÁRIOS SOBRE OS ENFOQUES DE MODELAGEM E PREVISÕES DETERMINÍSTICAS E ESTOCÁSTICAS

Conforme mostrado anteriormente os modelos tratam do gerenciamento do estoque de vagões nos pátios ou terminais da rede ou da alocação/despacho de vagões vazios a certos pares de origem-destino para satisfazer a demanda.

Mais do que concorrentes estas duas abordagens são complementares e podem ser usadas em conjunto. Todavia, no dia-a-dia da operação, em que o objetivo final é dar destinos aos vagões vazios, a abordagem tradicional casa perfeitamente com este objetivo, desde que o problema seja considerado dinâmico e não estático. Em outras palavras, a perspectiva tempo deve ser adicionada ao modelo (na abordagem de gerenciamento do estoque a variável tempo está implícita). Com esta perspectiva, o modelo pode indicar ser mais vantajoso guardar um vagão num determinado pátio, de modo a atender uma demanda futura, do que enviá-lo para outra localidade, cuja demanda poderia ser suprida de uma outra maneira. Por exemplo, considere-se os pátios A, B, e C e as suas ofertas (+) e demandas (-) nos dias 1 e 2, mas supondo que o planejamento é feito a cada dia e que o custo de enviar um vagão de A para B é menor do que enviá-lo de C para B.

	dia 1	dia 2
A	+1	-1
B	-1	0
C	+1	0

Com base nas hipóteses mencionadas, a distribuição de vagões no dia 1 indicaria a movimentação de 1 vagão de A para B. Todavia, considerando a perspectiva tempo, a solução de menor custo seria estocar 1 vagão em A e atender a demanda de B com o vagão em oferta no pátio C.

É também fácil mostrar que a decisão de alocar com base em apenas um período é diferente da decisão de alocar quando vários períodos são considerados, podendo também não ser ótima, conforme o exemplo dado a seguir e onde são conhecidas as ofertas e demandas dos pátios A e B nos instantes t_0 , t_1 e t_2 :

	t_0	t_1	t_2
A	+4	-4	-3
B	+4	+5	0

Supondo que o tempo de viagem de B para A leve 2 períodos e que o planejamento considere apenas um período, a demanda de -3 em A no instante t_2 não seria satisfeita a tempo, pois no instante t_0 não se toma conhecimento das ofertas e demandas no instante t_2 .

Embora o exemplo seja muito simples, pode-se concluir a importância de se considerar um período de planejamento no mínimo igual ao maior tempo de viagem entre dois pátios quaisquer do sistema.

Esta conclusão leva a uma outra: é necessário prever as ofertas e demandas nos diversos pátios ou estações do sistema ferroviário.

As ofertas ou demandas nos vários pontos do sistema são evidentemente, conforme já mencionado, de natureza estocástica. Contudo, no planejamento da operação diária, parece ser razoável que essas variáveis possam ser consideradas determinísticas e obtidas através de: consultas aos clientes os quais podem informar suas possibilidades e

necessidades de liberação dos vagões a eles alocados; previsões de chegadas dos vagões vazios aos seus destinos (vagões vazios em trânsito); previsões de liberação de vagões em manutenção e assim por diante. Prever as ofertas e demandas desta maneira, ainda mais se for considerado um período de planejamento adequado, de alguns dias, por exemplo, parece ser mais realístico do que sorteá-los de uma distribuição de probabilidades (empírica ou teórica). Este procedimento é mais adequado quando se está estudando ou simulando a performance do sistema ou a adequação do tamanho da frota de vagões, por exemplo.

4.6 - PROPOSTA DE UM MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS

4.6.1 - A REDE ESPAÇO-TEMPO

Muitos trabalhos têm sido feitos e publicados na área de distribuição e alocação de vagões vazios utilizando a teoria do fluxo em redes. Um dos principais entraves para a utilização desta metodologia é a dimensão do problema. A rede física, ao ser expandida no tempo, pode tomar dimensões impraticáveis de ser resolvida, seja pelo tempo de processamento necessário, seja pela quantidade de dados requeridos.

WHITE e BOMBERAULT (1969), por exemplo, propuseram um modelo de rede em que a unidade básica é representada pelo tripé (i,j,t) : trem "i" na estação "j" no tempo "t", ou seja, todas as conexões de trens entre duas estações foram representadas. Isto fez com que a rede se expandisse rapidamente e, no caso de se considerar um horizonte de planejamento de alguns dias, a sua dimensão se torna gigantesca. Isto porque cada conexão é representada na rede por um nó e, portanto, se numa estação qualquer existem três conexões diárias, esta estação é representada por três nós diferentes.

OUIMET (1972), de modo a contornar este problema prático, evitou representar todas as possíveis conexões de trens entre cada par de estações. Estas foram representadas por nós, conectados entre si pelo tempo médio que um vagão leva na viagem entre cada par de estações. Em outras palavras, as distâncias entre as estações foram representadas pelos tempos de viagem, os quais foram aproximados para unidades inteiras do período ou intervalo básico considerado no planejamento (1 dia, no caso). Assim, se o tempo médio que um vagão leva para ir da estação A para a estação B é de 36 horas, o arco que liga A a B tem um "comprimento" de 2 dias. Com este procedimento simplificado foi possível, segundo o autor, considerar um período de planejamento de 5 dias. Apenas para se ter uma idéia, a rede espaço-tempo, para o problema apresentado pelo autor, foi constituída por 859

arcos, os quais representaram as conexões físico-temporais entre 14 estações (nós), cujos tempos de viagem variam de 1 a 4 dias. É de se notar que apenas os arcos que representam conexões inferiores ao horizonte de planejamento (5 dias) são considerados na rede.

Tendo em vista que o modelo proposto neste trabalho foi baseado na rede espaço-tempo desenvolvida por OUIOMET (1972) apresenta-se, a seguir, a metodologia utilizada na sua criação.

Para efeito de ilustração considere-se a Figura 4.1 abaixo, que representa uma rede física com dois nós (A e B) expandida no tempo em apenas um período do horizonte de planejamento. Considere-se também que este período representa o tempo de viagem entre as estações A e B.

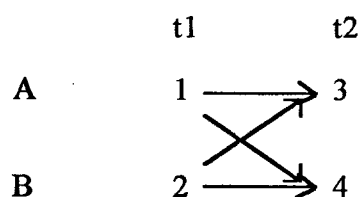


Figura 4.1 - Rede Espaço-Tempo de 2 nós e 1 Período de Tempo ($t_2 - t_1 = 1$ período)

Na Figura 4.1 os arcos (1,3) e (2,4) representam arcos de estoque, enquanto os arcos (1,4) e (2,3) representam possibilidades de movimento de vagões entre as estações A e B.

Esta rede básica pode ser expandida no espaço e no tempo se forem consideradas novas estações e mais períodos de tempo, aumentando o período de planejamento. Se o movimento entre dois nós requerer mais de um período "t" de tempo (n períodos, por exemplo), o arco que conecta estes dois nós e que tem origem no instante " t_0 " deverá ter destino no instante " $t_0 + nt$ ". Porém os arcos cujos destinos ultrapassam o horizonte de planejamento devem ser omitidos da rede.

Ainda exemplificando, considere-se o sistema representado na Figura 4.2 pelas estações A, B e C. Os números apresentados na figura representam os tempos de viagem, em horas, entre as estações.

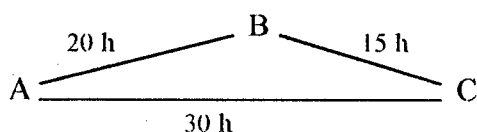


Figura 4.2 - Exemplo de um Sistema de três Estações

Considerando um horizonte de planejamento de 3 dias (o período ou intervalo de planejamento é de 1 dia), a rede espaço-tempo que representa o sistema da Figura 4.2 tem a seguinte configuração:

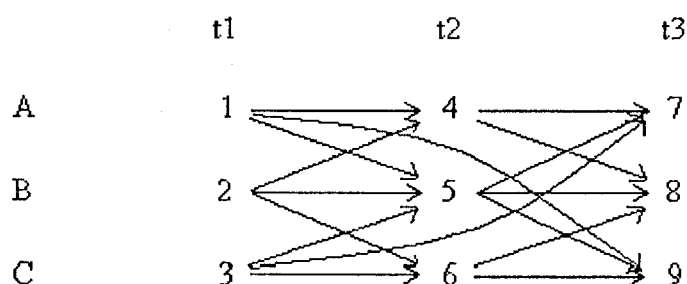


Figura 4.3 - Rede Espaço-Tempo do Sistema Representado na Figura 4.2

De acordo com o que já foi mencionado, o exame da Figura 4.3 indica:

- Os nós 1, 4 e 7 representam a estação A ao longo dos dias (t_1 , t_2 e t_3) do horizonte de planejamento. Do mesmo modo os nós 2, 5 e 8 representam a estação B e os nós 3, 6 e 9 a estação C;
- Os arcos de estoque são aqueles que ligam os nós representativos de uma mesma estação ao longo do tempo. Exemplos: (1,4), (5,8) e (3,6) e assim por diante;
- Os arcos de movimento são aqueles que conectam os nós que representam estações diferentes. Exemplos: (1,5), (1,9), (2,4), (3,5), (6,8) e assim por diante;
- O arco, por exemplo, que ligaria as estações A e C a partir do dia t_2 foi omitido, pois o movimento que o mesmo representa somente terminaria no dia t_4 , portanto além do horizonte de planejamento;
- Os tempos de viagem foram aproximados para unidades inteiras do período ou intervalo de planejamento: 1 dia para o tempo de viagem entre as estações A e B e B e C, e 2 dias entre as estações A e C.

Criados os arcos de estoque e movimento, o próximo passo é adicionar as ofertas e demandas em cada nó (ou seja, em cada estação em cada dia do horizonte de planejamento). Isto é feito ligando-se os nós em que há demandas a um nó que representa um "super-sumidouro" e os nós em que há ofertas a um outro nó que, por sua vez, representa uma "super-fonte". Estes arcos tem custo zero e capacidade de fluxo igual à demanda quando o mesmo é ligado ao super-sumidouro (arcos de demanda) ou capacidade igual à oferta quando o mesmo é ligado à super-fonte (arcos de oferta ou suprimento). Quando a demanda é zero o nó respectivo é ligado ao super-sumidouro com custo infinito e capacidade zero.

Relativamente aos arcos de estoque e movimento estes têm capacidade de fluxo infinita e os seus custos devem representar os custos reais de estocar um vagão no sistema e de transportá-lo entre as estações.

Finalmente, um "arco de retorno" com capacidade infinita e um custo negativo infinito é adicionado à rede. Este arco liga o super-sumidouro à super-fonte. O alto custo negativo do arco de retorno tem a finalidade de forçar a rede a executar todas as alocações viáveis. Assim, todas as demandas serão atendidas enquanto houver vagões disponíveis e enquanto for possível fazer o atendimento.

A rede assim criada, contudo, para o caso da distribuição de vagões vazios tem um sério problema: a demanda que não puder ser atendida numa estação qualquer, num determinado dia, é esquecida. O ideal é que essa demanda não atendida fosse acrescentada à demanda do dia seguinte. Para exemplificar o problema considere-se a Figura 4.4 que representa uma rede de 2 estações, num horizonte de planejamento de 3 dias. Nesta figura, os números próximos aos nós representam as ofertas (números positivos) e demandas (números negativos) de vagões vazios e os números sobre os arcos (setas) representam os custos de viagem (zero para o caso de estoque e 1 para o de movimento entre as estações).

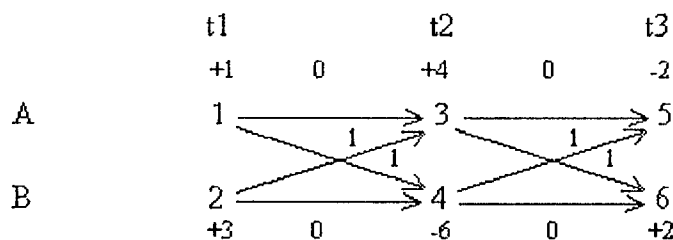


Figura 4.4 - Ofertas/Demandas e Custos numa Rede de 2 Estações e 3 dias de Horizonte de Planejamento

Um exame visual da Figura 4.4 indica rapidamente a alocação ótima (a custo total mínimo):

no dia t_1 : A envia 1 vagão para B
 B estoca 3 vagões
 no dia t_2 : A estoca 4 vagões
 B tem falta de 2 vagões ($6-1-3=2$)
 no dia t_3 : A tem sobra de 2 vagões
 B tem sobra de 2 vagões

Na prática, obviamente, os 2 vagões que estão sobrando em B no dia t_3 seriam utilizados para preencher a sua demanda no dia anterior. Todavia, do modo como a rede está montada, não é possível fazer isto automaticamente, pois não há como movimentar ou estocar "-2" vagões.

O problema foi contornado criando-se "arcos de falta". A primeira idéia seria como mostrado na Figura 4.5. Nesta figura representa-se a rede da Figura 4.4 acrescida dos arcos de falta, os quais podem ser facilmente identificados [arcos (3,1), (4,2), (5,3) e (6,4)]:

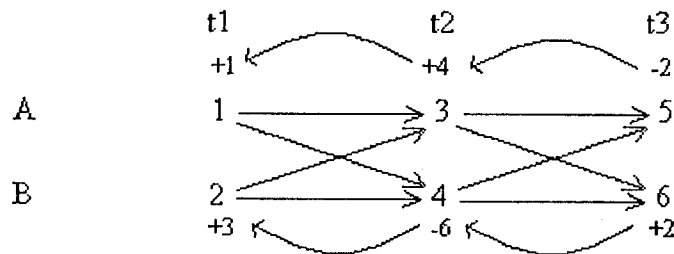


Figura 4.5 - Representação dos Arcos de Falta

Os arcos de falta, criados desta maneira, têm um sério inconveniente, pois o algoritmo poderia forçar um fluxo de 2 vagões no arco (3,1) da Figura 4.5 e então enviá-los para B através do arco (1,4). Assim, a demanda em B no dia t_2 seria preenchida com a oferta da estação A neste mesmo dia, o que é obviamente impossível.

De modo a evitar fluxos impossíveis, os arcos de falta foram criados simultaneamente com nós e arcos fantasmas, conforme ilustrado na Figura 4.6, a qual representa o mesmo sistema das Figuras 4.4 e 4.5.

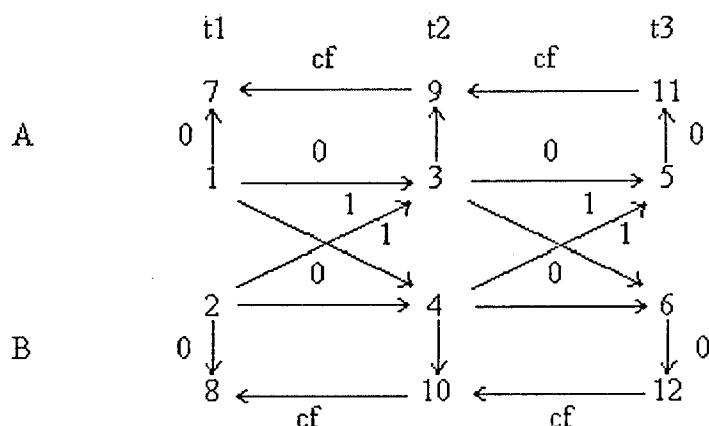


Figura 4.6 - Representação dos Arcos de Falta e dos Nós e Arcos Fantasmas

Conforme se pode notar na Figura 4.6 a cada nó real está associado um nó fantasma, os quais são ligados entre si por arcos fantasmas, cujo fluxo é no sentido do nó real para o fantasma. Os arcos fantasmas têm capacidade infinita e custo zero.

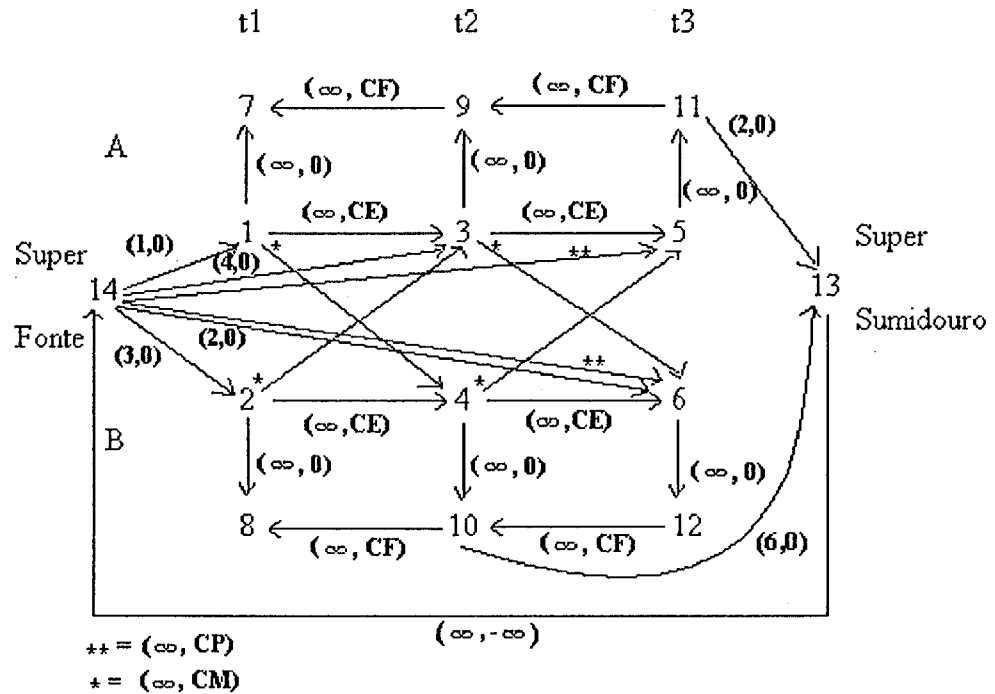
Os arcos de falta, por sua vez, ligam entre si os nós fantasmas de uma mesma estação e têm sentido inverso ao dos arcos de estoque. A capacidade dos arcos de falta é infinita, mas o seu custo deve representar o custo real da falta de suprimento de um vagão na estação considerada.

Esta metodologia, além de prevenir fluxos irreais, permite que demandas não atendidas sejam preenchidas tão logo quanto possível. Outrossim, tem a vantagem de facilmente identificar as faltas e os locais onde elas ocorrem, pela inspeção do fluxo nos arcos de falta.

A desvantagem óbvia é de requerer um número quase duas vezes maior de nós e arcos. Todavia, um modelo que não tenha essa capacidade, ou seja, de procurar atender demandas não preenchidas em períodos anteriores, certamente falharia na aplicação prática da resolução do problema da distribuição de vagões vazios.

Há necessidade ainda, para completar a rede espaço-tempo, da criação dos "arcos de empréstimo". Estes arcos, que ligam a super-fonte a todos os nós do último dia de planejamento, permitem ao algoritmo "criar" vagões para preencher a demanda quando a demanda total no sistema excede a oferta. Contudo, estes vagões são relatados como em falta na análise final. Com isto é permitida a identificação de todas as faltas, não importando a disponibilidade de vagões no sistema. Deve-se ainda apontar que os arcos de empréstimo têm capacidade de fluxo infinita e um custo de empréstimo, o qual, nas aplicações práticas, pode ser igual ao custo de falta.

A Figura 4.7 mostra a rede completa, com todos os nós e arcos necessários para representar o sistema simplificado na Figura 4.4. Na Figura 4.7 os arcos de empréstimo são representados pelos arcos (14,5) e (14,6).



C_M = custo de movimento ou de transporte

C_F = custo de falta

C_E = custo de estoque

C_P = custo de empréstimo

arcos = (capacidade, custo)

Figura 4.7 - Rede Completa da Figura 4.4

Deve-se ainda notar na Figura 4.7 que os nós e arcos não estão numerados aleatoriamente. Existe um determinado padrão de numeração, o qual permite identificar as estações e os demais elementos da rede de modo bastante fácil. Este esquema de numeração será explicado no item 4.7.1.

4.6.2 - O MODELO PROPOSTO

No desenvolvimento do modelo proposto procurou-se averiguar a possibilidade de sua utilização no sistema ferroviário brasileiro, em particular na estrutura organizacional da RFFSA - Rede Ferroviária Federal S.A..

Ao lado da estrutura de rede mostrada no item anterior, o modelo, para sua aplicação prática, nas operações diárias, necessita de um sistema de informação em tempo real, de uma comunicação eficiente entre as diversas estações e o centro de controle operacional, de previsões de oferta e demanda de vagões vazios, de custos de transporte, de estoque e de falta e ainda de dados físicos do sistema ferroviário.

No modelo proposto o sistema de informação em tempo real está representado por arquivos, os quais contêm todas as informações necessárias para processar o modelo. Num caso real, como o da RFFSA - Rede Ferroviária Federal S.A., a qual já dispõe de um sistema de informação em tempo real (SIGO), haveria a necessidade de fazer a interface do sistema com o modelo. Isto, evidentemente, é muito fácil de ser feito.

A solução encontrada pelo modelo sempre é ótima do ponto de vista do algoritmo, mas, individualmente, do ponto de vista da ferrovia e principalmente do usuário, muitas vezes deixa a desejar. Conforme citado anteriormente, nenhum modelo é capaz de alcançar todos os objetivos e capturar todas as complexidades do sistema ferroviário. Assim, por exemplo, a solução encontrada pelo algoritmo, embora minimizando o custo total da distribuição, pode deixar de atender sistematicamente um cliente mais distante. Em outra situação pode deixar de atender um cliente que necessite urgentemente transportar um produto perecível ou prioritário. Assim, é necessário que o responsável pela operação analise a solução encontrada pelo modelo. Em nenhum momento a intervenção do gerente ou responsável pode ser dispensada. Constatada uma ou ambas as situações acima exemplificadas, o gerente poderia fazer uma redistribuição manual, privilegiando, a seu critério, a demanda de uma determinada estação em detrimento da demanda de uma ou mais estações. O modelo desenvolvido, todavia, permite ao gerente fazer esta redistribuição a um custo mínimo. Duas opções, ou mesmo ambas, em conjunto, podem ser utilizadas. Na primeira, o gerente pode processar novamente o modelo, alterando o custo de falta, na estação prejudicada, para um valor maior. A segunda opção faz basicamente a mesma coisa, mas é um pouco mais sofisticada. Parte da suposição de que a demanda de vários clientes está agrupada numa determinada estação centralizadora e que apenas um dos clientes desta estação será privilegiado. O exemplo a seguir facilita o entendimento. Considere-se um horizonte de planejamento de 4 dias e que a estação centralizadora "A" agrupa as demandas de 3 clientes (C1, C2 e C3). Suponha-se ainda que se deseje priorizar apenas as demandas do cliente "C2" e que estas demandas e as demandas totais em "A" são as seguintes:

	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄
estação A (C1+C2+C3)	-2	-3	-4	-5
cliente C2	0	-2	-1	-3

O procedimento adotado no modelo foi o de criar uma estação fictícia "A1", associada a "A", atribuindo a "A1" as demandas do cliente "C2", as quais são descontadas da demanda total de "A" pelo próprio modelo. Outrossim, alterou-se o custo de falta da estação "A1" para um valor maior, de modo a forçar o algoritmo a atender as demandas dessa estação fictícia. Assim, as demandas nas estações "A" e "A1" fornecidas pelo modelo ao algoritmo são as que seguem:

	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄
estação A (C1+C3)	-2	-1	-3	-2
estação A1 (C2)	0	-2	-1	-3

Deste modo, o modelo daria prioridade apenas às demandas da estação A1 (ou seja, do cliente C2). No caso de se desejar priorizar a demanda do cliente "C2" apenas no dia "t₃", por exemplo, deve-se zerar as demandas dos demais dias, deixando-as agrupadas na estação "A", como mostrado a seguir:

	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄
estação A (C1+C3)	-2	-3	-3	-5
estação A1 (C2)	0	0	-1	0

Acredita-se que estas opções possam flexibilizar e facilitar a tomada de decisão pelo gerente.

O algoritmo utilizado pelo modelo para resolução da rede espaço-tempo foi o OUT-OF-KILTER de FORD e FULKERSON (1969), cuja base teórica e vantagens serão mostradas no item 4.7.1.

A programação do modelo, apresentada no Apêndice A.1, foi feita em FORTRAN-77, tendo sido utilizado um micro-computador de pequeno porte (640K de memória e 2 drivers). O tempo de resolução é pequeno e está perfeitamente ajustado a qualquer necessidade prática de operação real, onde, certamente, computadores de maior porte estarão disponíveis.

O modelo dá como resposta quatro tipos de relatórios:

a) Relatório do movimento de vagões;

- b) Relatório de falta de vagões;
- c) Relatório dos arcos;
- d) Matriz resultante das ordens de movimento de vagões no primeiro período.

O relatório do movimento de vagões indica, a cada período do horizonte de planejamento, para onde os mesmos devem ser direcionados e também onde eles devem ser estocados para suprimento futuro e a quantidade de vagões.

O relatório de falta de vagões indica, em cada estação e a cada dia, as demandas não atendidas, permitindo ao gerente uma visualização rápida das deficiências, de modo que o mesmo possa tomar alguma decisão sobre o movimento de vagões indicado pelo modelo.

O relatório dos arcos é uma saída opcional do modelo. No dia-a-dia da operação o mesmo não é necessário. A sua finalidade é permitir um melhor entendimento da criação de rede espaço-tempo e do programa computacional desenvolvido.

A matriz resultante das ordens de movimento no primeiro dia (somente de movimento; as ordens de estoque não são consideradas) poderia também sair em forma de arquivo de dados, de modo a ser utilizado no próximo ciclo de planejamento, pois representa as ofertas em trânsito.

As ofertas e demandas são fornecidas ao modelo na forma de duas matrizes: 1) a matriz dos vagões vazios em trânsito que representam ofertas em trânsito e 2) a matriz das ofertas/demandas de vagões vazios nas estações do sistema. Estas duas matrizes são então somadas.

Uma hipótese que está implícita na formulação do modelo é que há trens disponíveis e suficientes para transportar os vagões vazios rumo aos seus destinos.

4.7 - A RESOLUÇÃO DO MODELO

4.7.1 - O DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

O programa desenvolvido, denominado VAGZIOS (VAGões vaZIOS), tem como objetivo fazer a distribuição de vagões vazios, a custo mínimo, numa rede espaço-tempo, a partir das seguintes informações:

- a) Horizonte de planejamento;
- b) Período ou intervalo de planejamento;

- c) Número de estações do sistema ferroviário;
- d) Tempos de viagem entre as estações (em números inteiros de períodos ou intervalos de planejamnto);
- e) Custos de transportar, estocar e faltar (não atendimento da demanda) vagões vazios no sistema ferroviário;
- f) Ofertas e demandas de vagões vazios nas estações ao longo do horizonte de planejamento.

Não se tem como objetivo, neste item, detalhar o programa VAGZIOS. O programa, apresentado no Apêndice A.1, está razoavelmente documentado e um programador experiente poderá, com algum tempo e um pouco de esforço, entender as suas declarações e procedimentos, de modo a adaptá-lo às suas necessidades e ao seu sistema operacional.

Os dados são fornecidos ao programa via teclado, de forma convencional, e através de arquivos. Os dados fornecidos via teclado são aqueles que identificam o processamento e as opções do usuário, portanto variáveis a cada utilização do modelo.

Através de arquivos são fornecidos os dados físicos do sistema ferroviário e as ofertas e demandas de vagões vazios nas estações ou terminais do sistema. Esses arquivos, em número de três, constam também do Apêndice A.1 e são os seguintes:

a) Arquivo ARCODATA:

Para uma dada configuração de estações do sistema, estes dados são fixos. Neste arquivo são lidos o "número de estações" e o "número de ligações", este último representando todas as ligações possíveis entre as estações. No caso de todas as estações se ligarem entre si, ou seja, se cada uma das estações está ligada a todas as outras, o número de arcos é igual ao quadrado do número de estações, pois cada estação deve também estar ligada a si mesma, de modo a permitir a estocagem de vagões. Caso contrário o usuário deverá contar o número de arcos. Neste arquivo são lidos ainda os custos de falta em cada estação (podem ser custos diferentes) e também, para cada um dos arcos, a sua origem e destino, o tempo de viagem no arco e a sua capacidade e o custo de movimento (transporte) no caso da origem e destino serem diferentes, ou o custo de estoque (podem ser diferentes para cada estação), no caso de mesma origem e destino;

b) Arquivo TRANSMAT:

Neste arquivo são lidas as ofertas de vagões vazios em trânsito no sistema, previstas em cada uma das estações ao longo do horizonte de planejamento;

c) Arquivo DEMATRIX:

Neste arquivo são lidas as ofertas (positivas) e demandas (negativas) existentes nas estações, também ao longo do horizonte de planejamento. Portanto, são também ofertas e demandas baseadas em previsões.

Os dados dos arquivos TRANSMAT e DEMATRIX são então somados, obtendo-se assim as ofertas e demandas totais, em cada um dos períodos do horizonte de planejamento, nas estações ou terminais ferroviários.

A partir da leitura destes arquivos o programa passa à montagem da rede espaço-tempo. O exame das figuras já apresentadas neste capítulo, principalmente o da Figura 4.7, permite verificar que há um padrão na numeração dos nós e arcos. De fato, os nós e arcos não são numerados aleatoriamente, mas segundo um critério previamente estabelecido. Para explicar este critério poder-se-ia lançar mão da Figura 4.7. Todavia, prefere-se utilizar as Figuras 4.8 e 4.9 e as Tabelas 4.1 e 4.2 relativas ao exemplo da aplicação prática do modelo.

A Figura 4.8 mostra o sistema ferroviário operado pela Superintendência Regional de Curitiba da RFFSA, o qual foi utilizado para se fazer a exemplificação e aplicação prática do modelo de distribuição de vagões vazios.

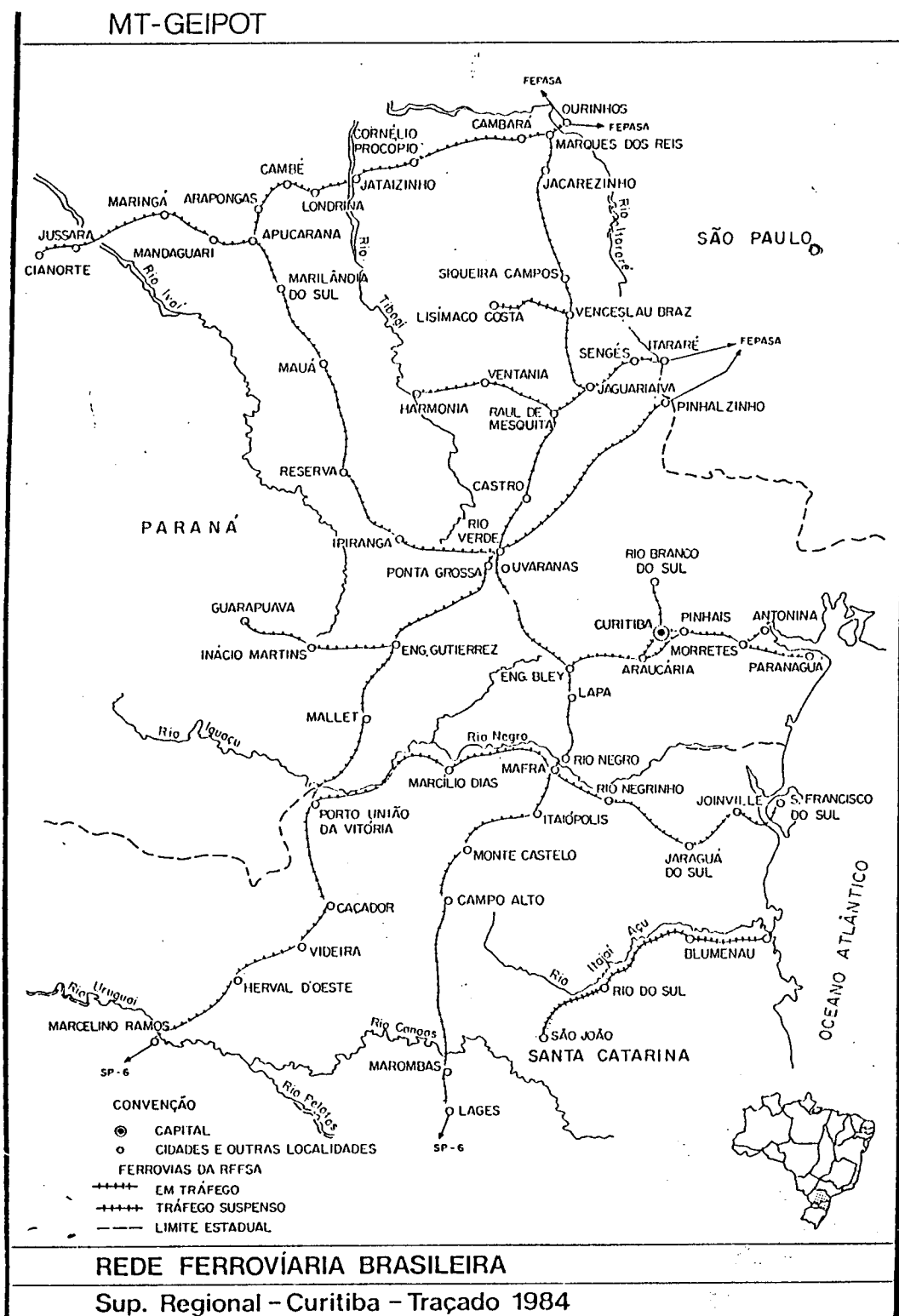


Figura 4.8 - Sistema Ferroviário da SR.5

Na Figura 4.9 mostra-se a rede física (sistema ferroviário considerado) com as distâncias e os tempos de viagem reais entre as estações, os quais estão listados na Tabela 4.1. Os tempos de viagem, contudo, mostrados na Tabela 4.2, foram aproximados para unidades inteiras do intervalo de planejamento, considerado de 1 dia no exemplo. No caso de uma ligação ter a mesma origem e destino, o "tempo de viagem", na montagem da rede, terá 1 dia de duração, de forma a permitir a estocagem.

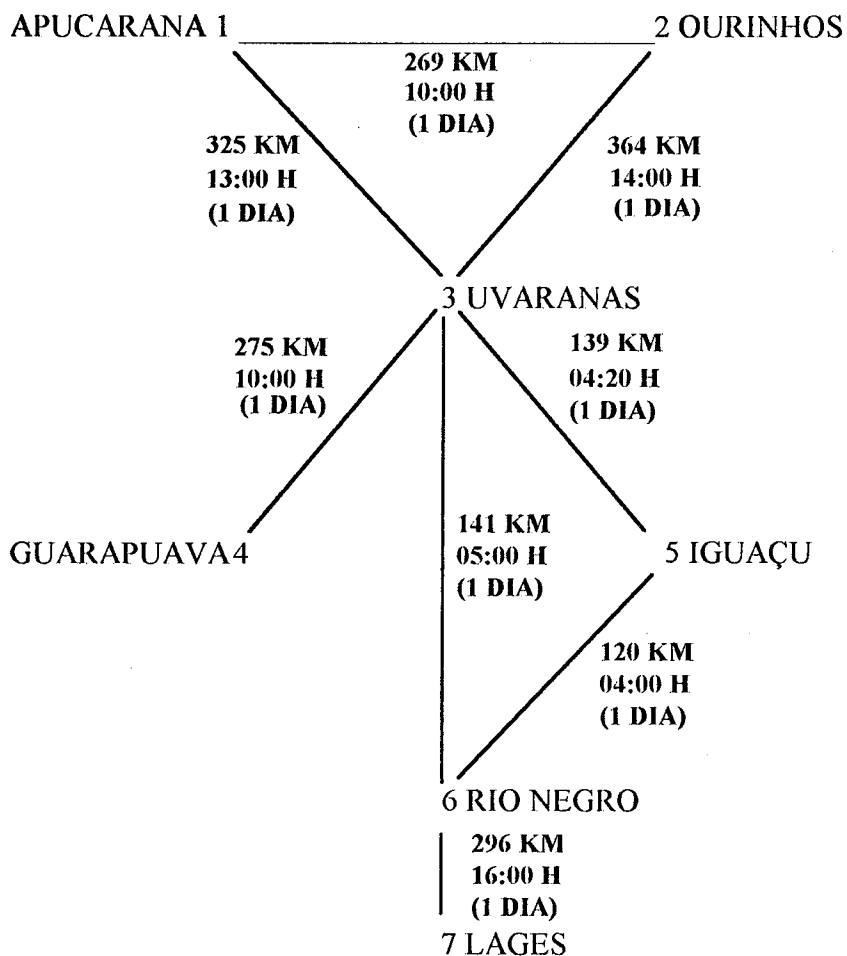


Figura 4.9 - Rede Física para o Exemplo da Distribuição de Vagões Vazios

Tabela 4.1 - Relação das Estações Ferroviárias para o Exemplo da Distribuição de Vagões Vazios

NÚMERO	NOME
1	APUCARANA
2	OURINHOS
3	UVARANAS
4	GUARAPUAVA
5	IGUAÇÚ
6	RIO NEGRO
7	LAGES

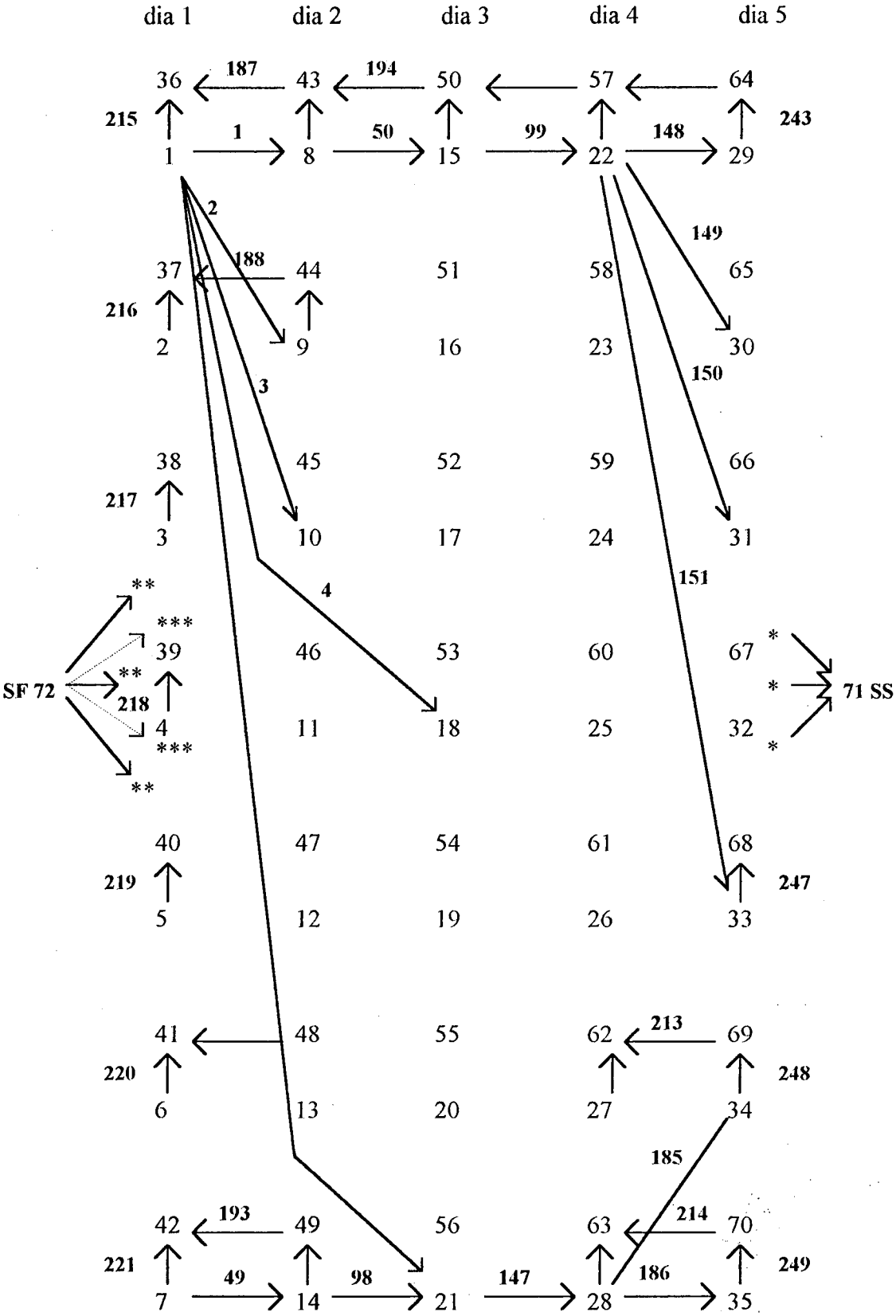
Tabela 4.2 - Tempos de Viagem (TV) e Distâncias (DIST) entre as Estações Ferroviárias do Exemplo da Distribuição de Vagões Vazios.

Nº DA LIGAÇÃO	ESTAÇÃO ORIGEM		ESTAÇÃO DESTINO		TV	DIST
	NOME	Nº	NOME	Nº	(DIAS)	(Km)
1	APUCARANA	1	APUCARANA	1	0	0
2	APUCARANA	1	OURINHOS	2	1	269
3	APUCARANA	1	UVARANAS	3	1	325
4	APUCARANA	1	GUARAPUAVA	4	2	600
5	APUCARANA	1	IGUAÇÚ	5	1	464
6	APUCARANA	1	RIO NEGRO	6	1	466
7	APUCARANA	1	LAGES	7	2	762
8	OURINHOS	2	APUCARANA	1	1	269
9	OURINHOS	2	OURINHOS	2	0	0

10	OURINHOS	2	UVARANAS	3	1	364
11	OURINHOS	2	GUARAPUAVA	4	2	639
12	OURINHOS	2	IGUAÇÚ	5	1	503
13	OURINHOS	2	RIO NEGRO	6	1	505
14	OURINHOS	2	LAGES	7	2	801
15	UVARANAS	3	APUCARANA	1	1	325
16	UVARANAS	3	OURINHOS	2	1	364
17	UVARANAS	3	UVARANAS	3	0	0
18	UVARANAS	3	GUARAPUAVA	4	1	275
19	UVARANAS	3	IGUAÇÚ	5	1	139
20	UVARANAS	3	RIO NEGRO	6	1	141
21	UVARANAS	3	LAGES	7	1	437
22	GUARAPUAVA	4	APUCARANA	1	2	600
23	GUARAPUAVA	4	OURINHOS	2	2	639
24	GUARAPUAVA	4	UVARANAS	3	1	275
25	GUARAPUAVA	4	GUARAPUAVA	4	0	0
26	GUARAPUAVA	4	IGUAÇÚ	5	1	414
27	GUARAPUAVA	4	RIO NEGRO	6	1	416
28	GUARAPUAVA	4	LAGES	7	2	712
29	IGUAÇÚ	5	APUCARANA	1	1	464
30	IGUAÇÚ	5	OURINHOS	2	1	503
31	IGUAÇÚ	5	UVARANAS	3	1	139
32	IGUAÇÚ	5	GUARAPUAVA	4	1	414
33	IGUAÇÚ	5	IGUAÇÚ	5	0	0
34	IGUAÇÚ	5	RIO NEGRO	6	1	120
35	IGUAÇÚ	5	LAGES	7	1	416
36	RIO NEGRO	6	APUCARANA	1	1	466

37	RIO NEGRO	6	OURINHOS	2	1	505
38	RIO NEGRO	6	UVARANAS	3	1	141
39	RIO NEGRO	6	GUARAPUAVA	4	1	416
40	RIO NEGRO	6	IGUAÇÚ	5	1	120
41	RIO NEGRO	6	RIO NEGRO	6	0	0
42	RIO NEGRO	6	LAGES	7	1	296
43	LAGES	7	APUCARANA	1	2	762
44	LAGES	7	OURINHOS	2	2	801
45	LAGES	7	UVARANAS	3	1	437
46	LAGES	7	GUARAPUAVA	4	2	712
47	LAGES	7	IGUAÇÚ	5	1	416
48	LAGES	7	RIO NEGRO	6	1	296
49	LAGES	7	LAGES	7	0	0

A Figura 4.10 apresenta os nós da rede espaço-tempo e alguns arcos dessa rede, de forma a facilitar a explicação de sua montagem. A rede foi montada considerando o conjunto das 7 estações mostradas na Figura 4.9 e considerando ainda um horizonte de planejamento de 5 dias, sendo o intervalo de planejamento de 1 dia, conforme já mencionado.



* → arcos (de demanda) ligando os nós fantasmas ao SS (quando o nó real tem demanda)

** → arcos (de oferta) que ligam a SF aos nós reais com oferta

*** → arcos (de empréstimo) que ligam a SF a todos os nós reais do último período

Figura 4.10 - Rede Espaço-Tempo do Exemplo da Distribuição de Vagões Vazios

Para representar a rede espaço-tempo acima definida há necessidade de 35 (7x5) nós, sendo cada estação representada por 5 nós. Os nós situados numa mesma linha representam, em diferentes períodos do horizonte de planejamento, uma mesma estação, cujo nó mais à esquerda tem numeração igual ao da própria estação que representa. Verifica-se facilmente o padrão de numeração dos nós: de cima para baixo e da esquerda para a direita. Estes nós, numerados no caso do exemplo de 1 a 35, são denominados nós reais. Criados os nós reais, o próximo passo é a criação dos arcos que ligam estes nós. Isto é feito no mesmo sentido da criação dos nós: de cima para baixo e da esquerda para a direita, considerando-se o tempo de viagem entre as estações. Procedendo assim, o nó 1 é ligado a todos os outros nós (arcos de números 1 a 7). Todavia, nota-se que o arco 4 liga o nó 1 ao nó 18 (estação nº 4), pois o tempo de viagem entre os nós 1 (estação 1) e 18 (estação 4) é de 2 dias. Feitas todas as ligações do nó 1, passa-se à numeração dos arcos que têm origem no nó 2 e prossegue-se até o nó 7, criando-se todos os arcos que têm origem no primeiro dia e destino de acordo com os tempos de viagem entre as estações. Prossequindo-se deste modo e desprezando-se os arcos cujos destinos ultrapassam o horizonte de planejamento, chega-se à última ligação entre os nós reais, a qual representa o arco nº 186, que liga a estação 7 a ela mesma (arco de estoque) no último período (nós 28 e 35).

A partir daí criam-se os nós fantasmas, cada qual associado a um nó real, como mostrado na Figura 4.10. A numeração dos nós fantasmas é feita do mesmo modo e em sequência aos nós reais, portanto de 36 a 70. Criados os nós fantasmas, os mesmos são ligados entre si pelos arcos de falta. A numeração dos arcos de falta é sequencial e contínua (pois todos os nós fantasmas são ligados entre si) e é feita, conforme mostrado na Figura 4.10, de cima para baixo e da esquerda para a direita. No exemplo, os arcos de falta são numerados de 187 a 214 ($7 \times 4 = 28$ arcos de falta).

Em seguida são criados os arcos fantasmas, ligando entre si os nós reais aos nós fantasmas. Estes arcos são também numerados contínua e sequencialmente, também de cima para baixo e da esquerda para a direita, recebendo o primeiro deles o número 215 e o último o número 249 ($7 \times 5 = 35$ arcos fantasmas).

São criados, então, os nós representativos do super-sumidouro e da super-fonte que na sequência, e no caso do exemplo, recebem respectivamente os números 71 e 72. O super-sumidouro é ligado à super-fonte através de um arco de retorno o qual, no caso do exemplo, recebe o número 250.

São criados, a seguir, também com numeração contínua, os arcos de oferta (ou suprimento) e de demanda, os primeiros ligando a super-fonte aos nós reais em que há oferta e os segundos os nós fantasmas ao super-sumidouro, quando o nó real associado tem demanda ou esta é nula. Para a numeração destes arcos, os nós são percorridos de cima para baixo e da esquerda para a direita. Estes arcos são, portanto, em número de 35 e são numerados de 251 a 285.

Finalmente são criados os arcos de empréstimo, os quais ligam a super-fonte a todos os nós reais do último período do horizonte de planeamento. Estes arcos são em número de 7 e numerados de 286 a 292. No caso do exemplo, portanto, há um total de 292 arcos.

No Apêndice A.2, além de outras saídas do modelo, apresenta-se o Relatório dos Arcos, onde são listadas todas as suas características e que, ao lado da Figura 4.10, permitem uma total compreensão do programa computacional desenvolvido.

4.7.2 - O ALGORITMO OUT-OF-KILTER

O algoritmo OUT-OF-KILTER foi desenvolvido por FORD e FULKERSON (1969) para resolver o seguinte problema: considere-se uma rede direcionada $G = \{N, A\}$, a qual consiste de uma coleção de N nós $\{1, 2, \dots, N\}$ juntamente com um subconjunto A de pares ordenados $\{i, j\}$ tomados de N . Para exemplificar, considere-se a Figura 4.11 abaixo:

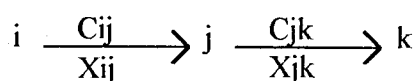


Figura 4.11 - Parte de uma Rede Direcionada (representando o fluxo de vagões vazios, por exemplo)

Na Figura 4.11 os pares $\{i, j\}$ são referidos como arcos. Associado a cada arco há um limite superior (u_{ij}) e um limite inferior (l_{ij}) de capacidade de fluxo e também o custo de passar, por exemplo, uma unidade de fluxo (um vagão vazio) no arco. O fluxo no arco é (X_{ij}).

O problema é minimizar o custo de passar um determinado fluxo na rede, se existir a viabilidade de se passar tal fluxo.

Este é um problema de programação linear (circulação a custo mínimo) com a característica especial de possuir em cada nó uma restrição de igualdade, a qual corresponde à equação de conservação do fluxo [Equação (4.2) abaixo]. O algoritmo OUT-OF-KILTER trata essas equações de um modo especial, possuindo uma importante estrutura que permite a simplificação do "simplex" (primal) a um ponto onde pode ser diretamente aplicado na própria rede, sem necessidade do "tableau". O tempo de computação do OUT-OF-KILTER é bastante inferior ao obtido quando se formula o problema segundo os padrões usuais da programação linear, devido às seguintes razões: 1) não há multiplicações ou divisões e 2) não há inversão de matrizes.

A seguinte notação será utilizada na formulação do problema:

$G \rightarrow$ uma rede direcionada $\{N, A\}$;

$N \rightarrow$ coleção de N elementos ou nós

$A \rightarrow$ conjunto de pares ordenados $\{i, j\}$ de uma coleção de N elementos ou nós;

$C_{ij} \rightarrow$ custo de passar uma unidade de fluxo no arco (i, j) ;

$X_{ij} \rightarrow$ fluxo no arco (i, j) ;

$l_{ij} \rightarrow$ capacidade mínima de fluxo no arco (i, j) ;

$u_{ij} \rightarrow$ capacidade máxima de fluxo no arco (i, j) ;

$q_{ij} \rightarrow$ custo líquido de transportar uma unidade de fluxo do nó "i" ao nó "j";

$v_{ij} \rightarrow$ custo marginal de diminuir l_{ij} de uma unidade;

$h_{ij} \rightarrow$ custo marginal de aumentar u_{ij} de uma unidade;

$w_i \rightarrow$ preço de uma unidade no nó "i"

É conveniente expressar o problema na notação da programação linear, de modo que se possa obter as relações entre as variáveis dos problemas primal e dual, conforme mostrado a seguir:

- O Problema Primal

Minimizar:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \times X_{ij} \quad (4.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} - \sum_{k=1}^n X_{ki} = 0, \forall i \in N \quad (4.2)$$

$$X_{ij} \geq l_{ij}, \forall (i,j) \in A \quad (4.3)$$

$$X_{ij} \leq u_{ij}, \forall (i,j) \in A \quad (4.4)$$

$$X_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in A \quad (4.5)$$

Da dualidade da teoria da programação linear sabe-se que existe uma variável dual associada com cada restrição primal e vice-versa. Assim, na formulação dual "w" é a variável dual associada com a restrição de igualdade primal, ou seja, a equação de conservação do fluxo em cada nó "i". Do mesmo modo "v_{ij}" e "h_{ij}" são as variáveis duais associadas com as inequações primais representadas pelas equações (4.3) e (4.4), as quais indicam as restrições de fluxo mínimo e máximo em cada arco (i,j). A formulação matemática do problema dual é, então, a que se segue:

- O Problema Dual

Maximizar:

$$Y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij} \times v_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij} \times h_{ij} \quad (4.6)$$

Sujeito a:

$$w_i - w_j + v_{ij} - h_{ij} \leq C_{ij}, \forall (i,j) \in A \quad (4.7)$$

$$v_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in A \quad (4.8)$$

$$h_{ij} \geq 0, \forall (i,j) \in A \quad (4.9)$$

As variáveis w não têm restrições de sinal, porque estas variáveis do problema dual estão associadas com restrições de igualdade na formulação primal.

No ótimo, os valores das funções objetivo dos problemas primal e dual são iguais. As relações entre as variáveis primal e dual que forçam esta igualdade são denominadas condições complementares de folga. Estas condições são:

$$v_{ij} > 0 \rightarrow X_{ij} = l_{ij}, \forall (i,j) \in A \quad (4.10)$$

$$h_{ij} > 0 \rightarrow X_{ij} = u_{ij}, \forall (i,j) \in A \quad (4.11)$$

$$w_i - w_j + v_{ij} - h_{ij} = C_{ij} \rightarrow l_{ij} \leq X_{ij} \leq u_{ij} \quad (4.12)$$

O OUT-OF-KILTER é eficiente porque tira proveito das relações acima e da estrutura especial do problema de circulação a custo mínimo, a qual permite que se examine apenas um pequeno conjunto das variáveis primal e dual na procura do melhor ou dos valores ótimos que solucionam a Equação (4.1). Esta eficiência é obtida definindo-se três quantidades:

$$q_{ij} = C_{ij} - w_i + w_j \quad (4.13)$$

$$v_{ij} = \text{máx} (0, q_{ij}) \quad (4.14)$$

$$h_{ij} = \text{máx} (0, -q_{ij}) \quad (4.15)$$

com v_{ij} e h_{ij} continuamente satisfazendo as Equações (4.7), (4.8) e (4.9). Deste modo os valores de w_i podem ser livremente escolhidos sem que se rompa a viabilidade do problema dual. Comparando as Equações (4.10), (4.11) e (4.12) com as definições dadas nas Equações (4.13), (4.14) e (4.15), as condições complementares de folga podem ser reformuladas:

$$q_{ij} > 0 \rightarrow X_{ij} = l_{ij} \quad (4.16)$$

$$q_{ij} < 0 \rightarrow X_{ij} = u_{ij} \quad (4.17)$$

$$q_{ij} = 0 \rightarrow l_{ij} \leq X_{ij} \leq u_{ij} \quad (4.18)$$

Estas três condições, aliadas à conservação do fluxo [Equação (4.2)] que mantém a viabilidade do problema primal, determinam as condições de solução ótima do problema dado. Estas três condições são suficientes e podem ser utilizadas para testar se os valores estipulados por tentativa nos arcos (i,j) são ótimos.

Se um conjunto de valores encontrados para " w_i " e " X_{ij} " satisfizer a Equação (4.2), e uma das Equações (4.16), (4.17) ou (4.18) para todos os arcos da rede " G ", então os valores de " X_{ij} " são a solução do problema de circulação a custo mínimo.

Um dos significados da palavra "Kilter" em Português é "Ordem". Assim "In Kilter" significa "Em Ordem" e "Out-of-Kilter", por sua vez, "Fora-de-Ordem".

Um arco é dito "In Kilter" quando satisfaz a uma das Equações (4.16), (4.17) ou (4.18). Caso contrário, é dito "Out-of-Kilter". Existem nove estados, mutuamente excludentes, que indicam o estado ("In Kilter" ou "Out-of-Kilter") na rede, conforme mostrado na Tabela 4.3. Um arco é dito "In Kilter" quando o seu Número Kilter é zero. Caso contrário é dito "Out-of-Kilter".

Tabela 4.3 - Possíveis Estados (Kilter) de um Arco (i,j) . Obs.: Para simplificação foram omitidos os índices i,j

Estado	Custo Líquido	Condições do Fluxo	Número Kilter	In Kilter?
A	$q > 0$	$X = l$	0	sim
B	$q = 0$	$l \leq X \leq u$	0	sim
C	$q < 0$	$X = u$	0	sim
A1	$q > 0$	$X < l$	$l - X$	não
B1	$q = 0$	$X < l$	$l - X$	não
C1	$q < 0$	$X < u$	$u - X$	não
A2	$q > 0$	$X > l$	$X - l$	não
B2	$q = 0$	$X > u$	$X - u$	não
C2	$q < 0$	$X > u$	$X - u$	não

Conforme visto, as condições ótimas de fluxo (custo mínimo) ocorrem quando todos os arcos estão "In Kilter", ou seja, quando os números Kilter de todos os arcos são iguais a zero.

A resolução do algoritmo consiste em três fases: a inicial, a primal e a dual. Após a fase inicial, o algoritmo interage com os problemas primal e dual até encontrar a solução ótima, se a mesma existir. Em termos gerais os seguintes passos são necessários:

- 1) Inicia-se com um fluxo conservativo, com todos os X_{ij} e w_i iguais a zero, identificando-se os estados dos arcos e computando-se os números "Kilter";
- 2) Não havendo nenhum arco "Out-of-Kilter" a solução ótima é encontrada. Caso contrário, procura-se um arco "Out-of Kilter" e passa-se à fase primal do algoritmo. Durante esta fase é feita uma tentativa de se obter um novo fluxo conservativo (alterando os valores de X_{ij}), mas de tal modo que nenhum arco tenha seu número "Kilter" piorado quando se melhora o número "Kilter" do arco selecionado;
- 3) Quando se verifica que nenhuma melhora pode ser obtida na fase primal, o algoritmo constrói uma nova solução dual (alterando os valores de w_i), de tal modo que nenhum número "Kilter" é piorado e repete-se o passo 2 acima.

4) Iterando-se entre os passos 2 e 3, o algoritmo constrói uma solução ótima ou, eventualmente, conclui não existir uma solução viável.

Tratamentos mais detalhados do algoritmo OUT-OF-KILTER, inclusive com exemplos de resolução, podem ser encontrados em: FORD e FULKERSON (1969), BAZARAA e JARVIS (1977), O'LAOGHAIRE e HIMMELBLAU (1974) e BOAVENTURA NETTO (1979). No Apêndice A.1, juntamente com o programa VAGZIOS, apresenta-se a listagem em FORTRAN IV da sub-rotina NETFLO, a qual resolve o algoritmo OUT-OF-KILTER.

4.8 - A APLICAÇÃO DO MODELO

Ao lado da aplicação prática do modelo descreve-se também, neste item, algumas suposições, critérios e procedimentos que tornam mais eficiente a sua aplicação e que, inclusive, orientaram o seu desenvolvimento.

4.8.1 - A METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MODELO

A metodologia de aplicação parte da hipótese de que a distribuição de vagões vazios é um processo de natureza dinâmica, auto-alimentado: informações são coletadas no sistema; a decisão é feita com base nas informações; a execução altera a distribuição no sistema e influencia futuras decisões.

A Figura 4.12 exemplifica o processo e mostra, de uma maneira global, as suas fases:

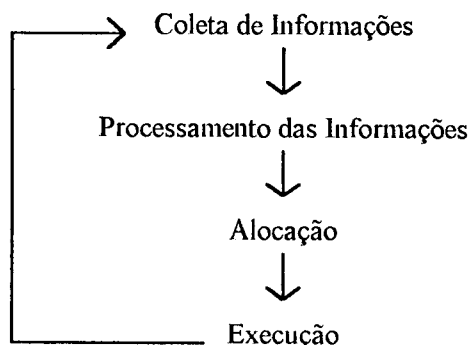


Figura 4.12 - Fases do Processo de Distribuição de Vagões Vazios

Conforme mencionado anteriormente, os trens são supostos disponíveis e em número suficiente para atender as ordens de movimentação dos vagões vazios.

As ligações entre as estações não representam, necessariamente, as conexões entre os trens. Todavia, a escolha das estações principais, ou centralizadoras de ofertas e demandas de vagões vazios, pode ser orientada por este critério, ou seja, de representarem pontos de conexão. De um modo geral, os pontos de conexão representam estações com grandes movimentos de carga/descarga.

A concentração das ofertas e demandas em estações principais facilita a coleta e manipulação dos dados e a análise dos resultados, agilizando as ordens de execução dos movimentos. Tem também a vantagem de diminuir o número de nós e de arcos da rede espaço-tempo, facilitando o processamento computacional, o qual pode ser fator limitante do número de estações. Numa situação emergencial, em que seja preciso individualizar algum cliente ou estação secundária agrupada numa estação centralizadora, o modelo tem dispositivos que permitem fazer isto facilmente, sem necessidade de alterar o arquivo original que contém a configuração física do sistema ferroviário.

O modelo deve ser processado no início de cada ciclo de planejamento. Um ciclo de planejamento abrange um determinado número de intervalos ou dias (se o intervalo for diário) definido pelo horizonte de planejamento. O segundo intervalo de um ciclo de planejamento passa a ser o primeiro intervalo do ciclo seguinte e assim por diante. Ofertas e demandas têm de ser previstas para todos os dias do horizonte de planejamento de cada ciclo.

O horizonte de planejamento deve ser, no mínimo, igual ao maior tempo de viagem entre duas estações quaisquer do sistema e a sua escolha deve levar em conta a qualidade das previsões e a dinamicidade do sistema. Horizontes muito pequenos podem inviabilizar a antecipação de decisões ou preparações que otimizem a operação global do sistema. Por outro lado, se o horizonte de planejamento for muito grande, as previsões das ofertas e das demandas podem não ter a confiabilidade desejada e, neste caso, as decisões ou preparações antecipadas podem ser inócuas, ocasionando o mesmo problema de otimização global da operação.

Para períodos ou intervalos de planejamento de 1 dia, considerado adequado no sistema ferroviário brasileiro, o horizonte de planejamento deve estar situado entre 3 e 7 dias, o qual, enfim, deve ser dimensionado na prática do dia-a-dia da operação ferroviária.

O período ou intervalo de planejamento também deve ser estabelecido com algum critério. Períodos muito curtos, inferiores a 1 dia (12 horas, por exemplo) devem ser evitados, pois tornam muito instáveis as previsões das ofertas e das demandas, mesmo nos casos em que a programação de trens é feita em 2 turnos, como é o caso da Regional de São Paulo da RFFSA (durante determinados períodos do dia os trens de carga não circulam,

devido ao fluxo intenso e prioritário dos trens de passageiros). Períodos superiores a um dia podem ser longos demais, principalmente quando a maioria dos tempos reais de viagem são inferiores a 1 dia. Outrossim, tradicionalmente, o período da operação ferroviária é diário, justificando-se, portanto a escolha deste intervalo.

Considera-se também que a prática de separar as ofertas em trânsito e as disponíveis nas estações pode conduzir a uma confiabilidade maior nas previsões. As ofertas em trânsito podem ser previstas pelo Centro de Controle Operacional da Regional, o qual tem uma melhor visão de todo o sistema e do seu desempenho global.

As ofertas disponíveis em cada estação, bem como as demandas, podem ser melhor previstas pelos "agentes locais", os quais, tendo acesso e conhecendo os clientes da ferrovia, avaliam melhor os seus pedidos e podem consultá-los sobre a liberação de vagões. Outrossim, os agentes locais têm um maior conhecimento do estado de conservação e necessidades de manutenção dos vagões, podendo ou não liberá-los para a operação em função do estado em que se encontrem.

O modelo considera então duas matrizes de ofertas/demandas, as quais são então somadas, constituindo a matriz de ofertas e demandas totais nos diversos terminais ou estações do sistema ferroviário.

Considera-se como executáveis apenas os movimentos de vagões ordenados no primeiro intervalo de horizonte de planejamento. As ordens dos intervalos posteriores são tomadas apenas como indicações, de modo a preparar ou viabilizar decisões futuras que poderão ser confirmadas ou indicadas pelo processamento efetuado no início de um novo ciclo de planejamento, onde as ofertas e demandas previstas anteriormente são ajustadas.

A partir desta sistemática de processamento, o modelo cria um arquivo apenas com as ordens de movimento dadas no primeiro intervalo do horizonte de planejamento. Este arquivo representa a matriz das ofertas em trânsito para o próximo ciclo de planejamento.

Embora as superintendências da RFFSA - Rede Ferroviária Federal S.A. tenham apontamentos de custos (combustíveis, salários, fretes, etc.), estes dados ainda não têm um uso freqüente nestas superintendências, também não há dados sobre os custos de estoque em cada estação. Outrossim, o custo da demanda não atendida não é quantificado. O custo da falta de um vagão poderia ser aproximado pela receita do frete, mas também o custo eventual de perder um determinado cliente deveria ser levado em conta.

Tendo em vista que esses custos não são disponíveis na RFFSA, propõe-se a solução clássica, ou seja, de considerar os custos de transporte proporcionais às distâncias entre as estações. Em relação aos custos de estocar um vagão ou não atender à demanda (faltar um vagão) há que se arbitrar valores. Sugere-se, para o custo de estocar um vagão, um

valor abaixo do menor custo de transporte entre duas estações. Para o custo de faltar um vagão, ao contrário, sugere-se um custo acima do maior custo de transporte verificado no sistema. Deste modo, na solução encontrada, nunca haverá uma estocagem desnecessária, em vista do alto custo atribuído à demanda não atendida. Esta abordagem, embora em termos práticos atenda a solução de custo mínimo, tem a desvantagem implícita de não apresentar os reais custos de movimentação dos vagões vazios.

Em relação aos tempos de viagem entre as estações do sistema ferroviário, os mesmos devem ser aproximados para unidades inteiras do intervalo ou período de planejamento. Esta aproximação deverá sempre ser para mais, de modo a levar em consideração os tempos gastos na baldeação dos vagões em trânsito.

Os critérios e procedimentos sugeridos foram considerados viáveis de serem implantados no sistema ferroviário brasileiro, conforme levantamentos efetuados em visitas às Regionais de São Paulo e do Paraná da RFFSA e também com base na leitura de diversos documentos operacionais elaborados pela RFFSA.

4.8.2 - A APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO

Conforme mencionado, a partir do exame da Figura 4.8, das origens e destinos dos trens e da importância relativa de cada estação no sistema, foi escolhida a configuração mostrada na Figura 4.9. As estações mostradas nesta figura foram consideradas estações centralizadoras das ofertas e demandas, segundo a metodologia preconizada.

É importante ressaltar desde logo que a configuração mostrada na Figura 4.9 pode não ser a melhor e nem representar as necessidades reais do sistema ferroviário em questão. Procurou-se apenas, além dos critérios mencionados no parágrafo anterior, abranger toda a região mostrada na Figura 4.8. Também ressalva-se aqui que as ofertas e demandas não são reais. Todavia, para efeitos didáticos e para mostrar a exequibilidade da metodologia proposta, considerou-se o exemplo adequado.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 do item 4.7.1 estão listadas e numeradas as estações do exemplo e os tempos de viagem considerados com as distâncias entre as estações. Estes dados foram obtidos da configuração física do sistema mostrado na Figura 4.9.

O custo de transportar um vagão vazio entre um par qualquer de estações foi tomado igual à distância entre elas. Para os custos de estocar e de faltar um vagão numa estação qualquer foram arbitrados, na falta de valores reais consistentes, os valores 20 e 2000. Estes custos foram tomados iguais para todas as estações, embora nada impeça que os mesmos sejam diferenciados.

No Apêndice A.2 é apresentada a saída completa do processamento do caso exemplo (dados, relatório dos arcos e resultados).

Como ilustração, processou-se o mesmo exemplo mostrado no Apêndice A.2, apenas alterando o custo de falta na estação nº 1 de 2000 para 3000 (exemplo 1) e após (exemplo 2) criando um nó fictício para o exemplo 1, no caso o nó 8, o qual corresponde a um cliente especial localizado na estação nº 2 e cujo custo de falta é também 3000. As demandas nos 5 dias de planejamento para este cliente são: 0, 0, 0, 0, -4. Os resultados destes processamentos (somente relatórios de movimentos e de faltas) são mostrados no Apêndice A.3, onde se pode verificar o redirecionamento dos vagões vazios, de modo a não haver faltas na estação nº 1 (exemplo 1) e para o cliente especial (exemplo 2). De fato, a demanda não atendida de 8 vagões na estação nº 1 (exemplo 1), no último dia do horizonte de planejamento, foi redistribuída entre as estações de números 3 (passou a ter falta de 3 vagões) e 4 (aumentou a sua deficiência de 1 vagão) no dia 4 e a estação nº 2, que passou a ter uma deficiência de 4 vagões no dia 5. No exemplo 2, observa-se que no dia 4 a estação nº 3 aumentou a sua deficiência de 1 vagão e no dia 5 a estação nº 1 passou a ter falta de 3 vagões, enquanto que a demanda de 4 vagões da estação nº 2 passou para a estação de nº 8 (cliente especial), demanda esta atendida no dia 4.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

- ALLMAN, W.P. (1972), An optimization approach to freight car allocation under time-mileage per diem rental rates, *Management Science*, Vol. 18, Nº 10, Junho.
- AVI-ITZHAK, B., BENN, B.A. e POWELL B.A. (1967), Car Pool Systems in Railroad Transportation: Mathematical Models, *Management Science*, Vol. 13, Nº 9, Maio.
- BAZARAA, M.S. e JARVIS, J.J. (1977), *Linear Programming and network flows*, John Wiley e Sons.
- DECISIONS SYSTEMS ASSOCIATES INC. (1978), Computer Based Model for Optimal Freight Car Distribution, FRA Contract DOT-FR-65140.
- DECISIONS SYSTEMS ASSOCIATES INC. (1978), Implementation Studies via Simulation of the Computer-Based Model for Freight Car Distribution, Report prepared for U.S. Department of Transportation, FRA, DSAI, Rockville.
- DEJAX, P.J. e CRAINIC, T.G. (1987), A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation, *Transportation Science*, Vol. 21, Nº 4, Novembro.
- FORD, L.R. e FULKERSON, D.R. (1962), *Flows in Networks*, Princeton University Press.

- GIGON, J.M. e SCHLAEPFER, F. (1967), The allocation of empty wagons by means of an electronic computer, *Monthly Bulletin of the I.R.C.A.*, V.IV, Nº7, 287-308.
- GLICKMAN, T.S. e SHERALI, H.D. (1985), Large-scale network distribution of pooled empty freight cars over time, with limited substitution and equitable benefits, *Transportation Research*, Vol. 19B, Nº 2, pág. 85-94.
- HAGHANI, A.E. (1989), Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model, *Transportation Research*, Vol. 23B, Nº 6, pág. 433-452.
- HERREN, H. (1973), La Répartition des Wagons Vides par EEG - Un Modele Analytique des CFF, *Rail International*, 4(10/11), Outubro/Novembro.
- HERREN, H. (1977), Computer-controlled Empty Wagon Distribution on the SBB, *Rail International*, Janeiro, pág. 25-32.
- JORDAN, W.C. e TURNQUIST, M.A. (1983), A Stochastic, Dynamic Network Model for Railroad Car Distribution, *Transportation Science*, Vol. 17, Nº 2, Maio.
- KIKUCHI, S. (1985), Empty freight car dispatching model under freight car pool concept, *Transportation Research*, Vol. 19B, Nº 3, pág. 169-185.
- LEAL, J.E. (1986), Um modelo heurístico para determinar o fluxo de vagões vazios numa rede ferroviária, Departamento de Engenharia Industrial, PUC, Rio de Janeiro.
- LEDDON, C.D. e WRATHALL, E. (1968), Scheduling Empty Freight Car Fleets on the Louisville and Nashville Railroad, *Cybernet. Electron. Railways* 3.
- MENDIRATTA, V.B. e TURNQUIST, M.A. (1982), A Model for the Management of Empty Freight Cars, *Transportation Research Record* 838, pág. 50-55.
- MISRA, S.C. (1972), Linear Programming of Empty Wagon Disposition, *Rail Int.* 3, pág. 151-158.
- NETO, P.O.B. (1979), Teoria e Modelo de Grafos, Editora Edgard Blucher Ltda..
- OUIMET, G.P. (1972), Empty Freight Car Distribution, Tese de Mestrado, Queen's University, Kingston, Ontario, Canadá.
- PHILIP, C.E. e SUSSMAN, J.M. (1977), Inventory Model of the Railroad Empty Car Distribution Process, *Trans. Res. Rec.* 656, pág. 52-60.
- RATCLIFFE, L.L., VINOT, B. e SPARROW, F.T. (1984), Optimal Prepositioning os Empty Freight Cars, *Simulation*, pág. 269-275.
- WHITE, W.W. e BOMERAULT, A.M. (1969), A Network Algorithm for Empty Freight Car Allocation, *IBM Syst. J.* 8, pág. 147-169.

WYRZYKOWSKI, W. (1961), The Circulation of Empty Wagons in Railway Networks, Monthly Bulletin of the I.R.C.A., V.XXXVIII, N°2, 79-128.

BIBLIOGRAFIA NÃO REFERENCIADA

ASSAD, A.A. (1978), Multicommodity Network Flows - A Survey, Networks, V.8, 36-89.

BEURRIER, A., DEMOTA, Ph., LEVINE, P. e POMEROL, J.-Ch. (1990), Distribution of Empty Railcars by an Expert System: A Case Study with Comparison with OR Approches, J. Opl. Res. Soc., Vol.41, N°6, 527-537.

COOPER, L. e LEBLANC, L.J. (1977), Stochastic Transportation Problems and other Network related Convex Problems, N.R.L.Q., N°24, 327-337.

GOTTFRIED, G. (1968), The Distribution of Empty Transport Units in the Railway Network, Monthly Bulletin of the I.R.C.A., V.V, N°11, 395-412.

JOHNSON, J.W. e KOVITCH, E.M. (1963), Freight Car Distribution: The Nature of the Problem, CORS Journal, V.I, N°1, 27-38.

KONYA, H. (1967), An Algorithm for Freight Car Dispatchings, Bull. I.R.C.A., V.4, 381-384.

KOOMANOFF, F.A. e BONTADELLI, J.A. (1967), Computer Simulation of Railroad Freight Transport Operations, The Journal of Industrial Engineering, Vol. XVIII, N° 1, Janeiro, pág. 3-8.

MAGNANTI, T.L. e WONG, R.T. (1978), Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms, Transportation Science, pág. 1-55.

MALONE, F. (1979), How SP cuts Empty-Car Miles, Railway Age, October, 48-50.

MARTENS, A. (1967), Mathematical Models for the Problems of Routing Wagons between Marshalling Yards, Bull. I.R.C.A., V.4, 145-155.

MILLER, E. (1976), Linear Programming Simulation of Routing Empty Railroad Cars, Trans.Res.Rec. 577, 35-43.

PETERSEN, E.R. e FULLERTON, H.V. (1973), Un modèle d'optimisation de réseau pour les Chemins de fer Canadiens, Rail International, Dezembro, pág. 1205-1210.

CAPITULO 5

DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES

5.1 - O PROBLEMA DA DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES

Ao contrário dos vagões vazios, a distribuição de vagões tanques refere-se à distribuição desses vagões carregados com combustível, a partir de uma refinaria para vários pontos ou terminais do sistema ferroviário onde encontram-se localizados os depósitos das empresas distribuidoras, de onde, então, são redistribuídos em caminhões tanques para os diversos pontos de venda.

No caso da Rede Ferroviária Federal S.A. - RFFSA, o transporte de combustíveis constitui-se numa das principais fontes de receita de algumas de suas regionais. Na regional de Curitiba, que será utilizada para descrever o problema e exemplificar a metodologia proposta, o transporte de combustíveis representa aproximadamente 50% da receita total de transporte e 30% da TKU transportada.

Não só pela importância no percentual da receita, mas também pelas suas características estratégicas e políticas, a distribuição de vagões tanques tem que ter uma alta confiabilidade.

O suprimento tem sido assegurado pela ferrovia. Todavia, estima-se que a introdução de métodos de otimização, que racionalizem o planejamento da distribuição de vagões tanques possa, além de aumentar a segurança no suprimento, introduzir significativas economias no processo. Essas economias, a exemplo das que têm sido verificadas no processo de distribuição de vagões vazios, podem se dar numa possível diminuição da frota de vagões tanques e, certamente, nas despesas operacionais, evitando-se movimentos desnecessários de vagões, vagões e trens extras, despesas com horas extras de pessoal, entre outros itens.

O problema da distribuição de vagões tanques consiste no suprimento de derivados de petróleo a várias distribuidoras localizadas em diversos pontos ou pátios do sistema ferroviário. Atualmente é feita uma reunião mensal no Rio de Janeiro pelo Departamento Nacional de Combustíveis (DNC), onde são estabelecidas as previsões de consumo mensal por região e a divisão deste volume entre as modalidades de transporte. Assim, cada regional da RFFSA sabe quantos m³ de combustível irá transportar no mês e

conseqüentemente pode calcular a média de vagões mensais e até mesmo diários que precisarão circular para atingir o nível de produção estipulado. Entretanto, a demanda das companhias distribuidoras não ocorre de forma determinística ao longo do mês. Os pedidos diários, no caso do exemplo da regional de Curitiba, são controlados por um "pool" formado pelas companhias distribuidoras, cuja gerência fica em Araucária (refinaria). Recebidos os vagões tanques num pátio qualquer, o combustível por eles transportado é então passado para os tanques ou depósitos das respectivas companhias distribuidoras. Se o depósito de uma dessas companhias estiver cheio, os vagões tanques a ela destinados ficam à sua disposição no pátio, não sendo cedidos a uma outra companhia cujo depósito esteja vazio ou com sua capacidade incompleta. Para se protegerem de eventuais faltas as distribuidoras, de um modo geral, adotam a política de inflacionar os pedidos, pois não pagam o aluguel dos vagões cheios estacionados nos pátios. Outrossim, devido à crônica e alta inflação que se tem verificado no Brasil nos últimos anos, as companhias distribuidoras, quando prevêm algum aumento nos preços dos combustíveis, antecipam os seus pedidos. Esta política, evidentemente, causa um enorme desequilíbrio no sistema de suprimento e distribuição da companhia ferroviária. Além disso, os pedidos são feitos diariamente, sem qualquer esquema de previsão, o que dificulta ainda mais o atendimento da demanda.

Neste quadro, a companhia ferroviária não tem conseguido racionalizar a sua oferta e os seus serviços, procurando, a qualquer custo, atender a demanda. Um mau serviço prestado pela ferrovia teria como conseqüências, além da perda de receita, a perda do cliente que poderia recorrer a outra modalidade de transporte, no caso, o caminhão tanque. Apresenta-se, portanto, uma metodologia visando a racionalização do processo da distribuição de vagões tanques, tanto em relação à demanda das companhias distribuidoras quanto em relação aos serviços da ferrovia.

5.2 - A METODOLOGIA PROPOSTA PARA A DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES

A metodologia proposta visa, portanto, racionalizar o atendimento da demanda, garantindo um suprimento mínimo a cada cliente, em cada pátio, em níveis estratégicos, de modo a evitar o transtorno da falta de combustível, como também o fornecimento em excesso além das necessidades do cliente.

O que se propõe é, basicamente, dividir o tanque ou depósito de combustível de cada uma das companhias distribuidoras em níveis estratégicos e estabelecer prioridades de abastecimento para cada um desses níveis. Para exemplificar suponha-se que o depósito do

cliente A numa estação E tenha sido dividido em três partes (não necessariamente iguais), como mostrado na Figura 5.1 abaixo:

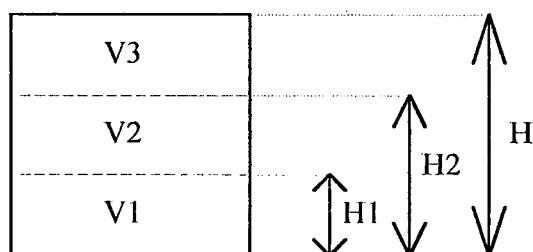


Figura 5.1 - Divisão do Depósito do Cliente A na Estação E em Níveis Estratégicos

Assim, quanto mais baixo estiver o nível do depósito, maior será a prioridade de atendimento. Contudo, se o nível for inferior a $H1$, a ferrovia procurará completar o volume $V1$, e somente atenderá as demandas dos volumes $V2$ e $V3$ se algum outro cliente, em qualquer pátio, não estiver com o nível de seu depósito, inferior ao nível estratégico mais baixo deste depósito. Deste modo o suprimento dará prioridade aos níveis mais baixos de todos os clientes, prosseguindo para os níveis mais elevados do mesmo modo, até esgotar a oferta. Procedendo desta maneira, os pedidos dos clientes vão sendo satisfeitos em ordem de prioridade, procurando-se evitar que um cliente, na iminência de ficar sem combustível, tenha de ser atendido a qualquer custo, enquanto outro mantém estoques de vagões tanques no pátio. Ou, evitando-se situações em que um cliente, com o tanque cheio ou quase cheio, tenha também que ser atendido a qualquer custo.

A divisão dos tanques ou depósitos pode ser feita num número qualquer de níveis estratégicos (os volumes contidos podem ou não ser iguais). Esta divisão pode também variar de cliente para cliente e de pátio para pátio, dependendo do volume total de cada depósito. Embora arbitrária, algumas variáveis podem ser consideradas na divisão dos depósitos: a) o volume total do tanque; b) a capacidade de suprimento, medida em número de dias (ou um outro intervalo de tempo), de cada volume estratégico; c) o tempo de atendimento dos pedidos dos vagões tanques; e) o maior trabalho de manuseio de dados e análise de resultados quando se incrementa o número de divisões. Outrossim, cada divisão funciona como se fosse um cliente diferente, o que aumenta consideravelmente o número de nós e arcos da rede espaço-tempo que será proposta.

Assim, para efeito de aplicação do algoritmo de otimização (algoritmo out-of-kilter) tudo se passa como se o cliente A (Figura 5.1) fosse transformado em três outros

clientes: A1, A2 e A3, cujos tanques têm volumes $V1$, $V2$ e $V3$ e custos de suprimento, a partir da refinaria, $C1$, $C2$ e $C3$, com $C1 < C2 < C3$.

Como no caso dos vagões vazios, a distribuição de vagões tanques se fará no espaço e no tempo, a custo mínimo, dentro de um horizonte de planejamento. Este horizonte de planejamento deverá ser, no mínimo, igual ao maior tempo de viagem entre a refinaria e uma estação qualquer do sistema ferroviário. Há necessidade então de se fazer previsões da demanda em cada um dos períodos do horizonte de planejamento.

Considerando o tanque do cliente A da estação E mostrado na Figura 5.1 suponha-se, como exemplo, que os níveis previstos pelo próprio cliente neste tanque nos dias $T1$, $T2$ e $T3$ (num horizonte de planejamento de 3 dias) sejam $N1$, $N2$ e $N3$, conforme indicado na Figura 5.2.

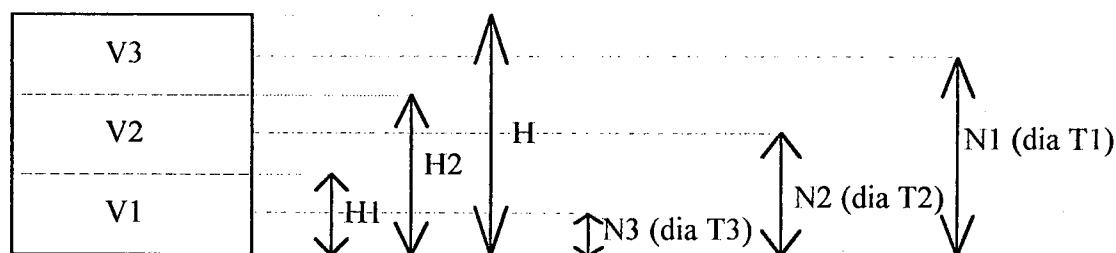


Figura 5.2 - Níveis Previstos no Tanque do Cliente A na Estação E nos Dias $T1$, $T2$ e $T3$ ($N1$, $N2$ e $N3$)

Na aplicação da metodologia considera-se que o cliente faz a previsão dos níveis, considerando apenas o consumo estimado para cada um desses três dias, com base na sua experiência. Nesta previsão, o cliente não considera o quanto solicitou no dia $T0$ (ou em dias anteriores) e, nem mesmo, o quanto lhe foi realmente enviado pela ferrovia. A ferrovia, contudo, corrige os níveis fornecidos pelo cliente em função do que efetivamente lhe remeteu no dia $T0$ (ou em dias anteriores, considerando o tempo de viagem). É conveniente ressaltar que no dia $T0$ a ferrovia planeja a distribuição de vagões tanques nos dias $T0$, $T1$ e $T2$, mas somente executa as ordens do dia $T0$. As ordens dos dias $T1$ e $T2$ são tomadas apenas como indicativos de movimentos futuros. Generalizando, apenas as ordens do primeiro período do horizonte de planejamento são cumpridas, enquanto as ordens dos períodos posteriores terão de aguardar confirmação, mas servem como indicativos de providências a serem tomadas, evitando-se surpresas.

A partir das informações dos níveis dos depósitos em cada período do horizonte de planejamento há necessidade de transformar essas informações em demandas de vagões tanques. Estas demandas deverão ser calculadas, a partir do nível informado, para cada uma das partes em que o depósito foi dividido. Assim, considerando, como já foi dito, que o volume V1 é do cliente A1, o volume V2 do cliente A2 e assim por diante, os volumes demandados desses clientes nos dias T1, T2 e T3 serão (ver Figura 5.2):

a) demandas no dia T1

Cliente A1 - demanda 0 (zero)

Cliente A2 - demanda 0 (zero)

Cliente A3 - demanda igual ao volume compreendido entre os níveis H e N1

b) demandas no dia T2

Cliente A1 - demanda 0 (zero)

Cliente A2 - demanda igual ao volume compreendido entre os níveis H2 e N2

Cliente A3 - demanda igual ao volume V3

c) demandas no dia T3

Cliente A1 - demanda igual ao volume compreendido entre os níveis H1 e N3

Cliente A2 - demanda igual ao volume V2

Cliente A3 - demanda igual ao volume V3

Os volumes acima demandados podem ser transformados em unidades de vagões tanques, bastando dividi-los pela capacidade do vagão tanque padrão da companhia ferroviária e fazendo-se as aproximações necessárias para os inteiros mais próximos.

A partir da previsão dos níveis, o próprio sistema computacional poderá transformar essas informações em demandas de vagões tanques, para cada uma das partes em que o depósito de combustível foi dividido. Embora se proponha este procedimento, por ser mais fácil e prático do ponto de vista das previsões dos clientes, não se desenvolverá neste trabalho o programa computacional para fazer a transformação preconizada. No exemplo de aplicação, as demandas serão dadas diretamente em unidades de vagões tanques.

Em relação à oferta, a responsabilidade de sua determinação ou previsão é da própria companhia ferroviária. Esta oferta será computada a partir dos vagões estacionados na refinaria e da previsão dos vagões que estarão retornando à refinaria. Para esta última determinação, o controle central da ferrovia entrará em contato com cada pátio ou terminal do sistema ferroviário, de modo a fazer a sua previsão com base nas informações de liberação de vagões tanques pelas companhias distribuidoras.

Portanto, nos pátios ou terminais (clientes) haverá apenas demandas e na refinaria apenas ofertas. Estes dados formam a matriz de oferta/demanda. Tem-se ainda dados de vagões em trânsito (ofertas), ou seja, os vagões tanques efetivamente enviados aos clientes. Estes dados formam a matriz de vagões em trânsito. Estas matrizes serão estabelecidas de tal modo que tenham a mesma dimensão, sendo então somadas, obtendo-se uma matriz de ofertas/demandas, conforme se mostrará no próximo item.

O problema fica então bastante parecido com o da distribuição de vagões vazios. No espaço e no tempo, a partir das ofertas da refinaria, procurar-se-á satisfazer as demandas dos clientes, a um custo mínimo. O algoritmo out-of-kilter pode portanto ser utilizado para fazer esta distribuição a custo mínimo. A rede espaço-tempo, contudo, terá que ser ajustada para as peculiaridades do problema em foco. Os critérios, as suposições e os procedimentos que nortearam o estabelecimento da metodologia de distribuição de vagões vazios, conforme visto no capítulo anterior, são também válidos para a distribuição de vagões tanques, cujo sistema é igualmente dinâmico e auto-alimentado. Outrossim, as considerações sobre custos de transporte, tempos de viagem, intervalos e horizonte de planejamento são igualmente válidas, bem como as considerações sobre as previsões das ofertas e das demandas.

5.3 - A REDE ESPAÇO-TEMPO E O PROGRAMA COMPUTACIONAL

A metodologia de criação da rede espaço-tempo para a distribuição de vagões tanques é a mesma descrita no item 4.6.1 para o caso da distribuição de vagões vazios, muito embora não seja necessária a criação de nós e arcos fantasmas e de arcos de falta. Estes nós e arcos foram criados, no caso da distribuição de vagões vazios, no intuito de acrescentar à demanda de cada dia as demandas não atendidas do dia anterior. No caso dos vagões tanques não há esta necessidade, pois a previsão do nível dos depósitos em cada período do horizonte de planejamento já leva em conta, implicitamente, a demanda do período anterior (tendo em vista que o cliente, no decorrer do horizonte de planejamento, vai diminuindo o nível do depósito em função da sua previsão de fornecimento de combustível e sem fazer qualquer correção ou consideração sobre os seus pedidos à ferrovia).

Cada divisão do tanque de uma companhia distribuidora será considerada como um cliente. O número de nós da rede espaço-tempo será o somatório do número de clientes em todas as estações do sistema ferroviário, acrescido de uma unidade referente à refinaria. Os nós serão numerados de 1 a N, sendo este último destinado obrigatoriamente à refinaria (devido ao esquema de desenvolvimento do programa computacional). A expansão dessa rede espacial no tempo se dará, como no caso dos vagões vazios, de cima para baixo e da esquerda para a direita. Assim, por exemplo, o nó 1 no dia 2 (supondo que o período de planejamento seja 1

dia) terá a numeração $(N+1)$, o nó 2 terá a numeração $(N+2)$ e assim sucessivamente até o nó N , que terá o número $(2xN)$. No dia 3 o nó 1 terá a numeração $(2xN+1)$, o nó 2 a numeração $(2xN+2)$ e assim por diante até o último dia do horizonte de planejamento. Se este horizonte for de T dias, o nó N , ou seja, a refinaria, terá a numeração $(N \times T)$.

Estabelecidos os nós, o próximo passo é ligá-los entre si através de arcos (na realidade o programa computacional faz a expansão da rede criando nós e arcos simultaneamente). Tendo em vista o problema em foco, só existem arcos de movimento (ligando a refinaria aos clientes) e arcos de estoque (ligando a refinaria a ela mesma). É de se notar que os nós que representam os clientes não podem ter oferta; eles tem oferta nula ou alguma demanda e, portanto, não faz sentido ter arcos que permitam movimentos de vagões entre os clientes. Os nós que representam a refinaria são ligados entre si por arcos de estoque, de modo a permitir que a oferta remanescente de um determinado dia seja acrescida à do dia seguinte.

De modo a exemplificar, considere-se a Figura 5.3 onde se representa os arcos de movimento e estoque para o caso de 3 clientes, supondo-se que o tempo de viagem da refinaria para o pátio de cada cliente seja de 1 dia e que o período e o horizonte de planejamento sejam de 1 e 4 dias, respectivamente. Haverá então 16 nós, conforme mostrado na Figura 5.3, onde também aparecem os 12 arcos da rede espaço-tempo representada (os números dos arcos estão sobre as suas setas indicativas).

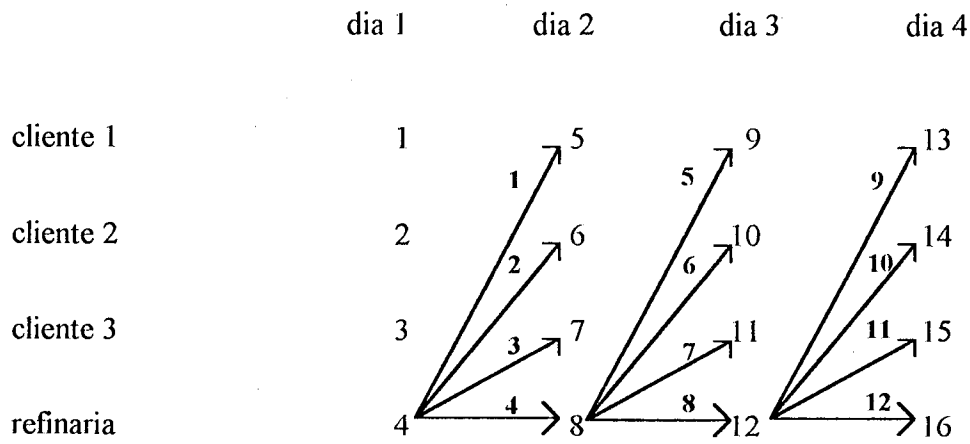


Figura 5.3 - Rede Espaço-Tempo para a Distribuição de Vagões Tanques (Horizonte de Planejamento de 4 dias)

Nota-se, na Figura 5.3, que os nós 1, 2 e 3, embora representem os clientes 1, 2 e 3 no primeiro dia do horizonte de planejamento, não estão ligados a qualquer outro nó e não irão aparecer na rede espaço-tempo. Do mesmo modo, se o tempo de viagem da refinaria ao

pátio do cliente 1 fosse de 2 dias o nó 5 não estaria ligado a nenhum outro, conforme mostrado na Figura 5.4 a seguir e também não apareceria na rede. Todavia é conveniente a representação desses nós, pois possibilita a compreensão do programa computacional e uma análise mais detalhada dos resultados. Para o gerente, entretanto, basta um relatório compacto com as ordens de movimento, podendo dispensar a figura da rede espaço-tempo.

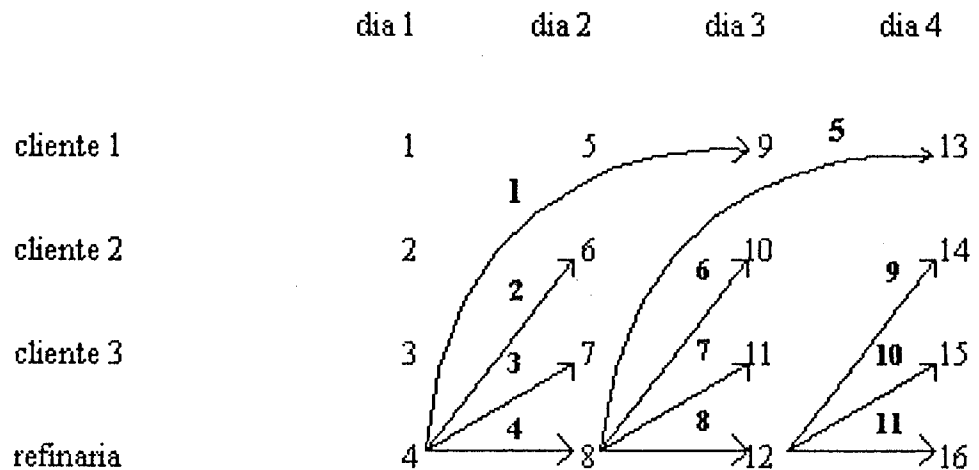


Figura 5.4 - Rede Espaço-Tempo para a Distribuição de Vagões Tanques (horizonte de Planejamento de 4 dias com Tempo de Viagem Superior a 1 dia)

Verifica-se também que a rede representada na Figura 5.4 tem 1 arco a menos do que a da Figura 5.3.

Às redes representadas nas Figuras 5.3 e 5.4 faltaria ainda acrescentar os nós representativos do super-sumidouro e da super-fonte (os quais teriam números 17 e 18, respectivamente), além dos arcos de retorno (ligando o super-sumidouro à super-fonte), os arcos de oferta ou suprimento (ligando a super-fonte aos nós com oferta), os arcos de demanda (ligando os nós com demanda ao super-sumidouro) e, finalmente, os arcos de empréstimo (ligando a super-fonte a todos os nós do último período do horizonte de planejamento). Conforme visto anteriormente (item 4.6.1) estes arcos têm as seguintes capacidades, custos e finalidades:

* arcos de retorno: capacidade infinita e custo negativo infinito e têm o objetivo de forçar a rede a executar todas as alocações viáveis.

* arcos de oferta ou suprimento: capacidade igual à oferta e custo zero e têm o objetivo de acrescentar as ofertas aos nós.

* arcos de demanda: capacidade igual à demanda e custo zero e têm o objetivo de acrescentar as demandas aos nós.

* arcos de empréstimo: capacidade infinita e custo igual ao custo de falta (não necessariamente) e têm o objetivo de identificar as faltas.

Em relação aos arcos de movimento e estoque, estes têm capacidade infinita e custos de movimentar ou transportar um vagão, no caso dos arcos de movimento, e de estocar um vagão no caso respectivo, custos estes que têm que ser determinados pela ferrovia.

Na Figura 5.6, relativa à rede espaço-tempo do exemplo de aplicação (item 5.4), são mostrados os nós e arcos referenciados acima.

Para fazer a distribuição de vagões tanques, de acordo com os objetivos mencionados anteriormente, foi desenvolvido o programa VAGTANQ (VAGões TANQue). Este programa é muito semelhante ao programa VAGZIOS (VAGões vaZIOS) descrito no item 4.7.1. O programa VAGTANQ, cuja listagem e arquivos estão apresentados no Apêndice B.1, foi documentado de forma que um programador com razoável experiência possa entendê-lo e adaptá-lo às necessidades de entrada e saída e também ao sistema operacional em questão. O programa trabalha com três arquivos: ARCOTANQ, TRANSTQE e STOPTANQ. Os outros dados, que identificam o processamento e suas opções são informados ao programa via teclado.

No arquivo ARCOTANQ são dados os números de nós e de arcos, o custo de empréstimo (arcos de empréstimo) e o número de estações e de clientes, bem como os seus respectivos nomes. Outrossim, são dados índices que permitem ao programa relacionar os nós a cada estação e a cada cliente. São também dadas as características de cada arco da rede física: origem e destino, custo de transportar ou estocar um vagão tanque, capacidade e tempo de viagem, de modo que o programa possa expandir a rede física no tempo, a partir do horizonte de planejamento, cuja informação é dada via teclado.

O arquivo TRANSTQE representa a matriz de vagões em trânsito (ofertas), ou seja, os vagões tanques efetivamente enviados aos clientes.

O arquivo STOPTANQ, por sua vez, representa a matriz de demandas dos clientes e de oferta de vagões tanques estacionados na refinaria. Estas duas matrizes são então somadas, obtendo-se as demandas e ofertas finais que serão consideradas na distribuição.

Em relação à saída do programa, é opcional a listagem dos dados e do relatório dos arcos (é importante para o entendimento do programa, mas não é útil para decisões operacionais, pois os resultados vêm condensados no relatório de movimento e no balanço da movimentação de vagões). O relatório de movimentos indica quantos vagões tanques foram enviados pela refinaria para cada divisão do depósito de cada cliente, em cada pátio ou

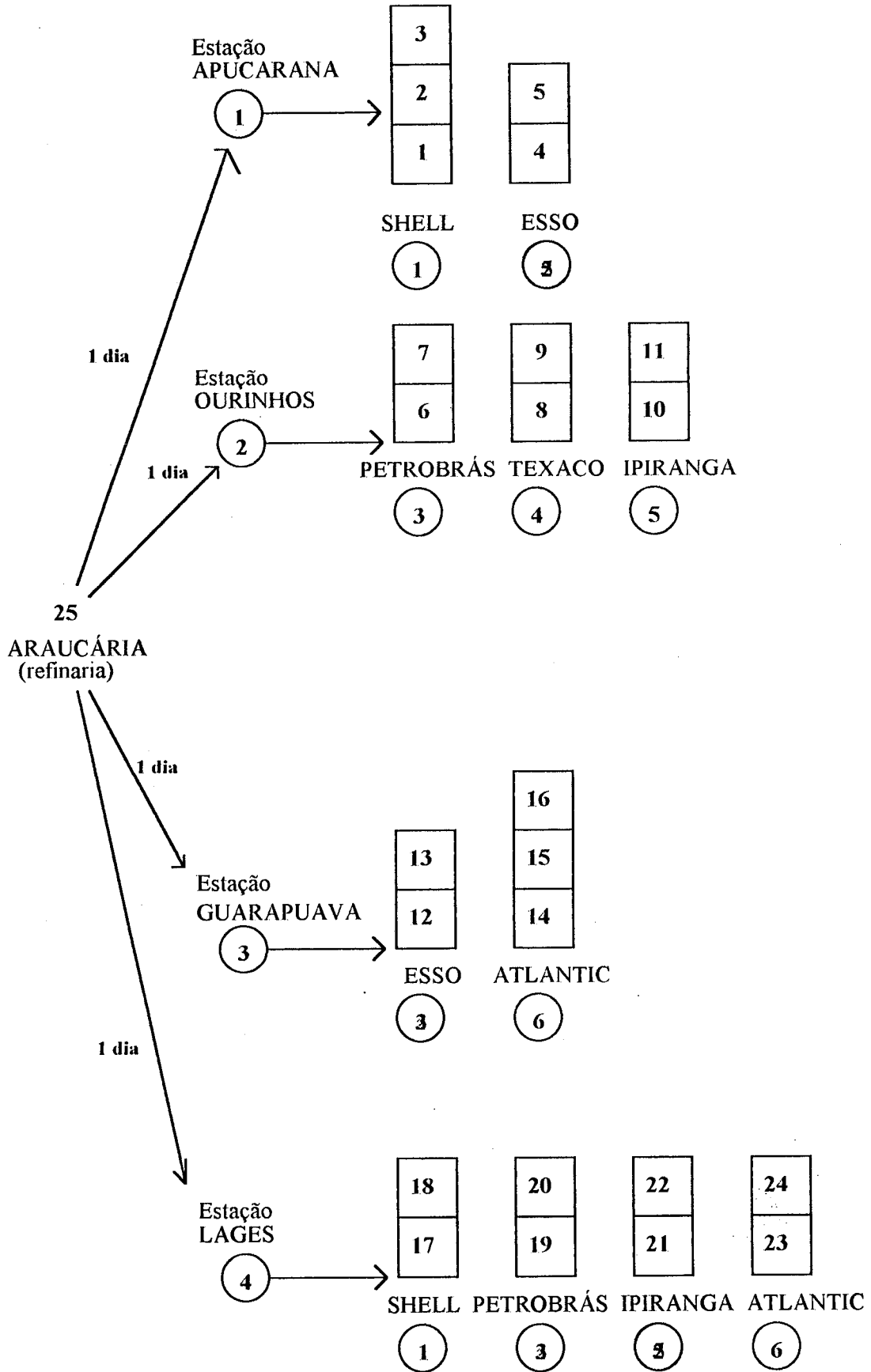
estação. O balanço da movimentação indica, por estação e por cliente, o quanto foi pedido, o quanto foi enviado e o quanto faltou. Também é listada a matriz resultante das ordens de movimentos do primeiro dia. Esta matriz poderia também sair em forma de arquivo de dados, constituindo-se na matriz ou arquivo TRANSTQE, a ser utilizado no próximo ciclo de planejamento.

5.4 - A APLICAÇÃO DO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES TANQUES

O exemplo da aplicação é hipotético, tendo em vista a dificuldade de obtenção de dados e mesmo porque, devido à concorrência entre as companhias distribuidoras, o "pool" mantém em sigilo os níveis de estoque dos depósitos de cada companhia, informando à ferrovia apenas o total demandado. Procurou-se, no entanto, utilizar estações que realmente fazem parte do sistema ferroviário de distribuição de vagões tanques subordinado à regional de Curitiba da Rede Ferroviária Federal S.A.. Outrossim, embora os nomes das companhias distribuidoras sejam reais (preferiu-se não inventar nomes), a distribuição delas pelas estações não têm nada a ver com a realidade, bem como os pedidos. Embora fictício, o exemplo serve para mostrar a aplicabilidade da metodologia e a viabilidade de sua utilização no dia-a-dia da operação ferroviária.

Na Figura 5.5 são mostrados (hipoteticamente) as estações e as companhias distribuidoras de cada uma delas e também a estação representativa da refinaria. Em cada uma das estações o número que aparece circundado é um índice representativo da estação, enquanto os números circundados junto aos nomes das distribuidoras são índices representativos de cada uma delas. Como as divisões dos tanques dos clientes serão representados na rede espaço-tempo pelos números 1 a 24, conforme mostrado na Figura 5.5, estes índices permitirão identificar as estações e as companhias nos relatórios de saída do programa. Por exemplo, o nó 15, tem índice de estação igual a 3 e índice de cliente igual a 6, portanto ele representa o depósito (segunda divisão) de combustível da ATLANTIC na estação Guarapuava, e assim por diante. Na Figura 5.5 a refinaria é representada pelo último nó, o de número 25 (por exigência do programa).

Considerando um horizonte de planejamento de 4 dias, a rede espaço-tempo é mostrada na Figura 5.6, onde os nós, situados numa mesma horizontal, representam a mesma estação e o mesmo cliente ao longo do tempo. De modo a não sobrecarregar a Figura 5.6 são mostrados apenas alguns arcos, os quais encontram-se listados no Apêndice B.2, onde estão apresentadas as listagens de saída do exemplo de aplicação da distribuição de vagões tanques. Esta Figura, ao contrário da Figura 5.5, é apenas importante para a compreensão do programa computacional.



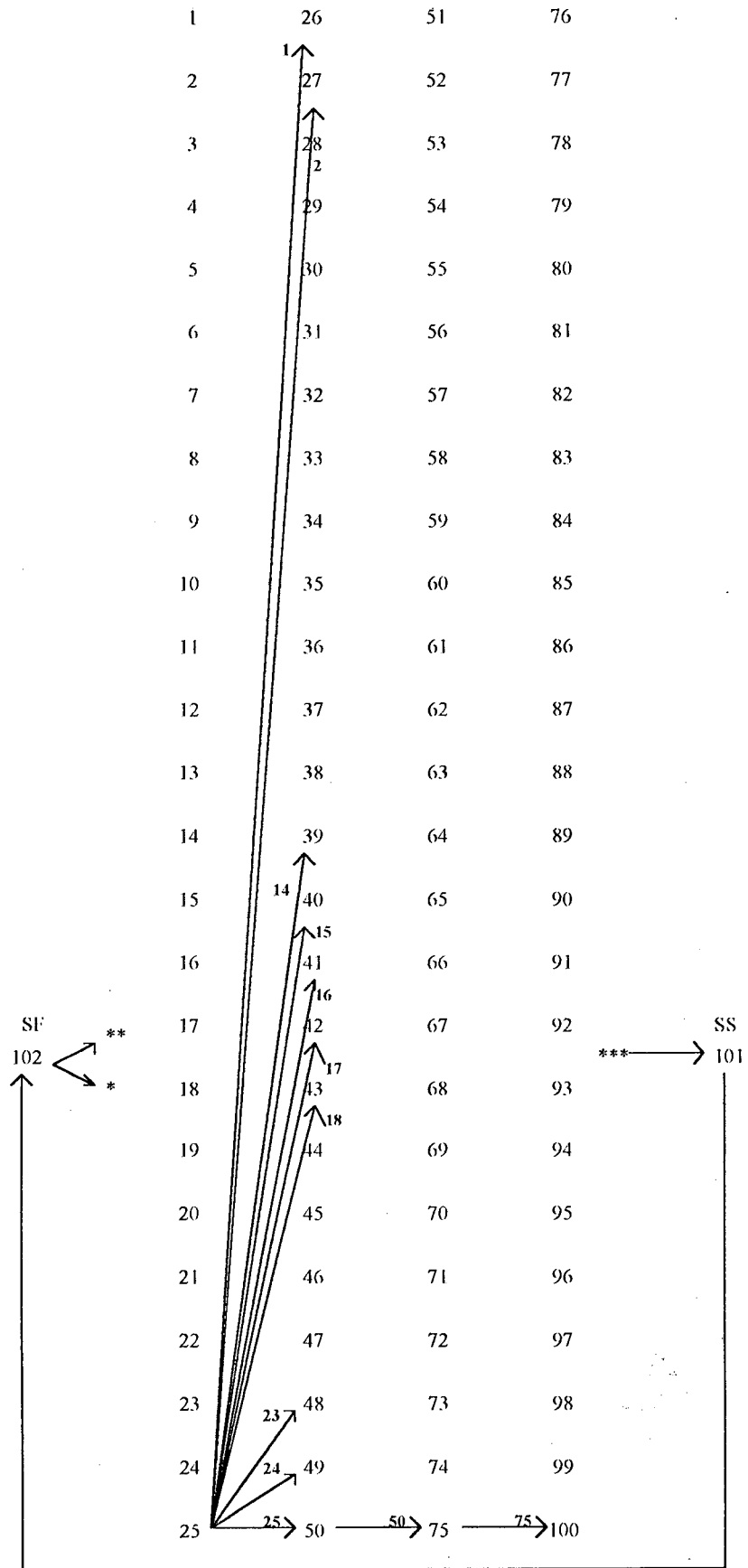
Observação: 1) Os números no interior dos círculos representam os índices indicativos das estações e dos clientes, conforme o caso; 2) Os números no interior dos retângulos representam os nós físicos da rede.

Figura 5.5 - Rede Física e Clientes do Exemplo de Distribuição de Vagões Tanques.

Tendo em vista o exemplo hipotético e a falta de dados sobre os custos de transporte e os objetivos do problema (evitar a falta de suprimento de combustível, entre outros), atribuiu-se o mesmo custo às divisões inferiores de cada depósito, independentemente da estação e do cliente, acrescentando-se 10 unidades a cada depósito situado em nível superior. Assim, por exemplo, o custo do transporte da refinaria (nó 25) para os nós 1 e 19 é de 10 unidades, para os nós 2 e 9 é de 20 unidades, para os nós 3 e 16 é de 30 unidades e assim por diante. O custo de estocar vagões na refinaria deve ser menor que o menor custo de transporte e, no caso do exemplo, foi considerado zero.

No Apêndice B.2 apresenta-se a saída do programa computacional resultante do exemplo de aplicação. Esta listagem é completa, contendo dados e resultados. Todavia, conforme já foi dito, apenas o "Relatório da Movimentação Planejada de Vagões Tanques" (acompanhado dos elementos mostrados na Figura 5.5) e o "Balanço da Movimentação de Vagões Tanques" são importantes para a decisão do gerente.

Verifica-se, conforme esperado, que o modelo faz a estocagem de vagões tanques, não os distribuindo de imediato para os níveis menos prioritários dos depósitos, quando há possibilidade de não atendimento da demanda, em períodos de tempo posteriores, nos níveis de maior prioridade dos depósitos.



* arcos de suprimento (ligam a SF aos nós com oferta (nós 25, 50, 75 e 100)

** arcos de empréstimo (ligam a SF aos nós 76 a 100)

*** arcos de demanda (ligam os nós com demanda ao SS (nós 1 a 24, 26 a 49, 51 a 74 e 76 a 99)

Figura 5.6 - Nós e Arcos da Rede Espaço-Tempo do Exemplo da Distribuição de Vagões Tanques

Verifica-se também que o modelo tem uma certa tendenciosidade, pois se não há oferta suficiente para atender as demandas de níveis de mesma prioridade dos depósitos, o modelo vai atendendo integralmente a demanda dos clientes (nós) em ordem de numeração crescente, de acordo com a entrada dos dados no programa. É o que se verifica, por exemplo, no movimento de vagões no dia 1 do horizonte de planejamento. Foram enviados para os nós 2 e 5 (vide Figura 5.5) 4 e 5 vagões, respectivamente, enquanto todos os outros nós (7, 9, 11, ..., 22 e 24), situados no mesmo nível de prioridade, não receberam nenhum vagão. Pode-se tirar partido dessa tendenciosidade do modelo, dando números mais baixos aos nós que, em igualdade de condições se deseje que sejam atendidos em primeiro lugar. Todavia, pode-se modificar o "Relatório da Movimentação de Vagões Tanques", seja distribuindo igualmente os vagões entre todos os nós (companhias distribuidoras), seja segundo algum critério estipulado pela ferrovia. Isto pode ser feito pelo gerente, que pode, inclusive, se valer de um programa computacional acoplado ao modelo e que faça automaticamente, através de uma heurística desenvolvida segundo regras pré-estabelecidas, a redistribuição dos vagões tanques. Este módulo do sistema, embora fácil de ser elaborado, não foi desenvolvido, pois depende bastante das particularidades de cada sistema ferroviário. Registra-se, no entanto, a sugestão.

BIBLIOGRAFIA NÃO REFERENCIADA

- FONSECA, A.P., REZENDE, A.E.L.M. e PEREIRA, A.L. (1992), Contribuição ao Estudo do Problema de Seqüenciamento de Entregas de Derivados de Petróleo a partir de um Centro de Distribuição, VI ANPET, Rio de Janeiro, V.1, 499-512.
- FONSECA, A.P., REZENDE, A.E.L.M. e PEREIRA, A.L. (1992), Proposta de um Modelo Integrado de Transporte e Estoque com vistas à Distribuição de Derivados de Petróleo a partir de Centros de Distribuição, VI ANPET, Rio de Janeiro, V.1, 527-540.
- LOPES, L.A.S. e FONSECA, A.P. (1992), Distribuição de Combustíveis: Transporte e Armazenagem, VI ANPET, Rio de Janeiro, V.1, 513-526.

CAPITULO 6

FORMAÇÃO DE TRENS

6.1 - ASPECTOS GERAIS SOBRE A FORMAÇÃO DE TRENS

Como em muitos outros sistemas de transportes, pode-se olhar o sistema ferroviário como uma rede. As ligações desta rede são as linhas ferroviárias onde se dá o movimento dos trens. Os nós se referem aos pátios ou estações onde ocorrem a coleta (concentração) ou distribuição do tráfego. No caso do transporte ferroviário de carga os nós representam pátios de classificação. A principal função dos pátios é reorganizar o tráfego que chega para a partida em trens que vão deixar este pátio.

Uma fonte de dificuldades no sistema ferroviário é justamente as atividades que se desenvolvem nos pátios, responsáveis por uma parte significativa dos atrasos que ocorrem no transporte da carga desde a origem até o destino. O tráfego que chega no pátio pode precisar de grande reorganização antes de ser alocado à próxima viagem. A maioria dos carregamentos ferroviários não vão diretamente da origem ao destino, e sim, geralmente, visitam um certo número de pátios intermediários. Quando um trem chega a um pátio intermediário, os vagões são retirados do trem e classificados, sendo agrupados de acordo com seus destinos. Esta consolidação de vagões em blocos permite à ferrovia tirar vantagem com a economia associada ao carregamento completo do trem. A decisão sobre quais vagões deverão ser agrupados em blocos comuns é chamada de "política de agrupamento". Cada pátio na rede tem sua política de agrupamento.

Qualquer trem que chega a um pátio possui uma "take-list" que especifica, em ordem de preferência, os grupos de vagões que podem ser utilizados para formar o trem. Isto é chamado de "política de formação" para aquele trem, pois irá determinar a sua composição. Assim, se o número de vagões do grupo preferencial da "take-list", que esperam para partir, é insuficiente para formar o trem, vagões do grupo preferencial seguinte são utilizados até a lotação completa do trem ser alcançada. Desta forma, um vagão sofre ainda atrasos na partida, como por exemplo: ele pode ter de esperar pelo próximo trem (atraso de conexão) ou pode ter de esperar até haver um número suficiente de vagões para formar o trem (atraso de acumulação).

Existe uma relação entre os custos de reclassificação e de atrasos e a economia obtida com o carregamento do trem. Assim, os planos de formação dos trens devem levar as políticas de agrupamento em consideração. Esta interação é especialmente importante no contexto de programar trens diretos ou trens longos, cujo propósito é evitar frequentes reclassificações em pátios intermediários e assim minimizar o tempo total de viagem dos vagões e o custo total de transporte. A literatura nesta área varia bastante quanto ao grau de interação alcançado entre estas duas políticas.

Conforme poderá ser observado pela bibliografia apresentada no item a seguir, os modelos de agrupamento e de formação dos trens visam o planejamento de políticas de operação para a ferrovia no médio prazo (6 a 12 meses). Estes modelos levam em consideração apenas grandes mudanças nos parâmetros do sistema e nos dados (como a sazonalidade nos volumes de tráfego e os desequilíbrios resultantes da quebra de uniformidade na distribuição geográfica das viagens) sem incorporar as mudanças do dia-a-dia na base de dados. Recompôr estas políticas em bases diárias pode resultar em confusão para o pessoal do pátio. No caso do gerenciamento da formação dos trens no dia-a-dia, as políticas de recebimento e despacho dos vagões são ditadas principalmente pelas necessidades de atendimento aos interesses dos clientes e, portanto, variam de um pátio a outro. Neste caso, o gerente desempenha um papel fundamental na determinação das ordens a serem enviadas aos pátios com o objetivo de orientar a formação dos trens.

Entretanto, para que o gerente alcance o melhor resultado na operação do dia-a-dia é necessário que ele tenha perfeito conhecimento das estratégias de agrupamento e de formação e das medidas nelas contidas, que visam o melhor desempenho e o menor custo de transporte, como por exemplo: 1) restrições de limites inferior e superior no número de vagões de um bloco já que blocos muito pequenos não são econômicos e são evitados na prática; 2) restrições refletindo a capacidade do pátio; 3) decidir se é melhor atrasar o trem caso não haja carga suficiente para sua formação e assim ter ganhos, com a lotação completa do trem, com o aumento da produtividade das locomotivas e da equipagem e perdas, pelo atraso sofrido pelos vagões, pela diminuição da qualidade do serviço oferecido ao cliente e pela menor utilização do equipamento, ou então deixar o trem partir com carga incompleta e ter ganhos com a inexistência de atrasos, mas perdas com a lotação incompleta do trem. É uma decisão que requer toda a experiência do gerente, pois tal decisão de atrasar o trem irá se refletir no serviço dos pátios subsequentes. Esta decisão ainda apresenta outros aspectos que devem ser considerados: a escolha do gerente fica bastante limitada pelo fato de ter que atender aos interesses do cliente. É preciso levar em consideração o estoque de vagões do cliente (carregados e vazios). O cliente pode precisar com urgência de um carregamento e neste caso o gerente não pode atrasá-lo, visando obter economias na formação do trem, sob o risco de perder o cliente; ou pode ocorrer que o cliente para se proteger de não ser atendido, coloque

seus próprios vagões na ferrovia e desta forma contribua bastante nos custos de congestionamento; ou ainda que a equipagem economizada com os trens completos acabe sendo ultrapassada pelas equipagens que serão necessárias para atender ao grande volume de pedidos de emergência por vagões particulares.

O objetivo que se tem no desenvolvimento do modelo de formação de trens, tratado neste capítulo, é justamente o de fornecer ao gerente da operação uma ferramenta útil e prática de ser usada no dia-a-dia, de forma a servir de apoio a uma tomada de decisão que leve a resultados de menor custo e de maior rendimento ao sistema ferroviário. Conforme já comentado no Capítulo 2, o planejamento a nível tático para a formação de trens já está contido no Plano de Transportes de cada Regional da RFFSA. Com base neste planejamento e levando em consideração as mudanças dos dados diários de carregamento, a programação e formação dos trens é reestudada para atender as necessidades de operação do dia-a-dia.

Mostra-se no item a seguir uma revisão dos principais trabalhos desenvolvidos nesta área.

6.2 - MODELOS DE FORMAÇÃO DE TRENS

Segundo ASSAD (1980, 1981), até 1981 os principais trabalhos publicados sobre o assunto foram:

- * BODIN, GOLDEN e SCHUSTER (1980) desenvolveram um modelo que visa apenas a estratégia de agrupamento e se abstrai do problema de formação. É um modelo de programação não-linear misto-inteiro e tem por objetivo determinar a política de classificação para todos os pátios do sistema ferroviário ao mesmo tempo. O modelo pode ser visto como um problema de fluxo de multicommodity com muitas restrições adicionais e para sua solução foram buscados procedimentos heurísticos. É um modelo para o nível tático.
- * SUZUKI (1973) desenvolveu um modelo que visa o planejamento de trens diretos (pátio a pátio) numa rede. É um problema de fluxo de multicommodity para cuja solução foi desenvolvido um método numérico aproximado. Muitas restrições importantes como a capacidade do pátio e o tamanho mínimo dos blocos, que estão representados no modelo de BODIN et al. (1980), não foram aqui incorporadas.
- * ASSAD (1980) propõe uma abordagem hierárquica na modelagem dos problemas e descreve um modelo que trata com o roteamento de vagões e a formação de trens do ponto de vista de fluxo em rede e otimização combinatória. É um problema de fluxo de multicommodity e indicado para o planejamento a nível tático. O autor tenta utilizar técnicas de decomposição na solução, entretanto o problema não foi resolvido.

* CHARNES e MILLER (1956) desenvolveram um modelo para a programação ótima do movimento dos trens de carga. Os autores adotaram uma formulação baseada na equipagem e não nos vagões para o movimento do tráfego. Com o uso da programação linear inteira é determinado o custo mínimo de alocação da equipagem a um conjunto de rotas possíveis. A saída é o número de equipagem-locomotivas alocado a cada ramo das rotas. Apesar de ser um modelo direcionado para o estudo da equipagem necessária, os autores analisam as decisões de despacho dos vagões e formação dos trens.

* BOURGEOIS e VALETTE (1961) apresentam uma descrição de um método prático para a formação de trens (operação nos pátios) ao mesmo tempo em que analisam outros métodos mais antigos e seus inconvenientes. O problema envolve encontrar um procedimento mais rápido e racional para movimentar os blocos de vagões das vias de classificação para as vias de formação dos trens.

* WIEGAND, Klaus-D (1977) apresenta um modelo para determinar uma combinação ótima de trens regulares e especiais de forma a atender a demanda num dado horizonte de planejamento. Uma busca sobre o tamanho da frota de trens regulares é realizada procurando minimizar os custos totais de transporte. O autor apresenta também um estudo sobre o despacho de tais trens. É um modelo para o plano tático.

A literatura ferroviária européia apresenta alguns modelos de otimização para o problema de agrupamento dos vagões sob o ponto de vista de formação dos trens.

* MARTENS (1967) formula o problema de alocar blocos de vagões a um conjunto dado de trens. O autor considera mudanças na programação de forma a acomodar as flutuações de carregamento. Assim, cada trem pode ser duplicado, sair como normalmente programado ou cancelado. É um problema de programação linear inteira. É indicado um algoritmo para a resolução do problema. O autor chega a uma solução após várias simplificações do problema real.

* ACHERMANN (1969) formulou um modelo para determinar o número e composição de trens longos de carga numa rede ferroviária. O objetivo é reduzir as classificações intermediárias e o tempo de viagem do trem. Por esta razão o modelo permite apenas uma classificação intermediária. Numa primeira fase são programados os trens para os quais há tráfego suficiente para a sua formação e numa segunda fase são alocados trens para o tráfego restante. É um problema de programação linear inteira e foi resolvido pelo método Branch-and-Bound. A solução encontrada é uma aproximação, já que os custos computacionais para a solução ótima são muito grandes.

* DUVALYAN (1973) também aborda o problema de formação do trem com o objetivo de otimizar dois critérios conflitantes: o tempo de classificação e o atraso de acumulação

envolvido no despacho de trens diretos. É um problema de programação linear inteira para cuja solução foi proposto um método de melhoramentos sucessivos.

* TRUSKOLASKI (1968) considera como solução para o problema de formação do trem o equilíbrio entre os atrasos de classificação e de acumulação. Sendo conhecidas as rotas para os fluxos de tráfego, o problema é determinar o fluxo que cria serviços de trens diretos e uma política ótima de classificação para os fluxos restantes. Através de uma heurística é feita uma procura, seqüencialmente, para determinar os trens diretos e os pátios de classificação intermediários.

* PLASIL (1989) apresenta um modelo para um plano ótimo de formação de trens diretos em redes ferroviárias muito densas. É um problema de fluxo de multicommodity para cuja solução algoritmos de sub-otimização estão descritos. É um modelo para o plano tático.

Uma outra forma de abordagem, onde procura-se eliminar a diferença existente entre a unidade de serviço, isto é, o vagão, e a unidade de produção, isto é, o trem, é apresentada na bibliografia a seguir.

* KONYA, H. (1967) formulou um problema de distribuição de vagões carregados e vazios num horizonte de planejamento de n-dias entre N setores (zonas). É um problema de programação linear com o objetivo de minimizar a quilometragem percorrida pelos vagões vazios e custos totais de falta. O autor sugere a utilização do método de decomposição de Dantzig.

* SHAMBERGER, R.C. (1982) descreve o sistema de programação e controle do movimento de vagões individuais, desde o cliente de origem até o cliente de destino, utilizado na "Missouri Pacific Railroad Company".

* REVOL e GOCHET (1973) apresentam os resultados de um estudo de aplicação de técnicas de pesquisa operacional ao gerenciamento da carga. São descritos modelos para várias partes do sistema ferroviário e suas ligações, usando tanto métodos analíticos como de simulação. O modelo foi testado num sistema com 42 pátios na França.

* DANCOISNE (1986) descreve as mudanças ocorridas na SNCF (sistema ferroviário francês) quanto ao movimento do tráfego em vagões individuais. É uma proposta de um sistema mais flexível, através de uma diversificação nos produtos transportados e trens com maiores velocidades.

* INTRAND (1987) também descreve a nova concepção do sistema ferroviário francês. Mostra o papel do computador no gerenciamento das prioridades entre os vagões.

* NASCIMENTO (1988) desenvolveu uma heurística para a formação dos trens. O modelo foi aplicado num corredor de exportação com três pátios de formação. O modelo considera cargas prioritárias e também dá a opção de reter cargas por motivos operacionais (por exemplo: o

carregamento do navio no porto se dá de forma mais lenta que o transporte pela ferrovia, havendo a necessidade de suspender temporariamente o transporte da carga, mesmo sendo ela prioritária). Os trens são formados atendendo os horários estabelecidos no Plano de Transporte da Ferrovia. A saída do programa computacional desenvolvido dá ao gerente informações sobre a composição do trem, a lotação obtida, a origem e destino dos vagões e as cargas residuais (isto é, cargas que ainda restam serem transportadas depois de formados todos os trens estabelecidos pelo Plano de Transporte). Considerando estas cargas, o gerente pode então decidir pela formação de trens extras. O modelo representa com bastante fidelidade as características operacionais da ferrovia estudada.

Outra forma de abordagem para o gerenciamento da operação ferroviária é o desenvolvimento de um único modelo englobando vários problemas. Não é uma técnica recomendada pois tem como resultado modelos muito grandes e de difícil resolução.

* HAGHANI (1989) apresenta a formulação e a solução de um modelo combinado para o roteamento e formação dos trens e distribuição de vagões vazios. Isto resulta num problema de programação misto-inteira com função objetivo não linear e restrições lineares. Uma técnica de decomposição heurística foi desenvolvida para resolver o problema.

* KEATON (1989) através de métodos de Lagrange e métodos heurísticos tenta resolver um modelo que inclui os problemas de roteamento de trens diretos, a frequência destes trens, como os vagões serão roteados através desta programação de trens e terminais e como será feito o agrupamento dos vagões. É um modelo para o nível tático.

6.3 - COMENTÁRIOS SOBRE OS MODELOS

Uma característica quase que comum nos modelos estudados acima é a complexidade encontrada. Para poder incorporar as várias restrições existentes na formação dos trens, de forma que o modelo represente o melhor possível a operação real, obtêm-se modelos matemáticos muito grandes e complexos para serem resolvidos computacionalmente. Por exemplo: o modelo desenvolvido por BODIN (1980) só foi possível de ser utilizado em problemas reais com o uso de engenhosos procedimentos heurísticos, segundo o autor. SUZUKI (1973), também chama a atenção para este fato: apesar de ter chegado a uma formulação matemática precisa para o problema, não foi possível resolvê-lo pelos métodos de programação existentes. Este fato motivou o desenvolvimento de um método aproximado. Outros autores encontraram a mesma dificuldade, como pode-se ver nos trabalhos de ASSAD (1980), MARTENS (1967), ACHERMANN (1969), DUVALYAN (1973) e PLASIL (1989), entre outros. Além do mais, a maioria destes modelos enfoca o problema de formação de trens

no plano tático. Por exemplo, os estudos desenvolvidos por WIEGAND (1977) e MARTENS (1967) tratam basicamente da determinação do gráfico horário de trens, conforme contido no Plano de Transportes em uso na RFFSA, no Brasil.

O modelo de HAGHANI (1989) tenta resolver os problemas de roteamento e formação de trens, distribuição de vagões vazios e alocação de locomotivas de uma forma combinada. Além de serem problemas muito grandes e complexos para serem resolvidos por um só modelo, o autor mistura problemas de níveis diferentes de hierarquização no planejamento (tático e operacional). Não é uma boa abordagem. Mesmo que existissem algoritmos e capacidade computacional para resolver tais problemas de forma combinada, ainda assim seria inapropriada tal abordagem já que não responderia às necessidades gerenciais de cada nível da empresa.

Uma aproximação alternativa para a resolução de problemas de tal complexidade é o desenvolvimento de técnicas heurísticas. Mesmo quando modelos exatos são tratáveis computacionalmente, existe ainda muito a ser dito do ponto de vista prático em favor das regras heurísticas, simples mas efetivas: essas regras podem ser facilmente entendidas pelo gerente da ferrovia e formam um guia valioso na tomada de decisão. As heurísticas são utilizadas especialmente quando o objetivo é racionalizar e reproduzir de perto as técnicas manuais. No problema de formação de trens, onde muitas regras devem ser levadas em consideração ao mesmo tempo, é uma técnica bastante recomendável. Diante das considerações feitas acima sobre os modelos existentes e diante das características operacionais do problema de formação de trens, atualmente encontradas no sistema ferroviário brasileiro e observadas pela autora por ocasião do desenvolvimento de sua tese de mestrado e atualmente a de doutorado, optou-se por um modelo heurístico, conforme mostrado a seguir.

6.4 - PROPOSTA DE UM MODELO DE FORMAÇÃO DE TRENS

Para o desenvolvimento do modelo de formação de trens apresentado no item 6.5, algumas considerações foram feitas, conforme relatado a seguir:

a) O Plano de Transportes de cada Regional da RFFSA contém o planejamento da programação e formação de trens a nível tático (válido para um ano). Os trens, que constam no Plano, têm seus horários e rotas programados entre estações concentradoras (pátios de formação). Para estes trens programados é proposto este modelo de formação à nível operacional (dia-a-dia).

No sistema ferroviário, cada estação concentradora tem, dentro de sua área de influência, pátios menores que servem aos clientes da ferrovia. Os vagões destes pátios

secundários são levados, por locomotivas de pátio ou trens coletores, aos pátios de classificação para a formação dos trens programados e que constam no Plano de Transportes. No pátio de classificação de destino é feita a distribuição dos vagões aos pátios secundários da área de influência deste pátio de classificação, da mesma forma que no processo de concentração. Pode ocorrer que certos vagões permaneçam dentro da área de influência de um mesmo pátio de classificação no processo de coleta e de distribuição. São vagões, então, que não entram na formação dos trens programados. Estes processos de concentração e de distribuição não serão tratados no modelo aqui proposto. Para este modelo só interessam os vagões com origem e destino entre pátios de classificação (ou áreas de influência diferentes).

Esta concentração do tráfego nos pátios de formação evita a formação de trens com pouca lotação. Do ponto de vista econômico, esta política é certamente justificável, já que a tração é o mais importante item de custo entre aqueles que tem uma influência direta no custo total do transporte.

b) A divisão das zonas de influência tem um efeito considerável na produtividade dos pátios de classificação. Se a zona de influência for muito grande, o pátio ficará saturado e um tempo de espera e de classificação muito grande para os vagões irá ocorrer. Se a zona for muito pequena, as facilidades disponíveis no pátio de classificação serão pouco utilizadas. Uma determinação do tamanho da zona de influência do pátio não é possível automaticamente, entretanto limites ótimos podem ser encontrados levando em consideração as distâncias entre os pátios e os volumes de vagões que costumam ser movimentados entre os pátios. No modelo proposto não foi feito este estudo. A rede utilizada foi bastante simplificada para possibilitar a aplicação prática (foram considerados poucos pátios).

c) Como o volume de tráfego a ser manuseado varia entre certos limites, de um dia para outro, é compreensível que uma solução que representa o ótimo para um dia não será aquela aplicável ao dia seguinte. É necessário, portanto, recalcular a solução para cada dia. Mesmo que o tempo de cálculo seja pequeno e mesmo que seja possível prever o tráfego com uma antecedência de 24 horas, seria impraticável produzir e seguir um programa de transporte (rotas e horários) diferente a cada dia. De fato, mesmo que o volume de tráfego variasse pouco, os horários de partida também variam de um dia para outro. Isto teria uma repercussão na escala das locomotivas. A menor mudança também teria repercussão no trabalho realizado nos diversos pontos de troca de equipagem. Devido às regras existentes quanto ao trabalho e formação da equipagem, nestes pontos seria necessário manter equipes disponíveis com várias horas de antecedência para realizar trabalhos ainda não conhecidos. Isto aumentaria bastante o número de equipes necessárias. Na prática, a única forma de otimizar esta operação consiste em preparar um programa em que os horários de partida mudem o mínimo possível. O programa básico dos trens deve ser fixo (Plano de Transportes) e, ao invés de calcular um

novo programa para cada dia, o modelo deve ficar confinado a indicar as modificações a serem realizadas, como resultado das flutuações do tráfego e dos interesses dos clientes.

d) O modelo será baseado na estrutura dos serviços de trens existentes nos pátios de formação. Obviamente a maioria destes trens serão, de fato, requeridos para o transporte dos vagões, de forma que um grande número deles será formado todos os dias. As flutuações do tráfego são tais, que um trem pode, em certas ocasiões, ser tanto cancelado quanto ter sua lotação esgotada, como ainda pode haver a necessidade de trens extras. O objetivo de um gerenciamento centralizado é exatamente o de tentar encontrar a melhor solução para estas flutuações. O modelo deve analisar o tráfego para todos os destinos da rede e indicar a solução que melhor atenda às regras impostas pelo gerente. Para permitir que o modelo desempenhe o papel de um coordenador central, é preciso um sistema computacional que tenha disponível todos os dados necessários para uma avaliação das inter-relações entre as decisões a serem tomadas. Neste estudo propõe-se a utilização do sistema SIGO, implantado na RFFSA, e que opera os dados em tempo real. Um micro-computador será acoplado a este sistema, possibilitando a transferência dos dados ao programa.

e) Geralmente os tempos de viagem são muito longos devido às várias reclassificações intermediárias. Os vagões deveriam ser classificados o mínimo possível já que os períodos de espera e de classificação nos pátios de formação são muito significativos no tempo de viagem do trem de carga. Para reduzir os tempos de viagem e visando a regularidade e economia operacional, o ideal é concentrar a formação dos trens num número limitado de pátios de formação adequadamente equipados, de forma que, em rotas de longas distâncias, trens diretos sejam formados sempre que possível. Assim, os movimentos de vagões nas rotas serão realizados em três etapas: viagens locais para a coleta dos vagões; viagens diretas da origem ao destino e viagens locais para a distribuição. No modelo proposto considerou-se a possibilidade de apenas uma parada intermediária entre a origem e o destino do trem.

f) Atualmente, na Rede Ferroviária Federal, o gerenciamento central de uma regional não tem ainda um controle total sobre os serviços do pátio e principalmente sobre a formação do trem. O sistema de informação existente (SIGO) não fornece informações sobre a ocupação das linhas do pátio e desta forma as decisões sobre os trens a serem formados, sobre os vagões que serão colocados nos trens, cabem mais ao chefe de pátio e ao chefe de manobra do que ao gerente central. Outro fator bastante negativo é que estas decisões são tomadas somente sobre os vagões que já estão nos pátios, quando o ideal seria o chefe de pátio ter conhecimento prévio do encaminhamento dos vagões antes dos trens chegarem aos pátios. Isto facilitaria o serviço de classificação e os trabalhos de formação dos trens, evitando atrasos e o que é muito freqüente, a impossibilidade de colocar certos vagões em um trem pelo fato dos mesmos estarem numa posição, nas vias do pátio, que impede a sua remoção dali.

O que ocorre normalmente, é que um trem ao chegar ao pátio, tem seus vagões classificados "a granel" sobre vias destinadas a rotas determinadas, isto é, os vagões da rota são destinados às estações pertencentes a uma mesma linha daquela rota. No momento de formar o trem, a via é classificada em tantos lotes quantas são as estações de destino. Os lotes são então reagrupados com a locomotiva, na ordem prevista para aquele trem. Operando assim, são satisfeitas as condições de agrupamento dos vagões e formação do trem, mas estas operações se dão muito lentamente. Por outro lado, o papel do chefe de pátio aparece como muito importante pois durante toda a duração da formação do trem, ele é o verdadeiro chefe da triagem e somente ele sabe o que deve ser feito e porque fazer. Tal situação tem inconvenientes: é um fato "anormal" o trabalho "inteligente" do canteiro de formação ser delegado ao chefe de pátio, pois a qualidade do trabalho executado dependerá do valor de tal agente (geralmente o trabalho é feito sem método e baseado na prática); o chefe de pátio opera em condições difíceis porque a ordem dos vagões na via de formação do trem permite várias simplificações que levam a ganhar tempo se o serviço de formação a ser feito fosse conhecido com antecedência, isto é, antes que os vagões chegassem aos pátios. O chefe de pátio, sem estas informações, só vai tomar conhecimento do comboio no decorrer da formação e assim o trabalho se dá lentamente e sem alcançar os resultados desejados; além disso, se basicamente só o chefe de pátio está ao par da situação durante todo o trabalho de formação, o pátio ficará em apuros se este agente é obrigado subitamente a se ausentar (o agente encarregado de substituí-lo perderá tempo até os trabalhos alcançarem o ritmo normal).

A formação dos trens decidida a nível de gerenciamento central, pelo seu automatismo, elimina todos estes inconvenientes.

g) Para ter-se um modelo que seja uma ferramenta efetiva de gerenciamento para a formação dos trens é necessário, entre outros fatos, tratar com a questão sobre quais trens formar. Conforme colocado acima, os trens programados entre os diversos pátios do sistema estão estabelecidos no Plano de Transporte da ferrovia e também, conforme já mencionado, o gerente tem alguma liberdade de escolha sobre o fato de realizar certas viagens durante o turno ou deixá-las para o próximo turno. Além do mais, mesmo que o gerente desejasse transportar toda a carga existente durante o turno, com bastante frequência isto é impossível, principalmente devido à falta de locomotivas. A mais eficiente linha de ataque a este tipo de problema, que contém muitas regras e variáveis, é o método heurístico, que foi a opção feita neste trabalho.

Para determinar que trens formar e quais deverão partir, começa-se selecionando um período de planejamento, cobrindo vários turnos. Estudos mostram que o ideal seria em torno de 3 a 6 turnos. De fato, seria interessante e conveniente, do ponto de vista gerencial, ter-se uma previsão de alguns dias sobre os vagões a serem transportados. Entretanto, estes dados são difíceis de obter, pois dependem basicamente de informações

dadas pelos clientes da ferrovia, dificultando assim uma previsão da programação para alguns dias. Os trens são então planejados turno a turno, assim como o estabelecimento de seus horários, ou se possível o planejamento é feito para dois turnos (1 dia). A ferrovia, além disso, é um tipo de empresa na qual a possibilidade de formação de estoque é tão pequena, que este problema pode ser seguramente ignorado. É permitido acumular vagões em estoque, mas, conforme colocado anteriormente, os limites para atrasos nos embarques são extremamente pequenos devido às imposições das operações industriais (clientes). Existe, além disso, um ritmo diário natural no nível de atividades nas instalações dos clientes, o qual tende a produzir picos acentuados durante o primeiro turno de cada dia, justificando de certa forma, o planejamento turno a turno.

A formação dos trens para cada turno é então determinada, considerando todas as restrições impostas pela ferrovia e principalmente levando em consideração as necessidades dos clientes. Caso seja feito o planejamento para os dois turnos, o do primeiro turno já pode ser colocado em execução e o do segundo pode servir como base para o planejamento dos serviços pelos chefes de pátios e pelos clientes. À medida que o segundo turno se aproximasse, os dados previstos para o terceiro turno (2º dia) seriam incorporados ao estudo e um ajuste da programação feita para o segundo turno seria efetuado, levando em conta as informações adicionais que se tornaram disponíveis durante o último turno.

6.5 - O DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE FORMAÇÃO DE TRENS

O desenvolvimento do modelo proposto neste trabalho procura otimizar a composição do trem segundo algumas regras heurísticas. As prioridades, problemas e objetivos nas diversas estações de um sistema ferroviário são diferentes entre si, dificultando o estabelecimento de um modelo matemático único, pois cada estação deveria ter uma função objetivo e restrições, as quais podem ser variáveis no dia-a-dia da operação. Além disto, conforme já mencionado, seria difícil estabelecer uma função que captasse e englobasse todos os objetivos e restrições do sistema. Assim, por exemplo, seria desejável, se possível, uma única função que simultaneamente maximizasse a receita e minimizasse os custos, mas estes dois objetivos, em certas situações, podem ser incompatíveis. Atender sempre esses objetivos pode significar a perda de um cliente. Em muitas situações, geralmente frequentes no transporte ferroviário, a prioridade é atender a um determinado cliente. Deve-se considerar ainda que dificilmente seria tangível a avaliação do custo da perda de um cliente nas operações do dia-a-dia. A avaliação deste custo, embora ainda difícil, seria mais apropriada no plano estratégico.

Assim, devido à dinamicidade do dia-a-dia, justifica-se a opção pelas regras heurísticas, facilmente adaptáveis à situação de cada pátio em cada turno de planejamento da operação ferroviária. Estas heurísticas estão baseadas nos principais objetivos levantados na literatura e em campo, através de visitas a algumas superintendências regionais da RFFSA - Rede Ferroviária Federal S.A., principalmente nas regionais de São Paulo e Curitiba. Pôde-se assim avaliar a adequabilidade dessas regras ao Sistema Ferroviário Brasileiro.

Em poucas palavras, poder-se-ia dizer que o modelo proposto de formação de trens persegue a maximização do número de vagões da composição, respeitando as limitações da ferrovia (número máximo de vagões e máxima tonelagem bruta da composição do trem) e segundo algumas prioridades definidas de antemão. Outras prioridades são definidas em tempo real, estas geralmente se sobrepondo às primeiras, de modo a levar em conta os desejos dos clientes e a operacionalidade do sistema.

A seguir, juntamente com a descrição do programa computacional desenvolvido, apresenta-se a concepção do modelo de formação de trens e as regras heurísticas em que o mesmo está baseado.

6.5.1 - O MODELO DE FORMAÇÃO DE TRENS E O DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

O programa computacional FORMTREM [FORMação de TREM] foi desenvolvido em FORTRAN 77 para microcomputadores. O mesmo está apresentado no Apêndice C.1. O programa está devidamente documentado para que um usuário com razoável experiência computacional possa utilizá-lo sem maiores dificuldades, inclusive fazendo modificações para adaptá-lo a alguma situação desejável ou mesmo para reescrever o programa numa outra linguagem de programação.

A entrada de dados ao programa se faz via terminal e através da leitura de dois arquivos: ARQFERRO e ARQVAG.

Via terminal são informados os dados que identificam o planejamento e definem a saída dos dados (impressão de dados e resultados ou somente resultados). Também via terminal são informadas as opções que modificam os dados implantados no arquivo ARQFERRO e as decisões gerenciais em tempo real, como a opção pela formação de trens extras ou o cancelamento de algum trem, cuja tonelagem bruta total esteja abaixo de um percentual extipulado pela ferrovia.

O arquivo ARQFERRO contém os dados do sistema ferroviário:

* Número de estações centralizadoras

* Para cada estação centralizadora:

- nome e código da estação
- capacidade operacional do pátio
- número de estações secundárias sob sua influência
- número de destinos
- número de horários de partidas de trens
- número de cargas prioritárias

* Matriz dos tempos de viagem entre as estações centralizadoras

* Para cada estação centralizadora (se houver estações secundárias):

- nome e código de cada estação secundária sob sua influência
- capacidade operacional do pátio de cada estação secundária

* Para cada estação centralizadora (se a mesma tiver horários de partidas de trens)

- Para cada um dos horários de partida de trens (horários do Plano de Transporte):
- prefixo do trem
- horários de partida e chegada no destino final do trem
- código da estação de destino final do trem
- tonelagem bruta máxima do trem
- número máximo de vagões da composição
- número de estações de baldeação do trem
- índices dos horários de partida e chegada (estes índices indicam se há mudança de dia em relação ao início do turno de planejamento - vide programa)
- número de locomotivas necessárias para a tração do trem.
- códigos das estações de baldeação do trem.

É importante salientar que os índices dos horários de partida e chegada permitem ao modelo fazer a programação dos trens para um número qualquer de dias, repetindo, ou não, os horários do Plano de Transporte.

* Para cada estação centralizadora (se a mesma tiver cargas prioritárias):

- Para cada uma das cargas prioritárias:
- nome e código da carga
- índice de prioridade da carga (um número de 1 a 10; índices maiores indicando maior prioridade)

A partir das leituras dos dados do sistema ferroviário contido no arquivo ARQFERRO são estabelecidos vários procedimentos alternativos, de modo a dar flexibilidade à operação. Estes procedimentos são conversacionais, isto é, são informados via terminal através de perguntas e solicitações ao gerente.

O primeiro desses procedimentos, que diz respeito à alteração dos horários do Plano de Transporte, tem como objetivo a formação de trens apenas para alguns horários desejados, sendo permitido alterar todos os horários ou somente os horários de algumas estações.

Neste ponto o programa coloca os horários de partida em ordem crescente (independentemente das estações centralizadoras de origem e destino). Este procedimento irá permitir que as cargas baldeadas sejam postas em outros trens ainda dentro do turno de planejamento.

O próximo procedimento permite a inclusão ou alteração das prioridades dadas às cargas em qualquer estação centralizadora do sistema ferroviário. Deverão ser informados o nome, o código e o índice de prioridade, o qual deverá ser um número entre 0 (zero) e 99 (noventa e nove). O índice 0 (zero) eliminará a prioridade dada anteriormente à carga e os índices superiores a 10 (dez) permitirão aumentar a prioridade da carga além das prioridades já informadas.

O procedimento seguinte permite ao gerente eliminar do planejamento de formação de trens as estações centralizadoras e secundárias que, por um motivo qualquer, não devem ser consideradas.

O próximo procedimento evita que as denominadas "cargas retidas por motivos operacionais" entrem na composição dos trens. Uma carga retida por motivo operacional pode ser aquela, por exemplo, destinada à exportação, mas cujo navio ainda não atracou no porto. O procedimento consiste em identificar a carga e a sua estação de destino, atribuindo-se prioridade negativa ao carregamento. As cargas retidas por motivos operacionais são então listadas separadamente, de modo que possam ser facilmente identificadas. Neste ponto do programa são apenas informadas, via terminal, as cargas que devem ser retidas por motivos operacionais. A identificação das cargas é feita após a leitura das informações do arquivo ARQVAG. A listagem, por sua vez, é feita no final do programa.

O passo seguinte do programa é a leitura dos dados do arquivo ARQVAG. O conteúdo deste arquivo corresponde, ou contém, as informações do sistema SIGO da RFFSA sobre os vagões destinados e mais algumas informações necessárias à implementação, no programa, de requisitos operacionais que facilitam a decisão gerencial, conforme descrito a seguir.

Os vagões destinados (carregados ou vazios) são referenciados no arquivo através de dois índices. O primeiro deles se refere à estação centralizadora da carga e o segundo indica o número da informação de carga. São lidos no arquivo ARQVAG os seguintes dados para cada estação centralizadora e as secundárias sob sua influência:

- código da estação de origem da carga
- código do cliente da ferrovia
- código da estação de destino da carga
- código da estação de baldeação da carga (só é permitida a baldeação em uma estação e, no caso de não haver baldeação, é repetido o código da estação de destino)
- código da carga ou mercadoria
- quantidade de vagões por mercadoria, cliente e destino
- tonelagem útil dos vagões por mercadoria, cliente e destino
- tonelagem bruta dos vagões por mercadoria, cliente e destino
- tempo de espera (tempo que a carga está no pátio esperando por transporte)

O tempo de espera é calculado como o número de dias entre a data em que o vagão é destinado e a data de planejamento da formação de trens (informada via terminal). Não se implementou este cálculo neste programa, supondo-se existir um programa que gerencie o arquivo de dados (o SIGO da RFFSA) e que calcule a variável em questão.

À medida em que vão sendo lidas as informações de carga, o próprio programa:

- atribui a hora em que a carga está disponível para carregamento (igual à hora de planejamento; isto faz com que elas só participem das composições com horários de partida posteriores ao horário de planejamento);
- atribui o índice de prioridade à informação de carga em questão (isto é feito comparando-se o código da carga com o código das cargas

prioritárias informadas no arquivo ARQFERRO; no caso da carga não ser prioritária é atribuído o índice 0 (zero);

- calcula a lotação inicial dos pátios das estações centralizadoras, somando as quantidades de vagões das informações de carga destas estações.

Após a leitura do arquivo ARQVAG é executado um procedimento, também conversacional (via terminal) de modo a permitir ao gerente da operação dar prioridade a algum cliente especial. Com este procedimento o cliente, ou seja, a informação de carga deste cliente, passa a ter prioridade sobre qualquer outra prioridade previamente estabelecida. Permite-se assim, à ferrovia, atender as necessidades dos clientes dentro de suas possibilidades.

O próximo passo se refere à ordenação das cargas em cada estação centralizadora (conforme já foi dito, considera-se que as cargas das estações centralizadoras e secundárias estão agrupadas nas primeiras). As cargas serão ordenadas de acordo com as prioridades estabelecidas:

- a) atendendo as necessidades dos clientes;
- b) de acordo com as prioridades informadas via terminal;
- c) de acordo com as prioridades constantes dos arquivos de prioridades;
- d) de acordo com o tempo de espera da carga no pátio (maior tempo, maior prioridade);
- e) de acordo com a quantidade de vagões da informação de carga (mais vagões, maior prioridade);
- f) de acordo com a distância da estação centralizadora de origem da carga à estação centralizadora de destino (maior distância, maior prioridade).

Conforme se pode observar, apenas os três primeiros itens se referem às prioridades propriamente ditas das cargas. Os demais ordenam-se de acordo com procedimentos. O item "d" explica-se por si só, pois não é razoável que o carregamento de algum cliente fique muito tempo esperando o transporte. Os itens "e" e "f" justificam-se por motivos operacionais. No caso da quantidade de vagões fica mais fácil acomodar uma quantidade menor em composições futuras. No caso da distância, se houver necessidade de formar um trem extra, uma distância menor facilitará a operação (ocupação da locomotiva por menor tempo, menos horas extras de equipagem, menor consumo de energia, etc.).

A ordenação das cargas é feita com a sub-rotina ORDVAG (ORDenação de VAGões).

Os passos seguintes referem-se à formação das composições dos trens propriamente ditas. Todavia, o gerente tem ainda dois procedimentos opcionais. O primeiro refere-se à formação dos trens com um bloco mínimo de vagões por cliente, de modo a evitar um controle operacional excessivo por parte da ferrovia. O segundo procedimento diz respeito à formação de trens diretos. O gerente informa ao programa, via terminal, as estações de origem e destino dos trens diretos. Serão colocados na composição apenas as cargas que respeitem esta situação, sendo deixadas de lado as cargas que baldeiam em estações ao longo do percurso do trem. Entretanto, caso o trem deixe a estação de origem ainda com capacidade de pegar cargas, estas serão incorporadas à sua composição nas estações de baldeação ao longo do percurso, desde que tenham destino final coincidente com o do trem, embora esta não seja a filosofia de criação de trens diretos. Os trens diretos têm o objetivo de agilizar a operação na época da safra, por exemplo, sendo formados com destino a um porto de exportação. De um modo geral devem sair lotados. Todavia, mesmo sendo diretos, estes trens provavelmente deverão parar ao longo do percurso, seja para abastecer, seja para trocar a equipagem, entre outras providências. Assim sendo, acrescentar mais vagões ao trem é uma operação rápida, ao contrário das operações de carga e descarga.

A formação dos trens é feita com a sub-rotina VAGTREM (VAGões no TREM). O objetivo desta sub-rotina é fazer a composição de cada trem respeitando o número máximo de vagões da composição e a sua tonelage bruta permitida, de acordo com as regras da ferrovia e as prioridades atribuídas às cargas destinadas.

A formação dos trens é iniciada na estação centralizadora de origem, conforme as opções tomadas nos procedimentos. As informações de carga, se houverem, vão sendo acrescentadas ao trem em ordem de prioridade, sendo testado se a sua capacidade (número máximo de vagões e tonelage bruta máxima) não é excedida. Conforme a situação podem ser emitidas as seguintes mensagens:

- a) não há cargas para o trem considerado;
- b) o trem foi formado com um determinado número de vagões e seu carregamento tem uma determinada tonelage, representando um percentual da sua capacidade máxima.

No caso "a", o programa prossegue para o próximo horário. No caso "b", se o percentual da sua capacidade for superior a um dado valor extipulado (40% no caso deste programa) o trem é formado. Em caso contrário, é perguntado ao gerente se ele quer cancelar o trem, cabendo a ele decidir. Optou-se por não cancelar automaticamente o trem, pois o percentual pode estar muito próximo do limite extipulado. De qualquer forma, é muito fácil mudar este procedimento, inclusive estabelecendo faixas de tolerância. Não havendo

cancelamento, são atualizados os números de vagões nos pátios de origem e de destino da carga. No caso de cancelamento é também emitida mensagem avisando deste fato.

Prosseguindo adiante, são atualizadas também as informações de carga na estação de origem e na de destino, no caso do destino ser uma estação de baldeação e não o destino final da carga.

Nas estações de baldeação são deixadas as cargas a ela destinadas (destino final) ou cargas que poderão entrar em outros trens para atingir o destino final. No caso aqui estudado permitiu-se que a carga baldeie apenas em uma estação intermediária. Ainda nas estações de baldeação são acrescentadas cargas ao trem até atingir o seu limite e as mesmas mensagens dos itens "a" e "b" acima são emitidas, devendo o gerente tomar as opções desejadas conforme o caso.

Uma carga que é deixada numa estação de baldeação tem atualizado o seu horário de disponibilidade, de modo a não entrar na composição de trens que passam mais cedo na estação de baldeação. Esta atualização é feita acrescentado-se ao horário de partida do trem da estação de origem o tempo de viagem à estação de baldeação, mais um tempo "t" extipulado pela ferrovia (igual a 1 hora em todos os pátios) para preparar a carga para novo carregamento.

Considerados todos os horários em todas as estações centralizadoras de origem, são listadas, estação por estação, as cargas residuais. Estas cargas são aquelas que não entraram na composição dos trens. É fornecido o número de informações de cargas residuais ao gerente e a ele é perguntado se é desejável formar trens extras. Caso a resposta seja afirmativa o gerente deverá fornecer, via terminal, uma série de informações solicitadas pelo programa: número de trens extras, prefixos, horários de partida e chegada, estações de destino e de baldeação, entre outras informações. Antes, porém, da listagem das cargas residuais, é fornecida ao gerente uma tabela com as lotações iniciais e finais de todos os pátios das estações centralizadoras, bem como os percentuais iniciais e finais em relação à capacidade operacional dos pátios.

Essas informações são de natureza mais qualitativa e de alerta, pois não refletem as ocupações dos pátios ao longo do período de planejamento. Todavia, se algum pátio, no início ou no fim da operação, apresenta a sua capacidade operacional esgotada, há indícios de que houve problemas operacionais, devendo o gerente da operação alertar os chefes de pátio. Uma das providências que pode ser tomada é desviar o trem para a estação secundária mais próxima, cujo pátio tenha capacidade disponível. Caso sejam formados trens extras, esta tabela é refeita e informada ao gerente da operação.

Outro fato que merece ser comentado sobre o modelo de formação de trens é que os mesmos são formados em ordem crescente de horários. Assim, por exemplo, suponha-

se que um trem parta da estação "A" às 06:00 horas para a estação "C" baldeando na estação "B" às 10:00 horas. Evidentemente este trem poderia pegar as cargas que saíam da estação "D" às 08:00 horas no trem com destino à estação "E", mas que leva cargas com destino à estação "C", baldeando na estação "B" às 08:30 horas, conforme mostrado na Figura 6.1 abaixo.

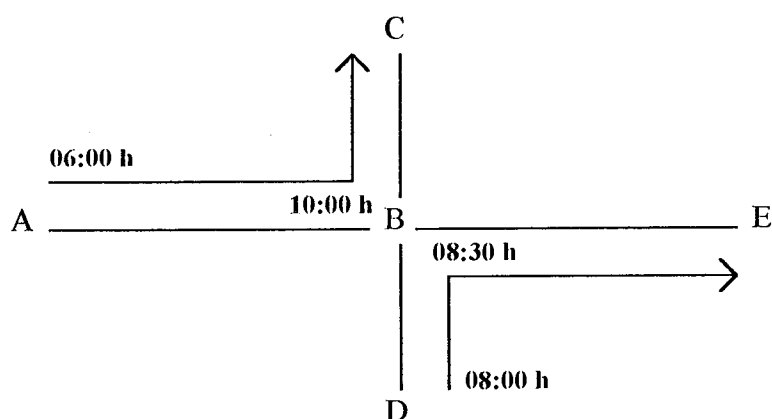


Figura 6.1 - Croquis Esquemático de uma Situação da Operação Ferroviária

Entretanto, como o trem DBE é formado depois do trem ABC, este último não poderá, pela formulação do programa, pegar as cargas do trem DBE que baldeiam em "B" com destino a "C". Estas cargas, na realidade, só poderiam ser pegadas por algum trem que passasse por "B" com destino a "C" e cujo horário de partida, não importando a estação de origem, fosse superior ao horário de partida do trem DBE. Não se considera, todavia, que este fato seja uma falha de formulação do modelo. Programando o mesmo para atender à situação mencionada, seria conferida ao planejamento da formação de trens uma dinamicidade não observada na prática do dia a dia da operação ferroviária. Além do mais, conforme foi programado, trabalha-se com dados mais reais, pois estas cargas só serão consideradas com a partida do trem da estação.

Finalmente, são listadas as cargas retidas por motivos operacionais, as quais ficarão à espera de uma solução.

6.6 - A APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO

Na prática, a aplicação do modelo seguiria as seguintes etapas: entre um turno e outro da operação, as estações acertariam com os clientes quais vagões carregados e vazios estariam prontos para o transporte naquele turno. É feita a coleta destes vagões: o pátio de classificação contata com cada estação de sua área de influência e é notificado sobre o número de vagões, tonelagem, estações de destino e o processo de coleta dos vagões que necessitam transporte a partir desta zona. Os vagões são levados então para o pátio de classificação. Os trens são formados. São então enviados avisos, entre os pátios de classificação, sobre os trens que partirão de cada pátio. Esta operação programada permitirá que cada pátio de classificação conheça que vagões ele receberá durante o próximo turno e então fazer um planejamento para os serviços necessários.

Para a aplicação dos exemplos que seguem foi considerada a rede inicial proposta no Capítulo 4 e os horários de trens estabelecidos no Capítulo 7. Na rede utilizada foram ainda acrescentados os pátios de números 7770, 8880 e 9990 com a finalidade de estudar-se as possibilidades de baldeação.

Na Figura 6.2 apresenta-se a rede proposta.

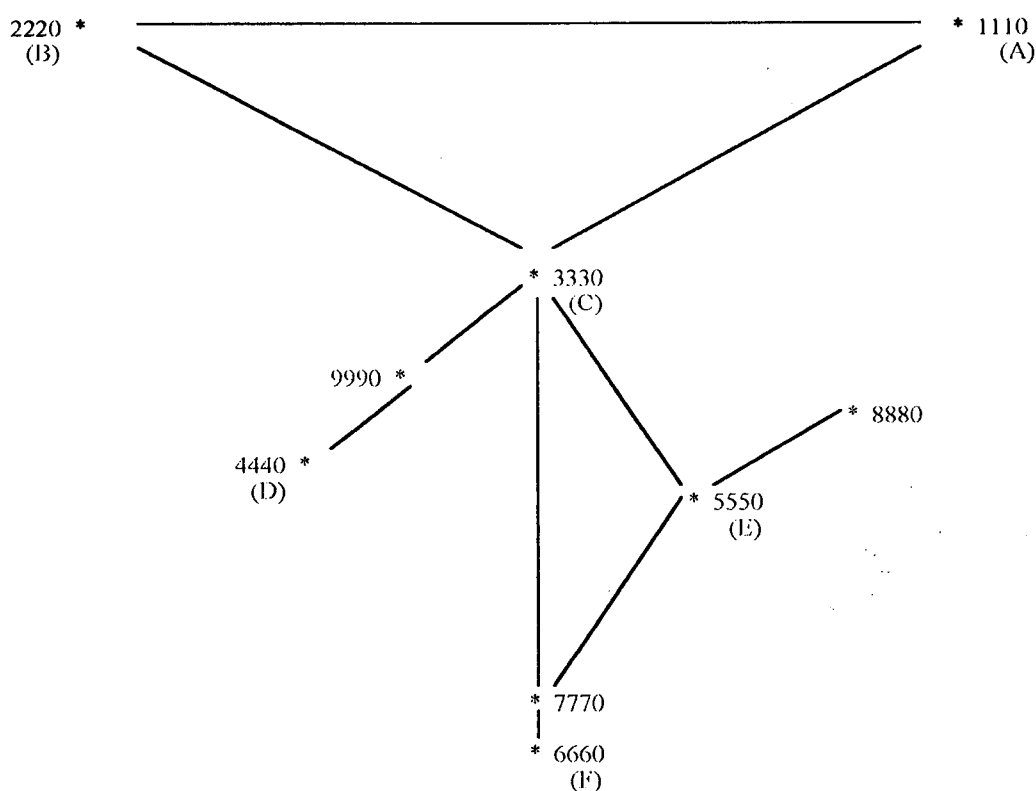


Figura 6.2 - Rede Proposta

A entrada de dados consiste dos arquivos ARQFERRO e ARQVAG conforme descrito no item anterior. No arquivo ARQVAG considerou-se poucos pátios com vagões, a fim de possibilitar uma análise detalhada dos resultados apresentados nas listagens de saída do programa.

O Apêndice c.2 contém as listagens dos exemplos, mostrando a aplicação das várias opções à escolha do gerente para a formação dos trens.

No exemplo 1 tem-se uma saída completa do programa, com os dados e resultados. São listadas: as estações centralizadoras, os tempos de viagem entre estas estações, as estações secundárias, os horários de partida dos trens, a impressão destes horários em ordem crescente, as cargas prioritárias de cada estação centralizadora, os vagões que poderão entrar na composição dos trens, a ordenação destes vagões pela prioridade da carga e pelo tempo de espera, a formação dos trens, as lotações dos pátios, as cargas residuais e a imagem do arquivo HORATREM (a ser utilizado pelo modelo desenvolvido no Capítulo 7).

Na rodagem do exemplo 1 fez-se as seguintes opções:

- impressão dos dados e resultados
- horários de trens do Plano de Transportes da ferrovia
- impressão dos horários dos trens em ordem de partida
- sem alteração / inclusão de cargas prioritárias
- são consideradas as cargas de todas as estações
- não há cargas retidas por motivos operacionais
- é considerado o arquivo de prioridades estabelecido pela ferrovia
- não são priorizados clientes
- não há um número mínimo de vagões por cliente
- não são estabelecidos trens diretos especiais
- não são formados trens extras

Pode-se observar pelos trens formados, que são obedecidas todas as restrições impostas (horários de partida, de baldeação, tonelagem máxima, número máximo de vagões e percentual mínimo de capacidade para formar o trem, fixado em 40% neste estudo). É também obedecida a ordem de prioridades estabelecidas, quais sejam: 1º) cargas prioritárias, 2º) tempo do vagão no pátio, 3º) clientes com maior número de vagões (no caso de cargas de igual prioridade e tempo de espera, estes prevalecem) e 4º) vagões destinados ao pátio mais distante da origem do trem (no caso de cargas de igual prioridade e tempo de espera, estes prevalecem).

Caso se optasse por priorizar clientes, esta seria a primeira prioridade atendida. Da mesma forma, as opções dadas via terminal também passam a ter prioridade sobre a ordem colocada acima, conforme descrito no item anterior e conforme será observado nos exemplos a seguir.

No exemplo 2 fez-se a opção de impressão apenas dos resultados. As demais opções são as mesmas do exemplo 1. Para o gerente esta opção atende perfeitamente suas necessidades de apoio ao gerenciamento dos trens. Não é preciso a impressão dos dados.

No exemplo 3 fez-se a opção de cancelar alguns trens. Pode-se observar que os vagões do trem AAB06 passaram para o trem AAB08; os vagões do trem AAC07 passaram para o trem AAE11; os vagões do trem AAB09 foram para o trem AAB10. Observa-se ainda que o trem CCD12 (horário de partida 12:00 horas) não foi formado com as cargas do trem AAE11 porque estas cargas só chegam em C às 14:00 horas.

No exemplo 4 foram feitas as seguintes opções: não considerar os horários de trens do Plano de Transportes; formar trens extras e considerar apenas as cargas existentes nas estações centralizadoras. Escolheu-se apenas a estação centralizadora 3330 (C) e dois trens: o CCD12 e o CCA13. Estes trens não foram formados pois não há cargas de C para D e de C para A. O trem extra AAE13 foi formado com as cargas que seguem para D e para E. O trem saiu de A com 40 vagões, deixou 35 em C, nesta estação pegou mais 33, seguindo com 38 vagões para E.

No exemplo 5 optou-se por mudar os horários de apenas uma estação e também formar trens extras. A estação escolhida foi a 3330 (C) e o único trem para esta estação será o CCD12. Observa-se que a carga do trem CCE08, que foi eliminado, passou para o trem AAE11. Este trem sai de A com 40 vagões destinados a D, os quais são deixados em C. Neste pátio o trem é formado com os 38 vagões que anteriormente eram do trem CCE08 e segue então para E. Observa-se ainda que o trem CCD12, com o horário de saída às 12:00 horas, era formado com os 20 vagões que tinham saído de A no trem AAC07 e deixados em C às 10:00 horas. Com a alteração do horário de 12:00 para às 10:00 horas não foi possível pegar esta carga, pois os horários de chegada da carga e saída do trem coincidem e, portanto, o trem não foi formado. Foram formados dois trens extras: o AAE13 e o AAB14. Comparando os vagões que entraram nestes trens com as listagens das cargas residuais em A, pode-se observar o cumprimento das prioridades: carga mais prioritária, maior tempo de espera no pátio e maior número de vagões por cliente.

No exemplo 6 testou-se a opção de alteração / inclusão de cargas prioritárias. Alterou-se a prioridade da estação 1110 (A) que era soja (código 1111) com índice 10 para farelo (código 1114) com índice 15. Na estação 3330 (C) foi incluída a prioridade soja com índice 10. Pode-se observar que as cargas 1114 (todas têm origem em A e destino em B)

foram as primeiras a serem incluídas nos trens AAB06 e AAB08 esgotando o total destas cargas.

No exemplo 7 utilizou-se o índice $I_{ROD} = -1$ significando que os trens serão formados apenas com as cargas das estações informadas via terminal. Escolheu-se a estação centralizadora 3330 (C) com suas secundárias. Como as cargas existentes nestas estações têm destino apenas para 5550 (E) e 6660 (F) e não há trens programados de C para F, foi formado só o trem CCE08. O trem extra é o CCF13 composto com as cargas de C com destino a F.

O exemplo 8 apresenta a opção de cargas retidas por motivos operacionais. A estação 4440 (D), por problemas operacionais, não pode receber as cargas de código 1111. Observa-se na formação dos trens, que estas cargas foram eliminadas dos trens AAC07 antes formado com 20 vagões desta carga com destino a D, e do trem AAE11 antes formado com 40 vagões desta carga com destino a D. Pela listagem das cargas retidas por motivos operacionais, que consta no final da listagem deste exemplo, pode-se ver que todas as cargas 1111, com destino a D, têm origem em A e, portanto, só poderiam entrar nestes dois trens.

No exemplo 9 deu-se prioridade ao cliente 10201 na estação 1110 (A). Pode-se observar que as cargas deste cliente têm origem em A e destino em B (são 4 informações de carga num total de 20 vagões) e que todas elas entraram no primeiro trem de A para B, isto é, o AAB06, apesar do tempo de espera do vagão no pátio ser de apenas um dia.

No exemplo 10 foram feitas as opções: mínimo de 6 vagões por cliente e criação de trem direto especial. Comparando-se esta formação de trens com a do exemplo 1, verifica-se que no trem AAB06 os clientes 10203 e 11203, com 5 vagões cada, foram substituídos pelos clientes 10202 e 11202 com 6 vagões cada e que antes estavam no trem AAB08. No trem AAB08 saíram os clientes 12203 e 13203 com 5 vagões cada e entrou o cliente 10207 com 20 vagões e que estava no trem AAB09. No trem CCE08 saíram os clientes 11203, 11207, 11201 e 11206 com 5 vagões cada. No trem AAB09 saiu o cliente 11207 com 5 vagões e entrou o cliente 12207 com 20 vagões e que estava no trem AAB10. No trem AAB10 saiu o cliente 10201 com 5 vagões e entrou o cliente 13207 com 20 vagões e que estava no trem AAB12. No trem AAB12 entraram os clientes 12206 com 15 vagões e o 10205 com 6 vagões.

O trem direto especial é o AAE11, cuja estação de baldeação 3330 (C) foi eliminada. Este trem antes era formado com as cargas dos clientes 12207 e 13207 com 20 vagões cada, com origem em A e destino em B. Nesta nova formação só são aceitas as cargas com destino em E.

Os exemplos acima poderiam ser compactados em 3 ou 4 rodadas do programa. Entretanto, optou-se por mostrar as opções de forma individualizada para um melhor entendimento das regras estabelecidas.

Chama-se a atenção que o objetivo desta aplicação prática é apenas o de mostrar que o modelo é viável. Cada regional da RFFSA pode adaptar as opções colocadas à disposição do gerente de acordo com suas necessidades operacionais.

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

- ACHERMANN, J. (1969), Model and Calculation Programme relating to the Optimum Formation of Trunk Haul Freight Trains, Bulletin of the International Railway Congress Association, Cybernetics and Electronics on the Railways, 6, 5, 181-226, Maio.
- ASSAD, A.A. (1980), Modelling of Rail Networks: Toward a Routing/Makeup Model, Transportation Research, 14B:101-114.
- BODIN, L.D., GOLDEN, B.L. e SCHUSTER, A.D. (1980), A Model for the Blocking of Trains, Transportation Research 14B: 115-120.
- BOURGEOIS, M. e VALETTE, M. (1961), Formation des Trains de Detail par la Methode de la Formation Simultanee, Revue Française de Recherche. Operationnelle, 4, 18, 56-92, Março.
- CHARNES, A. e MILLER, M.H. (1956), A Model for the Optimal Programming of Railway Freight Train Movements, Management Science, V.3, 1, 74-92, Outubro.
- DANCOISNE, J.M. (1986), The Movement of Traffic in individual Wagons in the 1990s: a challenge... and the SNCF Response, Rail International, Junho, 7-12.
- DUVALYAN, S.V. (1973), Etablissement sur Ordinateur du Plan de Formation Optimal et Répartition du Travail entre les Gares de Triage dans un Réseau Ferroviaire Important, Rail International, Outubro-Novembro, 1165-1167.
- HAGHANI, A.E. (1989), Formulation and Solution of a Combined Train Routing and Makeup, and Empty Car Distribution Model, Transportation Research, Vol. 23B, N°6:433-452.
- INTRAND, A. (1987), The Role of Computers in the Management of Priorities between Wagons in a single Transport Schedule, Rail International, Junho, 15-21.
- KEATON, M.H. (1989), Designing Optimal Railroad Operating Plans: Lagrangian Relaxation and Heuristic Approaches, Transportation Research, Vol. 23B N°6:415-431.
- KONYA, H. (1967), An Algorithm for Freight Car Dispatchings, Bulletin I.R.C.A.: Cybernetics and Electronics on the Railways, Agosto-Setembro, 381-384.

- MARTENS, A. (1967), Mathematical Models for the Problem of Routeing Wagons between Marshalling Yards, Bulletin of the International Railway Congress Association, Cybernetics and Electronics on the Railways, 4, 4, 145-155, Abril.
- NASCIMENTO, E.P. (1988), Operação de Trens em Linhas de Alta Densidade, Tese de Mestrado, IME - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.
- NASCIMENTO, E.P. (1989), Software for Railroad Load Transportation Management. A Brazilian Study. The 5th World Conference on Transport Research. Yokohama. Japão.
- NASCIMENTO, E.P. (1989), Software for Freight Transport Management in a Brazilian Railway, 6th International Congress ATEC (Association pour le Développement des Techniques de Transport, D'Environnement et de Circulation, Paris.
- NASCIMENTO, E.P. (1988), Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Trens de Carga, V Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transportes, Porto Rico.
- PLASIL, J. (1989), Optimum Plan of Train Forming in Dense Railway Networks, Rail International, Abril-Maio, 25-32.
- REVOL, B. e GOCHET, M. (1973), L'optimisation de la gestion du trafic des marchandises par wagons isolés - Étude UIC-METRA, Rail International, Vol.4, Nº9, Setembro, 925-932.
- SHAMBERGER, R.C. (1982), Automated Scheduling of Individual Freight Cars, Shipper to Receiver, Rail International, Julho, 75-80.
- SUZUKI, S. (1973), A Method of Planning Yard Pass Trains on a General Network, OR'72, North-Holland Publishing Company, 353-361.
- TRUSKOLASKI, A. (1968), Application of Digital Computer to the Optimisation of Freight Train Formation Plans, Bulletin I.R.C.A.: Cybernetics and Electronics on the Railways, Maio, 211-226.
- WIEGAND, Klaus-D. (1977), Methods for the Optimization of the Regular and Special Transport in long-distance Goods Traffic, Rail International, Março, 146-156.

BIBLIOGRAFIA NÃO REFERENCIADA

- KLUVANEK, P. e BRANDALIK, F. (1974), L'analyse du processus de concentration des wagons dans une gare de triage, Rail International, Dezembro, 817-839.
- SHIELDS, C.B. (1966), Models for Railroad Terminals, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol.2, Nº2, Dezembro, 123 -127.

CAPITULO 7

PROGRAMAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS

7.1 - ASPECTOS GERAIS DO CONTROLE E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Reconhece-se depois de vários anos que, em vista do montante elevado das despesas em capital ligado ao uso das locomotivas nos trens , é essencial realizar a maior utilização possível destes recursos.

Em termos simples, o problema da programação e distribuição de locomotivas pode ser descrito como sendo o de alocar locomotivas aos trens, de forma a obter uma solução que minimize o número de locomotivas necessárias para atender a uma dada programação de trens e, também, que minimize o percurso vazio destas locomotivas.

O método tradicional consiste em preparar manualmente a programação das locomotivas. Com a experiência e a qualificação adquiridas, obtém-se resultados altamente confiáveis. Todavia, com o crescimento do sistema ferroviário, não se tem certeza, com esta metodologia, que a melhor solução foi obtida. Além disso os tempos de tomada de decisão são habitualmente muito curtos para permitir o exame de alternativas quando da utilização desta metodologia manual. No contexto da produção, as considerações dominantes são as de assegurar que o esquema proposto seja executável e de respeitar os imperativos de produção. A experiência tem mostrado que se um especialista trata com uma programação contendo mais do que 50-70 viagens, então as respostas às questões: qual o número mínimo de locomotivas que deverá ser usado para atender uma dada programação?; quais viagens cada locomotiva deverá realizar ou quais as rotas ótimas?; qual a melhor distribuição física das locomotivas? ficam difíceis de serem respondidas se somente considerações intuitivas são levadas em consideração.

Na teoria, entretanto, constatou-se que o problema pode ser resolvido por métodos matemáticos como a programação linear. Este método é particularmente atraente porque permite dar uma solução ótima de forma fácil e rápida com o uso de recursos computacionais. A utilização do computador mostra-se essencial no gerenciamento das locomotivas no dia a dia da operação ferroviária.

Mostra-se no item a seguir uma revisão dos principais trabalhos desenvolvidos nesta área.

7.2 - MODELOS DE ROTEAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS

O problema de programação de locomotivas envolve o movimento destas na rede de forma a assegurar que todos os movimentos programados de trens tenham a tração necessária. É um problema que impõe decisões importantes e difíceis para uma empresa de transporte. Importantes porque elas contribuem no custo dos serviços ofertados pois envolvem a determinação do número de veículos utilizados, os deslocamentos vazios, os tempos de espera e ainda as viagens produtivas. E difíceis devido às múltiplas possibilidades que permitem um grande número de variáveis interrelacionadas no espaço e no tempo.

Segundo ASSAD (1980, 1981), até 1981 os principais trabalhos publicados sobre o assunto foram:

- * BARTLETT (1957) desenvolveu um método de alocação de locomotivas aos trens o qual minimiza o tamanho da frota a ser utilizada. Este método essencialmente faz os pares de chegadas e saídas nas estações, considerando as locomotivas como fluxos numa rede espaço-tempo e procura minimizar o tempo em que as locomotivas ficam paradas nos terminais. É indicado para frota homogênea e para o planejamento a nível tático.

- * BARTLETT e CHARNES (1957) desenvolveram, a partir do estudo anterior de Bartlett, um modelo de alocação de locomotivas aos trens que, além de determinar o tamanho mínimo da frota para manter a programação dos trens, estabelece as rotas possíveis para as locomotivas, considerando restrições de manutenção (locais de serviço, tempo necessário para o serviço e frequência de manutenção). Estas rotas formam ciclos e derivam essencialmente da associação de um grafo com a programação (horários) dos trens. O problema é colocado em forma de programação linear. O estudo foi feito para a Frisco Railroad (St. Louis - San Francisco Railway Company).

- * GERTSBACH e GUREVICH (1977) desenvolveram um procedimento formal de construir uma programação periódica ótima da frota que apresenta muita semelhança com o trabalho de Bartlett e Charnes. Os autores utilizaram o conceito de função déficit (diferença entre o número de partidas e de chegadas que ocorrem num terminal num dado período de tempo) para calcular a frota mínima.

- * SURMONT (1965) utilizou o algoritmo out-of-kilter para minimizar os custos relativos ao tamanho da frota e ao deslocamento vazio no movimento das locomotivas para atender a programação dos trens numa rede ferroviária.

* McGAUGHEY, GOHRING e McBRAYER (1976) usaram um procedimento similar ao de Surmont para a distribuição de locomotivas e vagões. O algoritmo out-of-kilter determina o fluxo de custo mínimo através da rede, de tal forma que as restrições de fluxo e custos aplicadas a cada arco sejam satisfeitas. É um modelo para o dia-a-dia.

* MONTY (1970) descreveu o problema no sistema ferroviário francês e utilizou o método de atribuição (o algoritmo se baseia no método Húngaro) para alocar as locomotivas em oferta nos pátios, aos trens. O autor enfatiza a utilização do computador em problemas deste tipo, isto é, problemas de natureza combinatória, pois obtém-se vantagens importantes quando comparado com a operação manual, principalmente quanto a velocidade na análise dos dados e na apresentação de soluções alternativas.

* HOLT (1973) apresentou o "bashpeak" - o sistema de programas que a British Rail utiliza para a programação de locomotivas. É utilizada uma heurística para fazer a alocação das locomotivas aos trens. Para minimizar o percurso vazio das locomotivas é utilizado o algoritmo "cascade" (cascata) que procura todas as distâncias mínimas num grafo direcionado. O autor apresenta alguns programas opcionais como: o ajuste das esperas nos terminais segundo as regras: primeira que chega primeira que parte ou última que chega primeira que parte; ou então a minimização da espera total nos terminais quando a programação das locomotivas é contínua durante vários dias.

* FLORIAN et al. (1976) desenvolveram uma pesquisa para aplicação numa frota não homogênea de locomotivas a qual procura encontrar a melhor distribuição para atender os trens. A função custo inclui custos de depreciação e de manutenção. O problema tem uma estrutura de fluxo de multicommodity numa rede espaço-tempo e é decomposto numa série de problemas de fluxo a custo mínimo, um para cada tipo de locomotiva, os quais podem ser resolvidos pelo algoritmo out-of-kilter. É indicado para o planejamento a nível tático e estratégico, pois o modelo, da forma como foi desenvolvido, é utilizado para estudar várias questões relacionadas com a aquisição de locomotivas.

Em anos mais recentes, os seguintes trabalhos foram publicados:

* DESROSIERS, PELLETIER e SOUMIS (1982) estudaram um modelo para determinar o número, o horário e as rotas dos veículos para efetuar cada um dos percursos dentro do intervalo de tempo imposto, de forma a minimizar o número de veículos e os custos de deslocamentos entre os percursos, respeitando as restrições de horários. A resolução do modelo é através de um método de otimização, que trata o tempo como variável contínua e encontra simultaneamente os horários e as rotas dos veículos. Devido ao grande número de rotas que satisfazem as restrições de horários, o problema é resolvido por geração de colunas. Este método de resolução corresponde a uma decomposição de Dantzig-Wolfe. Os autores

sugerem que o método pode ser aplicado na elaboração da tabela-horária dos trens e também na alocação de locomotivas aos trens considerando-se restrições de manutenção.

* DESROSIERS, PELLETIER e SOUMIS (1981) desenvolveram um método para determinar o caminho mínimo entre dois nós de uma rede onde, a cada nó, está associado um intervalo de tempo durante o qual é permitida a visita ao nó. Este modelo é resolvido por programação dinâmica, tendo como variáveis o tempo e o comprimento associados aos nós. O método serve para estabelecer rotas para os veículos respeitando restrições de horários.

* DESROSIERS, SOUMIS e DESROCHERS (1982) desenvolveram vários modelos para determinação de rotas sobre uma rede espaço-tempo satisfazendo restrições de horários: o problema de frota mínima e fluxo máximo resolvido pelo algoritmo de Ford e Fulkerson para fluxo máximo; o problema de frota mínima e custo mínimo e o problema de transporte ou alocação abordados como problemas de rede. Para estes modelos os autores sugerem a aplicação em problemas de alocação de locomotivas aos trens.

* BOOLER (1989) utilizou um método heurístico baseado num modelo de programação linear para achar a programação a custo mínimo para as locomotivas tracionarem um conjunto dado de trens. As horas de início das viagens podem ser fixas ou variáveis. O problema pode ser formulado como um problema de fluxo de multi-commodity cuja resolução é por decomposição e métodos de programação inteira. Para evitar as dificuldades da programação inteira, o autor propõe um método heurístico. O modelo não foi utilizado num problema prático.

* WRIGHT (1989) utilizou métodos estocásticos para resolver o problema de alocar locomotivas aos trens, dada uma tabela horária fixa para os trens e locomotivas de vários tipos. Dois algoritmos são usados: 1) um método de simples melhoramento local realizado sucessivamente a partir de pontos iniciais escolhidos randomicamente e 2) o método de simulação "annealing". Conforme o autor, os algoritmos descritos ainda não são apropriados para uso imediato na rede ferroviária. Outros estudos devem ser feitos para completá-los.

* LEAL (1992), a partir de um estudo de PHOTTOFF (1970) que trata da programação de locomotivas considerando uma estação e duas estações dependentes, estendeu o estudo para mais de duas estações. Primeiramente o autor faz uma análise do método Branch and Bound utilizado, propõe então uma heurística para aplicação do método e apresenta uma concepção geral de um sistema de alocação de locomotivas.

* NASCIMENTO (1988) desenvolveu uma heurística de alocação de locomotivas aos trens para ser usada com um sistema de informação em tempo real. Com as informações sobre as locomotivas disponíveis e os trens a serem tracionados, o algoritmo faz a alocação atendendo à restrição de menor tempo de viagem da origem da locomotiva à origem do trem e à restrição de atendimento ao horário de partida do trem. A locomotiva alocada a um trem é

automaticamente alocada à escala já estabelecida para este trem. São consideradas na programação dois tipos de locomotivas (diesel e elétricas) e trens tracionados com uma ou duas locomotivas.

* RYCKEBOSCH, H. e VANDER LINDEN, R. (1982) descrevem o sistema de gerenciamento computadorizado da frota de locomotivas elétricas implantado na SNCB. É utilizado um sistema de informação em tempo real, o gerenciamento é centralizado e a preparação das escalas é baseada nos resultados da aplicação do algoritmo de Ford e Fulkerson. Os autores não dão detalhes do modelo desenvolvido.

7.3 - COMENTÁRIOS SOBRE OS MODELOS

O problema, conforme colocado, consiste em desenvolver um método rápido e simplificado de determinar as programações das locomotivas de forma a permitir a análise das várias programações em pouco tempo e escolher a melhor entre as várias possibilidades.

O roteamento das locomotivas é feito de forma que, tanto quanto possível, tenha as seguintes características:

- minimizar o número de locomotivas necessárias
- assegurar que todas as viagens do período sejam providas com locomotivas e que os horários programados sejam cumpridos
- permitir tempo suficiente entre os horários de chegada e partida de forma que as transferências necessárias de uma ou mais locomotivas possam ser efetuadas
- alocar, sempre que possível, as mesmas unidades de transporte a todas as viagens que compõem uma viagem direta ou trem.

Pode-se observar, pela bibliografia referenciada no item anterior, que o problema de programação das locomotivas resume-se a achar a resposta às questões: qual o número mínimo de locomotivas necessárias para atender a uma dada programação e quais as viagens que cada locomotiva deve realizar. No gerenciamento desta programação tem-se ainda o problema da alocação das locomotivas em oferta nos pátios, aos trens. As pesquisas efetuadas ao longo dos anos mostraram que as respostas para estas perguntas apontam para problemas de determinação de cadeias em grafos e para problemas de circulação a custo mínimo.

A montagem da rede representativa que corresponde à programação (tabela horária) dos trens, pode ser efetuada de várias maneiras, de acordo com as restrições a serem

consideradas. A construção da rede implicará em maior ou menor eficiência para a resolução do problema, tanto do ponto de vista da aplicabilidade da metodologia no dia a dia da operação ferroviária, como do ponto de vista computacional, portanto merece toda a atenção. As Figuras 7.1 e 7.2 a seguir ilustram o estudo realizado por McGAUGHEY et al (1973). No desenvolvimento da rede representativa, o modelo considera todas as possibilidades de ligação com um pátio. Uma ligação entre duas viagens é estabelecida se a diferença entre o horário de chegada de um trem e o de partida não é inferior ao tempo mínimo necessário a esta correspondência, nem superior à duração máxima permitida para esta ligação. Estes limites são fixados pelo gerente da operação. Após ter estabelecido todas as correspondências entre os horários e atribuído os parâmetros apropriados aos arcos, a rede representativa é completada estabelecendo as ligações entre os nós terminais situados à esquerda com a origem de cada horário, assim como entre o término de cada horário e os nós terminais situados à direita. Um arco de retorno é traçado ligando, nas mesmas condições, os nós terminais situados à esquerda da rede com aqueles situados à direita. Os parâmetros atribuídos a cada arco são: número máximo de unidades de fluxo, número mínimo de unidades de fluxo e custo de cada unidade de fluxo (no exemplo representam os tempos de ligação). O algoritmo out-of-kilter determina o fluxo a custo mínimo através da rede, de tal forma que as restrições aplicadas a cada arco sejam satisfeitas.

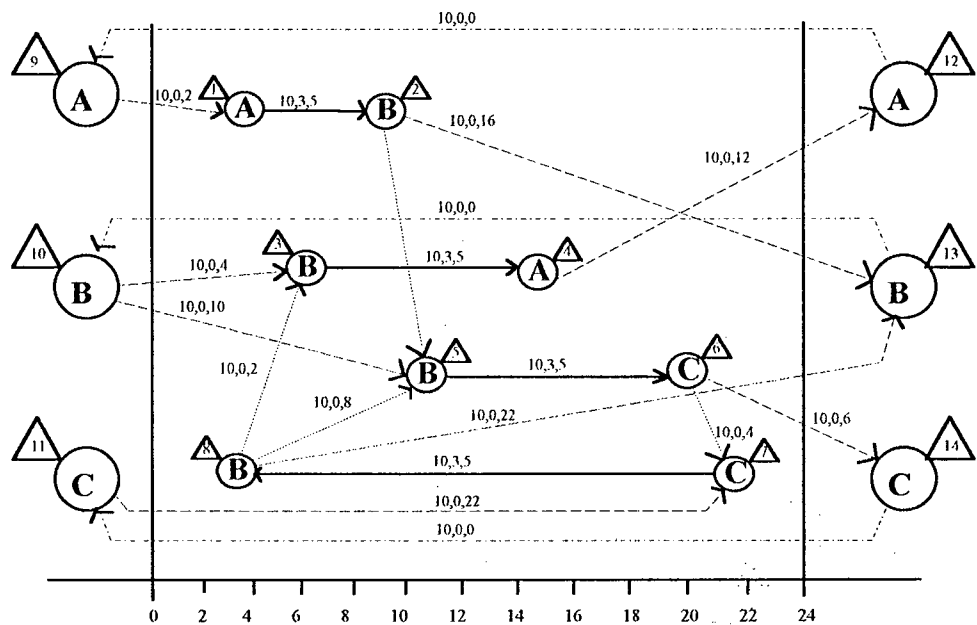


Figura 7.1 - Rede Representativa (4 trens)

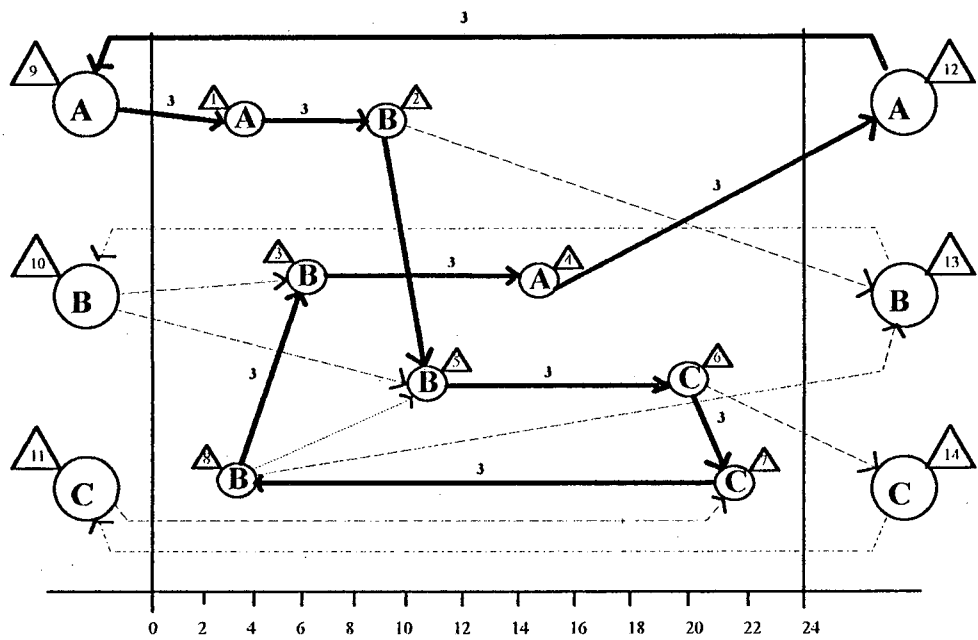


Figura 7.2 - Rede Resolvida

NOVAES (1978) mostra uma aplicação do modelo de atribuição a um problema onde deseja-se minimizar a frota necessária para atender uma dada programação de viagens, identificando também a seqüência em que estas viagens devem ser realizadas. A tabela a seguir mostra a programação de viagens.

Tabela 7.1 - Programação das Viagens

viagem nº	origem	destino	horário de partida	horário de chegada
1	A	B	09:00	12:00
2	A	B	10:00	13:00
3	A	B	15:00	18:00
4	A	C	20:00	24:00
5	A	C	22:00	02:00
6	B	A	04:00	07:00
7	B	A	11:00	14:00
8	B	A	15:00	18:00
9	C	A	07:00	11:00
10	C	A	15:00	19:00

É montada a matriz A analisando-se todas as seqüências de viagens, conforme mostrado a seguir. O objetivo é minimizar o tempo morto (tempo dispendido pela unidade de transporte desde o instante de chegada da viagem i até o instante de partida da viagem j) global das unidades de transporte, que são os elementos a_{ij} representados na matriz. O valor ∞ indica a inviabilidade física da seqüência de viagens $i \rightarrow j$ para a unidade de transporte. O algoritmo Húngaro é aplicado a cada uma das submatrizes em que é dividida a matriz A.

Viagem	n.o	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A =	1	∞	∞	∞	∞	∞	16	23	3	∞	∞
	2	∞	∞	∞	∞	∞	15	22	2	∞	∞
	3	∞	∞	∞	∞	∞	10	17	21	∞	∞
	4	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	7	15
	5	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	5	13
	6	2	3	8	13	15	∞	∞	∞	∞	∞
	7	19	20	1	6	8	∞	∞	∞	∞	∞
	8	15	16	21	2	4	∞	∞	∞	∞	∞
	9	22	23	4	9	11	∞	∞	∞	∞	∞
	10	14	15	20	1	3	∞	∞	∞	∞	∞

O seqüenciamento obtido para as viagens é mostrado a seguir:

1 - 8 - 4 - 10 - 5 - 9 - 3 - 6 - 2 - 7 - 1

Calcula-se então o tempo necessário para uma unidade de transporte realizar este seqüenciamento e divide-se por 24 (horas). No exemplo tem-se:

$120 / 24 = 5$ unidades de transporte

Conforme colocado anteriormente, além da busca da solução para os problemas levantados, quer-se resolvê-los de forma eficiente, tanto do ponto de vista da aplicabilidade no dia a dia da operação como do ponto de vista computacional. Para tanto apresenta-se no item a seguir a metodologia que considerou-se como a mais adequada.

7.4 - PROPOSTA DE UM MODELO DE ROTEAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS

7.4.1 - ROTEAMENTO

Conforme exposto no Capítulo 2 (item 2.3.2), a escala das locomotivas está estabelecida no Plano de Transportes da ferrovia. Esta escala é feita para atender todos os trens possíveis na rede ferroviária em questão, isto é, para atender o gráfico saturado de trens naquela rede. Corresponde a um planejamento a nível tático (geralmente para um horizonte de planejamento de 6 a 12 meses).

Para a execução dos serviços de trens no dia-a-dia, há a necessidade de refazer a escala, pois nem todos os trens previstos no Plano de Transportes irão circular, podendo inclusive ocorrer a mudança dos horários estabelecidos, o que de certa forma ocorre até com bastante frequência.

Dai a necessidade do gerente da operação ter a seu dispor uma ferramenta que o ajude na tomada de decisão no dia-a-dia, buscando a melhor solução para estas mudanças nos planos operacionais.

Em resumo, o problema que se tem é o seguinte: em cada período da operação, o qual pode ser de 24 horas ou até mesmo de 12 horas (que é o mais comum no sistema ferroviário brasileiro), são programados os trens que irão circular naquele período, com seus horários de partida e chegada. Para estes trens é preciso alocar as locomotivas e dar um seqüenciamento ótimo a estas locomotivas, de forma a se ter o melhor aproveitamento possível deste equipamento.

Tem-se então, por objetivo, construir uma nova escala de forma a minimizar o número de locomotivas a serem utilizadas na programação de trens estabelecida para o período.

Estudos sobre este tipo de problema apareceram na literatura de Pesquisa Operacional em 1954 (DANTZIG e FULKERSON, 1954), tendo o mesmo sido formulado como um problema de transporte. Buscando por objetivo também a eficiência computacional optou-se pela metodologia apresentada a seguir.

7.4.1.1- DEFINIÇÕES

Um grafo direcionado $G = [N; A]$ é definido como uma coleção, N , de elementos, junto com um subconjunto distinto, A , de pares ordenados (x, y) , onde $x, y \in N$. Os membros de N são chamados nós e os membros de A são chamados arcos. A representação gráfica de G terá um ponto distinto para cada elemento $x \in N$ e uma flecha de x a y se e somente se $(x, y) \in A$.

Seja x_1, x_2, \dots, x_n ($n \geq 2$) uma seqüência de membros distintos de N tal que $(x_i, x_{i+1}) \in A$ para todo $i = 1, 2, \dots, n-1$. Então a seqüência de nós e arcos $x_1, (x_1, x_2), \dots, (x_{n-1}, x_n), x_n$ é definida como uma cadeia (ou uma cadeia direcionada). Um nó $x \in N$ também é definido como uma cadeia. Se é estipulado que $x_1 = x_n$ ($n \geq 2$), então a seqüência é definida como um ciclo (ou um ciclo direcionado). Um grafo direcionado que não contém ciclos direcionados é chamado de grafo direcionado acíclico.

Um grafo cujo conjunto de nós, N , é dividido em dois subconjuntos S e T tal que $S \cup T = N$ e $S \cap T = \emptyset$, com cada arco de A indo de um nó de S a um nó de T , é chamado um grafo bipartido. Com o objetivo de mostrar que um grafo G é um grafo bipartido, escreve-se $G^* = [S, T; A^*]$.

Quando várias funções (capacidade, fluxo, etc.) são alocadas aos membros de A , chamamos o grafo de rede.

7.4.1.2 - DECOMPOSIÇÃO EM CADEIAS DE UM GRAFO ACICLICO (FORD e FULKERSON, 1962)

Uma decomposição de um grafo acíclico em cadeias é uma partição de N tal que os nós de cada parte (com seus arcos de conexão) formam uma cadeia. A partir da definição de uma cadeia está claro que o grafo pode ser sempre decomposto em $|N|$ cadeias formadas somente por nós. Um grafo acíclico está mostrado na Figura 7.3. Este mesmo grafo acíclico decomposto em cinco cadeias está mostrado na Figura 7.4, onde as cadeias estão indicadas pelas linhas fortes. Existem duas cadeias formadas por apenas nós nesta decomposição: x_5 e x_{10} .

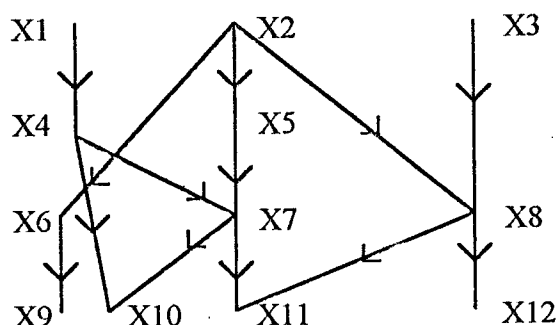


Figura 7.3 - Grafo acíclico $G = [N, A]$

O problema é encontrar o número mínimo de cadeias no qual um grafo acíclico pode ser decomposto, já que a escala que uma locomotiva realiza numa programação de trens (Figura 7.6) é uma cadeia.

Em correspondência a um dado grafo acíclico $G = [N, A]$ constrói-se um grafo bipartido $G^* = [S, T; A^*]$ onde $S = \{s_i\}$, $T = \{t_j\}$, $|S| = |T| = |N|$ sendo que os índices i e j variam de 1 a $|N|$. A^* é construído a partir de G da seguinte forma: se $(x_i, x_j) \in A$ haverá um arco (s_i, t_j) em G^* . Têm-se uma rede bipartida G^* definindo valores de capacidade iguais a 1 em todos os arcos $(s_i, t_j) \in A^*$.

A seguinte correspondência será definida entre a decomposição em cadeias de G e os fluxos de S a T em G^* : se o arco (x_i, x_j) de G é uma parte de uma das cadeias na decomposição, existe um fluxo de uma unidade de s_i a t_j em G^* . Se (x_i, x_j) não faz parte de uma cadeia, haverá um fluxo de valor zero em (s_i, t_j) . Portanto, (x_i, x_j) será parte de uma cadeia se, e somente se, existir um fluxo unitário em (s_i, t_j) . Da definição de cadeia e da seleção dos valores da capacidade, fica claro que a correspondência é de um para um, se toda fonte e todo sumidouro ficar limitado a no máximo uma unidade de fluxo. (Se x_k é uma cadeia de um nó não haverá um fluxo positivo saindo de s_k ou entrando em t_k em G^*). Na Figura 7.4 a rede bipartida e os fluxos (linhas fortes) correspondem à decomposição em cadeias do grafo da Figura 7.3.

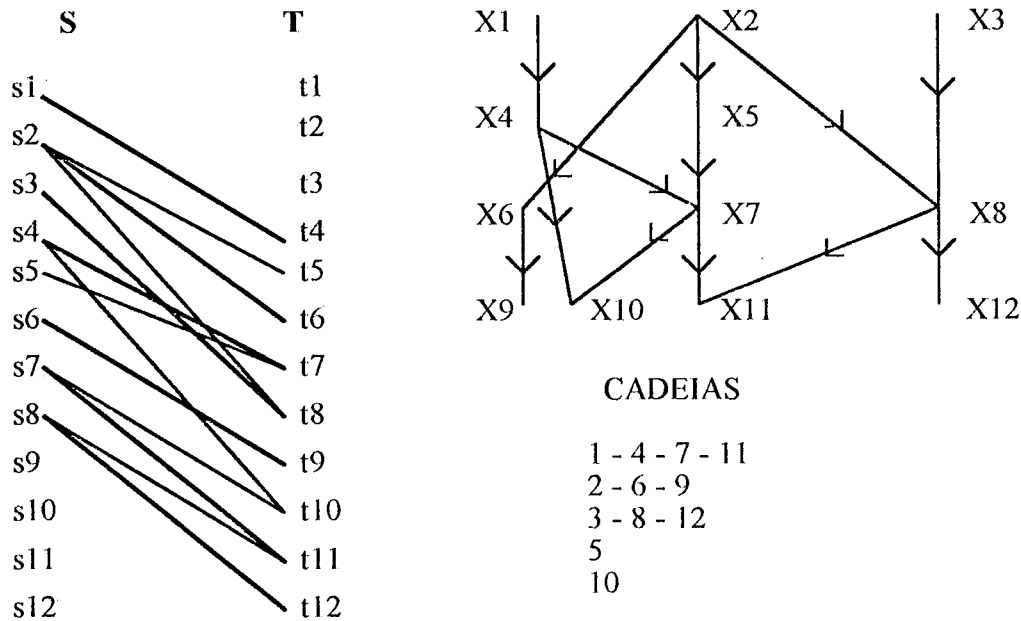


Figura 7.4 - Grafo bipartido $G^* = [S, T; A^*]$

O teorema a seguir mostra um método de encontrar o número mínimo de cadeias em que um grafo acíclico G pode ser decomposto.

Para um grafo acíclico decomposto em cadeias, C será definido como o conjunto de cadeias e D o conjunto de arcos que faz parte das cadeias de C .

O teorema de Dilworth (FORD e FULKERSON, 1962) diz: Seja $G = [N; A]$ um grafo acíclico decomposto em cadeias. Então $|C| + |D| = |N|$. Dilworth prova o teorema da seguinte forma: as cadeias serão indexadas por k , $k=1, \dots, |C|$. O número de nós que pertencem à k -ésima cadeia será referenciado por n_k . Como cada nó pertence à somente uma cadeia têm-se:

$$\sum_{k=1}^{|C|} n_k = |N|$$

Uma cadeia, por sua definição, tem um arco a menos que o número de nós.

Assim:

$$\sum_{k=1}^{|C|} (n_k - 1) + |C| = |D| + |C|$$

de onde:

$$|N| = |D| + |C|$$

A partir da identidade colocada no teorema acima, a minimização de $|C|$ pode ser encontrada maximizando $|D|$. Mas $|D|$ é o valor do fluxo de S a T na rede G^* sujeita a restrição de no máximo uma unidade de fluxo em cada fonte e em cada sumidouro.

Assim, fica claro que o problema de determinar o número mínimo de cadeias no qual G pode ser decomposto é resolvido encontrando-se o fluxo máximo em G^* .

7.4.2 - DISTRIBUIÇÃO FÍSICA DAS LOCOMOTIVAS

Nesta fase, tendo sido estabelecido anteriormente o número mínimo de locomotivas necessárias para atender a uma dada programação de trens e o roteamento destas locomotivas, isto é, quais os trens, ou seqüências de trens, que cada locomotiva deverá tracionar, aplica-se o modelo desenvolvido para a distribuição de vagões vazios, descrito no Capítulo 4, para se fazer a distribuição física das locomotivas.

Com as informações sobre as ofertas de locomotivas (tipos, locais onde se encontram, número de unidades disponíveis de cada tipo) e sobre a demanda das mesmas (tipos, locais de origem dos trens a serem tracionados, número de unidades necessárias em cada escala) faz-se a distribuição a custo mínimo. É importante salientar que as demandas são o resultado da resolução do grafo bi-partido. As locomotivas deverão ser alocadas aos trens únicos ou ao primeiro trem de cada uma das seqüências de trens determinadas.

Da mesma forma que para a distribuição de vagões vazios, o programa deverá ser rodado uma vez para cada tipo de locomotiva necessária e a cada período de planejamento.

Como a metodologia aqui proposta já se encontra bem detalhada no Capítulo 4, não se fará outros comentários sobre a aplicação da mesma.

Apenas chama-se a atenção para o fato de que para os vagões vazios é interessante, do ponto de vista gerencial, ter-se uma previsão de alguns dias sobre a oferta e demanda de vagões e a distribuição a ser feita. Já no caso das locomotivas, também seria interessante e conveniente tal previsão, mas como os trens são planejados período à período, assim como o estabelecimento de seus horários, fica bastante difícil uma previsão da programação para alguns dias. O mais certo é fazer o estudo completo, isto é, a determinação da programação dos trens, a determinação do número mínimo de locomotivas necessárias para servir estes trens, a escala destas locomotivas e a distribuição física das mesmas, período a período ou se possível a cada 2 períodos (1 dia).

7.5 - A APLICAÇÃO DO MODELO

7.5.1 - A METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MODELO

Como ilustração de uma aplicação da metodologia descrita no item 7.4, e com o objetivo de salientar as várias alternativas colocadas à disposição do gerente da operação, apresenta-se um serviço de trens atendendo os terminais A, B e C conforme ilustrado na Figura 7.5.

Dados os horários de partidas dos trens em cada terminal, suas origens e destinos e seus horários de chegada, qual o número mínimo de locomotivas necessário para atender esta programação e qual a escala destas locomotivas?

A Figura 7.5 mostra a programação de trens numa rede espaço-tempo. As linhas verticais representam os eixos temporais nos diversos terminais. Pontos na mesma altura representam o mesmo horário. Todos os serviços estão indicados por arcos numerados, os quais representam também os horários de partida e de chegada nos eixos temporais.

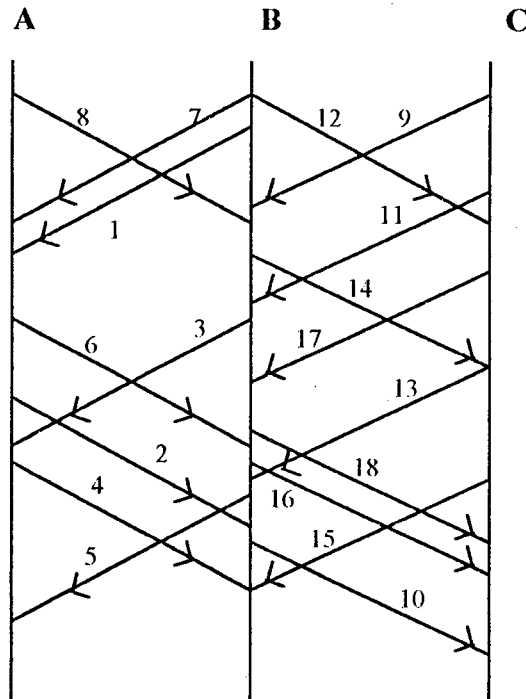


Figura 7.5 - Exemplo de uma programação de trens

A rede resultante deve estar de acordo com o horizonte de planejamento. Entretanto, se a programação é periódica, um período será suficiente. Um serviço programado da estação X para a estação Y é mostrado por um arco direcionado de X para Y com a origem no horário de partida em X e o destino no horário de chegada em Y. O número do serviço é escrito no arco. Por exemplo, a viagem número 7 corresponde ao primeiro serviço de B para A. Uma locomotiva chegando na estação X pode ser conectada a qualquer das partidas de trens programadas em X, após sua chegada nesta estação. Pode-se assumir que o tempo necessário para os serviços de manutenção e abastecimento da locomotiva antes dela estar pronta para a próxima viagem, está incluído no horário de sua última chegada. Por exemplo, uma locomotiva alocada para a viagem número 17 (Figura 7.5) poderá depois ser alocada a qualquer uma das viagens 18, 16, 5 e 10 que saem de B em horários mais tarde neste mesmo dia. Estas alocações possíveis estão mostradas no grafo direcionado da Figura 7.6, onde o nó x_i representa o número da viagem i e o arco (x_i, x_j) uma sequência possível de duas viagens pela mesma locomotiva.

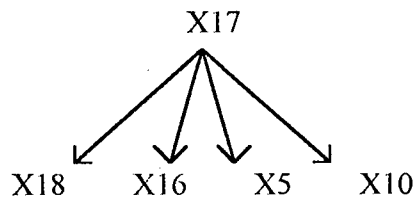


Figura 7.6 - Alocações possíveis para a locomotiva usada no serviço número 17. Este é um subgrafo do grafo acíclico completo da Figura 7.5

O grafo G que mostra estas relações para toda a programação é acíclico (já que o tempo progride numa forma acíclica). Uma cadeia em G descreve os serviços aos quais uma determinada locomotiva será alocada. Assim, o problema de atender a uma dada programação com a máxima utilização das locomotivas pode ser colocado como um problema de decomposição de um grafo no número mínimo de cadeias.

No exemplo dado, supõe-se que uma locomotiva chegando em X será conectada a uma partida de X no mesmo período ou esperará em X até o próximo; isto é, o "percurso vazio" (locomotiva escoteira ou sendo rebocada por um trem para tracionar outro trem a partir de outro terminal) não está sendo permitido. Se esta alternativa é considerada (a critério do gerente da operação), o grafo G terá arcos que saem dos nós correspondentes às viagens chegando a um terminal e se ligam às viagens partindo de outro terminal. E se um arco desta natureza é incluído numa cadeia, o percurso vazio pode ser feito.

Como mostrado acima, o problema pode ser resolvido construindo a rede bipartida G^* , o que pode ser feito diretamente da programação mostrada na rede espaço-tempo, e calculando o fluxo máximo em G^* (FORD e FULKERSON, 1962). A Figura 7.7 mostra a rede G^* formada a partir da rede espaço-tempo da Figura 7.5. As linhas fortes indicam unidades de fluxo. O fluxo indicado de S a T é máximo e tem um valor de 11. Como há 18 viagens na programação, pelo teorema de Dilworth o número mínimo de locomotivas necessárias é 7. As cadeias podem ser lidas diretamente de G^* .

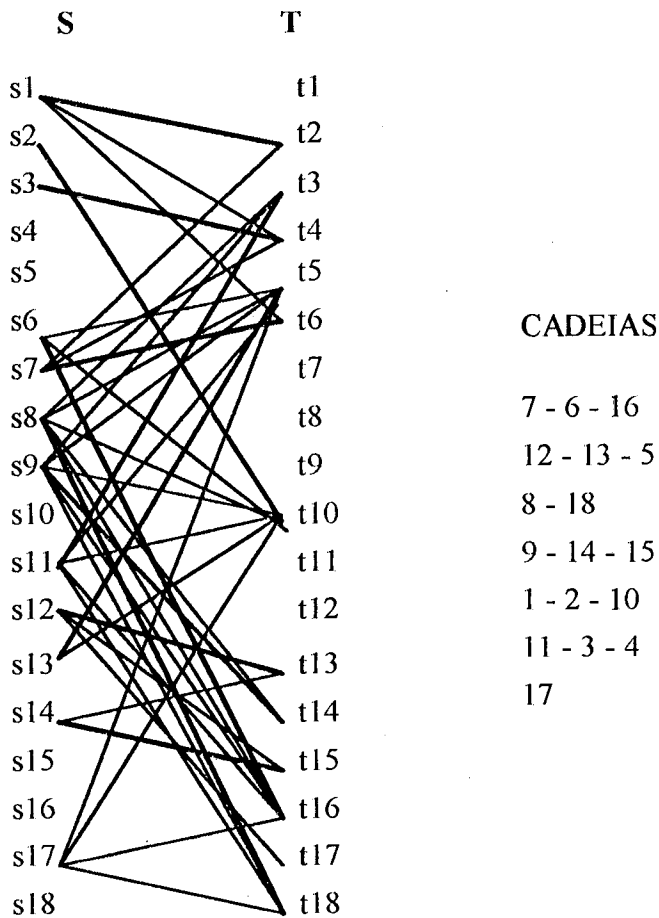


Figura 7.7 - O grafo bipartido para o exemplo da programação apresentada na Figura 7.5

Neste exemplo, a mesma locomotiva fará a viagem número 13 e a viagem número 5, já que há uma unidade de fluxo em (s_{13}, t_5) . Como a solução do fluxo máximo não é, em geral, única, muitas combinações de viagens são possíveis. Pode ser seguida a seguinte regra: ligar à cada chegada a partida mais próxima. Segundo GERTSBACH e GUREVICH

(1977), a prova do teorema que diz que o tamanho da frota $FS(S)$ de uma dada programação S é igual ao déficit total $D(S)$, garante que seguindo esta regra obtem-se sempre uma boa cadeia. Fica a critério do gerente da operação a escolha do que é mais conveniente. Nesta escolha podem ser levados em consideração, por exemplo, o tempo entre conexões e o trabalho das equipagens. Pode ser desejável, sob este ponto de vista, conexões mais longas no tempo ou mais curtas, a fim de evitar uma má distribuição de trabalho entre as equipagens (muito ou pouco trabalho em alguns períodos).

Para resolver este problema, um valor C_{ij} pode ser associado com cada conexão possível (x_i, x_j) (LEVIN, 1971). O valor de C_{ij} terá um valor alto se a conexão em questão for curta e a desejada for longa e um valor baixo caso contrário. Em G^* o fluxo no arco (s_i, t_j) terá um custo de C_{ij} . O fluxo máximo que minimiza o custo sobre todos os fluxos máximos atenderá os dois objetivos: a minimização do número de locomotivas necessárias e a geração de cadeias mais apropriadas aos objetivos da operação no período considerado. Um algoritmo bastante eficiente para encontrar o custo-mínimo e fluxos-máximos é dado por FORD e FULKERSON (1962). Se as cadeias obtidas não são satisfatórias, um número maior de locomotivas pode ser considerado como uma alternativa. Se o fluxo de G^* é uma unidade menor do que o máximo, uma locomotiva a mais é necessária, já que o número de cadeias é uma vez maior que o mínimo. O fluxo a custo mínimo para qualquer tamanho da frota pode ser determinado e a decisão final tomada usando estes resultados.

No exemplo mostrado neste item, foram colocados custos às viagens em valores crescentes a partir de 1, a medida em que os tempos de conexão entre elas fossem aumentando. Foi então aplicado o algoritmo out-of-kilter de circulação a custo mínimo e obteve-se as seguintes cadeias que, como pode-se observar, seguem a regra: a primeira que chega é a primeira que sai.

1 - 2 - 10

11 - 3 - 4

7 - 6 - 16

8 - 14 - 13 - 5

12 - 17 - 18

15

9

Ilustrando a metodologia descrita acima para aplicação do modelo, as Figuras 7.8 e 7.9 a seguir mostram os resultados obtidos para os problemas estudados por NOVAES (1978) e por McGAUGHEY et al (1973), descritos no item 7.3

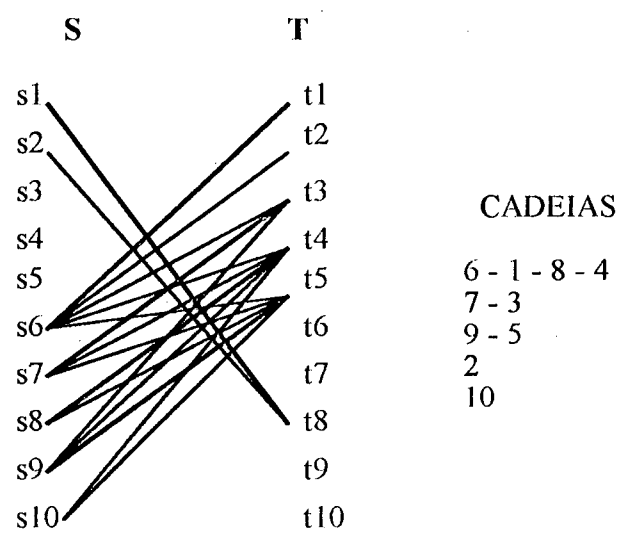


Figura 7.8 - Grafo Bi-Partido (cadeias resultantes)

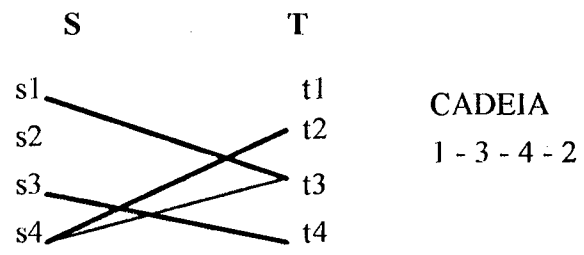


Figura 7.9 - Grafo Bi-Partido (cadeia resultante)

7.5.2 - O DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

O pacote computacional para resolver o problema da programação e alocação de locomotivas consta de três programas: 1) FLUXTREM [FLUXo de TREM(ns)], 2) ROTALOCO [ROTeamento de LOCOmotivas] e 3) ALOCO [ALOCação de LOCOmotivas]. Este último é basicamente o programa VAGZIOS, com algumas pequenas modificações para atender às particularidades da alocação ou distribuição de locomotivas. A sua estrutura e

opções, no entanto, são as mesmas do programa VAGZIOS e, portanto, já foram bastante detalhadas no Capítulo 4. A utilização do programa ALOCO, na alocação das locomotivas aos trens únicos ou ao primeiro trem de uma sequência de trens, também já foi discutida e mostrada em itens anteriores deste Capítulo. Destaca-se apenas que esta alocação é feita a custo mínimo. Assim, este item se limitará à apresentação e descrição dos programas FLUXTREM e ROTALOCO, os quais, em última análise, definirão as demandas de locomotivas que servirão de entrada ao programa ALOCO. Todos os programas mencionados acima foram desenvolvidos em linguagem FORTRAN 77.

Considerando a tabela (elaborada para um determinado horizonte ou período de planejamento) de origem e destino de cada trem e dos horários de partida e chegada, o programa FLUXTREM traça o grafo bi-partido. Conforme visto, o grafo bi-partido indica as precedências de cada trem em relação aos outros, mostrando as diversas possibilidades de sequenciamento dos trens. A partir do grafo bi-partido o programa FLUXTREM prepara ainda a rede orientada que servirá de entrada ao programa ROTALOCO. Esta rede é criada com a particularidade de poder ser resolvida pelo algoritmo out-of-kilter como um problema de fluxo máximo. Para isto são criados dois nós, representando a fonte e o sumidouro. A fonte é ligada ao conjunto de nós S (origens) do grafo bi-partido, enquanto o conjunto de nós T (destinos) são ligados ao sumidouro. Os nós do conjunto S são ligados aos nós do conjunto T conforme as precedências dos horários de trens em cada estação e conforme descrito anteriormente. Todos os arcos têm custo zero e capacidades superior e inferior iguais, respectivamente, a um e zero, exceto aquele que liga o sumidouro à fonte, cujo custo é negativo, sendo zero a capacidade inferior e infinito, ou um número muito grande, a capacidade superior. A fonte, cujo nó representativo recebe o número 1, é ligada apenas aos nós do conjunto S, dos quais partem arcos para os nós do conjunto T e apenas estes, por sua vez, são ligados ao sumidouro, cujo nó recebe o último número do conjunto total de nós da rede. Criada a rede deste modo, há necessidade de renumerar os nós do grafo bi-partido. Os nós que não são origem ou destino de arcos são desprezados. Considerando o grafo bi-partido da Figura 7.8, o grafo resultante é mostrado na Figura 7.10 a seguir, sendo os números entre parêntesis os originais do grafo bi-partido da Figura 7.8.

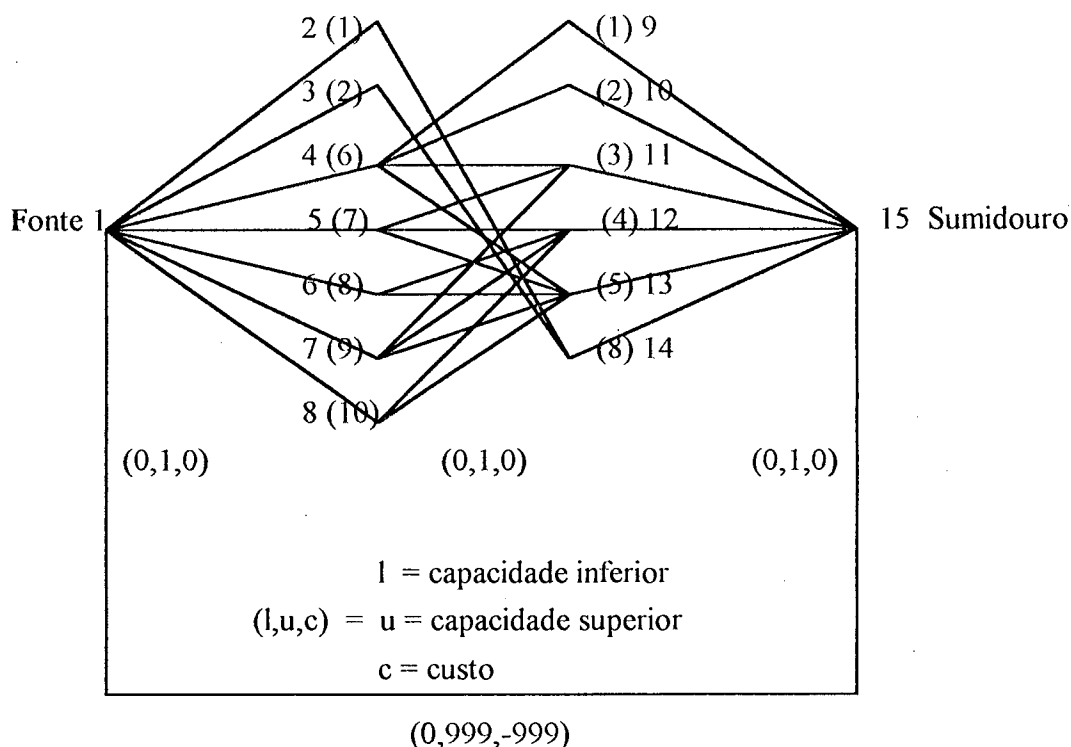


Figura 7.10 - Grafo Resultante do Grafo Bi-Partido da Figura 7.8

A partir do grafo mostrado na Figura 7.10 o programa FLUXTREM cria a rede dele resultante e cujas características dos seus arcos (origem, destino, custo, capacidades superior e inferior) são gravadas no arquivo SEQTREM criado pelo programa. Este arquivo servirá de entrada ao programa ROTALOCO. É conveniente dizer que os programas FLUXTREM e ROTALOCO relacionam os nós originais do grafo bi-partido da Figura 7.8 (mostrados também entre parêntesis na Figura 7.10) com os nós da Figura 7.10, pois os nós originais é que realmente representam a numeração dos trens. Deve ser notado ainda que os nós do conjunto S, que não são origem de arcos, representam término de cadeias; os nós do conjunto T que não são destinos de arcos representam início de cadeias; e os nós de S ou T com arcos mas que não fazem parte do fluxo máximo representam seqüências de trens únicos, pois não precedem nenhum outro trem. O programa ROTALOCO também identifica esses nós (ou trens).

O programa ROTALOCO, utilizando o algoritmo out-of-kilter, resolve a rede como um problema de fluxo máximo. Como resultado indica o número mínimo de seqüências de trens (contando inclusive com as seqüências unitárias) e as próprias seqüências, ou seja, os números de cada trem da seqüência. O número mínimo de seqüências de trens é o próprio número de locomotivas necessárias para atender à programação dos trens.

A partir da listagem pelo programa ROTALOCO das seqüências de trens, pode-se determinar a demanda de locomotivas no sistema ferroviário. O primeiro trem de cada seqüência indica a estação e a hora do horizonte de planejamento em que as locomotivas são demandadas. Tendo-se a demanda, verifica-se os locais e os horários de disponibilidades de locomotivas. Pode-se então, conforme a metodologia descrita no Capítulo 4, criar-se uma rede espaço-tempo, em que os nós representarão os diversos pontos do sistema ferroviário em diferentes horários. Assim, por exemplo, se o horizonte de planejamento é de 7 horas (das 06:00 às 13:00 horas) e se o intervalo de planejamento é de 1 hora, cada estação do sistema estará representada por 8 nós. Segundo a metodologia descrita no Capítulo 4, as ofertas e demandas de locomotivas serão alocadas nesses nós, conforme a disponibilidade de locomotivas no sistema e conforme os horários de partida dos trens iniciais de cada seqüência. A partir dessa rede espaço-tempo, acrescida dos nós fantasmas, dos arcos de falta e dos demais elementos descritos no Capítulo 4, o programa ALOCO indicará a alocação das locomotivas. De acordo com a saída do programa poder-se-á verificar também as demandas não atendidas e aquelas atendidas posteriormente ao horário inicial de saída do trem, indicando atrasos. Isto possibilitará ao gerente analisar as possibilidades e tomar as providências necessárias, inclusive indicando viagens vazias de locomotivas, de forma a minimizar, ou mesmo evitar, faltas e atrasos. No item 7.6, a aplicação prática do modelo permitirá exemplificar melhor a concepção dos programas.

7.5.3 - O ALGORITMO OUT-OF-KILTER

Este algoritmo já se encontra detalhado no Capítulo 4. Faz-se aqui alguns comentários sobre sua aplicação na metodologia proposta neste capítulo.

Conforme exposto no item 7.4, feito o grafo bipartido a partir de uma dada programação de trens, encontra-se o número mínimo de cadeias (no caso, o número mínimo de locomotivas) e o roteamento das locomotivas, pela aplicação do algoritmo de fluxo máximo de FORD e FULKERSON (1962). Para resolver o problema do fluxo máximo o melhor é o próprio algoritmo de fluxo máximo pela estrutura especial que possui. Entretanto, o algoritmo out-of-kilter também pode ser utilizado para resolver o problema de fluxo máximo, ligando-se a fonte ao sumidouro, por um arco com custo negativo e com capacidade superior infinita ou também muito grande. Os outros arcos, ligando a fonte aos demais nós da rede, estes nós entre si e também ao sumidouro, têm capacidade 1 e custo 0. A capacidade inferior de todos os arcos da rede é feita igual a zero. Conforme exposto no item 7.5.1, o problema de roteamento das locomotivas pode ser colocado como um problema de circulação a custo mínimo, caso o gerente aloque custos às conexões de trens, com o objetivo de estabelecer regras para a

construção destas conexões. Assim, utilizando-se o out-of-kilter, é possível resolver o problema de locomotivas tanto pelo fluxo máximo como pela circulação a custo mínimo. Daí a razão da escolha deste algoritmo para a resolução dos problemas apresentados.

7.6 - A APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO

Como nas outras aplicações efetuadas também a aplicação dos modelos desenvolvidos neste item será feita com dados fictícios. Todavia, os mesmos, como nos demais casos, são verossímeis com os dados ocorridos no dia a dia da operação ferroviária.

	13:00	13:00		13:00
	14/E	21/A		33/D
12:00	12:00	12:00	12:00	12:00
7/B	13/D	20/D	25/B	30/B
11:00	11:00			11:00
6/E	12/C			32/B
10:00	10:00	10:00		
5/B	11/A	19/B		
09:00	09:00	09:00	09:00	09:00
4/B	10/C	18/B	24/F	29/F
				31/E
08:00	08:00	08:00	08:00	08:00
3/B	9/C	17/E	23/C	28/F
07:00	07:00	07:00	07:00	07:00
2/C	8/A	16/D	22/E	27/C
06:00		06:00		06:00
1/B		15/B		26/D

A1hB2hC1hD2hE2hF

Convenção:

X

X = horário de saída

Y/Z

Y = número do trem

Z = destino

Figura 7.11 - Horários de Trens

Na Figura 7.11 apresenta-se, para um determinado período de planejamento, os horários de partida de trens em seis estações do sistema ferroviário e os tempos de viagem entre as estações, assim como a estação de destino do trem. Supõe-se ainda que todos os trens requerem a mesma tração, a qual pode ser suprida por uma única locomotiva. Com base nos dados da Figura 7.11 pode-se preparar a entrada do programa FLUXTREM. Esta entrada consiste do arquivo HORATREM mostrado no Apêndice D.1. O arquivo HORATREM consiste do número total de estações, do número ou código e do nome de cada estação, do número de horários de trens de cada estação e das origens e destinos de cada trem, bem como dos seus horários de partida e chegada e do número de locomotivas requeridas por cada um dos trens da programação.

Como saída, o programa FLUXTREM pode fornecer várias listagens de dados e resultados, bem como o grafo bi-partido descrito anteriormente. Todavia a saída realmente importante para o modelo é o arquivo SEQTREM gravado pelo próprio programa. Como ilustração, entretanto, apresenta-se uma saída completa no Apêndice D.1. O arquivo SEQTREM contém os arcos da rede que será resolvida pelo programa ROTALOCO como um problema de fluxo máximo. Não há necessidade do gerente tomar conhecimento deste arquivo. Assim, após rodado o programa FLUXTREM, o próximo passo é rodar o programa ROTALOCO. Este programa fornece também opções de saída, podendo apresentar dados e resultados intermediários e finais. Uma saída completa é apresentada no Apêndice D.2. Contudo, para a tomada de decisão, interessa apenas as "Seqüências de Trens Servidas por uma mesma Locomotiva", a qual é apresentada na Tabela 7.1.

O seqüenciamento dos trens é também mostrado de forma gráfica na Figura 7.12, a qual foi elaborada a partir da Figura 7.11 e dos dados da Tabela 7.2 (saída do programa ROTALOCO).

Tabela 7.2 - Saída do Programa ROTALOCO: Sequências de Trens Servidos por uma mesma Locomotiva

1 - 8 - 3 - 10 - 21
2 - 19
4 - 11 - 6
5 - 12
7 - 14
15 - 9 - 20
16 - 23 - 18 - 13
17 - 30
22 - 29
26 - 24 - 33
28 - 32
25
27
31

A partir destas sequências o passo seguinte é fazer a alocação das locomotivas ao primeiro trem de cada sequência. Isto, conforme dito anteriormente, pode ser feito com o programa ALOCO. Este programa deverá ser rodado com uma antecedência suficiente, de modo que a movimentação necessária das locomotivas possa ser feita a tempo de respeitar, tanto quanto possível, o horário de saída dos trens.

A exemplo do programa VAGZIOS, o programa ALOCO trabalha com três arquivos: ARCOLOCO, OFERLOCO e DEMALOCO. No arquivo ARCOLOCO são dadas as características necessárias para a formação da rede espaço-tempo: número de estações (nós), custos de falta, estoque e movimento nos arcos, número de arcos, capacidade de fluxo nos arcos, tempo de viagem entre as estações ou nós e também os próprios arcos, ou seja, as ligações possíveis entre os nós. Os tempos de viagem nos arcos (ou entre os nós) são aqueles mostrados nas Figuras 7.11 e 7.12.

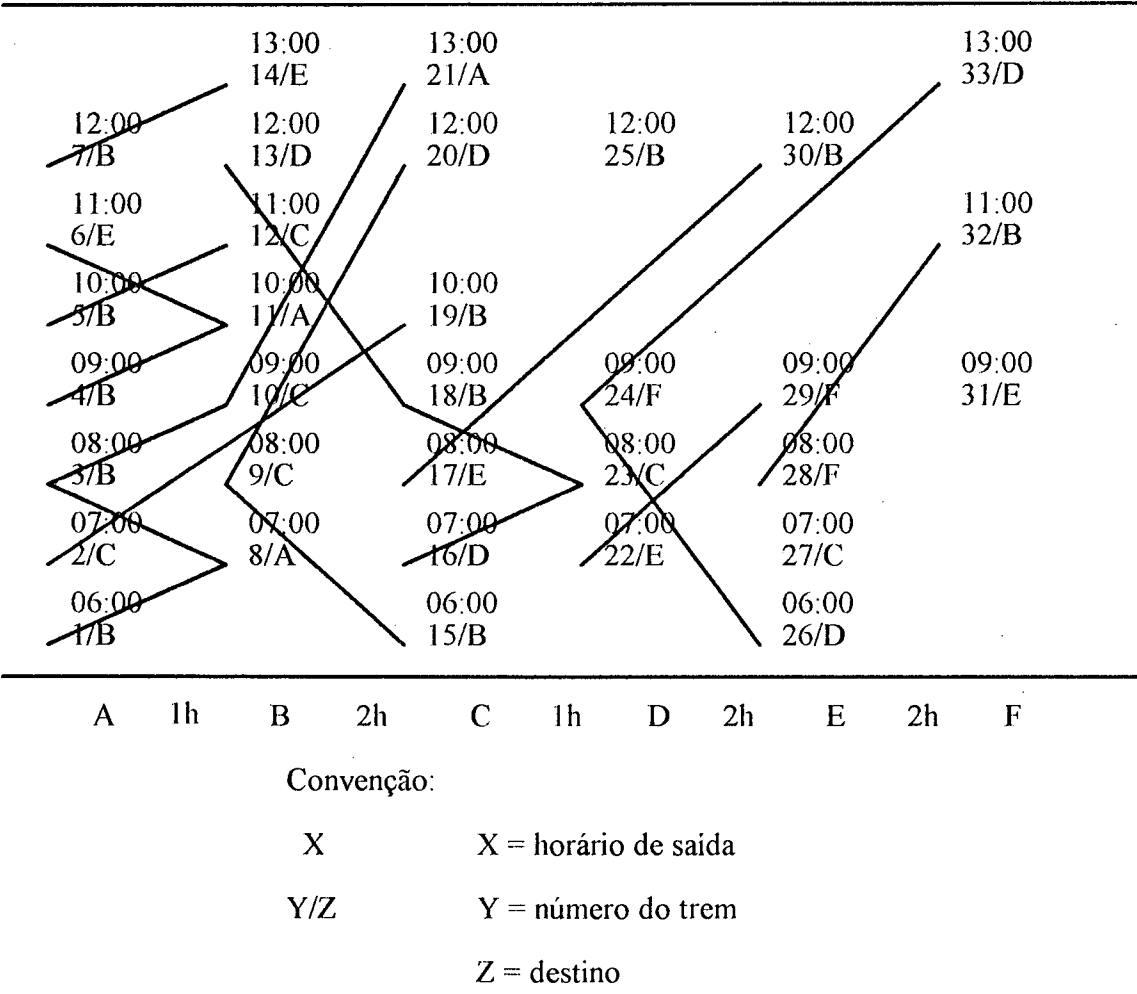


Figura 7.12 - Sequências de Trens Determinadas pelo Programa ROTALOCO (14 sequências)

Em relação aos custos, foram atribuídos custo zero ao custo de estocar uma locomotiva e 2000 ao custo de falta de uma locomotiva. Em relação aos custos de movimento, os mesmos foram tomados iguais aos tempos de viagem. Assim, como a alocação das locomotivas é feita a custo mínimo, o programa priorizará o atendimento dos trens cujas estações de partida estejam mais próximas daquelas onde as locomotivas estão estacionadas.

No arquivo OFERLOCO são dadas as ofertas de locomotivas no sistema ferroviário. Estas ofertas são dadas por estação e de acordo com o horário de disponibilidade. No arquivo DEMALOCO são dadas as demandas de locomotivas. Estas demandas, obviamente coincidem, ou são determinadas pelos horários dos trens iniciais de cada uma das sequências de trens (vide Tabela 7.2 ou Figura 7.12).

As matrizes de ofertas e demandas são então somadas, obtendo-se uma única matriz de ofertas/demandas. Nesta matriz, as ofertas são representadas por números positivos as demandas por números negativos. Esta matriz resultante pode, todavia, trazer alguns

problemas quando ofertas e demandas estão na mesma estação e no mesmo horário (ou seja, no mesmo nó), pois "sumirão" uma oferta e uma demanda. O programa foi então modificado de modo a recuperar essas informações, emitindo a mensagem de que a locomotiva em questão foi alocada ao trem daquele horário (ver Figura 7.14, exemplo 2).

Conforme mostrado na Figura 7.11 o turno de operação considerado abrange o horário das 06:00 horas às 13:00 horas. Considerando a hora como intervalo de planejamento, cada estação do sistema é representada por oito nós. Todavia, é conveniente estender o horizonte de planejamento, acrescentando horários antes e depois das horas inicial e final do turno (equivalente a acrescentar mais nós à rede espaço-tempo). Os horários anteriores ao início do turno têm a finalidade de permitir movimentações de locomotivas de forma a evitar atrasos. Os horários posteriores ao fim do turno podem indicar possibilidades de atendimentos, mesmo com atraso, dos trens que não foram atendidos dentro do turno.

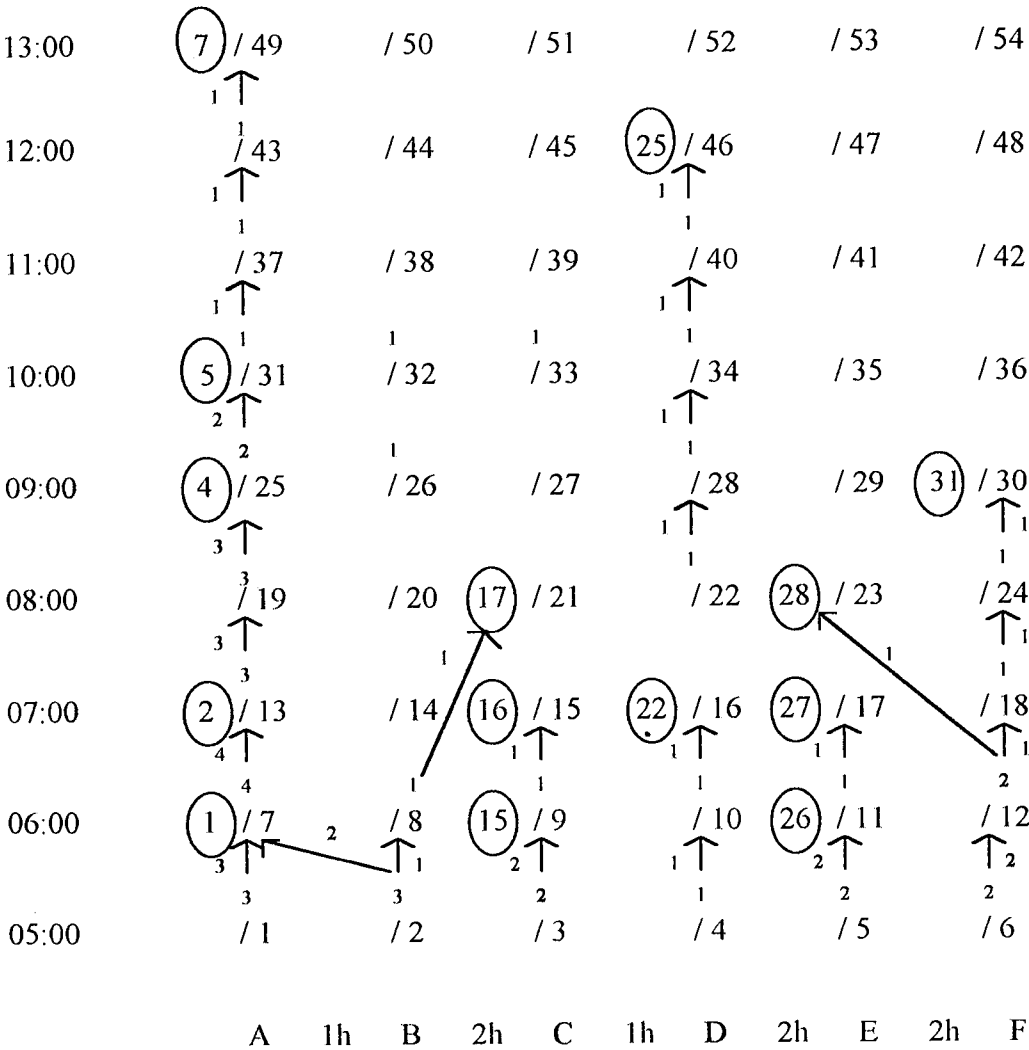
Foram rodados dois exemplos, cujas listagens de saída são mostradas no Apêndice D.4 (relatórios de movimentação e de falta de locomotivas). As Figuras 7.13 e 7.14 sintetizam os resultados obtidos nos dois exemplos.

No primeiro exemplo, mostrado na Figura 7.13, todos os trens foram atendidos no horário, sem atrasos. A movimentação das locomotivas está indicada pelas setas. No segundo exemplo, mostrado na Figura 7.14, pode-se verificar os atrasos. Na estação C, por exemplo, o gerente poderá optar por liberar o trem 17 no horário e atrasando o trem 16 em duas horas ou em atrasar cada um desses trens em uma hora. Verifica-se também que o trem 25, na estação D, sofrerá um atraso de uma hora. Na estação A, o trem nº5 sofrerá um atraso de uma hora, enquanto o trem nº7 sofrerá o mesmo atraso, mas só poderá partir fora do turno de operação. Nesta mesma estação o trem número 1 será atendido pela locomotiva ali estacionada.

A Ferrovia deverá confeccionar gabaritos com os horários dos trens de modo a facilitar a análise dos resultados. Nestes gabaritos, conforme mostrado nas Figuras 7.13 e 7.14, poderão ser lançadas as ofertas e as demandas e a movimentação indicada das locomotivas. Evidentemente, a decisão do gerente não poderá ser dispensada, devendo os resultados do programa ALOCO serem tomadas como indicativos. O gerente tem ainda as opções, como no programa VAGZIOS, de rodar novamente o programa ALOCO, seja alterando custos de falta em alguma estação, seja criando nós (ou estações) fictícias, de modo a privilegiar alguma estação ou algum trem.

Chama-se novamente a atenção que os programas FLUXTREM E ROTALOCO são aplicados a grupos de trens que utilizam o mesmo tipo de locomotiva (estes grupos podem ainda ser divididos em sub-grupos de acordo com o número de locomotivas necessárias por trem). Os programas são rodados uma vez para cada grupo (ou sub-grupo). O

programa ALOCO é aplicado uma vez para cada grupo - tipo de locomotiva (os sub-grupos não interessam neste caso, pois a demanda será a soma de todas as locomotivas necessárias de cada tipo).



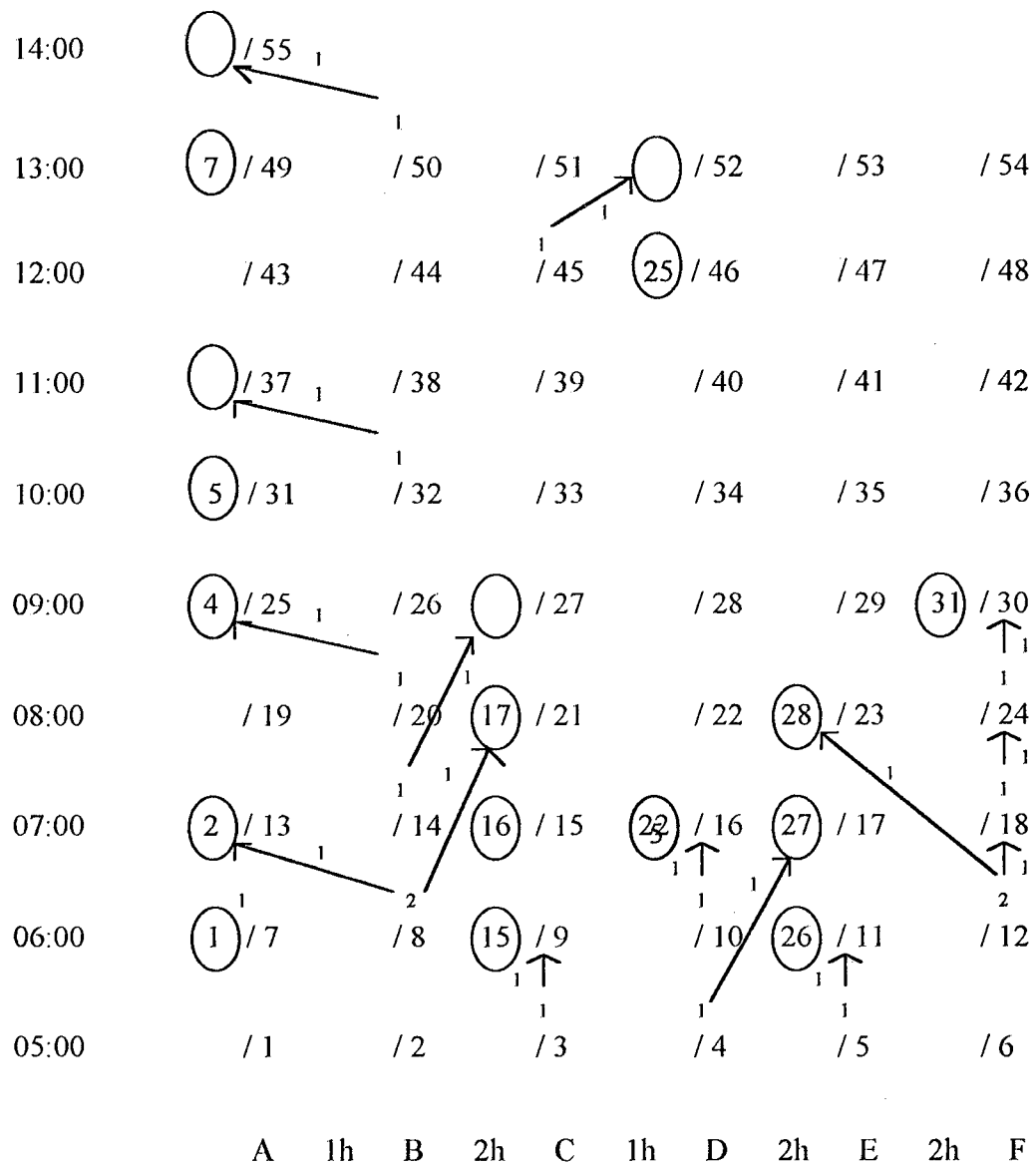
Convenção:

X = n.^o do trem (demanda de locomotivas = 1/trem)

Z Y = n.^o do nó

X/Y Z = ofertas de locomotivas

Figura 7.13 - Exemplo 1 de Alocação de Locomotivas. Ofertas e Demandas e Movimentação das Locomotivas



Convenção:

X = n.º do trem (demanda de locomotivas = 1/trem)

Z Y = n.º do nó

X/Y Z = ofertas de locomotivas

Figura 7.14 - Exemplo 2 de Alocação de Locomotivas. Ofertas e Demandas e Movimentação das Locomotivas

BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

- ASSAD, A.A. (1980), Models for Rail Transportation, *Transportation Research*, 14A:205-220.
- ASSAD, A.A. (1981), Analytical Models in Rail Transportation: an Annotated Bibliography, *INFOR* V.19, Nº1:59-80.
- BARTLETT, T.E. (1957), An Algorithm for the Minimum Number of Transport Units to Maintain a Fixed Schedule, *NRLQ* V.4, Nº2:139-149.
- BOOLER, J.M.P. (1980), The Solution of a Railway Locomotive Scheduling Problem, *J. Opl. Res. Soc.* V.31:943-948.
- DESROSIERS, J., SOUMIS, F. e DESROCHERS, M. (1982), Routes sur un Réseau Espace-Temps, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Publication 236.
- DESROSIERS, J., PELLETIER, P. e SOUMIS, F. (1982), Routes avec Contraintes d'horaires, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Publication 237.
- DESROSIERS, J., PELLETIER, P. e SOUMIS, F. (1981), Plus Court Chemin avec Contraintes d'horaires, Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Publication 235.
- FLORIAN, M.A. et al. (1967), The Engine Scheduling Problem in a Railway Network, *INFOR* 14, pag. 121-138.
- FORD, L.R. e FULKERSON D.R. (1962), *Flows in Networks*, Princeton University Press, Princeton, N.J..
- GERTSBACH, I. e GUREVICH, Yu. (1977), Constructing an Optimal Fleet for a Transportation Schedule, *Transportation Science* V.11, Nº1:20-36.
- GLEAVES, V.B., BARTLETT, T.E. e CHARNES, A. (1957), Cyclic Scheduling and Combinatorial Topology: Assignment and Routing of Motive Power to Meet Scheduling and Maintenance Requirements, *NRLQ* V.4, Nº3:203-220.
- HOLT, J. (1973), Locomotive Scheduling by Computer <<Bashpeak>>, *Rail Int.* 4, pag. 1053-1058.
- LEAL, J.E. (1992), Programação de Locomotivas, VI ANPET, V.2:1062 a 1074, Rio de Janeiro.
- LEVIN, A. (1971), Sheduling and Fleet Routing Models for Transportation Systems, *Transportation Science* - V.5, N.3.

- McGAUGHEY, R.S. et al. (1973), Planning Locomotive and Caboose Distribution, Rail Int. 4, pág.1213-1218.
- MONTY, G. (1970), Automatisation de l'affectation des locomotives', Revue Française de Recherche Opérationnelle, V.1:19-27.
- NASCIMENTO, E.P. (1988), Operação de Trens em Linhas de Alta Velocidade, tese de mestrado, IME, Rio de Janeiro, Brasil.
- NOVAES, A.G. (1978), Métodos de Otimização - Aplicações aos Transportes, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil.
- RYCKEBOSCH, H. e VANDER LINDEN, R. (1982), Computerized Management System for the Fleet of Electric Tractive Units, Rail International, 79-90.
- SURMONT, J. (1965), Operational Research Enables the Rosters to be Optimized, Bull. I.R.C.A. 2, pág. 329-343.
- WRIGHT, M.B. (1989), Applying Stochastic Algorithms to a Locomotive Scheduling Problem, J. Opl. Res. Soc. V.40, Nº2:187-192.

BIBLIOGRAFIA NÃO REFERENCIADA

- APPELGREN, L.H. (1969), A Column Generation Algorithm for Ship Scheduling Problems, Trans. Sci. V.3:53-68.
- APPELGREN, L.H. (1971), Integer Programming Methods for a Vessel Scheduling Problem, Trans. Sci. V.5:64-78.
- BELLMORE, M., BENNINGTON, G. e LUBORE, S. (1971), A Multivehicle Tanker Scheduling Problem, Transportation Science V.5, Nº11:36-47.
- BELLMORE, M., BENNINGTON, G. e LUBORE, S. (1968), A Maximum Utility Solution to a Vehicle Constrained Tanker Scheduling Problem, NRLQ V.15:403-415.
- DANTZIG, G.B. e FULKERSON, D.R. (1954), Minimizing the Number of Tankers to meet a Fixed Schedule, NRLQ V.1, Nº3:217-222.
- FARBAY, B.A., LAND, A.H. e MURCHLAND J.D. (1967), The Cascade Algorithm for finding all Shortest Distances in a Directed Graph, Management Science V.14, Nº1:19-28.
- FULKERSON, D.R. (1961), An Out-of-Kilter Method for Minimal Cost Flow Problems, J. Soc. Ind. and Appl. Math. V.9:18,27.

- GOLDEN, B.L. e SKISCIM, C.C. (1986), Using Simulated Annealing to Solve Routing and Location Problems, *NRLQ* V.33:261-279.
- HARTMAN, J.K. e LASDON, L.S. (1972), A Generalised upper bounding Algorithm for multi-commodity network Flow Problems, *Networks* V.1:333-354.
- HOLLADAY, J. (1964), Some Transportation Problems and Techniques for Solving Them, *NRLQ* V.11:15-42.
- KUHN, H.W. (1955), The Hungarian Method for the Assignment Problem, *NRLQ* V.2:83-97.
- LUNDY, M. e MEES, A. (1986), Convergence of an Annealing Algorithm, *Mathematical Programming* V.34:111-124.

CAPITULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 - CONCLUSÕES

Do estudo desenvolvido nos capítulos anteriores, é possível concluir-se que:

- o sistema proposto é bem aceito para o transporte ferroviário de carga, onde os horários dos trens e a escala de locomotivas são pré-definidos e devem ser cumpridos. A ferrovia permite, no entanto, variações quanto ao número de trens, horários e escala das locomotivas, devido a fatores como a sazonalidade da carga, interesses dos clientes e imprevistos na linha, entre outros. É, portanto, um sistema bastante flexível, que permite um melhor atendimento ao cliente e à ferrovia.
- sob as hipóteses apresentadas, o sistema proposto funciona de forma satisfatória e possibilita o planejamento da operação nas condições indicadas pelo Plano de Transporte da Ferrovia.
- a eficiência do planejamento estabelecido só será possível com um sistema computacional que forneça as informações em tempo real.
- o planejamento da operação, como proposto neste estudo, irá auxiliar o gerente da operação na tomada de decisão, mas não irá substituí-lo, principalmente na ocorrência de situações imprevistas, como quebra de locomotivas ou paralisação na linha, por exemplo.
- a utilização dos modelos de distribuição de vagões vazios, de vagões tanques, de formação de trens e de alocação de locomotivas permite o planejamento da operação num tempo ínfimo. Pode-se então, simular o planejamento sob várias hipóteses com rapidez e precisão.

- o sistema proposto, por ser dinâmico, possibilita um planejamento mais real e preciso. O gerente tem condições de analisar com antecedência decisões futuras.
- o modelo de distribuição de vagões vazios, com todas as considerações feitas sobre custos de movimento, custos de falta, custos de estoque e mais as opções dadas de priorizar uma estação ou um cliente, se constitui numa ferramenta de indiscutível valor, para o gerente, como apoio na tomada de decisão, pois permite a análise de várias alternativas de solução em pouco tempo.
- o modelo de distribuição de vagões tanques, o qual segue a metodologia desenvolvida para o modelo de distribuição de vagões vazios, com a opção dada de priorizar o atendimento dos níveis estratégicos dos tanques de combustível, irá racionalizar o atendimento da demanda, garantindo um suprimento mínimo a cada cliente, em cada pátio, evitando o transtorno da falta de combustível, como também o fornecimento em excesso além das necessidades do cliente.
- a heurística desenvolvida para a formação dos trens reúne as principais regras de decisão observadas na ferrovia e mais aquelas levantadas na bibliografia consultada. Desta forma, o gerente dispõe de uma ferramenta que lhe dá diversas opções de formação de trens de forma bastante rápida e precisa.
- com a divisão das linhas férreas em áreas de influência, em torno de estações centralizadoras de carga, é possível estabelecer regras de operação que as tornam mais eficientes.
- a possibilidade de estabelecer prioridades para as cargas permite um melhor atendimento da demanda e racionaliza o fluxo das cargas.
- a possibilidade de duas alternativas de planejamento, uma considerando todas as cargas ao longo da linha e outra apenas as cargas já concentradas nas estações centralizadoras, torna mais eficiente o gerenciamento da operação.
- a consideração das cargas em trânsito e as capacidades dos pátios, no estudo de formação de trens, diminui a interferência do gerente da operação e contribui para que esta operação seja bastante real e dinâmica.

- o modelo desenvolvido para a programação e alocação das locomotivas, ao refazer as escalas em bases diárias, permite ao gerente fazer a melhor ocupação deste equipamento com o emprêgo do mínimo de unidades necessárias para atender todos os trens programados também em bases diárias.
- o sistema proposto apresenta os seguintes benefícios, entre outros:
 - atribui um plano de viagem a todo vagão
 - atualiza um plano de viagem se uma conexão de trem é perdida
 - torna cada movimento visível à organização
 - dá suporte ao planejamento do dia-a-dia
 - reconhece situações de desequilíbrio, trazendo-as ao conhecimento do gerente; dá suporte à restauração da normalidade
 - dá suporte às necessidades dos clientes
 - mede o desempenho ótimo contra alternativas de solução
 - estimula a eficácia do processo decisório
 - é fácil de entender, operar e manter.
- os diversos relatórios produzidos pelo sistema são muito importantes para o gerenciamento de toda a malha ferroviária, principalmente para o gerenciamento nos pátios.
- a qualidade e o custo do serviço do transporte ferroviário dependem muito da competência e propriedade de toda a operação. Entretanto, a solução prática dos problemas encontrados nesta área, bastante complexos e trabalhosos, não seria possível sem a utilização de sistemas computacionais de apoio à decisão gerencial.

8.2 - RECOMENDAÇÕES

Das conclusões e observações feitas durante o trabalho, apresenta-se as seguintes sugestões para futuros estudos:

- o planejamento da operação, como indicado no sistema proposto, deverá ser acompanhado inicialmente pelos gerentes mais experientes da RFFSA, de modo a verificar a adequação das hipóteses e regras estabelecidas. Com base nessas observações poderão surgir modificações no que foi proposto, bem como poderão ser incorporadas novas regras, de modo a aumentar a eficiência do planejamento.
- após feita a distribuição de vagões vazios, dos vagões tanques, a formação dos trens e a alocação das locomotivas, recomenda-se que os dados relativos a estas aplicações dos modelos, sejam armazenados no sistema SIGO, de modo que todas as estações centralizadoras tenham acesso a elas e possam tomar, com antecedência, as providências necessárias. Para tanto, o sistema SIGO deverá ser preparado para receber as informações mencionadas.
- com certeza, algum tempo extra será necessário antes de colocar-se em prática tal sistema, pois ele requer, não apenas sistemas computacionais de grande porte, de rápida transmissão de dados, como o SIGO e de modelos matemáticos como os propostos neste estudo, mas o que é igualmente importante, de uma nova visão pelo pessoal da operação ferroviária, o qual deve estar convencido de que o computador pode operar mais rapidamente e mais eficazmente do que o indivíduo. Além disto, eles devem também estar dispostos a assegurar a implementação precisa e segura das soluções dadas pelos modelos. Daí a necessidade de um aprendizado sobre estes modelos, envolvendo os dados e regras utilizadas, a lógica seguida, as soluções encontradas, os relatórios apresentados.
- no desenvolvimento dos programas computacionais foi utilizada a linguagem FORTRAN 77 para microcomputadores. Os programas poderiam ser reescritos para outras linguagens que podem propiciar mais facilidades em termos de interface com os usuários, como por exemplo uma linguagem orientada à objetos tipo C++.