

Biblioteca Universitária
UFSC

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

UFSC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O PLANEJAMENTO
OPERACIONAL DE EMPRESAS DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO
URBANO DE PASSAGEIROS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA,
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA

SÉRGIO FERNANDO MAYERLE



0.266.885-6

UFSC-BU

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL - 1996

UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE EMPRESAS DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO URBANO DE PASSAGEIROS

SÉRGIO FERNANDO MAYERLE

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de:

"DOUTOR EM ENGENHARIA"

Especializada em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação.

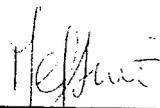


Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D.
Coordenador

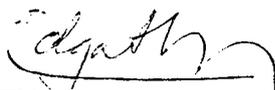
BANCA EXAMINADORA



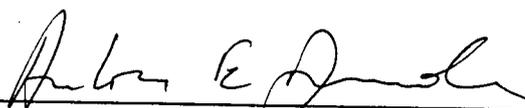
Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D.
Presidente



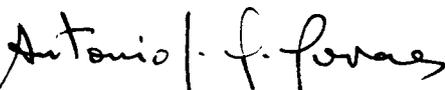
Prof. Maria Cristina Sinay, Ph.D.
Examinadora Externa



Prof. Edgar Augusto Lanzer, Ph.D.



Prof. Antônio Edmundo de Rezende, Ph.D.
Examinador Externo



Prof. Antônio Galvão Novaes, Dr.



Prof. Fernando L. C. Macdowell da Costa, Dr.
Examinador Externo

Este trabalho é dedicado à Elizandra, e
aos meus filhos Alexandre e Rafael.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão, orientado para o planejamento operacional de empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros. Na revisão bibliográfica são comentados os principais modelos e sistemas de alocação de veículos e de condutores.

No sistema desenvolvido, o plano de operação é gerado em três etapas. Na primeira etapa, a alocação de veículos é realizada utilizando um processo de alocação seqüencial baseado no algoritmo húngaro. Na segunda etapa, a geração de escalas é modelada como um problema de cobertura de conjuntos, cuja solução é obtida por meio de um algoritmo genético. A última etapa consiste em distribuir as escalas geradas utilizando um algoritmo derivado do método húngaro, aplicado sobre um grafo *multipartite* representativo do esquema de distribuição.

Os modelos utilizados no sistema, permitem que, diversos aspectos, tais como tratamento de incertezas na duração de viagens, tolerâncias nos horários de partida, política de utilização dos veículos, múltiplos critérios na distribuição de escalas, entre outros, sejam considerados.

Um tutorial descrevendo a interface do sistema é apresentado, a fim de demonstrar as suas características e potencialidade. Os dados e relatórios de saída de uma situação real são anexados ao trabalho, e os resultados obtidos são discutidos.

ABSTRACT

The aim of this work is the development of a decision support system for the urban passenger vehicle and crew planning. In the bibliographical review we present the main models and systems related with the work.

In the developed system the problem of vehicle and crew scheduling is divided in three stage. The first one consider the vehicle scheduling problem which is solved using a sequential allocation process based on the Hungarian algorithm. In the second stage, a set covering problem is solved with a genetic algorithm, in order to create a valid set of duties. The last stage comprise the distribution of the created duties, and for this purpose is used a process based on the Hungarian algorithm applied on a multipartite graph which represent the distribution problem.

The models used in the developed system has many features that allow the user to take into account uncertainties related with trip's duration, tolerances on the departure and many others aspects.

In this work is also presented a tutorial to demonstrate the features and capabilities of the developed system. The data of a real problem and reports generated by the system are included in the work and the results are discussed.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo de bom que Ele tem me concedido encontrar ao longo da minha vida.

Sou grato aos meus pais, por terem me indicado o caminho do estudo desde a mais tenra idade.

Com minha esposa e meus filhos tenho uma dívida eterna. Sei que jamais poderei repor a merecida atenção que lhes deixei de dedicar durante a realização deste trabalho. Assim, mais do agradecer pelo apoio e compreensão que deles recebi, gostaria de pedir perdão...

Devo uma palavra de gratidão ao Barcia, meu orientador e amigo, pela orientação e pelo incentivo recebidos, desde o início de minha carreira como docente.

Ao amigo Lanzer, muito obrigado pelos conselhos e pelo empurrão final. Eles foram muito úteis para a conclusão deste trabalho.

Aos professores que fizeram parte da banca, meu agradecimento pelas sugestões apresentadas, as quais, na medida do possível, procurei incorporar nesta versão final.

Aos demais amigos do EPS, especialmente ao Coelho, Ernani e Paladini, obrigado pelo apoio recebido.

ÍNDICE

Lista de Figuras	x
Lista de Quadros.....	xiv

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Considerações Gerais	1
1.2. Objetivos do Trabalho	3
1.3. Limitações	4
1.4. Importância do Trabalho	6
1.4.1. Aspectos Relevantes	6
1.4.2. Importância para a Economia Nacional	8
1.4.3. Importância para as Empresas de Transporte Rodoviário de Passageiros.....	10
1.4.4. Importância para o Usuário do Transporte Rodoviário Urbano de Passageiros.....	12
1.4.5. Importância para os Condutores.....	13
1.4.6. Importância para a Área de Conhecimento	14
1.5. Estrutura do Trabalho	15

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Considerações Iniciais	17
2.2. Classificação dos Problemas de Otimização Combinatorial	18
2.3. Os Problemas de Alocação de Frota e Condutores.....	23
2.3.1. Aspectos Gerais	23
2.3.2. Problemas de Alocação de Frotas.....	23
2.3.3. Problema de Alocação de Condutores	29

2.4. Modelos e Algoritmos de Alocação de Frota.....	33
2.4.1. Visão Geral dos Métodos de Alocação.....	33
2.4.2. Resolução dos Problemas VSP, VSPLPR, VSPMVT e VSPMD.....	33
2.5. Modelos e Algoritmos de Alocação de Condutores.....	40
2.5.1. Modelo Teórico para o Problema de Alocação de Condutores.....	40
2.5.2. Modelo de Alocação de Trabalhadores em um Local Fixo.....	42
2.5.3. Modelos de Alocação Baseados em <i>Set Covering</i> e <i>Set Partitioning</i> ...	43
2.6. Um Método Combinado Heurístico Baseado em <i>Matchings</i>	47
2.6.1. Formulação do Problema.....	47
2.6.2. Algoritmo de Solução.....	51
2.7. Experiências Computacionais.....	57
2.7.1. Um Breve Histórico.....	57
2.7.2. Sistema HASTUS.....	58
2.7.3. Sistema BUSMAN.....	60
2.8. Comentários Gerais sobre os Modelos e Sistemas Existentes.....	61

CAPÍTULO III

3. MODELO PROPOSTO

3.1. Definição do Problema.....	62
3.2. Modelo de Alocação da Frota.....	63
3.2.1. Visão Geral do Modelo de Alocação da Frota.....	63
3.2.2. Cálculo do Custo de Alocação de uma Seqüência de Viagens.....	65
3.2.3. Possibilidade de Alocação de uma Viagem em um Veículo da Frota ...	69
3.2.4. Algoritmo de Alocação da Frota.....	72
3.2.5. Melhoramento da Alocação.....	73
3.3. Modelo de Geração de Escalas.....	75
3.3.1. Definição do Perfil das Escalas.....	75
3.3.2. Geração das Escalas Alternativas e Cálculo dos Custos.....	77
3.3.3. Modelo de Geração do Plano de Escalas.....	78
3.3.4. Algoritmo Genético para Resolução do Modelo de Geração do Plano de Escalas.....	79
3.3.5. Ajuste da Solução e Geração do Plano de Escalas.....	84
3.4. Modelo de Alocação da Carga Semanal de Trabalho aos Condutores.....	84
3.4.1. Visão Geral do Modelo de Alocação da Carga Semanal.....	84
3.4.2. Abordagem Multi-critério para Alocação da Carga Semanal.....	89
3.4.3. Método Americano de Distribuição da Carga Semanal de Trabalho	90
3.5. Comentários sobre os Modelos Propostos.....	91

CAPÍTULO IV

4. SISTEMA COMPUTACIONAL

4.1. Considerações Gerais	94
4.2. Visão Geral do Sistema	95
4.3. Tutorial - Um Exemplo Prático	96
4.3.1. Menu Principal do Sistema <i>WinBUS</i>	96
4.3.2. Cadastro do Sistema <i>WinBUS</i>	97
4.3.3. Parâmetros de Geração do Plano de Operação	108
4.3.4. Geração do Plano de Operação	113
4.3.5. Geração de Relatórios	122
4.3.6. Diagrama de Carga e Consulta aos Planos de Alocação	124
4.3.7. Ajuda <i>On-line</i>	127
4.4. Metodologia de Utilização do Sistema <i>WinBUS</i>	128

CAPÍTULO V

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Considerações Iniciais	131
5.2. Análise dos Resultados Obtidos para a ESTRELA	132
5.3. Análise dos Resultados Obtidos para a EMFLOTUR	138
5.3. Considerações Finais	140

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões	142
6.2. Recomendações	143

BIBLIOGRAFIA	145
--------------------	-----

ANEXO A - Problema de Atribuição	163
--	-----

ANEXO B - Busca de Caminhos Mínimos em Grafos	166
---	-----

ANEXO C - Teoria dos Conjuntos Difusos	170
--	-----

ANEXO D - Disquetes para Instalação do Sistema <i>WinBUS</i>	177
--	-----

LISTA DE FIGURAS

1.1	Produção anual de ônibus urbanos, e de carros ferroviários e de metrô ao longo da década de 80	7
2.1	Classificação dos problemas de otimização combinatorial adaptado de Ibaraki.....	22
2.2	Classificação dos problemas de otimização combinatorial, segundo Müller-Merbach.....	22
2.3	Grafo representativo de uma esquema de alocação de 10 viagens a uma frota de 4 veículos, com restrições no comprimento máximo dos caminhos..	24
2.4	Grafo representativo de uma esquema de alocação para o problema da figura 2.3, sem restrição no comprimento máximo dos caminhos	26
2.5	Grafo representativo de uma esquema de alocação para o problema da figura 2.3, sem restrição no comprimento máximo dos caminhos, com dois tipos de veículos.....	27
2.6	Grafo representativo de uma esquema de alocação para o problema da figura 2.3, com duas garagens.....	28
2.7	Relação entre esquemas de alocação de frota e de alocação de condutores...	29
2.8	Solução do problema combinado de alocação de veículos e condutores	32
2.9	Representação de um VSPLPR, com as respectivas soluções.....	36
2.10	Procedimento de trocas heurísticas de viagens aplicado sobre um esquema com 3 veículos	40
2.11	Exemplos de formação de FWS, com 3, 1 e dois CWPs,.....	41
2.12	Tipo de arcos existentes no grafo de alocação de frotas	48
2.13	Tipo de arcos existentes no grafo de alocação de condutores.....	49
2.14	Formação de uma corrida com 2 pieces	50

2.15	Partição dos vértices em níveis	52
2.16	Problema de <i>matching</i> na iteração k	53
2.17	Problema de <i>matching</i> na iteração k com expansão de topo	54
2.18	Melhoramento dos <i>pieces</i>	56
3.1	Grafo $G(V, A)$, indicando as possíveis seqüências de execução das viagens.	64
3.2	Grafo de formação de <i>pieces</i>	68
3.3	Representação dos conjuntos difusos: saída no horário, saída adiantada, saída atrasada e chegada do veículo	71
3.4	Representação do horário de saída efetivo, obtido com o uso do princípio da extensão	72
3.5	Resultado do processo de alocação de viagens, mostrando as viagens alocadas em cada camada, e os possíveis seccionamentos das seqüências geradas.....	74
3.6	Esquemas de escalas viáveis	76
3.7	Grafo multipartite referente a alocação da carga de trabalho entre condutores	87
4.1	Esquema simplificado do sistema <i>WinBUS</i>	95
4.2	Algumas visões da janela principal do sistema <i>WinBUS</i>	96
4.3	Barra de ferramentas para manipulação de registros da base de dados.....	97
4.4	Janela de diálogo para alimentação do Cadastro da Empresa.....	98
4.5.a	Janela de diálogo apresentando a pasta de dados do cadastro da rede viária .	99
4.5.b	Janela de diálogo apresentando a pasta de Representação gráfica da rede viária.....	100
4.6	Janela de diálogo do Cadastro de Linhas e Horários, com a visualização da pasta de informações sobre as linhas e roteiros.....	101
4.7	Janela de diálogo do Cadastro de Linhas e Horários, com a visualização do acesso às informações sobre os horários	102
4.8	Janela de diálogo para Definição da Freqüência no processo de geração de viagens em bloco	102

4.9	Janela de diálogo do Cadastro de Linhas e Horários, com a visualização da pasta contendo o diagrama de freqüência de horários para uma linha e um dia típico	103
4.10	Janela de diálogo para acesso aos dados do Cadastro de Condutores	105
4.11	Janela de diálogo para acesso aos dados do Cadastro de Veículos.....	106
4.12	Janela de diálogo para definição da Política de Alocação da Frota.....	107
4.13	Janela de diálogo para Alteração da Data de Referência.....	107
4.14	Janela de diálogo da Base de Dados.....	108
4.15	Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta de parâmetros dos blocos	109
4.16	Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta de parâmetros das escalas	110
4.17	Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta contendo os parâmetros de distribuição semanal das escalas.....	111
4.18	Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta de custo operacional da frota.....	112
4.19	Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta de custo de pessoal.....	112
4.20	Janela de diálogo para Alocação dos Veículos	113
4.21	Janela contendo a lista de viagens não alocadas	114
4.22	Janela de diálogo para verificação do programa de alocação da frota e realização de ajustes manuais.....	115
4.23	Janela de diálogo para realizar a geração das escalas de trabalho dos diversos dias típicos.....	116
4.24	Janela de visualização das Escalas Diárias de Trabalho, com a apresentação das escalas dos dias úteis	118
4.25	Janela de controle do módulo de Geração do Rodízio Semanal, contendo a visualização do gráfico de horas semanais trabalhadas.....	119
4.26	Janela de controle do módulo de Geração do Rodízio Semanal, contendo a visualização do gráfico de horas extras semanais.....	120
4.27	Janela de controle do módulo de Geração do Rodízio Semanal, contendo a visualização do gráfico de análise de <i>trade-off</i>	120

4.28	Janela de diálogo para Alocação dos Condutores.....	122
4.29	Janela de diálogo para Geração dos Relatórios do Cadastro	123
4.30	Janela de diálogo para geração do Relatórios de Alocação	123
4.31	Janela de consulta ao Diagrama de Carga	124
4.32	Janela de Consulta da Alocação, apresentando o plano operacional da frota.	125
4.33	Janela de Geração de Relatórios, apresentando o resultado de uma busca sobre as viagens alocadas	126
4.34	Janela de consulta aos tópicos de ajuda do sistema <i>WinBUS</i>	127
5.1	Gráfico demonstrativo do perfil da demanda nos dias úteis	133
5.2	Gráfico demonstrativo do perfil da demanda nos sábados.....	133
5.3	Gráfico demonstrativo do perfil da demanda nos domingos.....	134

LISTA DE QUADROS

1.1	Valores indicativos de demanda para os quais cada modalidade de transporte coletivo de passageiros apresenta maior eficiência.....	8
1.2	Demonstrativo de receitas das empresas brasileiras de transporte rodoviário de passageiros, referente ao ano de 1992	8
1.3	Demonstrativo de custos e despesas das empresas brasileiras de transporte rodoviário de passageiros, referente ao ano de 1992	9
1.4	Distribuição das empresas, pessoal e frota, por região, em 31/12/1992.....	9
1.5	Número de passageiros, receita com venda de passagens, número de linhas regulares e extensão, por tipo de linha	10
1.6	Gasto mensal com transporte no município de São Paulo	12
2.1	Quadro de horários de uma empresa fictícia.....	24
2.2	Exemplo de tabela de horários do problema combinado de alocação, com os respectivos locais de troca de condutores.....	30
3.1	Quadro comparativo do valor da função objetivo para problemas de cobertura IMPACS × GA.....	93
5.1	Indicadores de desempenho para o processo de alocação da Frota.	132
5.2	Comparação entre viagens, <i>pieces</i> e veículos alocados.....	134
5.3	Indicadores de desempenho para o processo de geração de escalas	135
5.4	Distribuição de frequência dos tempos totais das viagens alocadas semanalmente aos condutores.....	136
5.5	Distribuição de frequência da quantidade de horas extras alocadas semanalmente aos condutores.....	137
5.6	Quadro resumo demonstrativo das escalas de trabalho em vigor na EMFLOTUR, obtidas com a utilização de procedimentos manuais	139

5.7 Quadro resumo demonstrativo das escalas de trabalho propostas para a EMFLOTUR, com base no plano operacional gerado pelo *WinBUS* 139

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Considerações Gerais

O efetivo gerenciamento de empresas de transporte rodoviário de passageiros implica em uma variedade de problemas de tomada de decisão. Tais problemas podem ser classificados em três níveis: o estratégico, o tático e o operacional. Decisões relativas à localização de garagens, determinação das regiões que serão atendidas, linhas que serão implantadas, compra de outras empresas, entre outras, são decisões vistas como estratégicas. A nível tático podem ser citadas decisões relacionadas com a aquisição de veículos novos e a definição das políticas de contratação de pessoal. Do ponto de vista operacional, surgem questões como a determinação do roteamento, alocação dos veículos e condutores, os quais ocorrem em uma base diária de programação.

Não é muito clara a distinção existente entre estes três níveis. Em linhas gerais, os problemas de nível estratégico referem-se às questões de maior impacto e com horizonte de planejamento mais longo. Por outro lado, decisões de caráter operacional ocorrem com maior frequência no processo administrativo, e apresentam um impacto menos abrangente. Quanto ao grau de estruturação destes processos decisórios, pode-se dizer que a nível operacional os procedimentos são mais bem estruturados que a nível tático e estratégico.

Não existe uma segmentação perfeita entre os problemas destes três níveis, e a rigor eles interagem entre si, sendo que a solução apontada para um acaba repercutindo na solução a ser adotada para o outro. Exemplificando, a mudança em alguns horários das viagens (decisão do nível operacional), pode implicar na necessidade de se adquirir novos veículos (decisão do nível tático). A construção de uma nova garagem em outra região (decisão estratégica), pode resultar no remanejamento das escalas de trabalho dos condutores (decisão operacional).

Apesar desta interação, é comum se estabelecer uma hierarquia no processo decisório, com o objetivo de facilitar e melhor estruturar os problemas a serem resolvidos. Assim,

geralmente, as decisões tomadas em um nível estratégico, são postas como um dado de entrada para a resolução dos problemas do nível tático. Os problemas operacionais, por sua vez, são resolvidos tomando como dados de entrada as soluções apontadas a nível estratégico e tático. Este tipo de abordagem, apesar de apresentar deficiências no sentido de não se garantir a otimalidade do sistema, apresenta a vantagem de reduzir significativamente o tamanho dos problemas, sendo, muitas vezes, a única forma viável de se obter uma solução para os mesmos.

A nível operacional, um dos problemas mais relevantes e complexos consiste em realizar a alocação da frota e dos condutores. Em outras palavras, o problema consiste em determinar um plano de distribuição de viagens sobre o conjunto de veículos e pessoas envolvidas na operação, de modo que cada viagem (um horário de uma linha) seja alocada a um veículo, e que a tarefa de conduzir os veículos seja distribuída entre os diversos condutores. Neste processo de distribuição, diversos fatores devem ser considerados, tais como:

- a) relação de linhas, com as respectivas viagens, locais de início, locais de término, horários de partida e a duração das viagens;
- b) características da frota existente (capacidade, comprimento, distância entre eixos, potência, estado de conservação, autonomia para abastecimento), as quais determinam a adequação de cada tipo de veículo às diversas rotas operadas pela empresa;
- c) tamanho da frota, considerando os diversos tipos de veículos;
- d) custos operacionais, por veículo ou grupo de veículos;
- e) estrutura da rede viária, com a localização dos pontos de início e término das viagens, além da localização dos terminais, garagens e pontos de substituição dos condutores;
- f) disponibilidade de condutores;
- g) legislação trabalhista vigente e os acordos firmados com os sindicatos, quanto ao regime de contratação, duração da jornada de trabalho e descansos regulares;
- h) políticas internas da empresa, quanto ao nível de utilização de horas-extras, rotatividade do pessoal e distribuição dos veículos aos motoristas.

Entre as restrições a serem consideradas, algumas são mais importantes que outras. Exemplificando:

Restrição #1 - Não alocar um veículo velho em uma linha que possua rampas íngremes e curvas fechadas.

Restrição #2 - Não alocar um veículo novo em uma linha não pavimentada.

Embora as duas restrições acima devam ser respeitadas, é razoável considerar a primeira como sendo mais importante que a segunda. Não sendo possível respeitar as duas restrições simultaneamente, é preferível que a segunda seja desconsiderada, tendo em vista que a primeira trata da segurança dos usuários e condutores.

Além disto, diversos critérios devem ser considerados, os quais poderão ser conflitantes entre si. Exemplificando:

Critério #1 - Minimizar o custo operacional

Critério #2 - Maximizar a confiabilidade em relação ao cumprimento dos horários estabelecidos

Os dois critérios apresentados acima são, de certo modo, antagônicos. A fim de satisfazer o segundo critério, é necessário incluir na programação algumas folgas que permitam restabelecer a programação original sempre que ocorrer algum atraso na realização de uma viagem. Tais folgas ao serem incluídas na programação tendem a fazer com que os custos operacionais aumentem.

Todos estes aspectos fazem com que a tarefa de programar as atividades de uma empresa de transporte rodoviário de passageiros envolva a manutenção e manipulação de uma base de dados bastante extensa, na qual a relação entre a solução e as variáveis intervenientes nem sempre é suficientemente compreendida e explorada. Em resumo, resolver este problema, de forma eficiente, requer a utilização de algoritmos e técnicas de otimização que determinem uma alocação viável para as viagens existentes, e que reduza os custos operacionais do sistema.

1.2. Objetivos do Trabalho

Se por um lado a utilização de algoritmos de otimização é essencial para a realização de um planejamento operacional eficiente das empresas de transporte rodoviário de passageiros, por outro lado sem o desenvolvimento de um sistema computacional,

nenhum modelo ou algoritmo será bem sucedido na prática¹. Tal sistema deve ser desenvolvido de modo a manter atualizada a base de dados e de modo a permitir a geração e resolução automática dos modelos envolvidos.

É neste aspecto que reside o objetivo geral deste trabalho, que apresenta um sistema de apoio a decisão, para elaboração de planos de operação, voltado especificamente para empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros.

O sistema computacional apresentado neste trabalho tem como objetivos específicos:

- a) manter e permitir a atualização da base de dados relativa a geração dos planos operacionais;
- b) gerar planos operacionais de utilização da frota e alocação de condutores, permitindo a consideração de informações subjetivas e de múltiplos critérios, a exemplo do que foi apresentado na seção 1.1, em relação ao grau de adequação entre veículos e linhas e em relação a objetivos do tipo confiabilidade e custos;
- c) permitir que o usuário realize o confronto entre alternativas geradas com base em critérios e cenários distintos; e
- d) gerar relatórios para implantação dos planos operacionais de utilização da frota e alocação de condutores.

Como produto secundário da realização deste trabalho, apresenta-se uma revisão bibliográfica, referente aos principais modelos e algoritmos encontrados na literatura.

1.3. Limitações

O transporte rodoviário de passageiros é composto por diversas modalidades, com características operacionais que distinguem umas das outras. Segundo estas características, pode-se estabelecer a seguinte classificação:

¹ Diversos trabalhos existentes na literatura (vide, por exemplo, [BOD83], [BAL83], [CLE93], [DES89], [DES90], [KWA94], [PAI93], [ROU93], [SHE85], [SMI86] e [WRE81b]) apresentam o foco voltado à descrição de modelos e algoritmos para a realização da alocação de veículos e condutores. Nestes trabalhos, não são abordados os aspectos relacionados com o desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão, ou, se o fazem superficialmente, remetem a questão a um plano secundário.

- a) *Transporte Rodoviário Urbano de Passageiros*: é utilizado para a movimentação da população nos centros urbanos das cidades e regiões metropolitanas, sendo caracterizado por apresentar linhas regulares de curta distância, com horários e itinerários bem definidos e de grande frequência². Nesta modalidade de transporte um veículo chega a realizar 20, 30 ou até 40 viagens por dia;
- b) *Transporte Rodoviário Intermunicipal, Interestadual e Internacional*: caracteriza-se pelo transporte de passageiros entre cidades, estados e países, através de linhas regulares de longa distância³, com horários e itinerários bem definidos. Nesta modalidade, em geral, o veículo realiza no máximo 5 viagens por dia, podendo eventualmente, levar até mais de uma semana para completar uma viagem, no caso de percursos de maior distância. Neste tipo de transporte é comum as empresas oferecerem serviços de bordo, e utilizarem veículos com conforto apropriado ao percurso e de acordo com as exigências dos usuários e órgãos reguladores;
- c) *Transporte Rodoviário Escolar*: esta modalidade é específica para o transporte de estudantes, da casa para a escola e vice-versa, e apresenta características operacionais distintas das duas primeiras. Sendo flexível em relação ao roteiro, o plano de operação deve garantir que cada passageiro seja transportado de sua casa para a escola satisfazendo janelas de tempo previamente acordados entre as empresas transportadoras e os usuários. Em geral a frota utilizada para este tipo de transporte é composta de microônibus, adaptados para oferecerem a devida segurança aos seus passageiros;
- d) *Transporte Rodoviário de Turismo*: é um transporte que caracteriza-se por ter roteiro e horário particularizados para cada viagem, o que costuma ser alvo de um contrato firmado entre a empresa e o grupo de passageiros. Os veículos utilizados apresentam características próprias a viagens de longo percurso, com comodidades adicionais, tais como: banheiro, televisão, som ambiente, vídeo, ar condicionado, bar, mesa para jogos, etc.;

² As linhas do transporte rodoviário urbano de passageiros apresentam percursos que em geral são inferiores a 50 km, e com uma frequência superior a uma viagem por hora.

³ As linhas do transporte intermunicipal de passageiros apresentam percursos que em geral são superiores a 100 km.

- e) *Transporte Rodoviário Particular de Passageiros*: esta modalidade de transporte é utilizada por empresas e outras instituições, no deslocamento de seus empregados entre os diferentes locais de trabalho. Cada viagem é programada de acordo com as necessidades da empresa e a disponibilidade do veículo.

Uma limitação deste trabalho, é o fato do mesmo focalizar somente a modalidade de transporte rodoviário urbano de passageiros, que corresponde a maior parcela de recursos mobilizados pelo setor.

Além disto, entre todas as atividades administrativas desenvolvidas por estas empresas, apenas o aspecto de planejamento operacional⁴, envolvendo a alocação de veículos e condutores, é tratada pelo sistema. Contudo, a estrutura modular e a utilização dos conceitos referentes a bancos de dados relacionais permite que o sistema seja ampliado, na medida em que se deseje integrar outras aplicações.

1.4. Importância do Trabalho

1.4.1. Aspectos Relevantes

A opção que o País parece ter feito em relação ao transporte urbano de passageiros sobre rodas pneumáticas, em detrimento do transporte sobre trilhos, pode ser evidenciada na figura 1.1, onde se apresenta a produção anual de ônibus urbanos e de carros ferroviários, inclusive de metrô, ao longo da década de 80.

Se por um lado esta opção deve-se a maior flexibilidade operacional e modularidade dos investimentos apresentada pelos ônibus, por outro lado, é importante reconhecer que tem sido colocados obstáculos à viabilização de novos investimentos, no que se refere aos sistemas de transportes de grande e média capacidade (trens urbanos, bondes e metrô), decorrentes das diversas limitações à contratação de empréstimos pelas instituições públicas. Tais restrições aliam-se aos freqüentes cortes nos orçamentos de investimentos, e também de custeio, cujos fluxos de liberação das dotações não obedecem às necessidades de recursos, mas sim a de suas disponibilidades, conduzindo o setor ferroviário a um quadro de progressiva degradação dos equipamentos. Como se não bastasse, em geral, o índice de cobertura tarifa/custo do transporte ferroviário urbano é

⁴ Diversas informação e atividades mantidas pela administração das empresas de transporte rodoviário de passageiros são passíveis de informatização, tais como: contabilidade financeira, contabilidade de custos, emissão da folha de pagamento, controle de consumo de combustível, controle de estoque de peças e combustível, cadastro de pessoal, renovação da frota, controle de gasto de pneus, entre outras.

bastante baixo e sua elevação é dificultada por se tratar de serviço oferecido à população de baixa renda (vide [ANT91]).

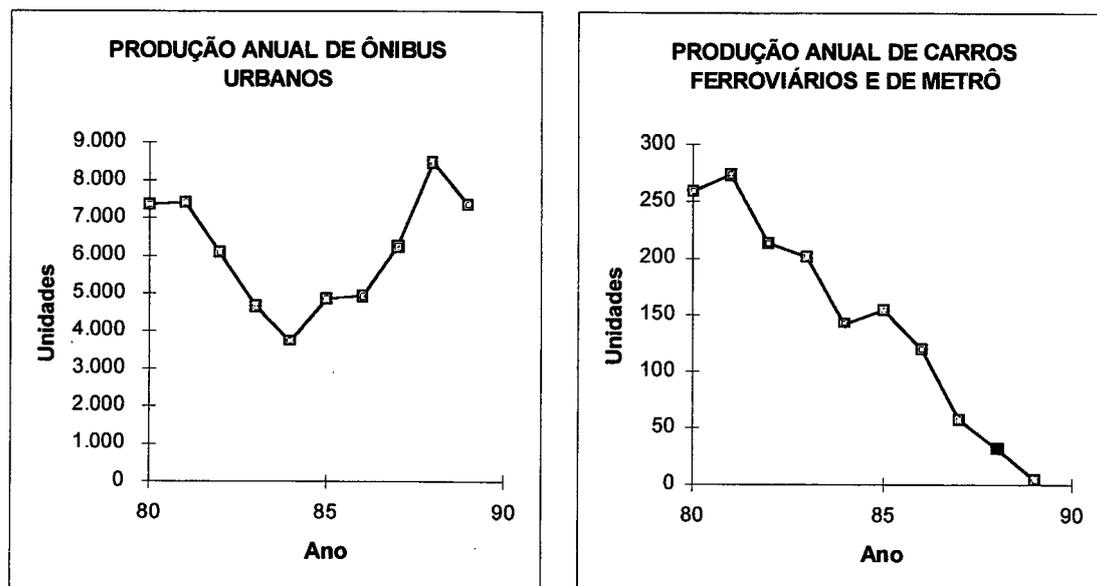


Figura 1.1 Produção anual de ônibus urbanos, de carros ferroviários e de metrô ao longo da década de 80. Fonte: ANTP / 91

Em contrapartida à flexibilidade e aos baixos investimentos necessários aos transportes rodoviários de passageiros, devem ser considerados os custos de operação, que fazem dos transportes ferroviários uma modalidade adequada ao atendimento de grandes demandas. Segundo o relatório do COASE/CNI (vide [CNI94]), existem controvérsias a respeito dos limites, porém a grande maioria dos técnicos aceita a existência de faixas de demanda de passageiros que são atendidas com mais eficiência por determinadas modalidades de transporte. Vários fatores são responsáveis pela variação dos limites dessas faixas, como por exemplo, a área atendida, o tipo de usuários e a tecnologia empregada.

Em um estudo realizado pelo Metrô-RJ (vide [MET76]), foi analisado o grau de eficiência de cada modalidade para os diversos níveis de demanda. No quadro 1.1, é apresentada uma síntese deste estudo.

Para avaliar a importância deste trabalho, diversos aspectos devem ser considerados. Em termos gerais, os sistemas de transporte coletivo urbano apresentam sua importância no contexto macroeconômico nacional, face ao volume de recursos mobilizados. Para os diversos segmentos envolvidos - empresas de transporte rodoviário de passageiros, usuário do transporte coletivo e a sociedade como um todo - o desenvolvimento de um sistema de apoio à tomada de decisão também apresenta a sua importância, conforme

discutido a seguir. Além disto, o trabalho também apresenta sua importância face a algumas contribuições para a área de conhecimento na qual está inserido.

Modalidade	Passageiros / hora
Ônibus	6.000
Monotrilho	11.000
VLT (Veículo Leve sobre Trilhos)	18.000
Metrô	50.000
Trem de subúrbio	60.000

Quadro 1.1 Valores indicativos de demanda para os quais cada modalidade de transporte coletivo de passageiros apresenta maior eficiência. Fonte: Metrô-RJ

1.4.2. Importância para a Economia Nacional

A importância dos problemas relacionados ao transporte rodoviário de passageiros no cenário econômico nacional pode ser evidenciada pela magnitude de algumas estatísticas disponíveis.

Segundo as estatísticas oficiais, publicadas na Pesquisa Anual do Transporte Rodoviário - PATR 1991/1992, realizada pelo IBGE, e que envolveu um total de 1027 empresas brasileiras de transporte de passageiros, o total de custos e despesas alcançou cifras da ordem de 37,3 trilhões de cruzeiros e a receita total obtida, por estas mesmas empresas, foi da ordem de 29,9 trilhões de cruzeiros⁵, conforme pode ser observado nos quadros 1.2 e 1.3.

RECEITA	Cr\$ (milhões)	Cr\$ (milhões)
Receita Bruta		
* com transporte rodoviário	25.956.470	
* de outras atividades	132.273	26.088.743
Deduções da Receita Bruta		
* vendas canceladas e descontos	70.997	
* Pis, Pasep, Finsocial	543.347	
* Imposto sobre serviços prestados	1.201.594	1.815.938
Receita Líquida		24.272.805
Receitas Financeiras		3.639.762
Outras Receitas Operacionais e Não-operacionais		1.232.242
Subvenções Governamentais		796.432
Receita Total		29.941.241

Quadro 1.2 Demonstrativo de receitas das empresas brasileiras de transporte rodoviário de passageiros, referente ao ano de 1992. Fonte: PATR 91/92 - IBGE

⁵ Estas receitas e despesas são estimadas, convertendo-se pelo valor mensal médio de compra do dólar americano [SRF93], em US\$ 8,2 bilhões e US\$ 6,6 bilhões, respectivamente.

CUSTOS E DESPESAS	Cr\$ (milhões)
Aluguéis e arrendamento de imóveis, máquinas, etc	151.224
Arrendamento mercantil de veículos, máquinas e equipamentos	1.118.125
Consumo de pneus, câmara-de-ar, peças, etc	2.712.689
Depreciação e amortização	3.434.019
Despesas financeiras	9.872.287
Impostos e taxas	249.080
Manutenção e reparação de veículos, imóveis, etc	752.957
Pagamentos efetuados a carreteiros ou transportadores autônomos	53.812
Retiradas de proprietários ou sócios, presidente e diretores	250.608
Salários de motoristas	3.848.362
Salários do pessoal de apoio e manutenção	3.397.643
Salários do pessoal administrativo e outras atividades da empresa	978.633
Encargos sociais trabalhistas	3.694.077
Combustíveis e lubrificantes consumidos	3.926.754
Prêmios de seguros	149.258
Serviços prestados por terceiros	256.251
Outros custos e despesas operacionais e não-operacionais	2.419.399
Total dos Custos e Despesas	37.265.178

Quadro 1.3 Demonstrativo de custos e despesas das empresas brasileiras de transporte rodoviário de passageiros, referente ao ano de 1992. Fonte: PATR 91/92 - IBGE.

No mesmo período, estas empresas proporcionaram cerca de 420 mil empregos e funções diretas, além de manterem uma frota de aproximadamente 105 mil ônibus e microônibus, representando uma capacidade de 6 milhões de passageiros, conforme os dados apresentados no quadro 1.4. Como pode ser observado, ainda, em torno de 60% destes valores referem-se às atividades de empresas sediadas na região sudeste.

Região	Empresas	Pessoal	Ônibus		Microônibus	
			Quantidade	Capacidade	Quantidade	Capacidade
Norte	52	9.862	3.085	184.556	38	885
Nordeste	180	55.975	14.032	806.508	496	10.324
Sudeste	547	264.015	61.829	3.548.005	393	8.750
Sul	197	60.760	17.418	956.810	124	2.729
Centro-Oeste	51	28.135	7.378	382.873	10	314
Brasil	1.027	418.747	103.742	5.878.752	1.061	23.002

Quadro 1.4 Distribuição das empresas, pessoal e frota, por região, em 31/12/1992. Fonte: PATR 91/92 - IBGE.

No quadro 1.5, apresentam-se, ainda, alguns dados que proporcionam uma visão de como encontram-se distribuídos estes recursos, entre as modalidades de transporte intramunicipal, intermunicipal, interestadual e internacional, considerando as linhas regularmente oferecidas. De acordo com estes dados, 65% da receita proveniente da venda de passagens em linhas regulares referem-se ao transporte intramunicipal. Considerando que parte dos deslocamentos intermunicipais estão associados a movimentos urbanos das regiões metropolitanas, conclui-se que o percentual relativo a

operação das empresas de transporte coletivo rodoviário urbano pode representar 75%, ou até 80%, de todo volume de recursos mobilizados neste ramo de atividade.

Transporte de Passageiros - Linhas Regulares				
Informação	Intramunicipais	Intermunicipais	Interestaduais	Internacionais
Passageiros (em milhares)	13.354.207	1.750.046	112.355	1.444
Receita Passagens (Cr\$ milhões)	13.962.521	4.979.029	2.348.127	70.446
Percentual sobre a receita total	65,37%	23,31%	10,99%	0,33%
Número de linhas	10.848	8.163	1.925	41
Extensão (km)	353.445	1.716.511	1.671.210	60.923

Quadro 1.5 Número de passageiros, receita com venda de passagens, número de linhas regulares e extensão, por tipo de linha. Fonte: PATR 91/92 - IBGE.

Como os dados estatísticos apresentados indicam, os custos relativos a manutenção e operação das frotas de transporte coletivo rodoviário urbano, representam, no Brasil, volumes bastante expressivos. Conseqüentemente, mesmo pequenas reduções percentuais nestas despesas, obtida por meio de modelos e técnicas de otimização, podem representar, ao longo dos anos, uma economia de dezenas, ou até centenas de milhões de dólares americanos.

1.4.3. Importância para as Empresas de Transporte Rodoviário de Passageiros

De acordo com os dados apresentados pelo PATR 91/92, o setor de transporte rodoviário de passageiros apresentou, no ano de 1992, um déficit (despesas e custos - receitas) da ordem de 7,2 trilhões de cruzeiros. Dos totais apresentados, a maior parcela de custos refere-se ao aspecto operacional. Este valor evidencia a necessidade da aplicação de procedimentos com o objetivo de racionalizar as operações do setor, inclusive para permitir a sobrevivência do mesmo a longo prazo.

Alguns exemplos encontrados na literatura também reforçam esta importância. Desrochers e Soumis (vide [DES89]), por exemplo, comentam que mesmo uma redução da ordem de 1% nos custos operacionais da MUCTC (Montreal Urban Community Transit Company), em valores de 1986, resultaria em uma economia anual da ordem de US\$ 2,0 milhões. De acordo com as citações encontradas, com a aplicação de técnicas de otimização em problemas práticos de alocação de frotas e condutores, é comum obter-se reduções de custo que variam de 0,5% a 2,5% (vide [DES89] e [BAL83]), mesmo em situações onde a empresa já apresenta uma boa organização e eficiência.

Associados com sistemas de informações gerenciais adequados, os modelos de alocação e roteamento podem desempenhar um papel crucial na elaboração de um planejamento operacional eficiente das empresas de transporte coletivo urbano, com a conseqüente redução nos custos. Além disto, estes modelos podem ser utilizados como ferramentas

para avaliar o impacto decorrente de decisões tomadas no planejamento tático e estratégico da empresa, permitindo com isto ganhos que extrapolam o aspecto operacional.

Outro fator relevante a ser considerado, refere-se a sistemática corrente adotada pelas empresas de transporte rodoviário de passageiros, principalmente pelas pequenas e médias, na alocação de frotas e condutores. No Brasil, é comum os planos de alocação de frotas e condutores serem gerados a partir de procedimentos manuais desenvolvidos pelos "práticos" das várias empresas. Observa-se, na aplicação destes procedimentos, que o papel desempenhado pelos custos de operação é secundário. A não ser pela utilização de algumas regras de caráter geral, o custo, quase sempre, aparece como resultado de uma alternativa de alocação proposta, e não como elemento determinante desta alternativa. Na prática, diversas são as simplificações realizadas sobre o problema. Exemplificando:

- a) são utilizados esquemas de alocação independentes para cada linha, não considerando a possibilidade de veículos e condutores atuarem em duas ou mais linhas; e/ou
- b) são pré-definidas as quantidades de horas-extras a serem executadas por cada condutor, ao invés destas horas serem decorrentes do resultado do plano.

A aplicação destas práticas comuns fazem com que soluções eventualmente melhores sejam desconsideradas, pelo programador da empresa, na obtenção de um esquema operacional, o que evidencia a possível ineficiência existente no setor.

Ressalta-se, ainda, que tais procedimentos de alocação, apesar de simplificarem drasticamente o problema real, requerem, para serem executados, tempos que podem alcançar semanas ou meses, dependendo do porte, da complexidade da empresa e da experiência de quem elabora o plano. Lamont (vide [LAM87]), relata que na MUCTC, de Montreal, o planejamento operacional é uma atividade que envolve 75 pessoas, que gastam aproximadamente 5 meses realizando a aquisição de dados, a alocação da frota e dos condutores, para as 11 garagens da empresa e 4 dias típicos (dias úteis, sábados, domingos e feriados). Nesta empresa, a programação é realizada duas vezes por ano. Tal fato evidencia a falta de flexibilidade apresentada por estas empresas, e neste sentido, a disponibilidade de uma ferramenta computacional que auxilie na elaboração do plano pode fazer com que este tempo seja substancialmente diminuído.

Finalmente, a existência de um sistema de informação, por sua vez, permite controlar e recuperar mais facilmente, informações pertinentes a cada viagem realizada, o que

poderá ser utilizado, entre outras aplicações, na identificação de veículos causadores de acidentes e dos condutores responsáveis pelo fato.

1.4.4. Importância para o Usuário do Transporte Rodoviário de Passageiros

Uma parcela significativa da população faz uso dos sistemas de transporte coletivo, por motivos de trabalho, negócio, estudo e lazer, e dependem quase que exclusivamente deste tipo de transporte para se locomover.

Para o passageiro, a utilização de sistemas computacionais, por parte das empresas, poderá resultar, indiretamente, em um ganho qualitativo. A utilização de sistemas de informação automatizados, faz com que as empresa adquira uma maior agilidade na elaboração de seus planos operacionais, aumentando, com isto, a capacidade de se adequar a oferta de serviço à demanda. Outro aspecto qualitativo importante é a possibilidade de se aumentar a confiabilidade do sistema, tendo em vista a maior organização do mesmo.

Vigência	Salário Mínimo Preços de Abril/93 (2)	Transporte de Ônibus (1) Gasto (%)
de 01/01/59 a 17/10/60 (3)	7.594.227,38	5,9
de 01/05/74 a 30/04/75	4.423.306,86	10,6
de 01/05/78 a 30/04/79	5.311.341,43	10,6
de 01/03/86 a 31/12/86 (4)	2.723.096,50	21,8
de 01/01/89 a 31/01/89 (5)	2.298.286,51	15,6
de 01/03/90 a 31/03/90	2.104.842,12	20,4
de 01/01/93 a 31/01/93	2.588.444,68	16,0
de 01/02/93 a 28/02/93	2.046.119,11	20,0
de 01/03/93 a 31/03/93	2.188.032,03	20,5
de 01/04/93 a 30/04/93	1.709.400,00	27,8

Quadro 1.6 Gasto mensal com transporte no município de São Paulo⁶. Fonte: Conselho para Assuntos de Energia / CNI (vide [CNI94])

Também é importante lembrar que a utilização de sistemas coletivos de transporte se dá principalmente por camadas da população com menor poder aquisitivo. Segundo levantamento feito pelo Conselho para Assuntos de Energia (COASE/CNI), e apresentado no quadro 1.6, desde 1959 até abril de 1993, houve um aumento significativo do percentual dos gastos mensais com transporte por ônibus em relação ao valor do salário mínimo na cidade de São Paulo. Pode-se constatar que os gastos com

⁶ Neste quadro considere as seguintes observações: (1) maior valor de tarifa básica durante o período de vigência do salário mínimo (Piso Nacional de Salários de 07/08/87 a 31/05/89); (2) corrigido pelo IGP-DI do período; (3) maior Salário Mínimo desde a sua implantação; (4) implantação do Plano Cruzado em 28/02/86; e (5) implantação do Plano Verão em 16/01/89.

transporte evoluíram, no período, de cerca de 6% para até quase 28% do salário mínimo, o que mostra um empobrecimento dos usuários de transporte coletivo, neste caso ônibus, naquela cidade. Estima-se que o quadro deva ser semelhante em outras regiões, por ser a perda do poder aquisitivo um fenômeno nacional, assim como a elevação das tarifas de transporte urbano por ônibus⁷.

Outro fator a ser considerado, diz respeito aos custos operacionais, que sempre tendem a ser repassados para as tarifas, mesmo que estas sejam controladas pelo poder público. Assim, um planejamento operacional mais eficiente, por parte das empresas, poderia via a contribuir para a manutenção ou até a redução destas tarifas.

1.4.5. Importância para os Condutores

O sistema proposto neste trabalho apresenta sua importância também para os condutores de veículos de transporte rodoviário de passageiros. Sabe-se, da prática, que algumas empresas não respeitam a legislação trabalhista, no que diz respeito aos limites da jornada de trabalho⁸, realização de horas-extras⁹, intervalos de descanso¹⁰, entre outros aspectos. Observou-se, em alguns casos, que o condutor é submetido a jornadas diárias

⁷ Segundo o COASE/CNI, a frota de ônibus, no período em questão, apresentou melhoria qualitativa devida ao aumento do grau de inovação tecnológica dos equipamentos, o que de certa forma justifica o aumento de tarifas. Por outro lado, é importante ressaltar que também houve um aumento do tamanho das empresas, que passaram a ter maior número de linhas, veículos e condutores, o que contribuiu para complexidade do gerenciamento destes sistemas de transporte.

⁸ De acordo com a C.L.T. [CAR71], a duração normal de trabalho, para empregados de qualquer atividade privada, não poderá exceder de oito horas diárias. As empresas, entretanto, que tenham horário inferior, não poderão aumentar esse horário se essa concessão ou liberdade existe de longo tempo. Qualquer dilatação de horário neste caso, mesmo respeitando o limite de oito horas é considerado como serviço extraordinário.

⁹ A duração normal do trabalho poderá ser prorrogada por meio de acordo entre empregador e empregados, ou em casos de imperiosa necessidade. Esta prorrogação poderá se dar até o limite de 10 horas diárias ou 60 horas semanais, sendo as horas suplementares remuneradas acima do valor da hora normal.

¹⁰ Além de um descanso semanal de 24 horas consecutivas e que deverá coincidir com o domingo, no todo ou em parte, salvo motivo de conveniência pública ou necessidade imperiosa do serviço, estabelece a legislação brasileira períodos para repouso e alimentação dentro de uma mesma jornada de trabalho e também entre uma e outra. Entre duas jornadas de trabalho, isto é, entre um e outro dia de serviço, é obrigatório um período mínimo de onze horas consecutivas para descanso. Em qualquer trabalho, cuja duração contínua exceda de seis horas, é obrigatória a concessão de um intervalo para repouso e alimentação, o qual será, no mínimo de uma hora e, salvo acordo escrito ou contrato coletivo em contrário não poderá exceder de duas horas. Quando a duração contínua do trabalho não atingir a 6 horas, mas for superior a 4, será obrigatório um intervalo de quinze minutos. Estes intervalos não são computados na duração diária do trabalho, isto é, não constituem parcela do horário normal do empregado.

de 12, 14 e, excepcionalmente, até 16 horas de trabalho. Em outros casos, o intervalo entre períodos de trabalho está muito acima dos parâmetros legais estabelecidos.

O argumento geralmente utilizado por parte das empresas, é de que a regularização destas situações implica na contratação de pessoal, e conseqüentemente, no aumento dos custos e da tarifa. Estas análises, em geral, revestem-se de muitos preconceitos e da falta de um tratamento mais objetivo que quantifique corretamente este aumento de custos.

Outra situação, na qual a aplicação do sistema apresenta sua importância, corresponde aos casos de negociações trabalhistas. Uma maior agilidade e objetividade por parte das empresas na avaliação das propostas dos sindicatos, pode evitar que os mesmos declarem greves, ou realizem outros tipos de manifestações contrárias aos interesses das empresas e da sociedade em geral. É conveniente lembrar a repercussão que apresenta uma paralisação das atividades dos transportes coletivos nos centros urbanos. Mais do que a simples paralisação do setor, estas greves intervêm no andamento de outros setores da economia, que dependem dos transportes coletivos para que seus empregados cheguem ao trabalho. Outro efeito produzido por tais greves é o congestionamento dos centros urbanos, em função do aumento significativo na utilização do transporte individual. Assim, através deste efeito, a greve no transporte coletivo apresenta repercussão, inclusive, para a parcela da sociedade que não faz uso desta modalidade de transporte.

1.4.6. Importância para a Área de Conhecimento

Neste trabalho, além de se revisar a bibliografia sobre os principais modelos e sistemas existentes, são abordados alguns aspectos não tratados na literatura pesquisada. Entre eles, pode-se considerar como contribuição específica deste trabalho, os seguintes tópicos:

- a) integração dos modelos de alocação de veículos, geração de escalas e distribuição da carga semanal de trabalho, sob a forma de um sistema computacional;
- b) utilização de um algoritmo heurístico tipo *greedy*, baseado no método húngaro, para efetuar a alocação de múltiplas viagens à frota existente;
- c) tratamento qualitativo de parâmetros do modelo de alocação da frota (nível de adequação da frota às linhas e do nível de risco de atraso);

- d) possibilidade de considerar, interativamente, critérios múltiplos de decisão no modelo de alocação de frota (maximizar o nível de adequação da frota às linhas, minimizar o risco de atraso e minimizar os custos operacionais);
- e) tratamento da tolerância na definição dos esquemas de geração de escalas, permitindo que se estabeleça limites desejáveis e máximos para uma série de parâmetros relacionados com a definição dos períodos de trabalho e descanso;
- f) utilização de algoritmo genético na determinação das escalas diárias de trabalho;
- g) utilização de um algoritmo heurístico, baseado no método húngaro, para solução do modelo de distribuição da carga de trabalho semanal;
- h) possibilidade de considerar, interativamente, no modelo de distribuição da carga semanal de trabalho, múltiplos critérios de decisão (minimizar a dispersão das horas de trabalho e das horas-extras associadas às escalas semanais de trabalho).

Contudo, apesar da extensão com que o tema de alocação de frotas e condutores em empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros é abordado, o trabalho não pretende esgotar todas as facetas apresentadas pelas diversas empresas que atuam no mercado. Como paradigma para geração do sistema, foram consideradas algumas empresas da cidade de Florianópolis (SC), nas quais foram coletadas as informações básicas para definição do problema.

1.5. Estrutura do trabalho

Este trabalho é subdividido em seis capítulos. Neste primeiro capítulo, é apresentada uma introdução, na qual constam os objetivos do trabalho, a importância do mesmo, discutida sob vários aspectos, e as limitações que o mesmo apresenta.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão da literatura, com a qual procura-se caracterizar o problema alvo do estudo, os trabalhos mais relevantes da área bem como alguns dos sistemas computacionais existentes.

No terceiro capítulo, são apresentados os modelos matemáticos propostos neste trabalho, para resolução dos problemas de alocação da frota, geração de escalas e distribuição da carga semanal de trabalho.

No capítulo seguinte, é apresentado o sistema computacional desenvolvido, que utiliza os modelos propostos no trabalho. No quinto capítulo é apresentada uma avaliação dos planos operacionais para duas empresas da região de Florianópolis, cujos dados e relatórios finais podem ser obtidos com o uso do sistema computacional que consta nos anexos deste trabalho.

Finalmente, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho, e algumas recomendações sobre desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Considerações Iniciais

Nas empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, existem diversas questões que devem ser resolvidas. Independente do porte destas empresas, deve-se determinar:

- a) quantos veículos são necessários;
- b) quais viagens deverão ser realizadas por cada veículo;
- c) onde deverão ficar os veículos que não estiverem em operação;
- d) quando e onde cada veículo deverá reabastecer;
- e) quantos motoristas são necessários;
- f) que motorista deverá conduzir cada um dos veículos, nos vários períodos do dia;
- g) quando começa e quando termina o turno de trabalho de cada motorista;
- h) quando cada motorista terá direito a sua folga para descanso e alimentação; e
- i) quando cada motorista terá direito a sua folga semanal.

As respostas para estas questões podem ser apresentadas sob a forma de um plano operacional, o que não é uma tarefa fácil de ser realizada, pois existem inúmeras combinações, envolvendo viagens, veículos e condutores, que formam planos de operação viáveis, e que deverão ser considerados.

Para se dar uma idéia da complexidade do problema, considere-se o caso, de uma empresa de porte médio, envolvendo 1000 viagens diárias, 50 veículos e 100 condutores. Uma análise do problema, ainda que seja superficial, indica que:

- a) se cada veículo realizar exatamente 20 viagens, então, o primeiro poderá ser alocado de C_{1000}^{20} formas diferentes, o segundo com C_{980}^{20} formas diferentes, o terceiro com C_{960}^{20} , e assim sucessivamente, até que, ao quinquagésimo somente reste uma única forma de alocação; combinadas entre si, seriam $C_{1000}^{20} \cdot C_{980}^{20} \cdot C_{960}^{20} \dots C_{20}^{20} = 1,99 \times 10^{1648}$ alternativas diferentes de alocação de viagens aos veículos;
- b) considerando que o programa diário de cada veículo seja dividido em 4 partes (existem inúmeras formas de se realizar esta partição, mas considere-se uma alternativa para cada veículo), e que a cada condutor caberá a realização de duas destas partes, ao primeiro poderá ser alocado C_{200}^2 alternativas diferentes; ao segundo condutor serão C_{198}^2 alternativas; ao terceiro serão C_{196}^2 , e assim por diante. No total existiriam $C_{200}^2 \cdot C_{198}^2 \cdot C_{196}^2 \dots C_2^2 = 6,22 \times 10^{344}$ formas diferentes de se distribuírem estas partes entre os motoristas;
- c) considerando as alternativas de alocação de veículos com as alternativas de alocação de condutores, seria possível gerar na ordem de $1,24 \times 10^{1992}$ combinações distintas¹.

Dentre todas estas combinações, deseja-se encontrar aquela que forma o melhor plano de operação do ponto de vista dos critérios adotados. É evidente que muitas destas combinações não são viáveis, e não precisariam ser consideradas. Ainda assim, o número de combinações que restariam, seria extremamente grande, inviável de ser considerado em qualquer esquema de enumeração explícita. Para resolução deste problema é necessário, portanto, fazer uso de técnicas mais eficientes de otimização combinatorial.

2.2. Classificação dos Problemas de Otimização Combinatorial

Segundo Grötschel et all (vide [GRO88]), em matemática a palavra “problema” é usada com diferentes sentidos. No contexto deste trabalho, o sentido que será utilizado é o de

¹ Este número é de difícil avaliação, tendo em vista a magnitude das grandezas físicas normalmente consideradas. Para fins de comparação, considere que a massa de um próton é da ordem de $1,8 \times 10^{-24}$ gramas (vide [VEN94]). A massa do Sol, que corresponde a quase 100% da massa do sistema solar, é estimada em $2,0 \times 10^{27}$ toneladas (vide [ECG95]). Assim, seriam necessários $1,11 \times 10^{37}$ prótons para obter uma massa equivalente a do sistema solar, o que ainda é incomparavelmente menor que o número potencial de planos operacionais que podem ser gerados na solução do problema de alocação de frotas e condutores da empresa tomada como referência. A mesma conclusão ainda poderia ser tomada, se esta comparação fosse feita em relação a Via Láctea, na qual estima-se que existam 100 bilhões de estrelas.

encontrar uma resposta para um problema Π , conhecido como problema de otimização, que geralmente apresenta a seguinte forma:

$$\Pi: \text{Max} \{z(x) \mid x \in S\} \quad (2.1)$$

onde $S \subset X$ denota a região viável no espaço X . Em outras palavras, $x \in S$ é uma solução viável que satisfaz a especificação do problema. A função $z: S \rightarrow \mathbb{R}$, com \mathbb{R} sendo o conjunto de números reais, é chamada de função objetivo. Um $x^* \in S$ é uma solução ótima² de Π se $z(x^*) \geq z(x), \forall x \in S$. Um problema de otimização Π é denominado de problema de otimização combinatorial se o conjunto $S \subset X$ é discreto.

Para qualquer problema imaginável, o tempo de processamento necessário a obtenção da solução depende do algoritmo utilizado e do tamanho do problema³. Uma das medidas do grau de dificuldade de se resolver um problema de otimização combinatorial, é dada pelas funções de complexidade tempo associados aos algoritmos utilizados. A função complexidade tempo, $f: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$, expressa o número máximo de passos necessários para resolver uma instância qualquer, de tamanho $n \in \mathbb{N}$, do problema em questão.

De fato, a função f não determina o tempo necessário para a resolução de uma instância do problema, que poderá variar significativamente de acordo com os parâmetros do modelo. Duas instâncias de um mesmo problema, com o mesmo tamanho, poderão apresentar tempos de resolução significativamente diferentes. Um problema de maior tamanho, poderá apresentar tempo de resolução menor que outro de menor tamanho. Além disto, o tempo poderá variar em função do computador utilizado. Todos estes aspectos fazem com que o tempo de resolução, propriamente dito, não seja uma medida adequada de comparação entre algoritmos.

Para expressar a complexidade de um problema, ou melhor dizendo, do algoritmo utilizado para resolver um determinado problema, é utilizada uma notação especial. Exemplificando, um algoritmo cuja função complexidade tempo é dada por um polinômio de ordem k , isto é, $f(n) = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + \dots + a_k n^k$, é dito ser da ordem $O(n^k)$. Note-se que apenas o termo de maior ordem apresenta o seu papel nesta

² No caso do problema de otimização ser definido como $\Pi: \text{Min} \{z(x) \mid x \in S\}$, a solução ótima será dada por um $x^* \in S$ tal que $z(x^*) \leq z(x), \forall x \in S$.

³ O tamanho da instância de um problema é geralmente medido em termos do comprimento dos dados de entrada. Se a entrada do problema for, por exemplo, a estrutura de um grafo $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de vértices e E o conjunto de arestas, $|V|$ e $|E|$ são as medidas que definem o tamanho do problema.

notação; de fato, para um valor suficientemente grande de n , os demais termos da função perdem a sua representatividade. As constantes do polinômio também não são consideradas, pois dependem do meio utilizado para a resolução. Assim, um algoritmo de complexidade $O(n^2)$ é dito apresentar uma complexidade menor que outro de complexidade $O(n^3)$.

Com o objetivo de distinguir os problemas de fácil e difícil solução, classificam-se os problemas de otimização combinatorial em polinomiais (P) e não-polinomiais (NP). Mais precisamente, a classe de problemas cujos algoritmos utilizados para obter a solução exata apresentam função complexidade tempo limitada superiormente por um polinômio em $n \in \mathbb{N}$, é chamada de classe P . Por outro lado, os problemas para os quais não se conhece algoritmos exatos⁴, cuja função complexidade tempo seja limitada superiormente por um polinômio em $n \in \mathbb{N}$, diz-se que pertencem a classe NP . A notação NP é derivada da expressão *non-deterministic polynomial time algorithm*. Alguns exemplos típicos de ordens associadas a problemas da classe NP , são: $O(n^{\log n})$, $O(n!)$, $O(k^n)$, etc.

Dado dois problemas de decisão⁵, Π e Π' , uma transformação polinomial é um algoritmo que, dado uma instância de Π , produz em um tempo polinomial uma instância de Π' , tal que a solução de cada instância $\sigma \in \Pi$ é a mesma que para a sua correspondente instância em Π' .

É evidente que este conceito de problema de decisão difere do conceito de um problema de otimização, embora estes possam estar relacionados entre si. Mais claramente, suponha que o problema de otimização seja um problema de programação linear (PPL) a ser maximizado. Um problema de decisão, relacionado com o PPL em questão, poderia ter o seguinte enunciado: "Existe alguma solução viável cujo valor da função objetivo é maior ou igual a Q ?" Supondo que exista um algoritmo polinomial para resolver o PPL, então, para obter a resposta deste problema de decisão, em primeiro lugar poderia ser

⁴ Para alguns problemas da classe (NP), são conhecidos algoritmos polinomiais capazes de determinar soluções aproximadas. Porém, isto não é suficiente para fazer com que o problema seja considerado da classe (P). Estes algoritmos aproximados fazem uso de heurísticas, que pode ser (vide [STO92]): (a) *heurísticas específicas*, desenvolvidas para cada tipo de problema, com base nas características do problema; (b) *heurísticas de busca local*, que são formas alternativas de busca no espaço de soluções, tais como *Tabu Search*, Algoritmos Genéticos e *Simulated Annealing*.

⁵ Chama-se de problema de decisão aquele para o qual somente existem duas respostas possíveis: *sim* ou *não*. Um exemplo de problema de decisão consiste em determinar se um grafo possui circuito hamiltoniano.

computada a solução do problema de otimização. Comparando o valor encontrado com Q , a resposta para o problema de decisão poderia ser dada em tempo polinomial.

Cook (1971) e Karp (1972) introduziram a noção de uma classe de problemas de decisão que, em um sentido bem definido, são os mais difíceis em NP . Um problema de decisão Π é dito NP -completo, se $\Pi \in NP$, e se qualquer outro problema em NP pode ser transformado para Π por um algoritmo de complexidade polinomial. Assim, todo problema NP -completo, Π , tem a seguinte propriedade (vide [GRO88]):

Se Π pode ser resolvido em um tempo polinomial então todos os problemas NP poderão ser resolvidos em tempo polinomial, isto é, se Π é NP -completo, e se $\Pi \in P$, então $P = NP$.

Isto justifica dizer que os problemas NP -completos são os mais difíceis problemas da classe NP . O principal interesse pela noção da NP -completicidade, é caracterizar, matematicamente, a existência de problemas de "difícil" resolução. A existência de problemas NP -completos também sugere um meio de padronizar a resolução de problemas em NP . De fato, o problema NP -completo mais utilizado como forma padronizada de resolução de problemas em NP , tem sido o problema de programação inteira. Vários problemas combinatoriais⁶, quando traduzidos para um problema de programação inteira, apresentam boas propriedades para a sua resolução.

Um problema Π é chamado de NP -fácil ("não mais difícil que algum problema em NP "), se existe um problema $\Pi' \in NP$ tal que Π pode ser reduzido a Π' . Um problema Π é chamado de NP -difícil ("pelo menos tão difícil que algum problema em NP "), se existe um problema $\Pi' \in NP$ tal que Π' pode ser reduzido a Π .

Na figura 2.1, são apresentados alguns problemas de otimização combinatorial, segundo uma classificação com ênfase no aspecto acadêmico, proposta por Ibaraki (1988).

Outros autores, sugerem existir diferenças entre os problemas padrões estudados pelo mundo acadêmico e os existentes no mundo real. Na figura 2.2, é apresentada uma classificação alternativa proposta por Müller-Merbach (1981), na qual fica evidenciada esta diferenciação. Nesta classificação, os problemas de alocação de veículos e condutores aparecem como um exemplo de problema combinatorial do mundo real.

⁶ Alguns exemplos típicos de problemas NP -completos, que podem ser transformados e resolvidos com o uso de programação inteiras, são: o problema de coloração de grafos, o problema de cobertura, o problema de partição, o problema da mochila, o problema do máximo conjunto independente, entre outros.

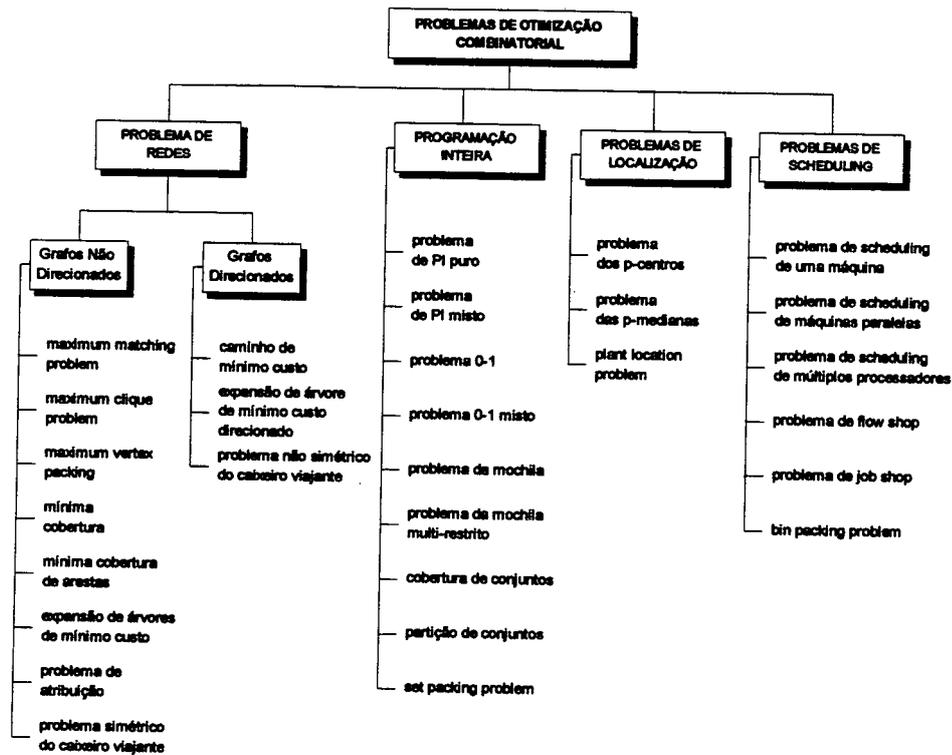


Figura 2.1 Classificação dos problemas de otimização combinatorial adaptado de Ibaraki. Fonte: Oscar C. L. Vaca (vide [VAC95]).

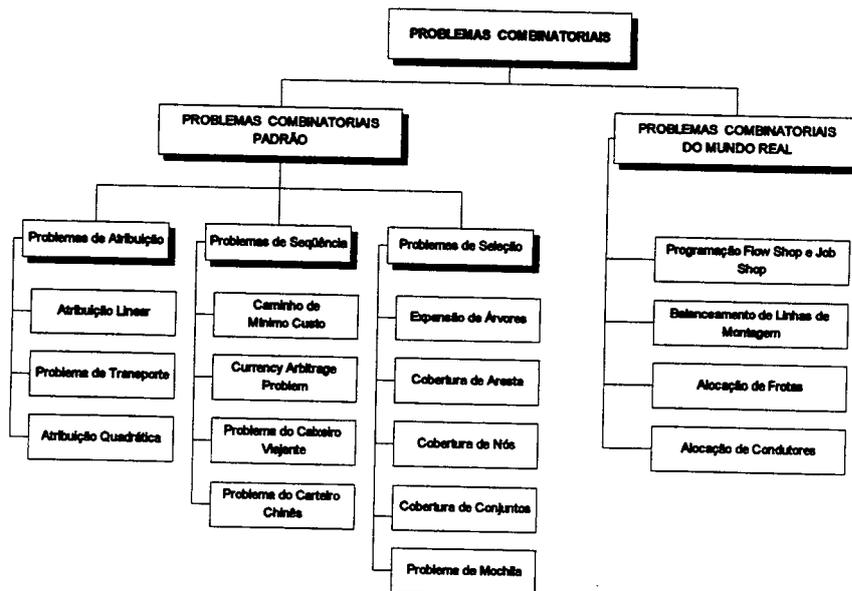


Figura 2.2 Classificação dos problemas de otimização combinatorial, segundo Müller-Merbach. Fonte: Oscar C. L. Vaca (vide [VAC95])⁷.

⁷ Neste trabalho são utilizados os termos alocação de frotas e alocação de condutores, ao invés dos

2.3. Os Problemas de Alocação de Frotas e Condutores

2.3.1. Aspectos Gerais

Em geral, a alocação de frotas e condutores são problemas que se interagem, isto é, a especificação da solução de um, implica na consideração de restrições para o outro. Assim, é natural que se deseje resolver os problemas simultaneamente. Entretanto, os modelos que incorporam os dois problemas, em um único problema de otimização, são bastante complexos.

Conseqüentemente, a maioria das aplicações práticas utilizam um procedimento seqüencial, no qual primeiramente é resolvido um problema e depois o outro, garantindo que certos mecanismos de acoplamento sejam preservados⁸.

Em uma edição especial da revista *Computers and Operations Research*, publicada em 1983, Lawrence Bodin, Bruce Golden, Arjang Assad e Michael Ball, apresentaram uma valiosa revisão do estado da arte, na época, sobre roteamento e alocação de veículos e condutores, na qual estão fundamentados alguns dos problemas e modelos apresentados nesta seção (vide [BOD83]).

2.3.2. Problemas de Alocação de Frotas

Existem, na literatura, diversos trabalhos relacionados com roteamento e alocação de veículos. Alguns problemas, a exemplo do *problema do caixeiro viajante* e do *problema do carteiro chinês*, são clássicos e amplamente conhecidos (vide [CRH75]). Em outros trabalhos, o problema tratado é particularizado através da descrição dos critérios e restrições adotados. Trabalhos como os apresentados por Solomon (vide [SOL87]), Kolen et all (vide [KOL87]) e Thangiah et all (vide [THA93]), por exemplo, descrevem uma classe de problema conhecidos como *problema de roteamento com janelas de tempos*. Nestes trabalhos o veículo deve executar um roteiro que passe por um conjunto de locais, para os quais existe especificado um intervalo de tempo no qual esta passagem deve ocorrer. O critério de otimização adotado é a minimização do comprimento total do roteiro.

termos seqüenciamento de veículos e seqüenciamento de equipes, como é apresentado no trabalho publicado por O. C. L. Vaca.

⁸ Nos casos em que os custos operacionais dos veículos sobressaem em relação aos demais custos do problema, esta abordagem produz resultados bastante satisfatórios. Quando os custos de alocação dos condutores representam uma parcela significativa dos custos operacionais, estratégias combinadas de alocação, são mais indicadas.

No caso específico do transporte rodoviário urbano de passageiros, o dado de entrada básico consiste em um conjunto de tarefas ou viagens a serem realizadas. Cada viagem tem especificado um horário de início, um horário de término, um local de início e um local de término, que deverá ser executada por um único veículo. Um exemplo ilustrativo de tabela de horários é apresentado no quadro 2.1, onde, por medida de simplificação, mas sem perda de generalidade, todas as viagens possuem o mesmo local de início e término (*Terminal*).

Viagem	Saída		Chegada	
	Local	Horário	Local	Horário
1	Terminal	08:00	Terminal	09:00
2	Terminal	08:30	Terminal	09:30
3	Terminal	08:15	Terminal	09:30
4	Terminal	09:50	Terminal	10:50
5	Terminal	09:40	Terminal	10:40
6	Terminal	09:15	Terminal	10:15
7	Terminal	10:45	Terminal	11:45
8	Terminal	11:30	Terminal	12:30
9	Terminal	11:20	Terminal	12:20
10	Terminal	12:15	Terminal	13:15

Quadro 2.1 Quadro de horários de uma empresa fictícia, referente ao exemplo apresentado por L. Bodin et all, 1983.

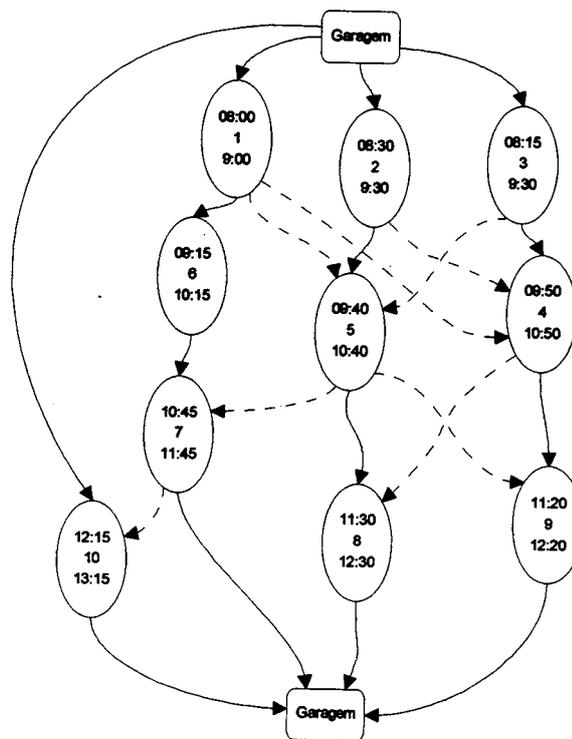


Figura 2.3 Grafo representativo de uma esquema de alocação de 10 viagens a uma frota de 4 veículos, com restrições no comprimento máximo dos caminhos. Fonte: L. Bodin et all, 1983 (vide [BOD83]).

A função objetivo pode incluir os custos de capital dos veículos, os custos de operação dos veículos e os custos operacionais com os condutores. O número de veículos disponíveis, bem como dos condutores, é limitado, e podem estar associados a diversos pontos de depósito (garagens). Este problema pode ser esquematizado por um grafo acíclico, a exemplo do que é apresentado na figura 2.3.

Neste grafo, cada viagem é representada por um nó, no qual estão assinalados os tempos de partida e chegada, além do número de identificação da viagem. Os arcos (tracejados e em linha cheia) indicam as possibilidades viáveis de alocação da frota. Considerou-se, na montagem deste grafo, que existe um arco entre os nós i e j desde que o tempo de chegada do nó i é menor que o tempo de saída do nó j , e que o tempo de saída do nó j não é maior que o tempo de chegada do nó i , acrescido de uma hora. Os arcos em linha cheia determinam um esquema de alocação da frota, no qual 4 veículos são utilizados para realizar as 10 viagens. Considerou-se, na obtenção deste esquema, que nenhuma seqüência de viagens alocadas pode ultrapassar o limite de 5:00 horas. Esta última restrição proíbe a alocação da viagem 10 na seqüência da esquerda.

O tipo e a complexidade dos problemas de alocação de frotas são determinados por três diferentes restrições impostas pela natureza de cada problema, a saber:

- a) limite no comprimento da seqüência de viagens alocadas, em função de problemas com reabastecimento de combustível;
- b) heterogeneidade na composição da frota, com restrições de alocação de viagens; e
- c) existência de múltiplos depósitos (garagens).

De acordo com estas restrições, L. Bodin *et all* (vide [BOD83]) descrevem quatro diferentes problemas básicos, apresentados a seguir.

2.3.2.1. Alocação de Frota com uma Garagem - VSP (*Vehicle Scheduling Problem*)

A resolução do VSP, implica em particionar o conjunto de nós do grafo acíclico que representam as viagens a serem executadas, em um conjunto de caminhos, de modo a minimizar uma função de custos. Cada caminho corresponde a uma seqüência de viagens a ser atribuída a um veículo da frota. A utilização de uma função objetivo que minimize o número de caminhos, faz com que o custo do capital também seja minimizado⁹. No caso

⁹ A cada caminho é associado um veículo. Minimizando o número de caminhos, minimiza-se o número de veículos, e, conseqüentemente, o custo do capital investido na frota.

de se associar pesos c_{ij} a cada arco do grafo, de modo a representar os custos de se fazer com que um veículo realize uma determinada viagem j após uma viagem i (custo de conexão), é possível utilizar uma função que minimize o custo total dos caminhos. Esta abordagem minimiza os custos operacionais, visto que os custos das viagens regulares (associadas aos nós do grafo) independem do resultado da alocação no caso de frotas homogêneas.

Na figura 2.4 é apresentada uma solução para o problema da figura 2.3, sem restrição no comprimento máximo dos caminhos, onde o objetivo utilizado foi a minimização do número de veículos.

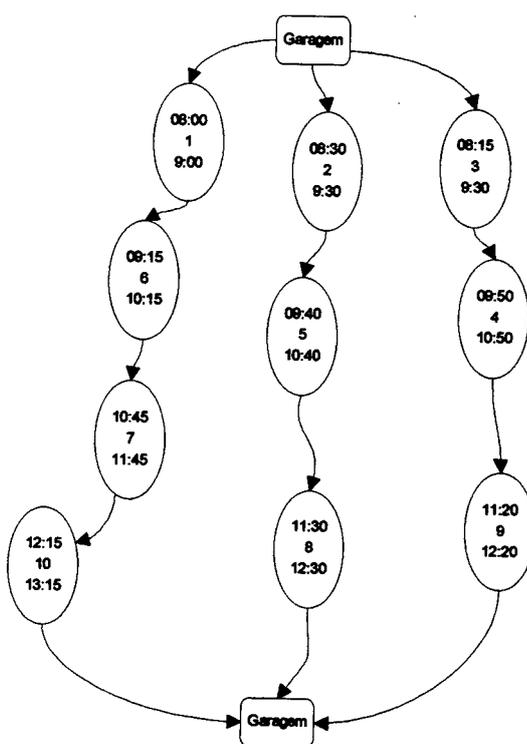


Figura 2.4 Grafo representativo de um esquema de alocação para o problema da figura 2.3, sem restrição no comprimento máximo dos caminhos. Fonte: L. Bodin et al, 1983 (vide [BOD83]).

2.3.2.2. Alocação de Frota com Restrição no Comprimento da Seqüência de Viagens - VSPLPR (Vehicle Scheduling Problem with Length of Path Restrictions)

Na resolução do VSPLPR, são consideradas restrições no tempo total de operação (ou alternativamente sobre a quilometragem percorrida), correspondendo na prática a necessidades de reabastecimento, manutenção, etc. Apesar de existir um algoritmo polinomial para resolução do problema VSP, o VSPLPR é um problema *NP*-difícil (vide [BAL80]). Por esta razão, para resolução deste problema, inclusive com adição de

outras restrições, são utilizados algoritmos heurísticos. Na figura 2.3, as linhas cheias representam a solução para o problema, considerando um limite máximo de 5 horas de operação para cada veículo.

2.3.2.3. Alocação de Frota com Múltiplos Tipos de Veículos - VSPMVT (Vehicle Scheduling Problem with Multiple Vehicle Types)

Na prática, a existência de diversos tipos de veículos faz com que seja necessário escolher aqueles que são mais adequados à realização de determinadas viagens. Veículos de maior capacidade, por exemplo, devem ser escolhidos para serem alocados em linhas com grande demanda, enquanto que veículos de menor capacidade devem, preferencialmente, ser alocados em linhas com pouca demanda. Por outro lado, as linhas com demanda intermediária poderiam ser alocadas com qualquer veículo.

Restrições deste tipo também podem ser consideradas, a fim de se evitar que veículos mais antigos, sejam alocados em linhas com trajetos acidentados (região de montanhas), ou que veículos muito longos sejam alocados em locais de pouca manobrabilidade.

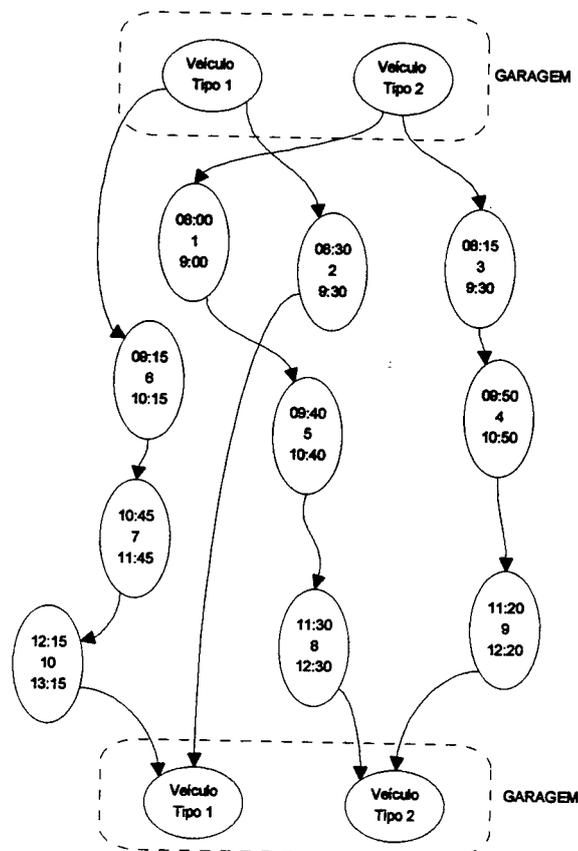


Figura 2.5 Grafo representativo de um esquema de alocação para o problema da figura 2.3, sem restrição no comprimento máximo dos caminhos, com dois tipos de veículos. Fonte: L. Bodin et al, 1983 (vide [BOD83]).

Neste problema, cada linha ou viagem tem especificado um tipo de veículo que deverá ser utilizado. Exemplificando, suponha que no problema da figura 2.3, as viagens 2, 6 e 7 devam ser realizadas por veículos do tipo 1, que as viagens 1, 3, 4 e 5, devam ser realizadas por veículos do tipo 2 e que as demais (8, 9 e 10) possam ser realizadas por qualquer veículo. Supondo, ainda, que não existam limites no comprimento da seqüência de viagens, então serão necessários 4 veículos, dois de cada tipo, para realizarem todas as viagens programadas. A solução deste problema encontra-se no grafo da figura 2.5.

2.3.2.4. Alocação de Frota com Múltiplas Garagens - VSPMD (*Vehicle Scheduling Problem with Multiple Depots*)

No VSPMD é considerado o fato de existirem duas ou mais garagens, nas quais os veículos poderão permanecer quando não estiverem em operação. Assim como no VSP, cada um dos veículos deverá retornar à garagem de origem após o término das viagens. A título de exemplo, a figura 2.6 apresenta uma solução para o problema de alocação de frotas com duas garagens.

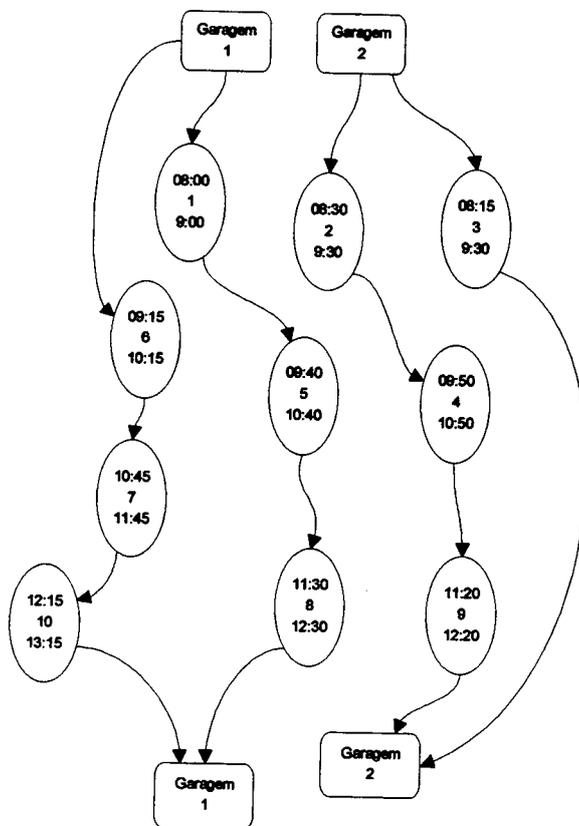


Figura 2.6 Grafo representativo de um esquema de alocação para o problema da figura 2.3, com duas garagens. Fonte: L. Bodin et al, 1983 (vide [BOD83]).

Neste exemplo, a solução seria ótima se a função objetivo considerasse os custos operacionais, e os locais de partida das viagens 1 e 6, e os locais de chegada das viagens 10 e 8 fossem próximos da garagem 1, bem como se os locais de partida das viagens 2 e 3, e os locais de chegada das viagens 3 e 9 fossem próximos da garagem 2.

2.3.3. Problema de Alocação de Condutores

O problema de alocação de condutores, descrito por L. Bodin et al (vide [BOD83]), está intimamente relacionado com o problema de alocação de frotas, conforme mostrado na figura 2.7.

No exemplo apresentado, existem três veículos (V1, V2, e V3), cujas seqüências de viagens foram subdivididas (em 3, 3 e 4 partes, respectivamente), de acordo com os possíveis pontos de substituição de condutores. Cada uma das partes, formadas nesta subdivisão, deverá ser alocada a um condutor. Estas partes, combinadas na forma de seqüências, de acordo com as regras trabalhistas vigentes, ao serem alocadas aos condutores, formam as escalas de trabalho, cujo custo não é, necessariamente, proporcional ao tempo total da seqüência gerada. Tais escalas poderão conter períodos regulamentares de descanso, e a viabilidade das mesmas depende, obviamente, além das regras trabalhistas, do tempo e local de término de uma parte e o tempo e local de início da parte subsequente.

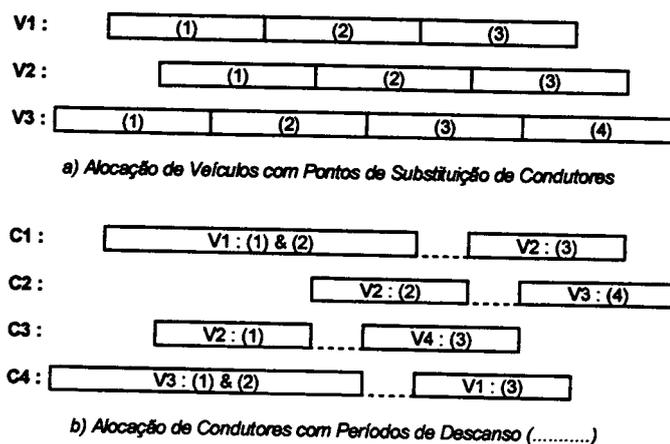


Figura 2.7 Relação entre esquemas de alocação de frota e de alocação de condutores. Fonte: L. Bodin et al, 1983 (vide [BOD83]).

Apesar de que neste exemplo a formação das escalas dos condutores tenha sido gerada em termos das seqüências de viagens alocadas aos veículos, isto não significa que os veículos tenham que ser alocados previamente, como poderá ser verificado adiante.

Uma descrição combinada do problema, considerando veículo e condutor, deve ter início com uma descrição mais detalhada da tabela de horários. A rigor, uma *linha*¹⁰ poderá ser composta de vários sub-trechos, com horários específicos de passagem por determinados pontos de referência. No quadro 2.2, por exemplo, cada registro (linha da tabela) representa um horário de uma linha, com vários pontos de referência que definem o roteiro, e que possui dois sentidos distintos. Cada horário deverá ser realizado sem que haja troca de veículo, a fim de garantir a continuidade da viagem para o passageiro. Cada uma das linhas possui um ou mais pontos de substituição de condutores, marcados com asterisco (*), e que não precisam coincidir, necessariamente, com os pontos inicial e final da linha.

Na alocação combinada, dois conceitos distintos de viagem devem ser considerados. O conceito de *trip*, coincide com o conceito de horário de uma linha, e corresponde a menor porção de trabalho que poderá ser alocada a um veículo em particular. Uma *d-trip* (*driver trip*), por sua vez, é a menor porção de trabalho que poderá ser executada por um condutor no mesmo veículo, e são formadas pela subdivisão dos horários das várias linhas nos seus pontos de substituição de condutores. Uma *d-trip* poderá, ainda, representar um movimento entre o ponto final de uma linha e a garagem, ou desta para um ponto inicial de uma linha.

Line College Park - Potomac Park			
College Park	Mount Ranier	North Capitol & New York Ave.	Potomac Park
(I)*	(II)*	(III)	(IV)*
⋮	⋮	⋮	⋮
09:00	09:20	09:55	10:15
09:15	09:35	10:10	10:30
⋮	⋮	⋮	⋮
10:20	10:00	09:25	09:05
10:35	10:15	09:40	09:20

Quadro 2.2 Exemplo de tabela de horários do problema combinado de alocação, com os respectivos locais de troca de condutores (marcados com *). Fonte: L. Bodin et al, 1983 (vide [BOD83]).

Assim, no exemplo do quadro 2.2, poderão ser criadas as seguintes *trips* e *d-trips*:

¹⁰ Uma linha é definida como sendo um trajeto, no qual um passageiro poderá se deslocar do início até o fim, sem necessidade de trocar de veículo, e pagando apenas uma passagem.

TRIPS

[(09:00,I),(10:15,IV)]	[(09:15,I),(10:30,IV)]
[(09:05,IV),(09:20,I)]	[(09:20,IV),(10:35,I)]

D-TRIPS

[(09:00,I),(09:20,II)]	[(09:20,II),(10:15,IV)]	[(09:15,I),(09:35,II)]
[(09:35,II),(10:30,IV)]	[(09:05,IV),(10:00,II)]	[(10:00,II),(10:20,I)]
[(09:20,IV),(10:15,II)]	[(10:15,II),(10:35,I)]	

Uma seqüência contínua de *d-trips*, alocada a um único veículo e condutor, é chamada de *piece*. Uma seqüência de *pieces*, formando a escala diária de trabalho de um condutor, é chamada de *corrida*. Eventualmente, na formação de uma *corrida*, o ponto no qual um *piece* termina não coincide com o ponto de início do *piece* subsequente. Neste caso o condutor terá que se deslocar de um ponto ao outro, a pé ou usando o próprio sistema de transporte coletivo. Este deslocamento, em geral, é remunerado.

Na formação das *corridas*, poderão ser inseridos períodos regulares de descanso e alimentação. Tais intervalos poderão ser de curta ou longa duração. As empresas fazem uso de intervalos de longa duração para melhor adequar os esquemas de trabalho com o perfil de demanda, que geralmente apresenta maiores concentrações no início da manhã e no início da noite. Os condutores, por sua vez, preferem a realização de intervalos menores, e costumam negociar este aspecto nos contratos coletivos de trabalho, inserindo cláusulas de remuneração especial, ou limitando o uso destes intervalos.

Por outro lado, cada um dos veículos deverá sair de sua garagem, realizar uma seqüência de *trips* (uma *trip* é composta por uma ou mais *d-trips*), e retornar a garagem de origem. A isto dá-se o nome do *bloco*. Um veículo poderá, eventualmente, realizar dois ou mais *blocos* a cada dia.

Resolver o problema combinado de alocação de frota e condutores consiste, portanto, conforme apresentado na figura 2.8, em determinar:

- a) a formação dos *blocos*, e a sua alocação aos veículos;
- b) a decomposição dos *blocos* em *pieces*;
- c) o seqüenciamento de *pieces* em *corridas*, e a sua alocação aos condutores.

Nas empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, o problema descrito acima, é aplicado para distribuir as viagens a serem realizadas em um determinado

período de tempo. Em geral, este problema de alocação é gerado para cada dia da semana, ou, mais precisamente, para três dias característicos da semana: dias úteis (segunda a sexta), sábados e domingos.

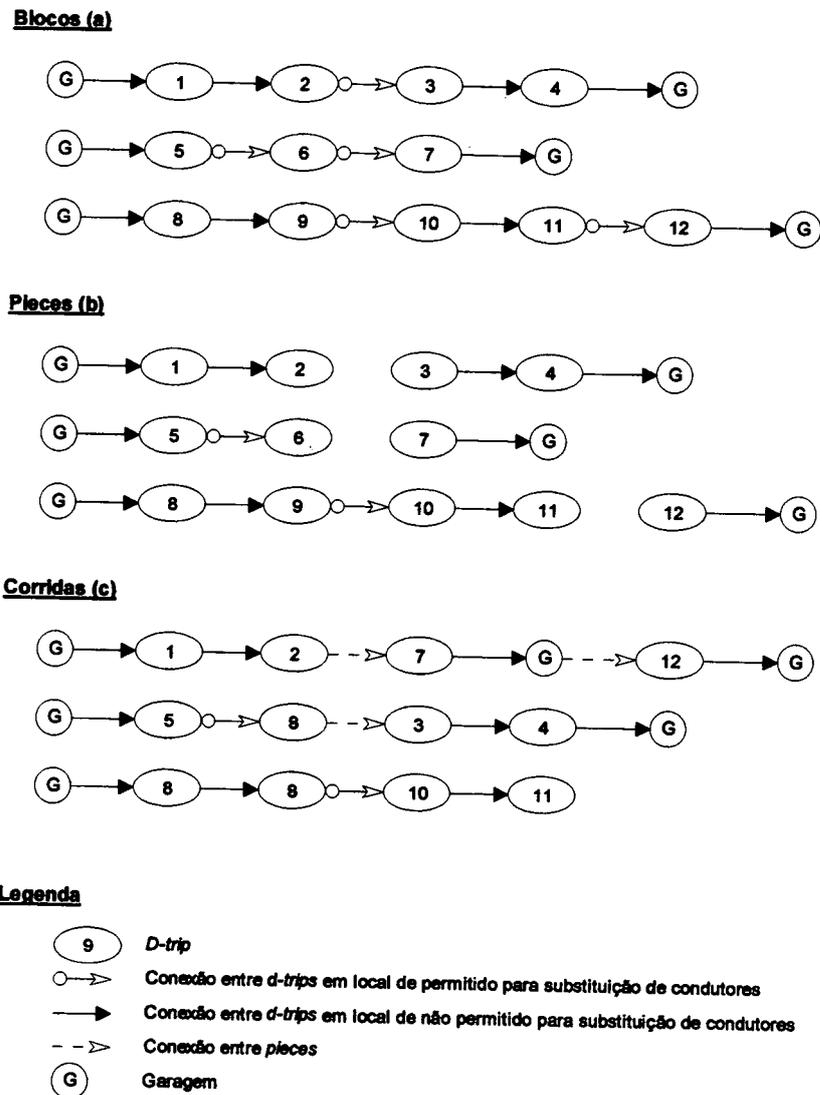


Figura 2.8 Solução do problema combinado de alocação de veículos e condutores: (a) os blocos são formados por seqüências de *d-trips*; (b) os *pieças* são formados pela separação dos blocos nos pontos de substituição de condutores; (c) as corridas são formadas por seqüências de um ou mais *pieças*. Fonte: L. Bodin et al, 1983 (vide [BOD83]).

Em algumas empresas, principalmente as norte-americanas, as *corridas* resultantes deste processo de alocação são distribuídas entre os diversos condutores, usando um sistema de prioridades, baseado no tempo de serviço que cada condutor tem na empresa. Nestas empresas cada condutor realiza a mesma corrida todos os dias. Este procedimento é preferido, muitas vezes, pela empresa e pelos próprios condutores, pois permite que o

condutor se familiarize com o roteiro. Além disto, é mais fácil de controlar. Entretanto, este sistema não assegura uma distribuição eqüitativa do trabalho, podendo causar distorções em termos de salários e serviços alocados.

Em outras empresas, normalmente as européias, as *corridas* que foram geradas no processo diário de alocação de frotas e condutores, sofrem um agrupamento, com base nas atividades semanais da empresa, a fim de garantir que a cada condutor corresponda um volume médio de trabalho e um salário mais ou menos equivalentes ao recebido pelos demais condutores. Este problema é conhecido como *crew rostering problem*.

2.4. Modelos e Algoritmos de Alocação de Frota

2.4.1. Visão Geral dos Métodos de Alocação

Apesar de diversos modelos teóricos de programação matemática (tais como: *fluxo em rede*, *matching* e *set covering*) serem indicados na formulação dos problemas de alocação de frota e condutores, não se pode dizer que exista uma sistemática comum de resolução a ser aplicada em todas as situações. Dado a complexidade, o tamanho e as particularidades de cada situação, em geral cada caso requer um modelo e uma técnica de solução específica.

2.4.2. Resolução dos Problemas VSP, VSPLPR, VSPMVT e VSPMD

Na resolução dos problemas VSP, VSPLPR, VSPMVT e VSPMD são consideradas diversas informações, com as quais são construídos grafos representativos de cada situação. O modelo para resolução do VSP, o mais simples destes problemas, considera os seguintes parâmetros:

- a) SL_i, ST_i local e instante de início da i -ésima viagem;
- b) EL_i, ET_i local e instante de término da i -ésima viagem;
- c) $TM(L1, L2)$ tempo de deslocamento entre os locais $L1$ e $L2$;
- d) DL local onde se encontra a garagem da empresa.

No grafo gerado para este caso, cada viagem i é representada por um elemento no conjunto de nós N . Além das viagens, o conjunto de nós contém dois nós adicionais: um nó inicial s e um nó terminal t . O conjunto de arcos, denotado por A , é composto pelos

arcos de conexão $(i, j) \mid ST_j - ET_i \geq TM(EL_i, SL_j)$ ¹¹, bem como pelos arcos que representam movimentos cuja origem ou destino são a garagem, isto é, pelos arcos $(s, i), \forall i \in N - \{s, t\}$ e os arcos $(i, t), \forall i \in N - \{s, t\}$ ¹². No grafo $G(N, A)$ assim formado, a solução para o VSP será dada pelo conjunto de caminhos que conectam o par de vértices s e t , que cobrem os vértices $i \in N - \{s, t\}$. Se aos arcos $(i, j) \in A$ forem associados os custos c_{ij} , tais que:

$$c_{ij} = \begin{cases} \text{custo operacional associado ao movimento } EL_i \rightarrow SL_j, \forall i, j \in N - \{s, t\} \\ \text{custo operacional associado ao movimento } EL_i \rightarrow DL, \text{ se } j = t \\ \text{custo de capital + custo operacional associado ao movimento } DL \rightarrow SL_j, \text{ se } i = s \end{cases}$$

então, poderá ser construído o seguinte modelo de programação matemática, proposto por Danzig e Fulkerson (vide [DAN54]):

$$\text{Min} \quad \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (2.2.a)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{i|(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{i|(j,i) \in A} x_{ji} = 0 \quad \forall j \in N - \{s, t\} \quad (2.2.b)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in N - \{s, t\} \quad (2.2.c)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \text{ e inteiros } \forall (i, j) \in A \quad (2.2.d)$$

onde $x_{ij} = 1$ indica que algum veículo deverá realizar a viagem representada pelo nó j após a conclusão da viagem representada pelo nó i , sendo que $x_{ij} = 0$ em caso contrário.

Este é um modelo de fluxo em redes, no qual as restrições (2.2.b) caracterizam o princípio de conservação de fluxo; as restrições (2.2.c) podem ser interpretadas como limites de capacidade dos nós $i \in N - \{s, t\}$; e as restrições (2.2.d) são os limites de capacidade dos arcos da rede. Para obtenção da solução ótima deste modelo, poderá ser

¹¹ Na formação do conjunto de arcos do grafo, se $ST_j - ET_i \gg TM(EL_i, ST_j)$, deve-se considerar a eventual necessidade de fazer com que o veículo retorne à garagem após o término da viagem i , e somente mais tarde se desloque ao ponto de início da viagem j . Neste caso, a condição a ser verificada deve ser substituída por $ST_j - ET_i \geq TM(EL_i, DL) + TM(DL, SL_j)$.

¹² O número de arcos *longos* cresce com o quadrado do número de nós. Bodin et al sugerem, com o objetivo de reduzir o tamanho do grafo, que se deixe de incluir alguns arcos cujo tempo seja maior que um limite especificado. Nestes casos, algumas modificações deverão ser realizadas, de modo a considerar corretamente os custos do capital imobilizado com a frota (vide [BOD83]).

aplicado o algoritmo *out-of-kilter* de Ford e Fulkerson (vide [FOR62]), no qual as condições de integridade poderão ser relaxadas sem prejuízo da viabilidade da solução.

Para resolução dos problemas VSPLPR, VSPMVT e VSPMD, conhecidos como sendo da categoria *NP*-difícil (vide [BAL80] e [LEN81]), algumas modificações deverão ser realizadas.

No caso do problema VSPLPR, considera-se adicionalmente em relação ao modelo 2.2 que nenhum caminho que conecta os vértices s e t poderá exceder, em comprimento, um limite estabelecido T_{MAX} . Para representação deste problema, Bodin *et all* (vide [BOD83]) sugerem a construção de um grafo idêntico ao que foi apresentado para o VSP, exceto pela não inclusão dos vértices s e t . Em relação a montagem do grafo, os autores sugerem, ainda, a inclusão de arcos de retorno que conectem os vértices j e i , desde que exista um caminho de comprimento menor que T_{MAX} conectando o vértice i ao vértice j . Assim, dois conjuntos de arcos poderão ser definidos:

$$A_1 = \{(i, j) \mid ST_j - ET_i \geq TM(EL_i, ST_j)\}$$

$$A_2 = \{(j, i) \mid TM(DL, SL_i) + (ET_j - ST_i) + TM(EL_j, DL) \leq T_{MAX}\}$$

Aos arcos do grafo $G(N, A_1 \cup A_2)$, são associados os custos c_{ij} , definidos por:

$$c_{ij} = \begin{cases} \text{custo operacional associado ao movimento } EL_i \rightarrow SL_j, \forall (i, j) \in A_1 \\ \text{custo de capital + custo operacional associado ao movimento } EL_i \rightarrow DL + \\ \text{custo operacional associado ao movimento } DL \rightarrow SL_j, \forall (i, j) \in A_2 \end{cases}$$

A solução do VSPLPR poderá ser obtida, encontrando-se no grafo $G(N, A_1 \cup A_2)$ um conjunto de circuitos que cobrem todos os nós do grafo, de modo que a soma dos custos dos arcos que compõe estes circuitos seja o menor possível, e que em cada circuito exista um e somente um arco do conjunto A_2 . Na figura 2.9 apresenta-se um exemplo deste tipo de grafo, juntamente com uma solução viável e outra inviável.

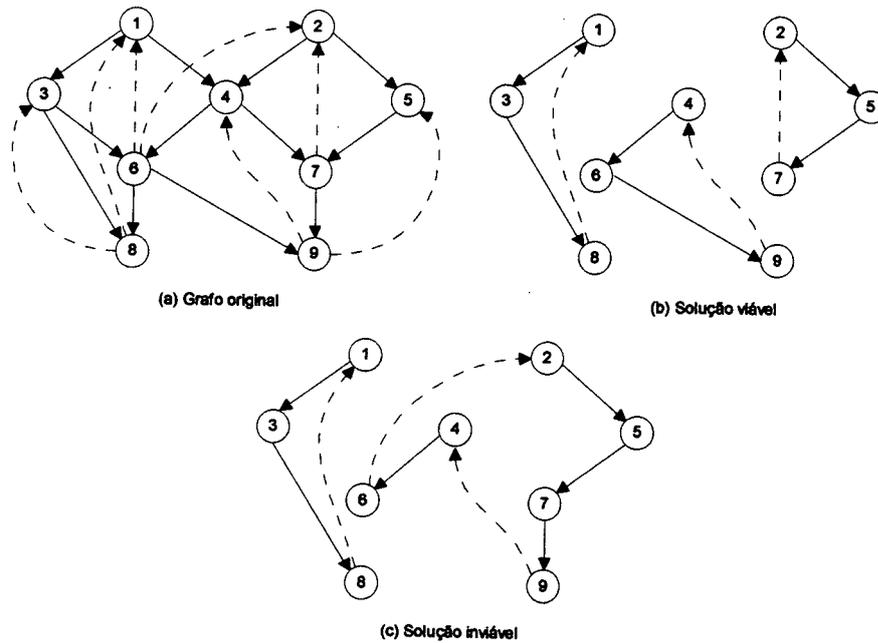


Figura 2.9 Representação de um VSPLPR, com as respectivas soluções. Fonte: L. Bodin et al, 1983 (vide [BOD83]).

A formulação matemática para este problema é a seguinte:

$$\text{Min} \left(\sum_{(i,j) \in A_1} c_{ij} x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A_2} c_{ij} y_{ij} \right) \quad (2.3.a)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{i|(i,j) \in A_1} x_{ij} + \sum_{i|(i,j) \in A_2} y_{ij} - \sum_{i|(j,i) \in A_1} x_{ji} - \sum_{i|(j,i) \in A_2} y_{ji} = 0 \quad \forall j \in N \quad (2.3.b)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A_1} x_{ij} + \sum_{i|(i,j) \in A_2} y_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2.3.c)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_1 \cap C} x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A_2 \cap C} y_{ij} \leq |C| - 1 \quad \forall \text{ circuito } C, |A_2 \cap C| \geq 2 \quad (2.3.d)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \text{ e inteiros } \forall (i,j) \in A_1 \quad (2.3.e)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq 1 \text{ e inteiros } \forall (i,j) \in A_2 \quad (2.3.f)$$

onde x_{ij} e y_{ij} são as variáveis associadas aos arcos dos conjuntos A_1 e A_2 , respectivamente. Na solução deste problema, $x_{ij} = 1$ e $y_{ij} = 1$ indicam que o arco correspondente faz parte de um dos circuitos. Cada circuito contém as viagens que deverão ser alocadas a um veículo em particular. Nesta formulação, (2.3.b), (2.3.c), (2.3.e) e (2.3.f) são as restrições características de um problema de fluxo em rede. A condição (2.3.d) é incluída para garantir que nenhum circuito escolhido tenha mais do

que um arco de retorno. Ao contrário do que acontece para o problema VSP, neste caso a solução ótima não é facilmente obtida, como poderá ser observado mais adiante.

A estrutura dos problemas VSPMVT e VSPMD, por sua vez, apresenta-se mais apropriada à formulação de modelos de fluxo em redes com múltiplas mercadorias (vide [KEN80]). O grafo gerado é similar ao utilizado no modelo VSP, porém, para cada tipo de veículo (ou garagem), denotados por $k = 1, \dots, K$, é acrescentado um par de vértices $\{s_k, t_k\}$, onde s_k é um vértice fonte e t_k é um vértice sumidouro. O conjunto de nós do grafo é definido por $N = N_1 \cup N_2$, onde N_1 é o conjunto de nós que representam as viagens, e $N_2 = \{s_1, s_2, \dots, s_K, t_1, t_2, \dots, t_K\}$ é o conjunto de nós fonte e sumidouro acrescentados ao grafo.

As variáveis de fluxo x_{ij}^k e os custos c_{ij}^k estão associados a k -ésima categoria de vértices, e existem sempre que for possível ao veículo da categoria k realizar a viagem representada pelo nó j após ter concluído a viagem representada pelo nó i . Denotando por $A_k = A_k^{(1)} \cup A_k^{(2)} \cup A_k^{(3)}$ o conjunto de arcos correspondentes a k -ésima categoria, onde:

$$A_k^{(1)} = \{(s_k, i) \mid \text{a viagem } i \text{ pode ser realizada pelos veículos da } k \text{-ésima categoria}\}$$

$$A_k^{(2)} = \{(i, t_k) \mid \text{a viagem } i \text{ pode ser realizada pelos veículos da } k \text{-ésima categoria}\}$$

$$A_k^{(3)} = \{(i, j) \mid \text{as viagens } i \text{ e } j \text{ puderem ser realizadas pelos veículos da categoria } k\}$$

tem-se o seguinte modelo:

$$\text{Min} \quad \sum_{k=1}^K \sum_{(i,j) \in A_k} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (2.4.a)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{i \mid (i,j) \in A_k} x_{ij}^k - \sum_{i \mid (j,i) \in A_k} x_{ji}^k = 0 \quad \forall j \in N_1 \text{ e } k = 1, \dots, K \quad (2.4.b)$$

$$\underline{b}_k \leq \sum_{j \mid (s_k, j) \in A_k} x_{sj}^k \leq \bar{b}_k \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (2.4.c)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \mid (i,j) \in A} x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in N_1 \quad (2.4.d)$$

$$0 \leq x_{ij}^k \leq 1 \text{ e inteiros } \forall (i, j) \in A \text{ e com } k = 1, \dots, K$$

onde \underline{b}_k e \bar{b}_k são os limites inferior e superior que indicam a disponibilidade de veículos em cada categoria.

Para a resolução dos modelos (2.3) e (2.4), relativos aos problemas VSPLPR, VSPMVT e VSPMD, podem ser aplicadas três técnicas distintas: programação concorrente, abordagem das duas fases e trocas heurísticas, conforme descrito a seguir.

2.4.2.1. Programação concorrente

A idéia básica consiste em analisar uma viagem por vez, segundo uma ordem preestabelecida, alocando-a ao veículo mais apropriado. Este método é utilizado na prática por ser de fácil implantação e por apresentar bons resultados. Bodin, Rosenfield e Kydes (vide [BOD78]) descrevem este procedimento como segue:

Passo 1 Ordene as viagens pelo tempo de início, incluindo-as em uma lista. Atribua a primeira viagem ao veículo 1;

Passo 2 Seguindo a ordem estabelecida para as viagens, verifique se é viável alocar a *i*-ésima viagem em algum veículo existente. Em caso afirmativo, realize alocação tomando o veículo para o qual ocorre o menor intervalo de tempo parado. Em caso negativo, crie um novo veículo, e aloque nele a viagem em questão.

Passo 3 Repita o passo 2, até que todas as viagens tenham sido alocadas.

Passo 4 Pare.

A viabilidade de que trata o passo 2, depende do tipo de problema considerado. Deve-se ressaltar, ainda, a possibilidade de aplicar este mesmo algoritmo em situações mistas, envolvendo limite de comprimento do caminho, tipos diferentes de veículos e múltiplas garagens. O critério de escolha do veículo mais apropriado à alocação, também poderá ser adaptado às circunstâncias de cada caso.

2.4.2.2. Abordagem das duas fases

A alocação de viagens nos problemas VSPMVT e VSPMD pode ser vista como um problema de formação de *clusters*. Embora com pouca documentação a respeito, é citado na literatura que estes procedimentos são bastante utilizados na prática. Existem duas abordagens distintas, ambas realizando a formação de *clusters* em etapas.

Uma destas abordagens considera que em uma primeira fase as viagens são agrupadas segundo algum critério de similaridade. Isto pode ser realizado por meio de um processo de alocação no qual cada viagem recebe um peso referente a sua inclusão em um determinado *cluster*. No caso do VSMVT, este peso poderá ser 0 ou 1, dependendo da possibilidade, ou não, de se realizar uma viagem com um veículo de determinado tipo.

No caso do VSPMD, o peso poderá estar relacionado com a proximidade da viagem a um depósito em particular. A alocação, propriamente dita, poderá ser realizada de modo a minimizar a soma destes pesos, considerando limites superiores e inferiores na disponibilidade de veículos em cada *cluster*. Uma vez formados tais *clusters*, resolve-se de modo isolado para cada um deles, um problema do tipo VSP.

Em outra abordagem, considera-se a ordem inversa. Na primeira fase o problema completo é resolvido como sendo um VSP, e, em seguida, cada um dos blocos gerados (seqüência de viagens alocadas a um veículo) é alocado inteiramente a um *cluster*. Esta abordagem apresenta melhores resultados para o VSPMD, pois para o VSPMVT não há garantias de obtenção da viabilidade.

Na prática, sempre existem características que poderão ser utilizadas na realização destes agrupamentos. Uma forma natural de agrupar as viagens, é considerar a localização geográfica das garagens, bem como os locais de início e término de cada viagem. As características dos veículos também apresentam um papel importante frente aos roteiros e demandas das várias linhas. A definição da própria linha, na sua essência, é uma forma de agrupamento das viagens¹³.

2.4.2.3. Trocas heurísticas

Esta técnica heurística de resolução, pode ser vista como uma variação do algoritmo 2-opt aplicado na resolução do problema do caixeiro viajante (vide [LIN65]). Como ponto de partida considera-se uma solução inicial aproximada, que pode ser obtida pelo método de programação concorrente. Nesta solução, cada seqüência de viagens a ser alocada a um veículo forma um bloco. Com base nesta solução inicial, avalia-se a possibilidade de realizar, de forma sistemática, trocas entre arcos de dois blocos distintos, com o objetivo de minimizar uma função de custo.

Na figura 2.10 é apresentado um exemplo deste procedimento. Como se pode observar, em cada troca de arcos apenas dois veículos são envolvidos. O efeito sobre os custos, que uma determinada troca de arcos provoca, não pode ser avaliada, em geral, apenas pelos custos dos arcos envolvidos. É necessário, pois, considerar os custos dos dois novos esquemas gerados, e compará-los com os custos de seus esquemas originais. Tal avaliação de custos poderá incorporar tempos ociosos, deslocamentos não produtivos, além dos fatores de adequação do veículo às viagens alocadas, entre outros aspectos.

¹³ É uma prática comum dos agentes envolvidos com a alocação de frotas, a subdivisão do problema global por linhas. Em cada linha é realizada uma alocação independente. Assim, os veículos utilizados em uma linha não costumam ser alocados em outras linhas.

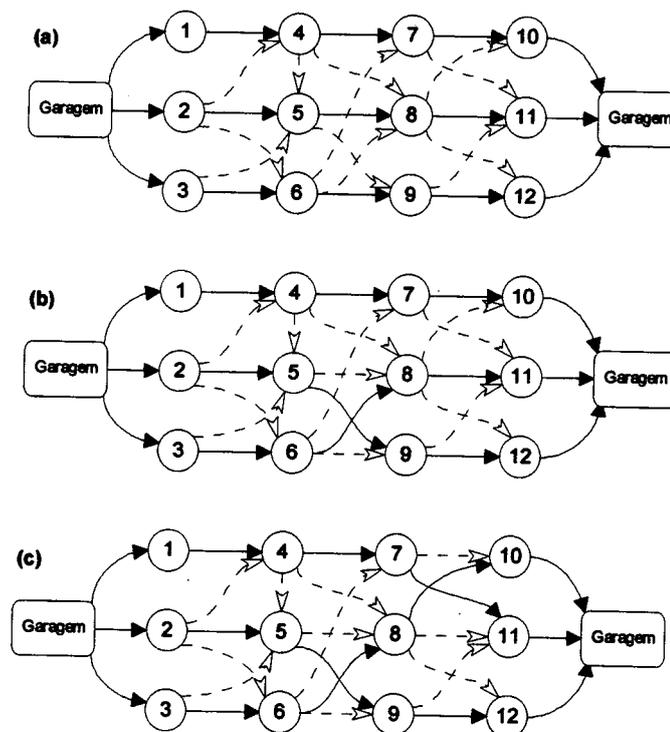


Figura 2.10 Procedimento de trocas heurísticas de viagens aplicado sobre um esquema com 3 veículos: (a) esquema inicial; (b) esquema inicial após a troca dos arcos 5-8 e 6-9 pelos arcos 5-9 e 6-8; (c) esquema após a segunda troca, na qual os arcos 7-10 e 8-11 são substituídos pelos arcos 7-11 e 8-10.

2.5. Modelos e Algoritmos de Alocação de Condutores

2.5.1. Modelo Teórico para o Problema de Alocação de Condutores

Bodin *et al* descrevem, em [BOD83], um modelo teórico genérico, para alocação de condutores, derivado do modelo 2.3. No modelo proposto por estes autores, é considerado que a cada condutor correspondem períodos contínuos de trabalhos, denominados de *continuous crew works periods* (CWP). Alguns destes períodos, quando agrupados, formam um esquema diário de trabalho. Estes esquemas são denominados pelos autores de *full work schedules* (FWS). Um FWS poderá ser composto de diversas formas, contendo, em geral de um a três CWPs. De acordo com a nomenclatura já apresentada na seção 2.3.3, cada CWP corresponde a um *piece*, e cada FWS é uma *corrida*. Na figura 2.11, são apresentados alguns exemplos de formação dos FWS.

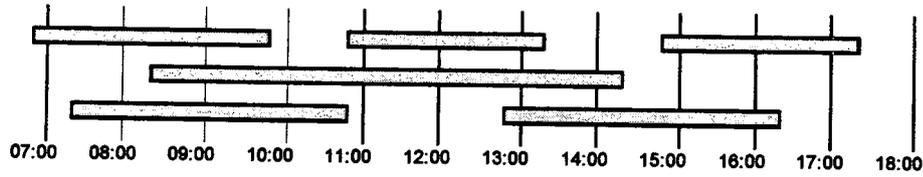


Figura 2.11 Exemplos de formação de FWS, com 3, 1 e dois CWPs, respectivamente.

Para representar o problema, os autores definem um grafo, no qual o conjunto de nós N é formado por tarefas elementares realizadas por um condutor dentro de um veículo, denominadas de d -trips. O conjunto de arcos, por sua vez, é formado por dois subconjuntos: o subconjunto A_1 é composto pelos arcos (i, j) tais que as d -trips i e j possam ser sequenciadas dentro de um único CWP e o subconjunto A_2 é composto pelos arcos de retorno (j, i) tais que um CWP iniciando na d -trip i e terminando na d -trip j é viável. Um FWS em potencial, denominado de *padrão*, é um conjunto composto por um pequeno número de CWPs. Denominando de ρ o conjunto de todos os FWS padrões, e $p(i, j)$ o conjunto de todos os padrões que cobrem um CWP que inicia em i e termina em j , tem-se o seguinte modelo:

$$\text{Min} \left(\sum_{l \in \rho} d_l z_l + \sum_{(i,j) \in A_1} c_{ij} x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A_2} c_{ij} y_{ij} \right) \quad (2.5.a)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{i|(i,j) \in A_1} x_{ij} + \sum_{i|(i,j) \in A_2} y_{ij} - \sum_{i|(j,i) \in A_1} x_{ji} - \sum_{i|(j,i) \in A_2} y_{ji} = 0 \quad \forall j \in N \quad (2.5.b)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A_1} x_{ij} + \sum_{i|(i,j) \in A_2} y_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2.5.c)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_1 \cap C} x_{ij} + \sum_{(i,j) \in A_2 \cap C} y_{ij} \leq |C| - 1 \quad \forall \text{ circuito } C, |A_2 \cap C| \geq 2 \quad (2.5.d)$$

$$\sum_{l \in p(i,j)} z_l + y_{ji} = 0 \quad \forall (j,i) \in A_2 \quad (2.5.e)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \text{ e inteiros } \forall (i,j) \in A_1 \quad (2.5.f)$$

$$0 \leq y_{ij} \leq 1 \text{ e inteiros } \forall (i,j) \in A_2 \quad (2.5.g)$$

$$0 \leq z_l \leq 1 \text{ e inteiros } \forall l \in \rho \quad (2.5.h)$$

onde $z_l = 1$ se o padrão l é utilizado ($z_l = 0$ em caso contrário), $x_{ij} = 1$ se a d -trip j é subsequente a d -trip i ($x_{ij} = 0$ em caso contrário) e $y_{ij} = 1$ se um CPW é definido pela seqüência que inicia na d -trip i e termina na na d -trip j ($y_{ij} = 0$ em caso contrário).

As diferenças básicas existentes entre este modelo e o apresentado em (2.3), está nas restrições adicionais (2.5.e) e (2.5.h), e na formulação da função objetivo. A restrição (2.5.e), é requerida a fim de assegurar que todos os CWP's sejam cobertos por um FWS. Na função objetivo, os parâmetros d_t e c_j são utilizados para considerar, respectivamente, os custos com a alocação dos condutores e com a alocação dos veículos, estes conforme descrito no modelo (2.3).

Em relação ao modelo proposto, os autores acrescentam que é impossível a sua utilização de forma explícita, tendo em vista o tamanho que o mesmo apresenta nos casos práticos. Em particular, o número de padrões FWS cresce na proporção de n^{2k} , onde n é o número de *d-trip* e k é o número de CWP's existentes por FWS. Assim sendo, são considerados métodos heurísticos que subdividem o problema em duas ou mais fases, ou que realizam simplificações com o objetivo de reduzir a complexidade do modelo apresentado.

2.5.2. Modelo de Alocação de Trabalhadores em um Local Fixo

Este modelo de alocação de trabalhadores, pode ser visto como sendo uma simplificação do modelo 2.5, na qual considera-se que a força de trabalho está concentrada em um local fixo. O modelo é caracterizado por um histograma de demanda, e um conjunto de esquemas de trabalho, conforme apresentado na figura 2.11. O histograma é definido pelo número de trabalhadores necessários em cada período, denotado por $d_t, \forall t = 1, \dots, T$, e pode ser obtido a partir de uma alocação prévia da frota. O modelo para alocação de trabalhadores em locais fixos, proposto inicialmente por Bennet e Potts (vide BEN68), pode ser escrito como:

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (2.6.a)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{j=1}^n a_{jt} x_j \geq d_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2.6.b)$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{e inteiros} \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (2.6.c)$$

onde:

$$a_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{se o FWS } j \text{ cobre o período } t \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad \forall j = 1, \dots, n$$

Neste modelo, o tamanho dos intervalos determina a precisão dos resultados obtidos. Quanto menor o intervalo, mais preciso é o resultado. É importante lembrar, entretanto,

que mesmo reduzindo o tamanho do intervalo a um minuto, ainda assim, existirá um erro cometido por se desprezar o tempo gasto pelos condutores no deslocamento do local de término de um CWP até o local de início do CWP subsequente. Por outro lado, o aumento na precisão implica, também no aumento do esforço computacional necessário para resolver o problema.

Na prática, este modelo é utilizado para obter uma definição prévia dos esquemas de alocação de condutores (vide [LES81]) e na avaliação das necessidades de pessoal decorrentes de modificações nas regras trabalhistas ou no atendimento de novas demandas (vide [BLA75] e [BOD81a]). Considerações adicionais, para limitar o uso de determinados tipos de FWS, podem ser introduzidas sem perda da linearidade do modelo. Exemplificando, pode-se requerer, adicionalmente às restrições do modelo 2.6, que pelo menos 50% dos esquemas sejam sem utilização de horas extras, ou que não mais que 10% dos condutores excedam 10 horas de trabalho diário. Condições deste tipo podem ser escritas na forma:

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} x_j \leq e_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (2.7)$$

onde $b_{ij} = 1$ se o j -ésimo FWS não satisfaz a i -ésima condição ($b_{ij} = 0$ em caso contrário), e e_i é o máximo número de esquemas que se permite violar a i -ésima condição.

Na literatura, este modelo também é explorado por vários outros autores, a exemplo de Monroe, Guha and Browne, Jenkins, Miller e Segal (vide [MON70], [GUH75], [JEN75], [MIL75] e [SEG79]).

2.5.3. Modelos de Alocação Baseados em *Set Covering* e *Set Partitioning*

Entre os modelos mais pesquisados para resolver o problema de alocação de condutores estão as formulações do problema de cobertura e/ou partição de conjuntos. Nestas formulações, considera-se que o trabalho a ser realizado por um veículo, também denominado de bloco, é composto por um conjunto de *pieces*, os quais correspondem às partes do bloco nas quais não são realizadas trocas de condutores. Então, uma alternativa de trabalho para um condutor, também denominado de *duty*, pode ser especificado por uma combinação de *pieces* que respeita as regras e contratos de trabalho.

Sejam $N = \{1, 2, \dots, n\}$ e $M = \{1, 2, \dots, m\}$ os conjuntos de índices para os *duties* e *pieces*, respectivamente. Considerando conhecidas os custos associados aos *duties*, isto é, $c_j, \forall j \in N$, e considerando os elementos $a_{ij}, \forall i \in M, \forall j \in N$, como segue:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o } j\text{-ésimo duty contém o } i\text{-ésimo piece} \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

e ainda:

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{se o } j\text{-ésimo duty faz parte da solução} \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

então o problema de encontrar o conjunto de *duties* de mínimo custo que cobre todos os *pieces* pode ser representado pelo seguinte problema de cobertura de conjuntos:

$$(SCP) \quad \text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (2.8.a)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, \quad \forall i \in M \quad (2.8.b)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in N \quad (2.8.c)$$

O problema de partição de conjuntos, por sua vez, poderá ser formulado através do seguinte modelo:

$$(SPP) \quad \text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (2.9.a)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = 1, \quad \forall i \in M \quad (2.9.b)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in N \quad (2.9.c)$$

Como o leitor poderá observar, os dois modelos apresentados são bastante semelhantes, exceto pela substituição da desigualdade no modelo de cobertura pela igualdade no modelo de partição. Em ambos os casos, o objetivo consiste em minimizar o custo dos *duties* que participam da solução do problema. No caso do SCP, o conjunto de restrições assegura que cada *piece* seja coberto pelo menos por um *duty*, enquanto que no caso do SPP, cada *piece* é coberto exatamente por um *duty*.

A exemplo do modelo apresentado na seção anterior, nestes também poderão ser incluídas restrições adicionais, semelhantes às condições (2.7), com o objetivo de restringir a utilização de determinados tipos de *duties*.

Diversos métodos foram desenvolvidos para a resolução destes dois problemas. Apesar das semelhanças existentes entre os dois modelos, os métodos desenvolvidos apresentam características particulares.

Heurgon, por exemplo, resolveu o problema de partição de conjuntos usando um método de programação linear e *branch and bound* (vide [HEU72] e [HEU75]).

Marsten (vide [MAR74]) utilizou um método de programação linear em conjunto com *branch and bound*, obtendo a solução ótima para problemas de partição de conjuntos com até 200 restrições e 2400 variáveis.

Shepardson e Marsten (vide [SHE80]) resolveram o problema de partição de conjuntos, para o caso específico de existirem apenas 2 peças por duty, usando uma técnica de relaxação lagrangeana e *branch and bound*.

Mitra e Darby-Dowman (vide [MIT85]) modificaram o modelo de cobertura de conjuntos para obterem um problema mais genérico, no qual se permite a sobre cobertura ou a não cobertura de uma tarefa, sujeitando as mesmas a uma função de penalidades.

Wren, Smith e Miller (vide [WRE85]) também utilizaram uma técnica de programação linear e *branch and bound*, desenvolvida por Ryan e Foster (vide [RYA81]), para resolverem o problema de cobertura de conjuntos.

Beasley (vide [BEA87]), por sua vez, propôs um algoritmo para o problema de cobertura de conjuntos, que combina testes de redução com heurísticas duais, e otimização com o subgradiente e programação linear. No trabalho publicado são apresentados alguns resultados com problemas de até 400 linhas e 4000 colunas.

Fisher e Kedia (vide [FIS90]) utilizaram adaptações das heurísticas *greedy* e 3-opt, aplicadas sobre o problema dual da relaxação lagrangeana dos SCP/SPP, para obterem limites inferiores aplicados em um esquema de busca do tipo *branch and bound*.

Para resolver os problemas de cobertura e partição de conjuntos, El-Darzi e Mitra (vide [ELD92]) utilizaram um esquema de busca em árvores, no qual limites de poda são estabelecidos com o usos de relaxação lagrangeana e solução de problemas de atribuição.

Uma outra abordagem, utilizada por Paias e Paixão (vide [PAI93]), para resolver o problema de cobertura de conjuntos, considera a transformação do SCP para a forma de um problema de programação dinâmica, no qual é aplicada uma técnica de relaxação do espaço de estados, com o objetivo de encontrar limites inferiores para a solução ótima do problema de cobertura. Tais limites, em conjunto com técnicas de *branch and bound*, são utilizados para obter a solução ótima do problema.

Ryan, outro autor que se destaca na área, publicou um trabalho apresentando resultados obtidos com o uso de microcomputadores, em problemas de partição com até 700 restrições e 200.000 variáveis binárias (vide [RYA92]). Neste trabalho, para obter resultados tão surpreendentes, o autor faz uso das características específicas da estrutura do modelo desenvolvido para o problema de *rostering*.

Mais recentemente, Beasley e Chu (vide [BEA94] e [CHU95]) propuseram dois algoritmos genéticos para resolver o problema de cobertura e partição de conjuntos. Aplicados sobre um conjunto de mais de 100 problemas de cobertura e partição, disponíveis na OR-library (vide [BEA90]), tais algoritmos apresentaram um desempenho bastante razoável, principalmente para o SCP. Estes problemas usados como teste, apresentam dimensões que variam entre 200 e 1.000 restrições e entre 1.000 e 10.000 variáveis, para os problemas de cobertura e entre 20 e 800 restrições e entre 200 e 1.000.000 variáveis, para os problemas de partição.

Outro trabalho publicado recentemente, desenvolvido por Wren e Wren (vide [WRE95]), também faz uso de algoritmos genéticos para resolver o problema de alocação de condutores em sistemas de transporte coletivo. O autor compara o resultado obtido na solução de um problema com o uso desta técnica heurística, com o obtido através do uso do sistema IMPACS e conclui comentando o fato de que apesar do sistema IMPACS produzir um resultado ligeiramente melhor, foram necessários esforços de mais de uma década de pesquisas e desenvolvimentos para obter este sistema, enquanto que o algoritmo proposto foi desenvolvido em um período bastante curto.

Entre as técnicas de solução apresentadas, as mais significativas para este trabalho, em face de suas características e facilidades de implantação computacional, são as apresentadas em [BEA87], [BEA94], [CHU95] e [WRE95].

2.6. Um Método Heurístico Combinado Baseado em *Matchings*

2.6.1. Formulação do Problema

Ball, Bodin e Dial (vide [BAL83]) propuseram, em 1983, um método heurístico combinado para a resolução do problema de alocação de frotas e condutores, baseado em *matchings*. Neste método, são considerados dois grafos, um representando o problema de alocação de veículos e o outro a alocação de condutores. Um conjunto de restrições assegura que a solução escolhida seja compatível em ambos os grafos. O dado de entrada consiste em uma tabela de horários a serem cumpridos, no qual constam os locais de saída (BT) e chegada (ET), e os respectivos horários, para todas as viagens a serem realizadas. Além disto, são conhecidos os pontos de troca de condutores (RP), e os horários em que estes pontos são atingidos.

No modelo proposto por Ball *et al.*, para os dois grafos, o conjunto de vértices é composto por *d-trips*, além de dois vértices adicionais, *s* e *t*, representando a garagem. Uma *d-trip* é formada pela divisão das viagens nos pontos de substituição de condutores. Assim, cada *d-trip* é definida por um local de início e um local de término, bem como um horário de início e um horário de término. O local início de uma *d-trip* poderá ser um BT ou um RP, enquanto que o seu término poderá se dar em um RP ou ET.

Os arcos destes grafos variam conforme a situação. No caso do grafo de alocação da frota, tem-se os seguintes arcos:

- Arco Tipo (1)* Conecta *s* a BT, e representa o movimento de um veículo deixando a garagem pela primeira vez no dia;
- Arco Tipo (2)* Conecta ET a *t*, e representa o movimento de retorno do veículo à garagem, no final de um dia;
- Arco Tipo (3)* Conecta ET a BT, e representa o movimento que o veículo deverá realizar do local de término de uma viagem para o local de início da viagem subsequente; no caso de ET coincidir com BT, este arco representa a espera do veículo em um local;
- Arco Tipo (4)* Conecta RP a RP, e representa a troca de um condutor; neste tipo de arco, os dois locais (RP) são idênticos, sendo que este arco sempre constará da solução do problema de alocação da frota;
- Arco Tipo (5)* Conecta ET a BT, passando por uma garagem, e representa um movimento do veículo do local de término para a garagem, na qual

permanece por um determinado período de tempo, para posteriormente retornar ao local de início de uma nova viagem.

Os arcos tipo 4 poderiam ser eliminados do grafo de alocação de frotas, sem prejuízo da representação do problema. Contudo a manutenção dos mesmos se justifica para mostrar a correspondência deste grafo com o de alocação de condutores. Na figura 2.12, estão caracterizados os arcos do grafo de alocação de frota.

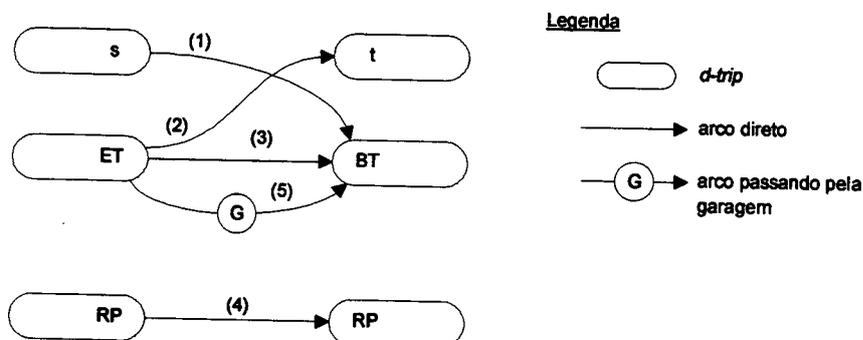


Figura 2.12 Tipo de arcos existentes no grafo de alocação de frotas. Fonte: Michael Ball *et al* (vide [BAL83]).

No grafo de alocação de condutores, surgem 10 tipos diferentes de movimentos, definidos pelos seguintes arcos:

- Arco Tipo (1)** Conecta *s* a BT, e representa o movimento de um condutor deixando a garagem no início do dia, juntamente com um veículo, e dirigindo-se ao ponto BT;
- Arco Tipo (2)** Conecta ET a *t*, e representa o movimento de retorno do condutor, do ponto ET para a garagem, ao final de um dia, conduzindo um veículo;
- Arco Tipo (3)** Conecta ET a BT, e representa o movimento do condutor ao levar um veículo do local de término de uma viagem ao local de início de outra viagem; como no grafo do problema de alocação da frota, os pontos ET e BT poderão coincidir, indicando um tempo de espera do condutor, juntamente com um veículo;
- Arco Tipo (4)** Conecta RP a RP, e representa a permanência do condutor em um mesmo veículo; os dois RPs devem ser coincidentes; ao contrário do que acontece no problema de alocação de frotas, este arco nem sempre faz parte da solução do problema de alocação de condutores;

Arco Tipo (5) Conecta ET a BT, passando por uma garagem, e representa o movimento de retorno do condutor à garagem, a partir do ponto ET, para lá permanecer por um período de tempo, retornar para o ponto BT, conduzindo, eventualmente, um outro veículo;

Arco Tipo (6) Conecta RP a BT, e representa o movimento de um condutor que deixa o veículo no ponto RP, se desloca à garagem (sem o veículo) para pegar outro veículo, e conduzi-lo ao ponto BT;

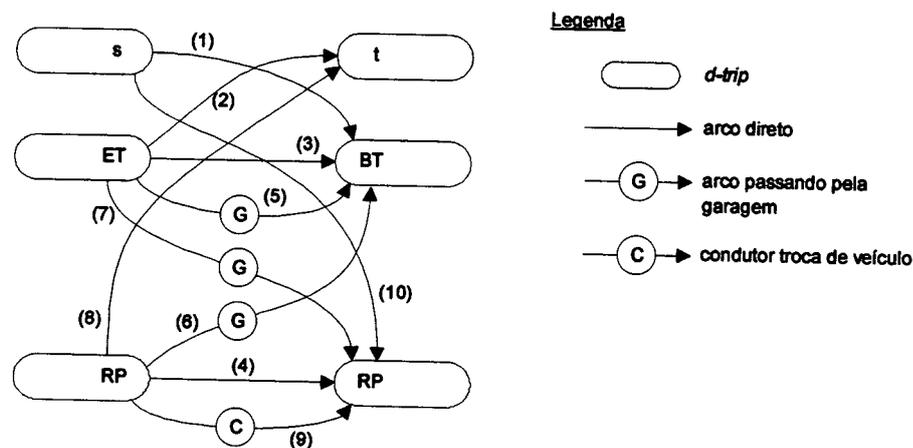


Figura 2.13 Tipo de arcos existentes no grafo de alocação de condutores. Fonte: Michael Ball *et al* (vide [BAL83]).

Arco Tipo (7) Conecta EP a RP, e representa o movimento de um condutor que leva um veículo do ponto ET para garagem, e posteriormente se desloca (sem o veículo) para um ponto RP;

Arco Tipo (8) Conecta RP a t, e representa o deslocamento do condutor do ponto RP para a garagem, no final de uma jornada de trabalho;

Arco Tipo (9) Conecta RP a RP, e representa o movimento do condutor ao deixar um veículo no ponto RP e pegar outro no segundo RP; eventualmente, os dois RPs poderão ser os mesmos, e neste caso, o arco representa um tempo de espera;

Arco Tipo (10) Conecta s a RP, e representa o movimento do condutor ao deixar a garagem, sem um veículo, no início de uma jornada de trabalho, para se deslocar para o ponto RP.

Cada programa de alocação de um veículo ou condutor, corresponde a um caminho de s a t no respectivo grafo. Nem todos os caminhos possíveis, entretanto, formam programas de alocação viáveis.

Em geral, poucas restrições são consideradas na formação de caminhos no grafo do problema de alocação de frotas¹⁴. Além disto, a função de custo associada a este problema pode ser representada pela soma dos custos dos arcos que formam cada caminho.

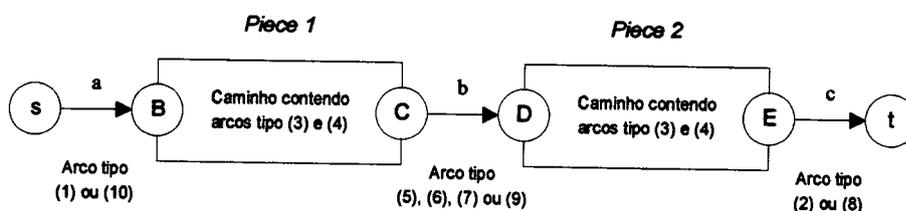


Figura 2.14 Formação de uma corrida com 2 peças: o primeiro piece é formado por arcos (3) e (4) que conectam as d-trips B e C, e o segundo piece é formado por arcos (3) e (4) que conectam as d-trips D e E. A seqüência de arcos $A(\ell) = (a,b,c)$ representa uma corrida que contém estes dois pieces. Fonte: Michael Ball et all (vide [BAL83]).

No caso do problema de alocação de condutores, é necessário considerar algumas restrições de modo a assegurar que o caminho obtido no grafo corresponda a um programa de alocação viável. Em termos do grafo do problema de alocação de condutores, um *piece* é uma porção do caminho de s a t , que contém apenas arcos do tipo (3) e (4), ou em outras palavras, é a porção de trabalho que pode ser realizada em um único veículo. Em relação aos custos, cada *piece* pode ser caracterizado pelos seus vértices de início e de término. Assim, uma *corrida* pode ser especificada por um conjunto de pares de vértice, onde o primeiro par corresponde ao início e término do primeiro *piece*, o segundo par corresponde ao início e término do segundo *piece*, e assim por diante. Na figura 2.14 é apresentado um esquema para representação deste conceito.

A fim de que as soluções para os problemas de alocação de frota e de condutores sejam compatíveis, as seguintes condições devem ser respeitadas:

¹⁴ As restrições em relação a formação de caminhos que correspondem a alocações viáveis da frota foram comentadas anteriormente na seção 2.3.2.

- a) Se um arco tipo (3) é usado na solução do problema de alocação de frota, então o arco (3) correspondente no problema de alocação de condutores também deverá ser utilizado;
- b) Um arco tipo (1), (5) ou (6) deve ser utilizado na solução do problema de alocação de condutores, se e somente se arcos do tipo (1) ou (5) incidem sobre os correspondentes vértices na solução do problema de alocação da frota;
- c) Um arco tipo (2), (5) ou (7) deve ser utilizado na solução do problema de alocação de condutores, se e somente se arcos do tipo (2) ou (5) saem dos correspondentes vértices na solução do problema de alocação da frota.

A restrição (a) assegura que, se na solução do problema de alocação de frota um veículo prossegue do final de uma viagem ao início de outra, o mesmo deve acontecer na solução do problema de alocação de condutores. As condições (b) e (c) implicam que, se na solução do problema de alocação de frota um veículo se dirige do fim de uma viagem para a garagem ou desta para o início de uma viagem, então o mesmo deve acontecer na alocação de condutores.

2.6.2. Algoritmo de Solução

Para resolução deste problema, Ball, Bodin e Dial (vide [BAL83]) decompõe o algoritmo de solução em três etapas¹⁵. Na primeira etapa são construídos *pieces* através de um procedimento de *matching*, os quais são melhorados na segunda etapa através de procedimentos de divisão e recombinação. Na última etapa, os *pieces* são agrupados por meio de *matchings*, formando as corridas.

2.6.2.1. Construção de *pieces*

Na primeira etapa é considerado o grafo do problema de alocação de condutores. Neste grafo acíclico, o conjunto de vértices (*d-trips*) é dividido em níveis. Um nível k é composto por vértices cujo caminho de maior comprimento a partir de s possui k arcos, conforme está ilustrado na figura 2.15.

¹⁵ Uma sistemática semelhante a apresentada neste trabalho foi posteriormente proposta em um artigo publicado por Ball e Roberts (vide [BAL85]), para alocação de tripulantes em empresas de transporte aéreo.

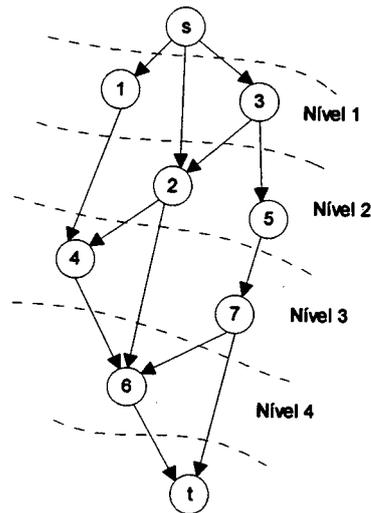


Figura 2.15 Partição dos vértices em níveis. Fonte: Michael Ball *et all* (vide [BAL83]).

A cada iteração do algoritmo, os vértices de um nível são adicionados aos *pieces* em formação. Se um vértice não puder ser adicionado aos *pieces* já existentes, então ele se torna o início de um novo *piece*. Em cada um dos níveis, a alocação dos vértices aos *pieces* pode ser resolvido através da formulação de um problema de *matching*, conforme apresentado na figura 2.16. Nesta figura, os nós que estão circulos por uma linha pontilhada representam os *pieces*, formados desde a iteração 1 até a iteração $k-1$. Além destes vértices, estão apresentados aqueles existentes no nível k , e que deverão ser agregados aos *pieces* em formação. Se existir um arco entre o último vértice de um *piece* e um vértice do nível k , então também existirá um arco conectando o pseudo-vértice que representa este *piece* e este vértice do nível k . Se for associado um custo unitário a estes arcos, então a resolução do problema de *matching* de mínimo custo, neste grafo, faz com que os vértices se associem de forma a minimizar o número de novos *pieces*¹⁶.

¹⁶ Poderão ser utilizadas funções de custos mais complexas, com o objetivo de considerar tempos de conexão entre viagens, penalidades por troca de linha e veículo, etc.

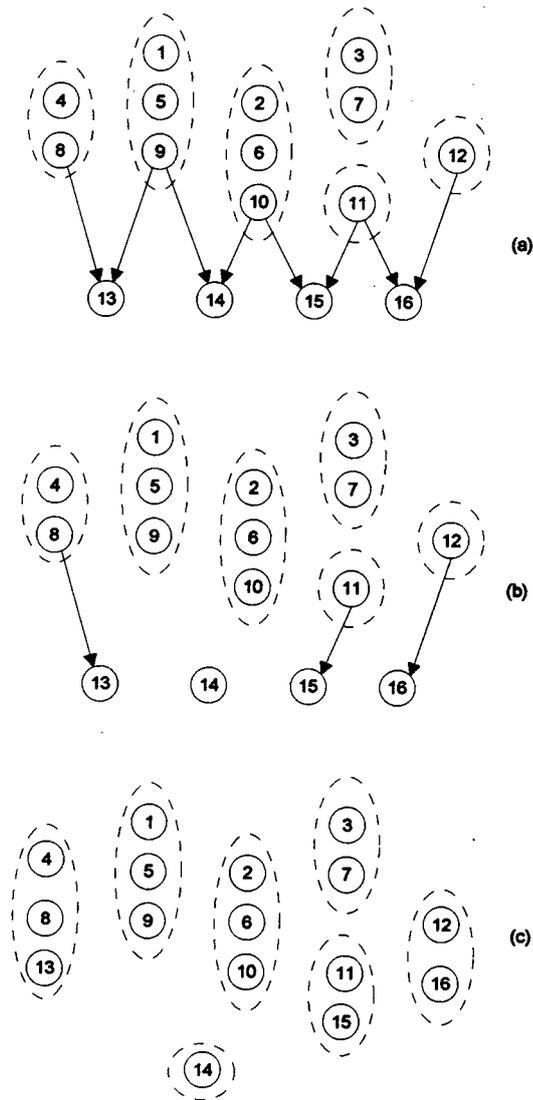


Figura 2.16 Problema de *matching* na iteração k : (a) formação do grafo; (b) solução do problema, considerando limite de 3 vértices no comprimento de cada *piece*; (c) novo conjunto de *pieces*. Fonte: Michael Ball *et al* (vide [BAL83]).

Nos casos em que um *piece* tem seu tempo total acima de um valor T' e próximo a um limite T , que determina o máximo tempo permitido, o esquema de *matching* poderá ser realizado de forma mais eficiente se for considerada a possibilidade da primeira *d-trip* do *piece* ser isolada das demais. Tomando o exemplo da figura 2.16, um novo esquema de *matching* poderia ser dado pela figura 2.17.

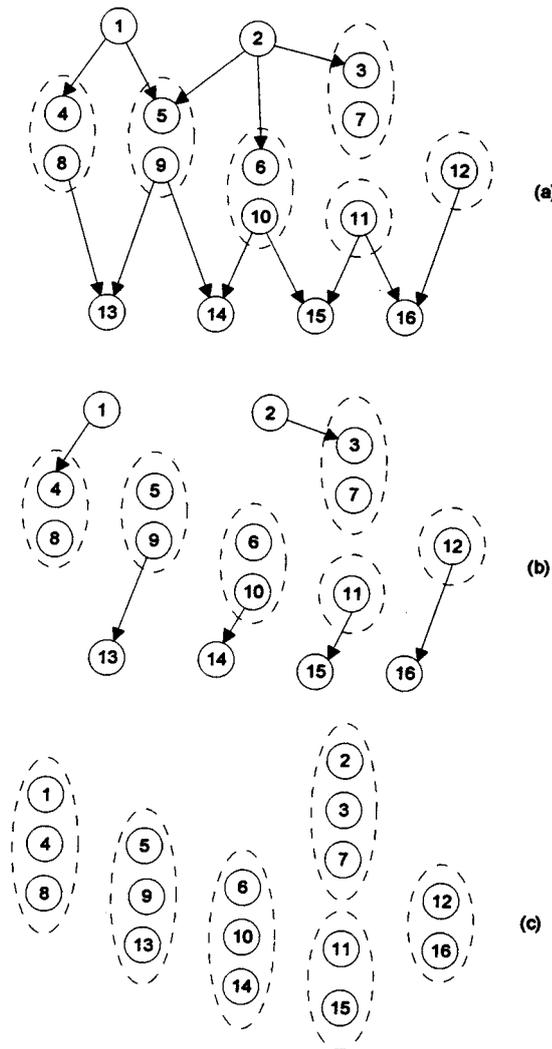


Figura 2.17 Problema de *matching* na iteração k com expansão de topo: (a) formação do grafo; (b) solução do problema, considerando limite de comprimento do *piece*; (c) novo conjunto de *pieces*. Fonte: Michael Ball *et al* (vide [BAL83]).

A formalização da primeira parte deste algoritmo, referente a construção dos *pieces*, considera como dados de entrada um grafo acíclico onde o conjunto de vértices é denominado por V , um vértice inicial s e outro terminal t , além de um parâmetro limitante do comprimento máximo de um *piece*, designado por T , e de um valor $T' \leq T$. Os passos deste algoritmo são os seguintes:

Passo 1 Particionar os vértices em $V - \{s, t\}$ em níveis, onde o nível de um vértice i é o comprimento (em termos do número de vértices) do caminho mais longo de s até i ;

Passo 2 Para cada nível L , começando com $L = 1$, faça:

- a) expandir todos os pieces cujo tamanho é maior que T' ;
- b) formar um grafo de *matching* cujos vértices são os pieces formados nos níveis 1 até $L-1$, seus respectivos vértices superiores livres, e os vértices do nível L . Dois vértices são adjacentes, se eles podem ser agrupados em um caminho cujo peso total é menor que T ;
- c) achar o *matching* de mínimo custo, cuja função objetivo é dada pela soma dos custos dos *pieces* em potencial, dado por $\alpha c_1(d) + \beta c_2(t)$, onde α e β são parâmetros de entrada, $c_1(d)$ é uma função de custo que depende do tempo entre viagens, e $c_2(t)$ é uma função do tempo total do piece;
- d) contrair o grafo, agrupando os vértices de acordo com o *matching* formado, a fim de obter o novo conjunto parcial de pieces.

Variando os valores de α e β , e as funções $c_1(d)$ e $c_2(t)$, diferentes objetivos poderão ser adotados.

2.6.2.2. Melhoramento dos *pieces*

Após a construção dos *pieces*, é possível que os mesmos sejam melhorados com o uso de procedimentos de divisão e recombinação. Na figura 2.18 são apresentados os possíveis melhoramentos que podem ser obtidos com estes re-arranjos.

Os passos deste procedimento de recombinação de pieces pode ser apresentado sob a forma do seguinte algoritmo:

- Passo 1.* Formar o grafo de *matching*, no qual para cada *piece*, pce , é incluído um vértice no grafo com custo dado por $CP(pce)$. Associar, neste grafo, um arco a cada par de vértices (*pieces*), que podem ser reagrupados em um *piece* longo, $lpce$ (este *piece* longo poderá violar a restrição de comprimento máximo). Definir o custo do arco como sendo $\text{Min} \{CP(pce1) + CP(pce2) \mid pce1 \text{ e } pce2 \text{ podem ser obtidos pela divisão de } lpce \text{ em um dos pontos RP ou ET}\}$;
- Passo 2.* Encontrar o *matching* de mínimo custo;
- Passo 3.* Realizar a recombinação dos *pieces*, de acordo com a solução encontrada para o problema de *matching*.

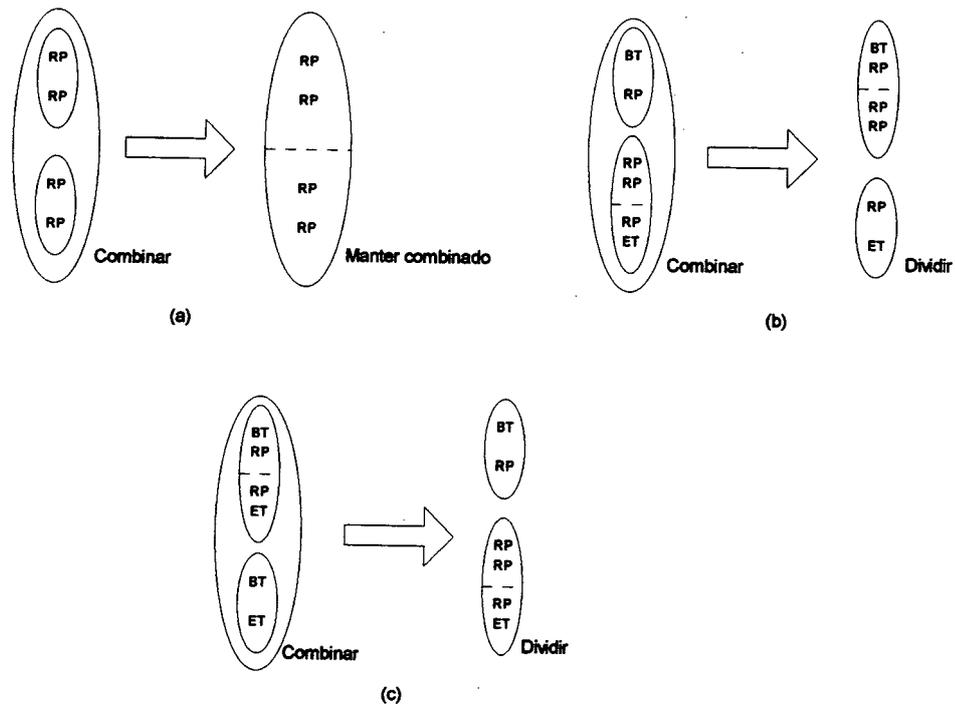


Figura 2.18 Melhoria dos *pieces*: (a) combinar dois *pieces* curtos para formar um *piece* longo; (b) combinar um *piece* curto e um longo para formar dois *pieces* de tamanho moderado; (c) recombinar dois *pieces* curtos para eliminar uma viagem à garagem. Fonte: Michael Ball *et al* (vide [BAL83]).

O algoritmo de melhoramento de *pieces* pode ser interpretado como um procedimento de trocas heurísticas (do tipo 2-opt, 3-opt, etc.), no qual o algoritmo de *matching* é utilizado para encontrar as trocas que ao serem executadas simultaneamente produzem o maior decréscimo no valor da função objetivo. Os autores ressaltam que, assim como nos procedimentos de trocas heurísticas, não existe garantias de que a solução encontrada é a de menor custo total.

2.6.2.3. Geração de corridas

Na terceira etapa do método proposto por Ball, Bodin e Dial (vide [BAL83]), os *pieces* obtidos com a aplicação do algoritmo de melhoramento são combinados para formarem as corridas. Este procedimento de geração de corridas, envolve a utilização dos arcos do tipo (5) até (10), e inicia combinando pares de *pieces* curtos (como por exemplo com 2 $\frac{1}{2}$ horas), separados por intervalos curtos (da ordem de 10 minutos), que passam a formar corridas parciais. O conjunto final de corridas, portanto, será formado por duas corridas parciais, ou dois *pieces*, ou ainda um *piece* e uma corrida parcial. O procedimento descrito pelos autores, é o seguinte:

Passo 1 Gerar corridas parciais a partir da combinação de pares de *pieces*, como segue:

- a) formar o grafo de *matching* cujos vértices são os *pieces* e cujos arcos indicam os pares de *pieces* que serão utilizados de forma conjunta na formação das corridas parciais;
- b) encontrar o *matching* de mínimo custo;
- c) determinar as corridas parciais baseado na solução do problema de *matching*;

Passo 2 Gerar as corridas, como segue:

- a) formar o grafo de *matching*, cujo conjunto de vértices é composto pelos *pieces* não combinados no passo P1 e as corridas parciais formadas no passo P1, e cujos arcos que conectam estes vértices representam o conjunto de possíveis combinações para a formação de corridas.
- b) determinar o *matching* de mínimo custo;
- c) formar o conjunto de corridas, a partir da solução do problema de *matching*.

Tipicamente, o comprimento do segundo e terceiro intervalo, nas corridas que contém 3 e 4 *pieces*, devem ser curtos. Além disto, intervalos longos devem ser precedidos de quantidades significativas de trabalho. A função objetivo utilizada nestes problemas de *matching*, descritos em P1 penaliza o tempo pago pelas horas decorrentes do intervalo extra, enquanto que ao mesmo tempo minimiza o número de *pieces* e corridas parciais. No passo P2, a função objetivo utilizada considera os custos de pagamento do pessoal, decorrentes dos acordos e contratos de trabalho vigentes.

2.7. Experiências Computacionais

2.7.1. Um Breve Histórico

Embora tenha sido do conhecimento dos primeiros pesquisadores que o problema de alocação de frotas e condutores pudesse ser formulado como um modelo de programação linear inteira, os recursos computacionais existentes e a tecnologia de otimização disponível não permitiam a resolução dos mesmos para problemas de ordem

prática. Por esta razão, até o final da década de 1970, as pesquisas nesta área se concentravam no desenvolvimento de sistemas baseados em heurísticas, que procuravam imitar os procedimentos manuais utilizados na época (vide, por exemplo, [ELI64]). Surgiram, nesta época, sistemas como TRACS (UK) e RUCUS (USA). Apesar da economia que estes sistemas produziram, reconhecia-se que a simples utilização de heurísticas não era suficiente para a resolução dos problemas em geral, pois a implantação dos mesmos implicava em um significativo esforço de pesquisa e desenvolvimento, com o objetivo de adequar as heurísticas utilizadas a cada caso em particular.

A partir do final da década de 70, os estudos foram direcionados para a produção de sistemas baseados em métodos mistos, os quais combinam heurísticas e programação matemática. Usualmente estes sistemas são acompanhados por facilidades interativas que permitem ao usuário ajustar os esquemas de alocação a serem produzidos, antes de entrar no estágio automatizado.

Alguns dos sistemas computacionais desenvolvidos com este enfoque, são adaptações do modelo de Bennet e Potts, anteriormente descrito na seção 2.5.2. São exemplos típicos deste tipo de desenvolvimento, os sistemas MICROBUS (vide [BER88]) e OPTIBUS (vide [CED88]). Outro sistema citado na literatura, embora não publicado em detalhes, é o sistema HOT, desenvolvido em Hamburgo e largamente utilizado na Alemanha. Este sistema é baseado em procedimentos heurísticos e *matchings* (vide [HOF81] e [DAD88a]). O sistema CHIC-Graphic/CHIC-Services, por sua vez, é um sistema interativo que auxilia o usuário desenvolver o seu próprio plano de operação (vide [URV88]).

De acordo com Wren e Rousseau (vide [WRE93]), os sistemas mais utilizados atualmente, são os sistemas da Teleride-Sage, e os sistemas UMA (Trapeze), HASTUS, IMPACS e HOT. Dentre estes, apenas os sistemas HASTUS e IMPACS apresentam uma boa descrição na literatura, e por esta razão serão apresentados a seguir.

2.7.2. Sistema HASTUS

O sistema HASTUS utiliza um procedimento de decomposição padrão para o problemas de alocação de condutores. Em termos gerais, os blocos são divididos em *pieces*, os quais são combinados de modo a produzir os FWSs (*full work schedules*). A solução obtida é melhorada com o uso de heurísticas e, eventualmente, pelo próprio usuário que intervém interativamente no processo.

Mais precisamente, este sistema utiliza um modelo matemático linear com o objetivo de determinar os esquemas diários de trabalho. A idéia é preservar a estrutura básica do problema, e os impactos das regras trabalhistas sobre os custos, sem que sejam considerados os detalhes existentes no processo de alocação.

Neste sistema, o primeiro passo na construção da solução consiste em definir o tamanho do período em que será dividido o dia de trabalho, podendo o mesmo variar de 15 a 60 minutos, dependendo do problema considerado. Esta divisão é utilizada para realizar uma alocação preliminar da frota, na qual cada veículo envolvido inicia e termina a operação de acordo com a divisão em períodos escolhida para o dia de trabalho.

O passo seguinte consiste em gerar todos os FWS em potencial, que contenham até dois ou três *pieces*, satisfazem as regras trabalhistas, e que iniciam e terminam de acordo com a divisão fixada para os períodos. Avaliando-se os custos de cada um destes FWS, o problema de alocação de condutores é relaxado sob a forma de um problema de programação linear. A formulação utilizada segue o modelo apresentado por Bennet e Potts (vide [BEN68]), já discutido na seção 2.5.2.

Este procedimento de relaxação, denominado de HASTUS-Macro, é bastante eficiente, e pode ser utilizado como uma ferramenta de planejamento macroscópico, na avaliação dos impactos decorrentes de mudanças no regime de trabalho e no nível de serviço prestado, conforme sugerido por Blais e Rousseau (vide [BLA80]).

A solução do HASTUS-Macro proporciona, também, uma indicação de como dividir os blocos em *pieces*, e como agrupar estes para formar FWSs. O problema de dividir os blocos em *pieces*, é resolvido através de um procedimento de busca de caminhos mínimos em grafos, onde cada arco corresponde a um *piece*. O custo associado com cada *piece*, na definição do grafo, corresponde a uma penalidade que indica quando o respectivo *piece* aumenta ou diminui a diferença entre o número de *pieces* estimado pelo HASTUS-Macro e o obtido por este procedimento. Isto é feito de forma repetitiva, considerando todos os blocos, até que nenhuma melhoria adicional possa ser obtida.

Finalmente, na última etapa de geração da solução, um algoritmo de *matching* é utilizado para a formação dos FWS. Nesta fase são utilizadas, ainda, algumas heurísticas com o objetivo de melhorar os resultados obtidos (vide [LES89]).

A partir de 1990, a empresa GIRO, desenvolvedora e distribuidora do HASTUS, passou a produzir algumas versões deste sistema com o método Crew-Opt desenvolvido por Desrochers *et al* (vide [DES88], [DES92] e [DES89]), o qual usa uma formulação de *set covering* e geração de colunas na resolução do problema de alocação de condutores.

2.7.3. Sistema BUSMAN

O BUSMAN é um sistema integrado, desenvolvido e distribuído pela Hoskyns Group In. em associação com a University of Leeds, e compreende um conjunto de programas composto pelo COMPACS, IMPACS e o CREWPLAN. Destes, o IMPACS é o módulo central que contém um algoritmo responsável pela resolução do problema de alocação através de um modelo de *set covering*. Antes da utilização deste algoritmo, uma série de técnicas de redução são aplicadas ao problema.

A primeira redução é feita através da análise de todos possíveis *pieces*, com o objetivo de determinar quando dois *pieces* consecutivos de um mesmo bloco podem ser combinados, sem sacrificar uma possibilidade útil de mudança de condutor (vide [SMI88]).

Posteriormente, são produzidos milhares de combinações (FWS) entre estes *pieces*. Neste procedimento, são consideradas todas as possibilidades de início de trabalho que um condutor possa ter, tendo em vista cada um dos pontos de início de *piece* existentes. As combinações formadas consideram, também, o número máximo de *pieces* e o tamanho dos intervalos de descanso. Destas combinações, as menos eficientes são descartadas, desde que as suas partes estejam incluídas em um certo número de outras combinações.

Então, o problema de *set covering* é montado, no qual cada coluna corresponde a uma das combinações geradas (FWS), e cada linha a um *piece* ou combinação de *pieces*. O algoritmo utilizado é uma variante do código ZIP de Ryan (vide [RYA80]), adaptado para fazer uso das características da estrutura do problema de alocação de condutores. Estas adaptações são responsáveis em permitir que problemas com 1.000 linhas e 20.000 colunas possam ser resolvidos satisfatoriamente, o que corresponde a problemas de empresas com 200 condutores, aproximadamente.

A última etapa automatizada do IMPACS, consiste na realização de trocas heurísticas, levando-se em consideração os pontos de substituição de condutores eliminados na fase inicial. Nesta etapa, estas oportunidades são reconsideradas com o objetivo de produzirem melhorias na solução do problema.

O usuário poderá, ainda, se desejar, realizar interativamente algumas modificações que sejam julgadas adequadas. Se no resultado permanecer algum *piece* coberto por duas ou mais colunas, o usuário poderá optar por transformar deliberadamente tais duplicações em tempo ocioso.

2.8. Comentários Gerais sobre os Modelos e Sistemas Existentes

A busca por um sistema de planejamento operacional aplicado ao transporte rodoviário urbano de passageiros é constante entre administradores das empresas que atuam no setor. Apesar do esforço em se produzir modelos e sistemas de uso geral, é notório o fato de que cada país, região, ou até mesmo empresa, possui particularidades que tornam a generalização dos modelos algo impraticável. A utilização de modelos e sistemas denominados genéricos, implica, quase sempre, em um processo de adaptação, por parte das empresas, à lógica operacional implantada no sistema. Apesar de existirem diversos trabalhos publicados nesta área, conforme se observou na literatura disponível, poucos são os que efetivamente foram aplicados em várias empresas e localidades.

Entre os trabalhos publicados, que visam o enfoque operacional, entretanto, não foi observado nenhuma referência explícita ao tratamento de incertezas referentes às variações nos tempo de viagem, nem tão pouco a consideração das tolerâncias admissíveis em relação aos horários de saída destas mesmas viagens.

Além disto, os modelos apresentados, em geral, ao tratar preliminarmente da alocação de veículos, levam em conta, como objetivo primário, a minimização da frota. Constatou-se na prática, que entre alguns empresários do ramo de transporte rodoviário urbano, a idéia de reduzir a frota não é bem aceita, apesar de que isto possa representar algum tipo de economia no curto prazo. A questão considerada por estes empresários, costuma ser a de encontrar a melhor alocação possível para a frota disponível, sem levar em consideração alternativas de expansão ou redução da frota. Estas questões específicas ao dimensionamento da frota, são postas e tratadas em um nível decisório acima do operacional, e normalmente resolvem-se de forma vinculada às questões mais gerais da economia, levando-se em consideração disponibilidade de linhas de crédito, taxas de juros, descontos especiais, etc.

A nível nacional, constatou-se a existência de pouquíssima, ou quase nenhuma, publicação sobre o assunto. Observou-se, também, em algumas empresas, e junto a consultores especializados na atividade de geração de planos operacionais, a total falta de sistemas computacionais voltados ao tratamento do planejamento operacional. A informatização nestas empresas restringe-se, na grande maioria dos casos, ao controle das arrecadações, emissão de folha de pagamento e controle das operações contábeis. Algumas poucas, consideradas mais bem estruturadas, apresentam sistemas desenvolvidos para o controle da frota (envolvendo o consumo de combustível, desgaste de pneus, etc.), para o cálculo da tarifa e para o controle na manutenção dos veículos.

CAPÍTULO III

3. MODELO PROPOSTO

3.1. Definição do Problema

O problema de alocação de frota e condutores, conforme visto no capítulo 2, pode ser dividido em três subproblemas.

O primeiro destes subproblemas, denominado de *problema de alocação da frota*, consiste em definir em uma base diária de alocação, qual veículo da frota deverá executar cada uma das viagens, levando em consideração aspectos de adequação dos veículos em relação aos roteiros das viagens, a estrutura da rede viária, os horários a serem cumpridos, a necessidade de deslocamentos não produtivos e reabastecimentos, além, obviamente, dos custos operacionais. A resolução deste subproblema pode ser feita isoladamente para cada dia típico (dias úteis, sábados, domingos e feriados). A saída desta etapa do processo de alocação, resulta em um plano de operação diário para cada veículo da frota, e ainda, eventualmente, uma lista de viagens não atendidas por estes planos.

O segundo subproblema, denominado de *problema de geração de escalas*, deve produzir, a partir dos planos de alocação da frota, esquemas de trabalho a serem alocados aos condutores na etapa seguinte do processo de planejamento. A geração das escalas também se realiza em uma base diária, para cada dia típico, e consiste em definir a forma como deverão ser particionados os planos de alocação da frota, e como estas partes deverão ser reagrupadas para serem designadas a cada um dos condutores. Na resolução deste subproblema, além dos planos gerados na alocação da frota, deve-se levar em consideração aspectos trabalhistas (tamanho da jornada diária de trabalho e a necessidade de períodos para descanso e alimentação) e os custos diários com o pessoal de operação (motoristas e cobradores).

No terceiro subproblema, designado de *problema de alocação da carga semanal de trabalho*, o objetivo é definir o conjunto de escalas (uma para cada dia) que deverão fazer parte do pacote de trabalho semanal de cada condutor. Neste subproblema,

deverão ser levados em consideração aspectos trabalhistas (período mínimo de descanso entre jornadas de trabalho e descanso semanal), a possibilidade de compensar as horas extras de trabalho com base na carga semanal, além de se buscar uma distribuição homogênea da carga de trabalho entre os condutores.

Por serem parte integrante de um mesmo problema, estes três subproblemas não se apresentam de forma isolada, pois a solução de um interfere na solução do outro, e a eventual obtenção da solução ótima para cada um destes subproblemas não significa, necessariamente, a obtenção da solução ótima para o sistema.

É necessário, portanto, que alguns cuidados especiais sejam tomados na resolução de cada um destes subproblemas, de modo a garantir que, se não for possível obter a solução ótima, pelo menos seja obtida uma boa solução para o sistema como um todo. Para tanto, aos modelos propostos são incorporadas heurísticas que procuram melhorar o acoplamento entre os subproblemas apresentados.

3.2. Modelo de Alocação da Frota

3.2.1. Visão Geral do Modelo de Alocação da Frota

Considere, no modelo de alocação da frota, um grafo $G(V, A)$, no qual $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ é o conjunto de vértices que representam as viagens que deverão ser alocadas em um dia típico (dia útil, sábado, domingo ou feriado) e $A = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ é o conjunto de arcos que indicam as possibilidades de seqüenciamento das viagens pertencentes a $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$. A existência de um arco $a_r = (v_i, v_j) \in A$ indica que a viagem v_j pode ser realizada após a viagem v_i . Neste grafo os vértices estão dispostos em camadas, conforme mostra a figura 3.1.

Cada uma destas camadas do grafo é composta por vértices que representam viagens que podem ser realizadas como seqüência de alguma viagem disposta na camada imediatamente anterior, e que não podem ser realizadas na seqüência de nenhuma viagem disposta na mesma camada ou em camadas posteriores.

Mais precisamente, considere que V_k é o conjunto de vértices contidos na camada $k = 1, 2, \dots, K$ do grafo $G(V, A)$. Então, tem-se¹:

¹ $\Gamma(v_i) = \{v_j | (v_i, v_j) \in A\}$ é o conjunto de vértices sucessores de v_i ; $\Gamma^{-1}(v_j) = \{v_i | (v_i, v_j) \in A\}$ é o conjunto de vértices predecessores do vértice v_j ; o conjunto de vértices sucessores de um conjunto de vértice é definido como $\Gamma(\{v_1, v_2, \dots, v_k\}) = \Gamma(v_1) \cup \Gamma(v_2) \cup \dots \cup \Gamma(v_k)$.

- a) $V_1 = \{v_i \in V \mid \Gamma^{-1}(v_i) \cap V = \emptyset\};$
- b) $V_2 = \{v_i \in (V - V_1) \mid \Gamma^{-1}(v_i) \cap (V - V_1) = \emptyset\};$
- c) $V_3 = \{v_i \in (V - V_1 - V_2) \mid \Gamma^{-1}(v_i) \cap (V - V_1 - V_2) = \emptyset\};$ etc.

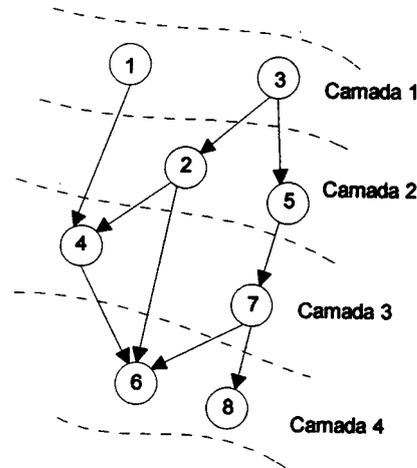


Figura 3.1 Grafo $G(V, A)$, indicando as possíveis seqüências de execução das viagens.

Considere, ainda, o conjunto de veículos $U = \{u_1, u_2, \dots, u_R\}$, que compõe a frota disponível para realizar as viagens do conjunto V .

A sistemática proposta para a obtenção da solução do problema de alocação da frota consiste, fundamentalmente, na resolução de K problemas de designação (veja o algoritmo do anexo A), um para cada camada do grafo $G(V, A)$. Como dado de entrada para resolução de cada um destes problemas de designação, e em particular ao associado com a k -ésima camada, tem-se uma solução parcial composta pela alocação das viagens $v_i \in V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_{k-1}$ à frota disponível.

Neste estágio existirão, tipicamente, alguns veículos aos quais já foram alocadas seqüências de viagens existentes nas camadas anteriores, e outros que ainda permanecem sem alocações. As viagens da camada V_k , por sua vez, poderão (ou não) ser alocadas, dependendo do tamanho da frota e da quantidade de viagens existentes na camada k , da localização dos veículos e da possibilidade de deslocamento destes em tempo de realizar as viagens, das restrições relativas à adequação entre frota e viagens, etc. Assim sendo, pode-se constituir uma matriz quadrada de ordem $|V_k| + M$ para o problema de designação, denotada por $C = [c_{ij}]$, com seus coeficientes definidos como segue:

- a) para $i = 1, 2, \dots, |V_k|$ e $j = 1, 2, \dots, R$, c_{ij} é o custo de operação do veículo $u_j \in U$, considerando a alocação adicional da viagem $v_i \in V_k$; se não for possível alocar a viagem $v_i \in V_k$ ao veículo $u_j \in U$, então $c_{ij} = +\infty$;
- b) para $i = |V_k| + 1, |V_k| + 2, \dots, |V_k| + R$ e $j = 1, 2, \dots, R$, c_{ij} é o custo de operação do veículo $u_j \in U$, considerando a não alocação de viagens adicionais;
- c) para $i = 1, 2, \dots, |V_k|$ e $j = R + 1, R + 2, \dots, R + |V_k|$, c_{ij} corresponde ao custo ou penalidade de não realizar a alocação da viagem $v_i \in V_k$;
- d) para $i = |V_k| + 1, |V_k| + 2, \dots, |V_k| + R$ e $j = R + 1, R + 2, \dots, R + |V_k|$, c_{ij} é nulo.

O início deste processo de alocação da frota, se dá com as viagens da primeira camada, situação na qual todos os veículos estão livres. Resolvido o problema de designação desta primeira camada, o processo se repete para a segunda camada, agora considerando as viagens já alocadas na primeira, e assim sucessivamente, até que todos as camadas tenham sido processadas.

3.2.2. Cálculo do Custo de Alocação de uma Seqüência de Viagens

Para o cálculo dos custos de alocação de uma seqüência de viagens a um veículo da frota, deve-se considerar os seguintes custos:

- a) depreciação da frota²;
- b) juros sobre o capital imobilizado na frota;
- c) custo dos combustíveis, filtros, óleos lubrificantes e graxas;
- d) custo dos pneus;
- e) custo da manutenção preventiva e corretiva;
- f) custo da mão-de-obra operacional (motorista e cobradores).

Estes custos incidem sobre a operação dos veículos, e podem variar entre os modelos disponíveis na frota, ou até mesmo entre veículos de um mesmo modelo. Na operação

² O preço de mercado de um veículo depende, principalmente, de dois fatores: idade e quilometragem. Por esta razão, é razoável considerar que o fator depreciação deva ser calculado com base nestes dois fatores.

de um veículo da frota devem ser considerados os seguintes fatores de geração de custos:

- a) deslocamentos produtivos (viagens existentes na tabela de horários);
- b) deslocamentos improdutivos³;
- c) tempos ociosos relacionados com a permanência do veículo no terminal, ou em local próximo a este, no aguardo da realização de novas viagens;
- d) multas pelo não cumprimento da tabela de horários estabelecida pelo órgão fiscalizador do serviço.

Sendo possível alocar uma seqüência de viagens a um veículo qualquer da frota, o custo operacional será dado pela seguinte expressão:

$$CO = CD_{prod} \cdot KM_{prod} + CD_{imp} \cdot KM_{imp} + CH_{mdo} \cdot HT_{mdo} + D\&J + M + P \quad (3.1)$$

onde: *CO* custo operacional do veículo ao realizar a seqüência de viagens alocadas;

CD_{prod} custo médio por km rodado, operando no transporte de passageiros;

CD_{imp} custo médio por km rodado, operando sem transporte de passageiros;

CH_{mdo} custo horário da mão-de-obra;

HT_{mdo} estimativa do total de horas trabalhadas pelo motorista e cobrador, referentes a seqüência de viagens alocadas no veículo;

D&J é o custo diário de depreciação e juros;

M é o custo das multas imputadas pelo órgão fiscalizador, pelo não cumprimento do horário de saída estabelecido na tabela de horários⁴;

³ Os deslocamentos improdutivos consistem das viagens realizadas sem passageiros. Fazem parte destes deslocamentos: as movimentações entre garagens e terminais de passageiros; entre os terminais de passageiros, desde com a finalidade de redistribuir os veículos; e entre terminais e locais de abastecimento.

⁴ Nem sempre é possível realizar todas as viagens sem atrasos, visto que poderão ocorrer situações nas quais a empresa tem uma carga de trabalho a realizar que exige uma quantidade de recursos (frota) maior que o disponível. Nesta situação é comum ocorrerem atrasos, e conseqüentemente, multas.

- KM_{prod} quilometragem percorrida pelo veículo na operação de transporte de passageiros, referente a seqüência de viagens alocadas;
- KM_{imp} quilometragem percorrida pelo veículo a título de deslocamento improdutivo⁵, referente a seqüência de viagens alocadas;
- P soma das penalidades calculadas em função do grau de adequação entre veículo e viagens alocadas.

Antes de calcular o custo de alocação de uma seqüência de viagens em um veículo, deve-se prever o horário e o local de abastecimento, além da melhor garagem para o veículo em questão⁶. A identificação da melhor solução, nestes casos, é feita a partir da enumeração sistemática das alternativas disponíveis e através da comparação direta do custo de cada uma delas, já que são poucas as alternativas existentes. Como resultado deste processo, obtém-se a quilometragem total percorrida, tanto a nível produtivo quanto improdutivo. No caso da quilometragem total, obtida com a alocação de uma viagem adicional ultrapassar o limite estabelecido para um reabastecimento, desconsidera-se esta possibilidade de alocação⁷, atribuindo ao custo de operação um valor que inviabilize esta alternativa no processo de solução do problema de designação ($c_{ij} = +\infty$).

Na estimativa do parâmetro HT_{mdo} , deve-se levar em consideração o fato de que parte das horas de trabalho são improdutivas, e correspondem a períodos de tempo no qual o veículo permanece parado, porém com uma equipe de condutores associada. Neste aspecto, de certa forma, encontra-se parte do vínculo existente entre o problema de alocação da frota e o problema de geração de escalas. Para manter o vínculo entre estes dois problemas, é realizada uma estimativa do tempo de trabalho baseada na construção de um grafo, denominado de grafo de geração de *pieces*, o qual foi denotado por $H(T, P)$.

⁵ No cálculo da quilometragem improdutiva, são consideradas conhecidas as distâncias mínimas entre cada par de nós da rede viária. Para tanto, pode ser utilizado o algoritmo de Floyd (veja o Anexo B) aplicado sobre o grafo representativo da rede viária.

⁶ No caso da empresa dispor de mais do que uma garagem, a escolha da melhor delas, bem como do local de reabastecimento, deve ser feito com base em critérios econômicos, de modo a reduzir os custos do sistema.

⁷ Os veículos mais modernos, em geral, dispõem de tanque de combustível com capacidade suficiente para um dia padrão de trabalho. A sistemática adotada, que considera apenas um reabastecimento por dia para cada veículo, é bastante razoável para a maioria das empresas.

Na caracterização deste grafo, considere uma seqüência de viagens $V_j = \{v_1^j, v_2^j, \dots, v_K^j\}$ alocada a um veículo $u_j \in U$. O instante de tempo que antecede esta seqüência, bem como o instante que a sucede, são pontos de início e término de trabalho associados ao veículo $u_j \in U$. Também os intervalos de tempo existente entre duas viagens consecutivas, podem ser considerados como pontos potenciais de troca de condutores, desde que este fato venha a ocorrer em um local permitido. Seja $T = \{t_1, t_2, \dots, t_K\}$ o conjunto de vértices do grafo $H(T, P)$, que correspondem a estes pontos de entrada, troca e saída de condutores. Considere, também, o conjunto de arcos $P = \{p_1, p_2, \dots, p_S\}$, no qual $p_s = (t_i, t_j)$ corresponde a um *piece* em potencial, a ser formado pelas viagens contidas no intervalo de tempo que inicia no ponto de troca t_i e termina no ponto de troca t_j ⁸, como mostra a figura 3.2. Finalmente, considere $\Delta(t_i, t_j)$ como sendo a duração deste intervalo de tempo.

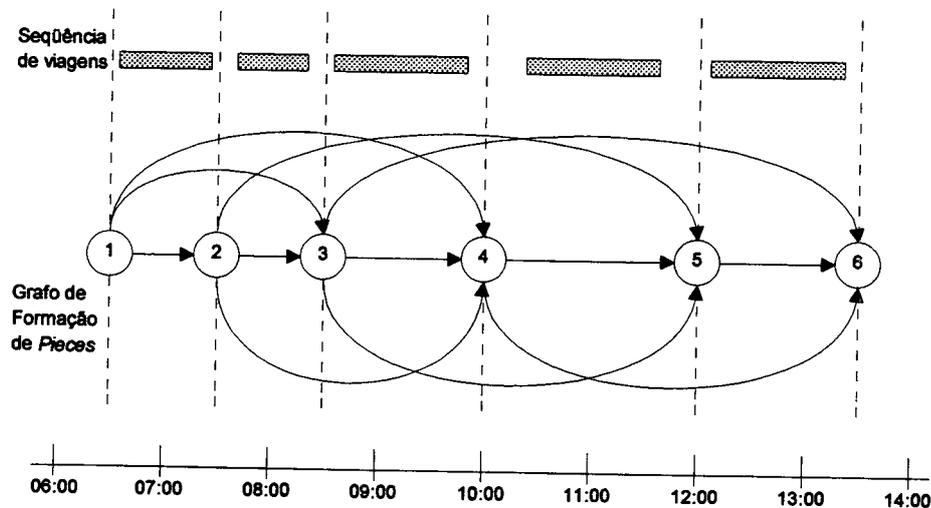


Figura 3.2 Grafo de formação de *pieces*. O caminho mínimo neste grafo determina a o esquema de formação de *pieces* a ser adotado.

Então, a cada um dos arcos do grafo $H(T, P)$ pode-se associar um custo Δ_{ij} dado por:

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} \Delta_{min} & \text{se } \Delta(t_i, t_j) < \Delta_{min} \\ \Delta(t_i, t_j) & \text{se } \Delta_{min} \leq \Delta(t_i, t_j) \leq \Delta_{max} \\ +\infty & \text{se } \Delta(t_i, t_j) > \Delta_{max} \end{cases} \quad (3.2)$$

Na expressão acima, Δ_{min} e Δ_{max} denotam, respectivamente, os parâmetros de tempo mínimo a ser considerado e o tempo máximo permitido na formação dos *pieces*.

⁸ No caso de existirem movimentos improdutivos, considera-se para fins determinação deste custo, como se os mesmos fossem viagens regulares da tabela de horários.

Considerando os custos Δ_{ij} associados aos arcos, uma estimativa para o valor de HT_{mdo} corresponde ao custo do caminho mínimo no grafo $H(T,P)$ ⁹, entre o vértice inicial $t_1 \in T$ e o vértice terminal $t_k \in T$.

Com a aplicação deste modelo na determinação do valor de HT_{mdo} , passa-se a considerar que o custo da mão-de-obra não corresponde apenas ao tempo gasto com a condução do veículo, mas também aos intervalos de tempo existentes entre uma viagem e outra, nos quais o condutor fica alocado ao veículo, e a disposição da empresa. Nesta estimativa, entretanto, não são considerados os efeitos das horas extras e das eventuais escalas de trabalho de curta duração, isto é, escalas de trabalho que não completam a carga horária diária regular.

Contudo, considerando a forma como o custo Δ_{ij} é calculado, e considerando a minimização destes custos por parte do modelo de designação, resulta que os *pieces* formados serão apropriados ao processo de geração de escalas, isto é, não serão muito curtos, nem muito longos, e possuirão poucos intervalos de tempo ocioso.

A fim de levar em conta o grau de adequação do veículo $u_j \in U$ às viagens v_i que lhe são alocadas, considera-se no cálculo do custo operacional (equação 3.1) uma penalidade P_j , dada por:

$$P_j = \begin{cases} F \cdot \sum_i KM_i \cdot (1 - \mu_{ij}) & \text{se } \mu_{ij} \geq \beta, \forall j \\ + \infty & \text{se algum } \mu_{ij} < \beta \end{cases} \quad (3.3)$$

onde KM_i é a distância percorrida no trajeto da viagem v_i , $\mu_{ij} \in [0,1]$ é o grau de adequação existente entre a viagem v_i e o veículo $u_j \in U$, F é um fator de custo que penaliza alocações impróprias e β é um limite mínimo aceitável para o grau de adequação entre frota e viagens. Como pode ser observado nesta expressão, quanto menor o grau de adequação entre o veículo e a viagem, maior será o valor da penalidade P_j .

3.2.3. Possibilidade de Alocação de uma Viagem em um Veículo da Frota

Nas seções anteriores, considerou-se a necessidade de se verificar se uma viagem adicional poderia (ou não) ser alocada a um veículo que já possui uma seqüência parcial de viagens.

⁹ Para resolução deste problema, poderá ser utilizado o algoritmo de Dijkstra, (veja o Anexo B), o qual é considerado o mais eficiente entre os algoritmos não heurístico na determinação de caminhos mínimos em grafos.

O fato de um veículo poder realizar uma viagem adicional está intimamente ligado à viabilidade do veículo terminar as viagens já alocadas antes do horário de saída na nova viagem. Obviamente, isto depende do tempo gasto na realização das viagens anteriores, e do horário previstos para saída da viagem adicional.

Dado a natureza incerta dos tempos de viagem¹⁰, é usual que os especialistas responsáveis pela programação das escalas de trabalho nas empresas, considerem os tempos de viagem acrescidos de uma margem de segurança adequada para absorver as variações que por ventura possam ocorrer. Ao se proceder desta forma, estará sendo aumentada a quantidade de trabalho a ser realizada, e, conseqüentemente, o tamanho da frota necessária. Por outro lado, este aumento nos tempos de viagem nem sempre se concretiza durante a fase de operacionalização dos planos, e o que se acaba verificando é um aumento no intervalo existente entre as viagens, o que contribui para a diminuição da eficiência da empresa.

Também é comum, na prática, considerar-se uma tolerância em relação aos horários de saída das viagens. Esta tolerância pode ser considerada tanto no sentido de adiantar, como no de atrasar a viagem.

No modelo proposto, este aspecto foi tratado por meio da teoria desenvolvida por Zadeh em 1965, denominada de Teoria dos Conjuntos Difusos (veja [ZAH65])¹¹. Segundo esta teoria, valores imprecisos (tempo das viagens) podem ser representados por meio de números difusos. Considere que, em um determinado estágio do processo de alocação, se conheça o instante de chegada (término de todas as viagens já alocadas) de um veículo $u_j \in U$, no terminal de saída da viagem $v_i \in V_k$, a ser considerada no processo de alocação da k -ésima camada do grafo $G(V, A)$. Dado as incertezas envolvidas, este horário de chegada do veículo pode ser representado por um número difuso \tilde{C}_j (linha tracejada na figura 3.3).

O horário especificado para saída da viagem a ser alocada, por sua vez, também pode ser representado por um número difuso (\tilde{S}_i), tendo em vista a tolerância existente. Os horários anteriores ao horário da saída, correspondem às saídas adiantadas, e também podem ser representados através de conjuntos difusos (\tilde{S}'_i), o mesmo acontecendo com

¹⁰ O tempo de viagem nem sempre pode ser considerado um dado preciso, tendo em vista os desvios gerados pela própria natureza do tráfego urbano.

¹¹ No Anexo C é apresentado um resumo dos principais conceitos da Teoria dos Conjuntos Difusos, que foram utilizados no modelo de alocação da frota para determinar o grau de possibilidade de alocação de uma viagem a um veículo.

os horários posteriores ao horário de saída, os quais correspondem aos horários de saída tardia (\tilde{S}_i'').

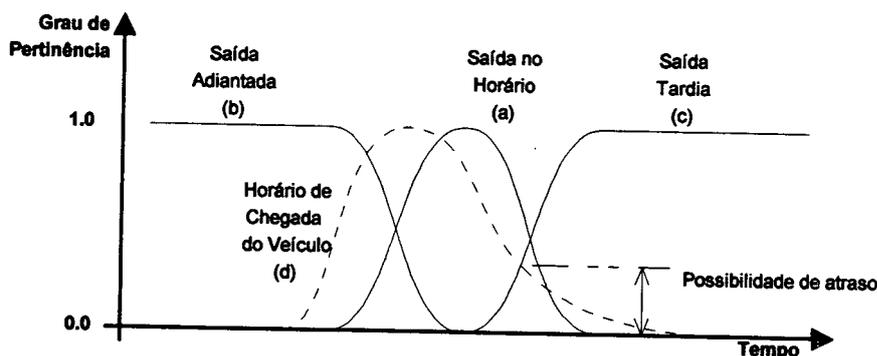


Figura 3.3 Representação dos conjuntos difusos: (a) saída no horário; (b) saída adiantada; (c) saída atrasada; e (d) chegada do veículo.

Assim, a nova viagem poderá ser alocada ao veículo em questão, somente se for “bastante remota” a possibilidade do tempo de chegada do veículo (\tilde{C}_j) ser considerado tardio para que se possa dar saída na nova viagem (\tilde{S}_i''). Em outras palavras, para que seja considerada a possibilidade de alocação da viagem $v_i \in V_k$ no veículo $u_j \in U$, é necessário que:

$$\mu(\tilde{C}_j \geq \tilde{S}_i'') = \sup_{\substack{c > s \\ c \in \tilde{C}_j \\ s \in \tilde{S}_i''}} \min(\mu_{\tilde{C}_j}(c), \mu_{\tilde{S}_i''}(s)) \leq \alpha \quad (3.3)$$

onde $\alpha \in [0,1]$ é o valor do grau de possibilidade de atraso considerado aceitável pelo decisor. Assim, quanto mais próximo da unidade for o valor de α , maior será a propensão à aceitação do risco de atraso por parte do decisor.

Além disso, considere que a alocação da viagem $v_i \in V_k$, cujo horário de saída é definido pelo número difuso \tilde{S}_i , deva se realizar ao veículo $u_j \in U$, cujo horário de chegada é definido pelo número difuso \tilde{C}_j . Neste caso, pode-se afirmar que a saída efetiva não poderá ser antes de \tilde{C}_j , nem antes de \tilde{S}_i . Mais precisamente, a saída efetiva da viagem $v_i \in V_k$ se dará no instante $\tilde{H} = \text{Max}(\tilde{C}_j, \tilde{S}_i)$, definido pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_{\tilde{H}}(h) = \mu_{\text{Max}(\tilde{C}_j, \tilde{S}_i)}(h) = \sup_{\substack{h = \min(c, s) \\ s \in \tilde{S}_i \\ c \in \tilde{C}_j}} \min[\mu_{\tilde{C}_j}(c), \mu_{\tilde{S}_i}(s)] \quad (3.4)$$

Na figura 3.4 é apresentado a interpretação gráfica desta operação.

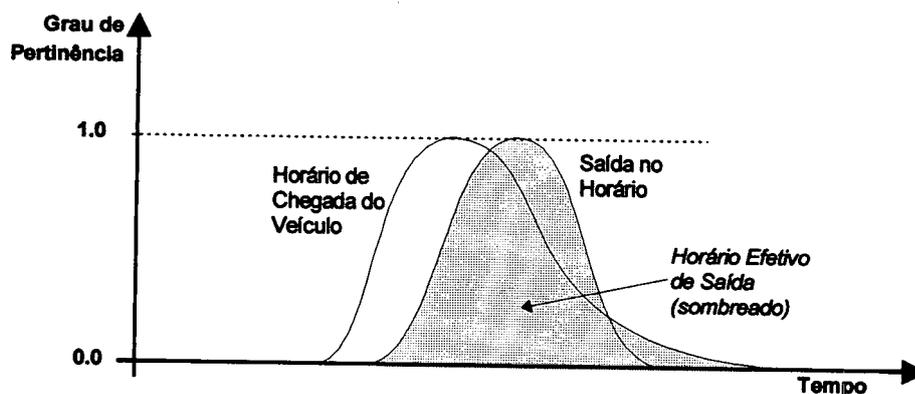


Figura 3.4 Representação do horário de saída efetivo, obtido com o uso do princípio da extensão.

Considerando que a duração da viagem $v_i \in V_k$, é representada por um número difuso \tilde{D}_i , e ainda que o horário efetivo de saída dado pelo número difuso \tilde{H} , cuja função de pertinência é obtida pela expressão (3.4), pode-se calcular o instante de término da viagem, como sendo o número difuso dado pela soma $\tilde{H} + \tilde{D}_i$, cuja função de pertinência pode ser obtida através do princípio da extensão, como:

$$\mu_{\tilde{H} + \tilde{D}_i}(z) = \sup_{\substack{z=h+d \\ h \in \tilde{H} \\ d \in \tilde{D}_i}} \min [\mu_{\tilde{H}}(h), \mu_{\tilde{D}_i}(d)] \quad (3.5)$$

fechando, assim, o ciclo de verificação da possibilidade de se realizar a alocação de uma viagem em um veículo parcialmente alocado, do ponto de vista da variável tempo.

Para um nível α especificado pelo decisor, as operações descritas nesta seção podem ser realizadas considerando o conceito de conjuntos de nível α , fazendo com que as mesmas se resumam a operações aritméticas simples, sem maior complexidade do ponto de vista computacional.

3.2.4. Algoritmo de Alocação da Frota

Em linhas gerais, o algoritmo de alocação da frota pode ser apresentado na forma que segue:

Passo 1 Inicialização. Defina o conjunto de viagens $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$. Monte o grafo $G(V, A)$. Defina o conjunto de veículos $U = \{u_1, u_2, \dots, u_R\}$. Defina os parâmetros α e β . Faça $k = 1$.

Passo 2 Formação da camada k . Forme o conjunto

$$V_k = \left\{ v_i \in V - \bigcup_{r=1}^{k-1} V_r \mid \Gamma^{-1}(v_i) \cap (V - \bigcup_{r=1}^{k-1} V_r) = \emptyset \right\}$$

Se o $V_k = \emptyset$, então pare. Todas as viagens foram consideradas no processo de alocação. Em caso contrário, vá ao passo 3.

Passo 3 Montagem da matriz de custos de alocação. Determine a matriz $C = [c_{ij}]$ como segue:

a) para $i = 1, 2, \dots, |V_k|$ e $j = 1, 2, \dots, R$, c_{ij} é o custo de operação CO , do veículo $u_j \in U$, considerando a alocação adicional da viagem $v_i \in V_k$, dado pela expressão:

$$CO = CD_{prod} \cdot KM_{prod} + CD_{imp} \cdot KM_{imp} + CH_{mdo} \cdot HT_{mdo} + D\&J + M + P$$

Se não for possível alocar a viagem $v_i \in V_k$ ao veículo $u_j \in U$, de acordo com o descrito na seção 3.2.3, então faça $c_{ij} = +\infty$;

b) para $i = |V_k| + 1, |V_k| + 2, \dots, |V_k| + R$ e $j = 1, 2, \dots, R$, c_{ij} é o custo de operação do veículo $u_j \in U$, considerando a não alocação de viagens adicionais;

c) para $i = 1, 2, \dots, |V_k|$ e $j = R + 1, R + 2, \dots, R + |V_k|$, c_{ij} corresponde ao custo ou penalidade de não realizar a alocação da viagem $v_i \in V_k$;

d) para $i = |V_k| + 1, |V_k| + 2, \dots, |V_k| + R$ e $j = R + 1, R + 2, \dots, R + |V_k|$, c_{ij} é nulo.

Passo 4 Resolução do problema de designação. Resolva o problema de designação definido pela matriz $C = [c_{ij}]$, através da aplicação do algoritmo húngaro (veja o detalhe no anexo A), e aloque as viagens $v_i \in V_k$ aos veículos $u_j \in U$ de acordo com o resultado obtido.

Passo 5 Faça $k = k + 1$ e volte ao passo 2.

3.2.5. Melhoramento da Alocação

Com a realização do processo de alocação descrito em 3.2.4, obtém-se um conjunto de seqüências de viagens a serem alocadas aos veículos da frota, conforme ilustrado na figura 3.5. Este resultado pode ser melhorado. Considere, para tanto, os seccionamentos destas seqüências conforme indicado pelas linhas tracejadas existentes na figura.

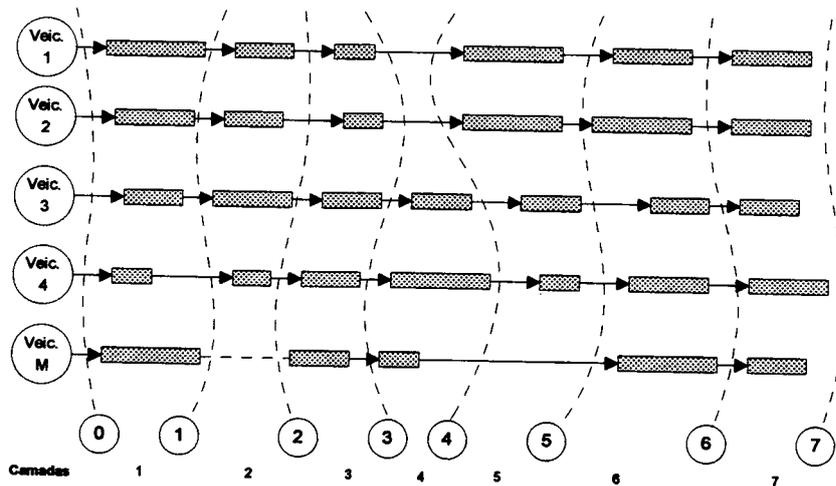


Figura 3.5 Resultado do processo de alocação de viagens, mostrando as viagens alocadas em cada camada, e os possíveis seccionamentos das seqüências geradas. Nesta figura, os retângulos sombreados representam as viagens alocadas. As linhas tracejadas indicam a formação das camadas de alocação.

Ao realizar um destes cortes, divide-se cada uma das seqüências em duas seqüências parciais. Com a recombinação destas seqüências parciais determina-se novas soluções para o problema de alocação da frota. O custo de recombinação da i -ésima seqüência parcial existente à esquerda de um corte, com a j -ésima seqüência parcial da direita pode ser obtido pelo mesmo procedimento de avaliação de custos e possibilidade de alocação descritos nas seções 3.2.2 e 3.2.3. Dispondo estes custos sob a forma de uma matriz quadrada, e associando a esta matriz um problema de designação, é possível obter, para cada corte, uma recombinação de mínimo custo.

A sistemática adotada para o melhoramento das alocações, portanto, consiste em resolver tais problemas de designação, um para cada corte, começando com o corte 0, em seguida o corte 1, e assim sucessivamente, até que todos os cortes sejam considerados. Este processo poderá se repetir, até que não se observe redução nos custos de operação em uma passada completa por todos os cortes.

3.3. Modelo de Geração de Escalas

3.3.1. Definição do Perfil das Escalas

Como resultado do modelo de alocação da frota, tem-se, para cada dia típico (dia útil, sábado e domingo), um conjunto de *pieces*¹² que deverão ser agrupados de modo a formar escalas diárias de trabalho, as quais deverão ser designadas aos condutores. Cada *piece* é caracterizado por um local de início, um horário de saída, um local de término e um horário de chegada. Para que estas escalas sejam consideradas viáveis, é necessário que as mesmas satisfaçam uma série de condições impostas pela legislação trabalhista¹³, tais como:

- a) a duração normal de trabalho, para empregados de qualquer atividade privada, não pode exceder de oito horas diárias; as empresas que tenham horário de trabalho inferior a 8 horas, não poderão aumentar esse horário, se essa concessão ou liberdade existe de longo tempo. Qualquer dilatação de horário neste caso, mesmo respeitando o limite de oito horas é considerado como serviço extraordinário;
- b) a duração normal do trabalho poderá ser prorrogada por meio de acordo entre empregador e empregados, ou em casos de imperiosa necessidade; a prorrogação poderá se dar até o limite de 10 horas diárias ou 60 horas semanais, sendo as horas suplementares remuneradas acima do valor da hora normal;
- c) em qualquer trabalho, cuja duração contínua exceda de seis horas, é obrigatória a concessão de um intervalo para repouso e alimentação, o qual será no mínimo de uma hora e, salvo acordo escrito ou contrato coletivo em contrário, não poderá exceder de duas horas; quando a duração contínua do trabalho não atingir a 6 horas, mas for superior a 4, será obrigatório um intervalo de quinze minutos; estes intervalos não são computados na duração

¹² A determinação do conjunto de *pieces* é dada pela resolução do problema de caminhos mínimos no grafo $H(T, P)$, conforme descrito na seção 3.2.2. Neste problema de caminho mínimo, os parâmetros Δ_{max} e Δ_{min} determinam o tamanho dos *pieces* que serão formados.

¹³ No Brasil, as relações entre empregador e empregado são regidas pela Consolidação das Leis de Trabalho (CLT), e pelos acordos coletivos de trabalho realizados entre sindicatos patronais e sindicatos de trabalhadores.

diária do trabalho, isto é, não constituem parcela do horário normal do empregado.

Estas condições, que podem ser alteradas pelos acordos coletivos, definem o perfil das escalas diárias de trabalho que são consideradas viáveis. Genericamente, os parâmetros necessários para determinar a viabilidade de uma escala, podem ser resumidos em:

- HN quantidade de horas normais trabalhadas por dia;
- HE_{max} quantidade máxima de horas extras trabalhadas por dia;
- TC_{max} período máximo de trabalho contínuo (sem descanso);
- ID_{min} intervalo mínimo para descanso e alimentação;
- ID_{max} intervalo máximo para descanso e alimentação¹⁴;
- TV_{min} intervalo mínimo para troca de veículo.

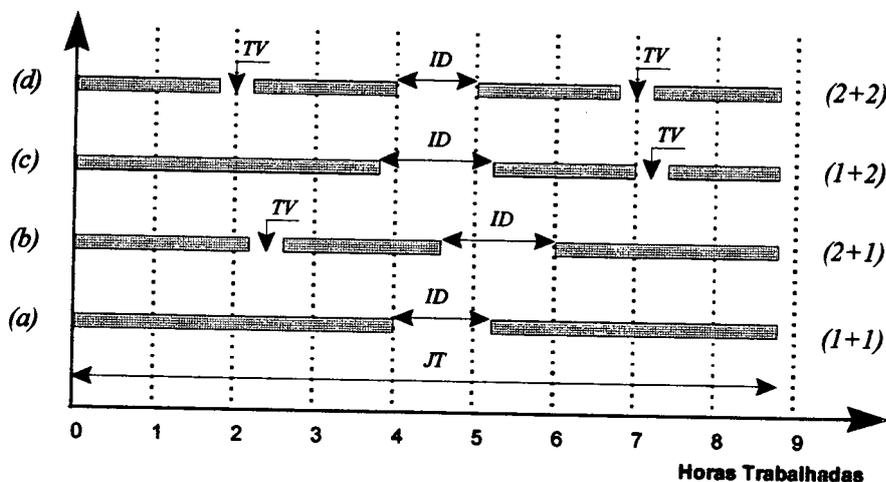


Figura 3.6 Esquemas de escalas viáveis: (a) esquema 1+1 formado por dois *pieces* intercalados por um intervalo de descanso; (b) esquema 2+1 formado por três *pieces* intercalados por um intervalo de troca de veículo e um intervalo de descanso; (c) esquema 1+2 formado por três *pieces* intercalados por um intervalo de troca de veículo e um intervalo de descanso; (d) esquema 2+2 formado por quatro *pieces* intercalados por dois intervalos de troca de veículo e um intervalo de descanso.

¹⁴ Na prática, eventualmente, o intervalo para descanso poderá ser maior que D_{max} . Entretanto, a quantidade de tempo que exceder este limite será considerada como hora trabalhada, e deverá ser remunerada.

Tipicamente, uma escala de trabalho é formada pela agregação de dois, três ou eventualmente quatro *pieces*, entre os quais devem ser previstos intervalos para troca de veículos (*TV*) e para descanso (*ID*), conforme apresentado na figura 3.6.

3.3.2. Geração das Escalas Alternativas e Cálculo dos Custos

Para gerar as escalas alternativas, é utilizado um procedimento de enumeração, dividido em quatro etapas:

- a) combinação dois a dois dos *pieces* existentes, para formação dos esquemas 1+1, seguido de validação de cada escala gerada;
- b) combinação dois a dois dos *pieces* existentes, para formar pares de *pieces* que satisfazem o limite TC_{max} de trabalho contínuo e o intervalo TV_{min} de troca de veículos;
- c) combinação entre *pieces* isolados e pares de *pieces* para formação dos esquemas 1+2 e/ou 2+1, seguido de validação de cada escala gerada;
- d) combinação entre dois pares de *pieces* para formação de esquemas 2+2, seguido de validação de cada escala gerada.

Para que uma escala gerada seja considerada válida, é necessário e suficiente satisfazer as seguintes condições:

- a) as duas partes combinadas não se sobrepõem no tempo;
- b) o intervalo de descanso existente entre as partes combinadas (*ID*) não é inferior ao valor D_{min} , para os casos em que $JT > TC_{max}$;
- c) o intervalo de descanso não é menor que TV_{min} , para os casos em que há necessidade de trocar de veículo e $JT \leq TC_{max}$;
- d) o intervalo de tempo compreendido entre o início e o fim da escala de trabalho gerada (*JT*), subtraído do valor $\min(ID, ID_{max})$, não é superior à soma $HN + HE_{max}$.

Satisfeitas as condições de validação apresentadas acima, o custo de uma escala poderá ser obtido a partir do cálculo das seguintes expressões:

$$HT = \begin{cases} JT - \min(ID, ID_{max}) & \text{se } JT > TC_{max} \\ JT & \text{se } JT \leq TC_{max} \end{cases} \quad (3.5)$$

e

$$CE = \begin{cases} CN_N \cdot HN & \text{se } HT \leq HN \\ CN_N \cdot HN + CH_E (HT - HN) & \text{se } HT > HN \end{cases} \quad (3.6)$$

- onde: HT é a quantidade de horas trabalhadas associada à escala de trabalho;
- JT é o intervalo de tempo compreendido entre o início e o fim da escala de trabalho;
- CE é o custo diário total da escala de trabalho;
- CH_N é o custo horário aplicado sobre horas normais de trabalho;
- CH_E é o custo horário aplicado sobre o trabalho extraordinário.

Como resultado deste processo de geração de escalas alternativas, obtém-se um conjunto de possíveis escalas diárias de trabalho, onde a cada uma delas está associado um custo e um conjunto de *pieces* cobertos com a sua implantação.

3.3.3. Modelo de Geração do Plano de Escalas

Seja $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ o conjunto de *pieces* formado a partir da solução do problema de alocação da frota, para a qual foram resolvidos os problemas de caminhos mínimos nos grafos $H(T, P)$ de cada veículo, conforme apresentado na seção 3.2.2. Seja $\Sigma = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ a família de escalas $S_j \subset R$, geradas para um dia típico de trabalho (dia útil, sábado, domingo e feriados), obtido com o procedimento de enumeração descrito em 3.3.2.

Qualquer sub-família $\Sigma' = \{S_{j_1}, S_{j_2}, \dots, S_{j_k}\}$ de Σ , tal que:

$$\bigcup_{i=1}^k S_{j_i} = R \quad (3.7)$$

é chamada de conjunto de cobertura de R . A sub-família Σ' é dita ser um conjunto de cobertura primário, se qualquer $\Sigma'' \subset \Sigma'$ não é um conjunto de cobertura em R .

Sejam c_j custos positivos associados aos $S_j \in \Sigma$. Então, o custo associado a família $\Sigma' = \{S_{j_1}, S_{j_2}, \dots, S_{j_k}\}$ pode ser calculado por:

$$\sum_{i=1}^k c_{j_i} \quad (3.8)$$

e o seguinte modelo de programação linear 0-1 pode ser formulado:

$$\text{Min} \quad \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \quad (3.9.a)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j \geq 1 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.9.b)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3.9.c)$$

onde $a_{ij} = 1$ se $r_i \in S_j$, e $a_{ij} = 0$ em caso contrário.

No modelo acima, as restrições (3.9.b) asseguram que existirá pelo menos uma escala $S_j \in \Sigma$ que contém o *piece* $r_i \in R$. As condições de integridade (3.9.c) garantem que cada variável pode assumir apenas os valores um ou zero. No caso de uma variável $x_j = 1$, tem-se que a respectiva escala $S_j \in \Sigma$ deve fazer parte do plano de operação. A função objetivo (3.9.a), faz com que a escolha das escalas recaia sobre o subconjunto de menor custo total.

O modelo apresentado acima é bastante discutido na literatura, e recebe o nome de *set covering problem* - SCP (veja, por exemplo, [BEA87], [BEA94], [ELD92], [FIS90], [PAI93], [SMI88] e [WRE88a]). Este problema foi demonstrado ser *NP*-completo por Karp (veja [KAR82]) e a maioria dos trabalhos relacionados com o mesmo voltam-se a geração de procedimentos heurísticos capazes de gerar soluções aproximadas em um tempo computacional considerado razoável (veja [VAS84] e [BEA90]).

Diversas aplicações deste modelo são encontradas na literatura, envolvendo problemas de balanceamento de linhas de produção, investimento de capital, recuperação de informação, entre outros. Também é comum a utilização deste modelo na solução do problema de alocação de tripulantes, tanto em empresas de aviação comercial, como em empresas que atuam no transporte urbano de passageiros - tais como trens, metrô e ônibus (veja por exemplo [PAD93] e [MIT81]).

3.3.4. Algoritmo Genético para Resolução do Modelo de Geração do Plano de Escalas

Segundo A. Wren (veja [WRE95]), alguns dos algoritmos apresentados na literatura para resolução do problema de alocação de condutores, baseados em programação matemática e heurística, são resultantes de um trabalho de refinamento ocorrido ao

longo de quase uma década de pesquisas, como é o caso particular do IMPACS. Recentemente, alguns autores publicaram trabalhos apresentando algoritmos genéticos para resolução do *set covering problem* e do *set partitioning problem* (veja [BEA94] e [CHU95]). Ainda segundo A. Wren, algoritmos genéticos possuem um potencial bastante grande, já que em um período bastante curto os resultados obtidos podem ser considerados equiparáveis aos obtidos em trabalhos anteriores.

Os fundamentos teóricos dos algoritmos genéticos foram desenvolvidos por Holland, no início da década de 70, com a idéia de imitar o processo evolucionário que ocorre com organismos biológicos na natureza [DAV91]. Pode-se entender um algoritmo genético como sendo um processo de busca probabilística “inteligente”, passível de aplicação em uma série de problemas de otimização combinatorial.

Apesar deste processo de evolução não ser totalmente conhecido pelos biólogos, alguns aspectos são considerados aceitos. Em primeiro lugar, sabe-se que a evolução se processa por meio de dispositivos biológicos denominados de cromossomos, os quais armazenam as características do ser vivo. Através de um processo de seleção natural, indivíduos mais bem adaptados ao meio (maior *fitness*) conseguem se reproduzir com maior frequência, transmitindo suas características genéticas aos descendentes. A reprodução é o ponto chave, no qual a evolução se processa. Através da combinação dos materiais genéticos dos ancestrais, novos cromossomos são produzidos, os quais, eventualmente passam por um processo denominado de mutação. Através deste processo, os descendentes poderão vir a apresentar características distintas de seus ancestrais. Eventualmente, tais características permitem que o indivíduo gerado venha a ter uma maior capacidade de adaptação ao meio em que vive.

Os algoritmos genéticos apresentam uma estrutura similar ao que se observa na natureza, e seus passos principais são os seguintes:

- Gerar uma população inicial*
- Avaliar o fitness dos indivíduos da população*
- Repetir**
 - Selecionar ancestrais da população*
 - Efetuar o cruzamento entre os ancestrais selecionados*
 - Eventualmente realizar uma mutação nos descendentes gerados*
 - Avaliar o fitness dos descendentes gerados*
 - Substituir alguns indivíduos da população (ou todos) pelos descendentes*
- Até que uma solução satisfatória tenha sido encontrada*

Dentro desta perspectiva, os aspectos relevantes, que passarão a ser discutidos, são: a estrutura do *cromossomo*, a avaliação do *fitness* e os processos de *seleção natural*, de *reprodução* e de *mutação*.

3.3.4.1. Estrutura do cromossomo

A estrutura do cromossomo é um dos elementos fundamentais na definição do processo evolutivo. Nos algoritmos genéticos, é nesta estrutura que se encontram armazenadas as características das soluções pesquisadas na busca.

Para o problema em questão, é natural a representação da solução por meio de uma seqüência de valores binários (0-1) associados aos valores das variáveis correspondentes no modelo 3.9. Considerando que, em geral, apenas um pequeno número de elementos desta seqüência são iguais a 1, é mais conveniente representar o conjunto de cobertura $\Sigma' = \{S_{j_1}, S_{j_2}, \dots, S_{j_k}\}$, por meio do conjunto ordenado de índices que definem quais $S_j \in \Sigma$ fazem parte da solução. Assim, o *i*-ésimo cromossomo da população é dado por:

$$J_i = \{j_{i1}, j_{i2}, \dots, j_{ik}\} \quad (3.10)$$

onde j_{ik} é o índice de uma das variáveis iguais a 1 neste cromossomo.

3.3.4.2. Avaliação do fitness

O *fitness* de um cromossomo representa a capacidade do indivíduo adaptar-se ao meio ambiente. No caso dos algoritmos genéticos, quando aplicados sobre problemas de otimização combinatorial, a medida de *fitness* costuma relacionar-se com o valor da função objetivo.

No algoritmo proposto, adotou-se como medida do *fitness* o valor da função objetivo apresentado em (3.9.a). O cálculo deste valor pode ser realizado pela seguinte expressão:

$$f_i = \sum_{j \in J_i} c_j \quad (3.11)$$

Considerando que deseja-se encontrar uma solução de menor valor da função objetivo, a medida de *fitness* deve ser considerada de modo que quanto maior o seu valor, menor sua capacidade de adaptação, e vice-versa.

3.3.4.3. Processo de seleção natural

A medida de *fitness*, calculada por (3.11), é utilizada no modelo para ordenar os p indivíduos da população durante o processo de busca. A ordem é estabelecida de modo que $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_p$. Assim, o primeiro indivíduo da população apresenta o melhor *fitness*, enquanto que o último indivíduo, por sua vez, apresenta o pior *fitness* de toda a população.

No processo de seleção existente no algoritmo proposto, foi considerada uma distribuição de probabilidade do tipo gradiente, na qual a probabilidade de escolha do melhor indivíduo é um múltiplo da probabilidade de escolha do pior, isto é, $P_1 = \lambda \cdot P_p$. Desta forma, a probabilidade de escolha do i -ésimo indivíduo da população é dado por:

$$P_i = \frac{g_i}{\sum_{r=1}^p g_r} \quad (3.12)$$

onde g_i é valor do i -ésimo elemento de uma série aritmética decrescente, dada por:

$$g_i = \lambda - (i - 1) \cdot \frac{(\lambda - 1)}{(p - 1)} \quad (3.13)$$

A adoção desta técnica de seleção deu-se em função de algumas propriedades apresentadas pela mesma, a saber:

- a) o valor da probabilidade de escolha sendo independente do valor da função objetivo (*fitness*) faz com que o cálculo da mesma seja mais simples, direto e rápido;
- b) o fato de se vincular a probabilidade de escolha de um indivíduo com a ordem que o mesmo ocupa na população, independente do valor da função objetivo, faz com que o processo de escolha continue dando ênfase aos melhores indivíduos, mesmo nas situações em que os *fitness* começam a se tornar mais ou menos homogêneos em termos da ordem de grandeza.

3.3.4.4. Processo de reprodução

Em algumas aplicações tradicionais, é comum encontrar-se operadores que efetuam o cruzamento entre cromossomos ancestrais, escolhendo uma ou duas posições de corte em suas estruturas e realizando a recombinação das partes obtidas. No caso do problema em questão, a aplicação desta técnica não garante que os cromossomos descendentes

venham a ser considerados viáveis do ponto de vista da cobertura sobre o conjunto $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$.

Com o intuito de garantir a viabilidade das soluções pesquisadas, adotou-se um operador de *crossover* que gera um descendente a partir de dois cromossomos $J_a = \{j_{a1}, j_{a2}, \dots, j_{ak}\}$ e $J_b = \{j_{b1}, j_{b2}, \dots, j_{bl}\}$, realizando uma permutação aleatória nos índices do conjunto $J_a \cup J_b$, produzindo um novo conjunto $J_c = \{j_{c1}, j_{c2}, \dots, j_{c(k+l)}\}$. Dado a natureza do problema, a solução obtida desta forma é um conjunto de cobertura sobre $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, que apresenta redundâncias, isto é, alguns de seus índices podem ser eliminados sem prejuízo da viabilidade da solução.

Para obter-se um conjunto de cobertura primário, a partir do conjunto J_c , aplica-se o seguinte procedimento:

- Passo 1 Inicializar. Definir $J_c = \{j_{c1}, j_{c2}, \dots, j_{c(k+l)}\}$. Faça $m = 1$.
- Passo 2 Teste de Parada. Se $m > k + l$, então pare, com J_c sendo o conjunto de cobertura primário.
- Passo 3 Teste de Cobertura. Se $J_c - \{j_{cm}\}$ não é um conjunto de cobertura, então faça $m = m + 1$ e volte ao passo 2.
- Passo 4 Redefinir. Faça $J_c = J_c - \{j_{cm}\}$, $m = m + 1$ e volte ao passo 2.

3.3.4.5. Processo de mutação

O operador de mutação é visto como um mecanismo de preservação contra a perda eventual de informações genéticas relevantes. Através deste operador, informações que foram eliminadas da população poderão voltar a ser introduzidas em um indivíduo durante o processo de reprodução.

No algoritmo proposto, a mutação é realizada aleatoriamente antes de executar o procedimento de obtenção de um conjunto de cobertura primário descrito na seção 3.3.4.4, e consiste em acrescentar ao conjunto $J_c = \{j_{c1}, j_{c2}, \dots, j_{c(k+l)}\}$, alguns índices adicionais. No algoritmo desenvolvido adotou-se um acréscimo de $|J_c|/8$ índices adicionais, escolhidos aleatoriamente no problema.

A taxa de mutação, isto é, a probabilidade de que ocorra a mutação, é variável no decorrer da busca, sendo maior na medida em que se observa a tendência de convergência dos *fitness* dos indivíduos da população. A taxa de mutação é calculada pela seguinte expressão:

$$\theta = \frac{0,01}{1 - e^{-\Delta}} \quad (3.14)$$

onde:

$$\Delta = \frac{f_p - f_1}{f_p} \quad (3.15)$$

3.3.5. Ajuste da Solução e Geração do Plano de Escalas

A aplicação do modelo de cobertura descrito em (3.9) admite que, eventualmente, um ou mais *pieces* gerados sejam cobertos por mais de uma escala de trabalho. Além disto, no processo de geração de escalas alternativas não foi considerada a possibilidade de cada *piece* formar isoladamente uma escala.

Tendo em vista estes aspectos, após o término da aplicação do algoritmo genético pode ser necessário ajustar o resultado obtido de modo a não ocorrer a superposição na alocação dos *pieces*. Isto pode ser realizado pela simples eliminação dos *pieces* duplicados das escalas, mantendo-os em apenas uma das ocorrências.

3.4. Modelo de Alocação da Carga Semanal de Trabalho aos Condutores

3.4.1. Visão Geral do Modelo de Alocação da Carga Semanal

Em algumas empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, a exemplo das americanas, considera-se a obtenção do plano de escalas como sendo a última etapa do planejamento operacional. Nestas empresas, as escalas obtidas são distribuídas de modo que a cada condutor cabe executar exatamente a mesma escala, todos os dias. Este procedimento, em geral, causa distorções em relação à distribuição da carga semanal de trabalho e em relação aos salários pagos, já que estes dependem da quantidade de horas-extras trabalhadas.

Já nas empresas européias, em geral, procura-se distribuir as escalas de trabalho de forma equitativa, tanto do ponto de vista da carga horária, como também do ponto de vista dos salários pagos.

No Brasil, em particular, uma série de regras trabalhistas devem ser observadas neste processo de alocação:

- a) de acordo com a C.L.T, a duração normal do trabalho poderá ser prorrogada por meio de acordo entre empregador e empregados, ou em casos de imperiosa necessidade;

- b) segundo a legislação, esta prorrogação poderá se dar até o limite de 10 horas diárias ou 60 horas semanais, sendo as horas suplementares remuneradas acima do valor da hora normal;
- c) poderá haver, dependendo do tipo de atividade, a compensação das horas extras trabalhadas ao longo da semana;
- d) a empresa deve conceder um descanso semanal de 24 horas consecutivas, que deverá coincidir com o domingo, no todo ou em parte, salvo motivo de conveniência pública ou necessidade imperiosa do serviço;
- e) a legislação brasileira determina que entre duas jornadas de trabalho, isto é, entre um e outro dia de serviço, é obrigatório um período mínimo de onze horas consecutivas para descanso.

Tendo em vista estas regras trabalhistas, e considerando a possibilidade dos planos de escala serem diferentes para cada dia, ou pelo menos para cada dia típico (dia útil, sábado, domingos e feriados), este processo de distribuição pode deixar de ser simples, mesmo sem considerar o aspecto de homogeneização da carga de trabalho.

No modelo proposto, considerou-se que em período semanal é necessário realizar a alocação de um conjunto de escalas $N = N_1 \cup N_2 \cup \dots \cup N_7$, onde $N_i = \{n_{i1}, n_{i2}, n_{i3}, \dots\}$ é o conjunto de escalas de trabalho que compõe o *i-ésimo* dia da semana. Seja $d_i = |N_i|$ o número de escalas a serem alocadas em cada dia. Conforme já comentado, nas empresas em geral, os conjuntos referentes aos dias úteis costumam ser iguais entre si, isto é, $N_2 = N_3 = N_4 = N_5 = N_6$, sendo que N_1 e N_7 , que correspondem aos domingos e sábados, respectivamente, costumam apresentar uma carga de trabalho menos intensa.

A quantidade mínima de condutores¹⁵, necessária para executar estas escalas, sem considerar as reservas para cobrir eventuais faltas, considerando k dias de trabalho por semana ($k = 5$ ou 6), é dado por:

¹⁵ O termo condutor é utilizado neste texto para representar uma equipe de trabalho, que pode ser composta por um motorista e um cobrador, ou simplesmente, pelo motorista.

$$m = \max \left\{ \max_i d_i, \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^7 d_i}{k} \right\rceil \right\} \quad (3.16)$$

onde $\lceil y \rceil$ é o menor inteiro maior ou igual a y . Nesta expressão, é considerado que o número de condutores não pode ser inferior a quantidade de escalas existente em cada dia, devendo ser suficiente para assegurar que cada condutor tenha pelo menos $7 - k$ dias de folga por semana. Assim, considerando este número, haverá $m - d_i$ condutores de folga no i -ésimo dia da semana. A cada uma destas folgas considere associada uma escala fictícia a ser incluída no respectivo conjunto, de modo que $N_i = \{n_{i1}, n_{i2}, n_{i3}, \dots, n_{i(m-1)}, n_{im}\}$. Com isto, a cada um dos m condutores caberá uma escala (de trabalho ou folga), em cada dia da semana.

Para representação do processo de distribuição das escalas pertencentes aos conjuntos N_i entre os condutores, é utilizado um grafo multipartite $G(N, A)$, no qual $N = N_1 \cup N_2 \cup \dots \cup N_7$ e $A = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_7$, sendo que:

$$A_d = \{(\alpha, \beta) | \forall \alpha \in N_d, \forall \beta \in N_{d+1}\} \quad \forall d = 1, \dots, 6 \quad (3.17.a)$$

$$A_7 = \{(\alpha, \beta) | \forall \alpha \in N_7, \forall \beta \in N_1\} \quad (3.17.b)$$

Nestes conjuntos, deverão ser eliminados os arcos correspondentes às seqüências de escalas que não satisfazem as necessidades mínimas de folga previstas pela legislação entre duas jornadas de trabalho consecutivas.

Obter uma solução para o problema de distribuição da carga semanal de trabalho, consiste em encontrar, neste grafo, m circuitos contendo 7 nós, um em cada conjunto N_i , tal que em cada circuito exista pelo menos $7 - k$ escalas de folga. Adicionalmente, pode-se desejar que a solução obtida satisfaça um critério de uniformidade na distribuição destas escalas.

Na figura 3.7, é apresentado o grafo multipartite $G(N, A)$, no qual foram realizados dois seccionamentos, um sobre o conjunto de arcos A_4 e o outro sobre o conjunto de arcos A_7 . Estes seccionamentos particionam o grafo $G(N, A)$ em dois subgrafos, $G_1 = \langle N_1 \cup N_2 \cup N_3 \cup N_4 \rangle$ e $G_2 = \langle N_5 \cup N_6 \cup N_7 \rangle$, sendo que em cada um existem m seqüências parciais de escalas.

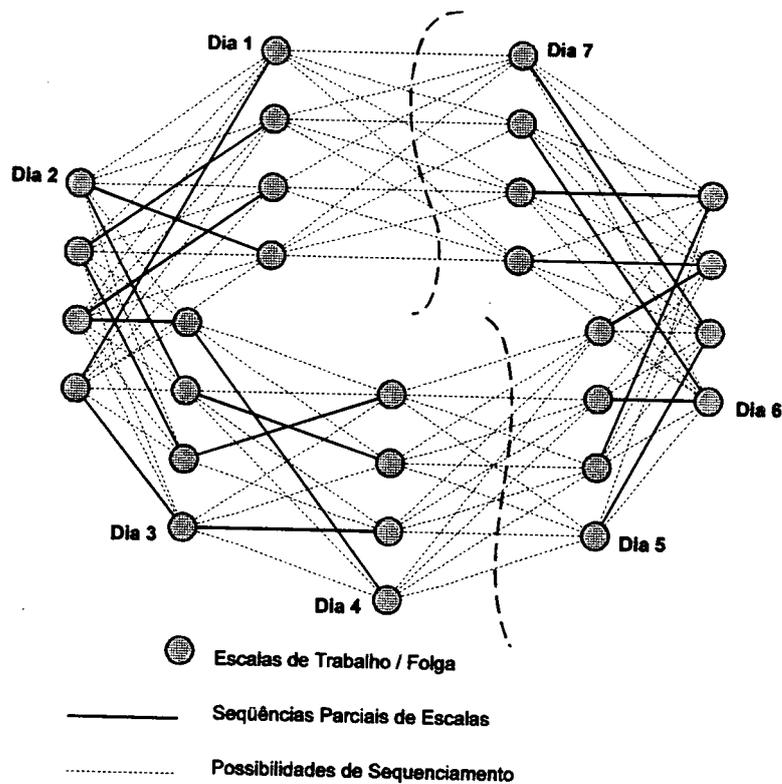


Figura 3.7 Grafo multipartite $G(N, A)$, referente a alocação da carga de trabalho entre quatro condutores ($m = 4$), e representação da etapa de redistribuição entre seqüências parciais de escalas, considerando os seccionamentos no conjunto de arcos A_4 e A_7 .

Sejam $S_i = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ e $S_j = (\beta_5, \beta_6, \beta_7)$ duas destas seqüências parciais, cada uma retirada de um subgrafo distinto. Estas duas seqüências parciais poderão ser concatenadas formando uma nova seqüência $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7)$, desde que $(\alpha_4, \beta_5) \in A_4$ e $(\beta_7, \alpha_1) \in A_7$. Considerando o seccionamento no grafo e as concatenações possíveis entre as seqüências parciais formadas, pode-se definir o seguinte problema de programação inteira 0-1:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} \cdot x_{ij} \tag{3.18.a}$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, m \tag{3.18.b}$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, m \tag{3.18.c}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j = 1, \dots, m \tag{3.18.d}$$

no qual $x_{ij} = 1$ indica que S_i de G_1 deverá ser concatenado com S_j de G_2 .

O modelo acima corresponde a um problema de designação, cuja solução pode ser obtida com o uso do algoritmo húngaro. Neste modelo, a função de custo, c_{ij} , pode ser dada por:

$$c_{ij} = P_{HE} \cdot \left(\frac{HE_{ij}}{HE} \right)^2 + P_{HT} \cdot \left(\frac{HT_{ij}}{HT} \right)^2 + P_{FS} \cdot \max(NDT_{ij} - k, 0) \quad (3.19)$$

- onde
- P_{HE} penalidade aplicada sobre a alocação de quantidades excessivas de horas extras;
 - P_{HT} penalidade aplicada sobre a alocação de quantidades excessivas de horas trabalhadas;
 - P_{FS} penalidade aplicada sobre a não alocação de folgas semanais previstas na legislação; com o objetivo de observar a legislação trabalhista, esta penalidade se sobrepõe as demais, devendo ser significativamente maior;
 - HT quantidade média de horas trabalhadas alocadas por condutor;
 - HE quantidade média de horas-extras alocadas por condutor;
 - HT_{ij} quantidade de horas trabalhadas alocadas na concatenação das seqüências parciais S_i e S_j ;
 - HE_{ij} quantidade de horas-extras alocadas na concatenação das seqüências parciais S_i e S_j ; e
 - NDT_{ij} número de escalas de trabalho na concatenação das seqüências parciais S_i e S_j .

Se a concatenação de S_i com S_j , não define um circuito, atribui-se, na formação da matriz de custos, o valor $c_{ij} = +\infty$.

Atribuindo valores adequados para as penalidades, obtém-se como solução deste problema de designação, associações entre seqüências parciais cuja dispersão (em termos dos valores das horas trabalhadas e das horas-extras alocadas) tende a ser menor que a observada antes do seccionamento do grafo. Além disso, garante-se, que a cada seqüência gerada sejam alocados um número mais adequado de escalas de folga.

A sistemática de distribuição da carga semanal de trabalho, adotada no modelo, consiste em resolver tais problemas de designação mantendo-se fixo o seccionamento entre os

conjuntos N_1 e N_7 , e fazendo variar o segundo seccionamento do grafo: primeiramente entre N_1 e N_2 , em seguida entre N_2 e N_3 , e assim sucessivamente, até o seccionamento entre N_6 e N_7 , que completa o ciclo de melhoramento. Para cada uma destas situações, resolve-se um problema de designação definido pelo modelo (3.18), de modo a redistribuir as escalas semanais de cada condutor. Este ciclo de melhoramento se repete até que em duas passagens consecutivas a redução no valor da função objetivo deixa de ser significativo.

3.4.2. Abordagem Multi-critério para Alocação da Carga Semanal

Conforme descrito anteriormente, dois critérios são usualmente considerados no processo de alocação da carga semanal de trabalho: equidade na distribuição da carga de trabalho e na distribuição dos salários.

Em alguns casos, a quantidade de condutores determinada pela expressão (3.16) tende a ser um número fracionário. O arredondamento para um valor inteiro, previsto nesta expressão, faz com que algumas escalas adicionais de folga sejam incorporadas ao planejamento. Estas escalas, em princípio, ao serem alocadas, fazem com que determinados condutores, que as recebam, tenham uma menor carga semanal de trabalho. Para compensar este fato, procura-se alocar a estes indivíduos escalas com maior quantidade de horas de trabalho. Entretanto, tais escalas, em geral, são as que apresentam maior quantidade de horas-extras. Com isto, cria-se uma distorção: ao mesmo tempo que se atribui menores cargas semanais de trabalho a determinados condutores, paga-se para estes os melhores salários. Para contornar este problema é proposto uma abordagem multi-critério para a questão.

Tendo em vista os critérios apresentados, e com o objetivo de se obter uma gama de soluções eficientes, utilizou-se uma função de custo modificada (c'_j), na qual o parâmetro de ajuste $\gamma \in (0,1)$ determina a maior ou menor ênfase em cada critério. A função de custo modificada, adotada neste trabalho, é a seguinte:

$$c'_{ij} = \left[\max \left(\frac{HE_{ij}}{FE_{\gamma} \cdot HE}, \frac{HT_{ij}}{FT_{\gamma} \cdot HT} \right) \right]^2 + P_{FS} \cdot \max (NDT_{ij} - k, 0) \quad (3.20.a)$$

onde:

$$FE_{\gamma} = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq \gamma \leq 0.5 \\ \left(\frac{\gamma}{1-\gamma} \right)^{\frac{1}{4}} & \text{se } 0.5 < \gamma < 1 \end{cases} \quad (3.20.b)$$

e

$$FT_{\gamma} = \begin{cases} \left(\frac{1-\gamma}{\gamma} \right)^{\frac{1}{4}} & \text{se } 0 < \gamma \leq 0.5 \\ 1 & \text{se } 0.5 < \gamma \leq 1 \end{cases} \quad (3.20.c)$$

Para realizar a distribuição com ênfase na equidade de salários, adota-se γ próximo de zero. Na medida em que o valor deste parâmetro aumenta em direção à unidade, a ênfase modifica-se gradualmente para o critério de equidade em termos de horas trabalhadas. Os demais parâmetros da função seguem a mesma definição apresentada para (3.19).

De posse das soluções obtidas para diversos valores de γ , o planejador poderá escolher a solução mais conveniente. Em geral, valores intermediários de γ apresentam soluções nas quais os dois critérios considerados apresentam-se razoavelmente satisfeitos.

3.4.3. Método Americano de Distribuição da Carga Semanal de Trabalho

Embora considerado menos justo, do ponto de vista da distribuição da carga de trabalho, em algumas empresas dá-se a preferência à aplicação do método de distribuição americano, pois o mesmo permite que cada condutor se familiarize com a escala que se repete diariamente.

Entretanto, a eventual necessidade de distribuir algumas escalas de folga durante os dias úteis, e o fato de que as escalas de trabalho nos finais de semana costumam ser diferentes das executadas durante os dias úteis, fazem com que exista uma pequena margem de flexibilidade que permite obter algum ganho no sentido da equidade entre carga de trabalho e salário.

Para implantação deste método, modificou-se a função de custo, que passa a incluir uma penalidade referente a trocas de escalas. A função de custo modificada para implantação do método americano é:

$$c''_{ij} = \left[\max \left(\frac{HE_{ij}}{FE_{\gamma} \cdot HE}, \frac{HT_{ij}}{FT_{\gamma} \cdot HT} \right) \right]^2 + P_{FS} \cdot \max(NDT_{ij} - k, 0) + P_{TE} \cdot (NTE_{ij} - 1) \quad (3.21)$$

onde NTE_{ij} é o número de escalas distintas associadas aos dias úteis, dadas pela concatenação das seqüências parciais S_i e S_j , e P_{TE} é uma penalidade por troca de escala durante os dias úteis.

3.5. Comentários Sobre os Modelos Propostos

Os modelos apresentados, consideram o problema de planejamento operacional das empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros subdividido em três subproblemas. Esta abordagem é normalmente adotada em outros trabalhos encontrado na literatura. Porém, alguns aspectos diferenciam os modelos propostos daqueles encontrados no levantamento bibliográfico realizado.

Em relação a alocação da frota, pode-se considerar o modelo proposto uma extensão da técnica de programação concorrente apresentada na seção 2.4.2.1. Enquanto que na técnica de programação concorrente a alocação é feita analisando-se as alternativas de alocação para uma viagem a cada vez, no modelo proposto a análise é feita considerando todas as alternativas de alocação existente para um subconjunto de viagens. Pode-se dizer, portanto, que a técnica de programação concorrente é um caso particular do modelo proposto, no qual todos os subconjuntos alocados possuem cardinalidade igual a 1. Pelas características do modelo, pode-se dizer que quanto maior a cardinalidade dos conjuntos considerados nos problema de designação, melhor tendem a ser os resultados obtidos, pois maior é o número de combinações consideradas. Assim, pode-se afirmar que o método proposto deve apresentar resultados nunca piores que os obtidos com o uso da técnica de programação concorrente, que usualmente é aplicado na prática.

A etapa proposta para melhoramento da alocação da frota, embora na prática não tenha demonstrado ganhos significativos em relação ao processo de alocação inicial proposto, pode ser equiparada com a técnica de trocas heurísticas discutida na seção 2.4.2.3. Entretanto, enquanto que esta técnica considera trocas do tipo *2-opt* e *3-opt*, no modelo de melhoramento proposto são realizadas, por meio da resolução de problemas de designação, trocas do tipo *k-opt*, onde k é o número de veículos existentes na frota. Também neste caso pode-se afirmar que a solução obtida com o modelo proposto não deve ser pior que a técnica de trocas heurísticas apresentada na revisão bibliográfica, a qual costuma ser largamente empregada na prática.

Além do aspecto algorítmico, introduziu-se no modelo de custos de alocação da frota, uma estimativa dos gastos com o pessoal de operação, através da resolução de problemas de caminhos mínimos em grafos. Apesar desta abordagem ter sido aplicada em outras situações, envolvendo a distribuição de cargas de trabalho em locais fixos, por exemplo, não se encontrou referências explícitas de sua aplicação no problema de alocação de frotas. Supõe-se, entretanto, que algum tipo de abordagem equivalente deva ser realizado nos sistemas comerciais existentes.

Ainda no modelo de alocação da frota, foram introduzidos novos aspectos, não tratados na literatura pesquisada. A consideração do grau de incerteza em relação aos tempos de viagem, a tolerância em relação aos horários de saída e o grau de adequação entre veículos da frota e as linhas a serem realizadas, foram incorporadas no modelo por meio do uso da Teoria dos Conjuntos Difusos.

Além disto, enquanto nos trabalhos encontrados na literatura a formação dos *pieces* leva em consideração informações dos especialistas, os quais definem as características de um *piece* considerado “adequado”, neste trabalho a formação dos *pieces* passa a ser um subproduto obtido automaticamente no processo de alocação da frota, por meio da resolução dos problemas de caminho mínimo.

Na etapa de geração das escalas diárias de trabalho, por outro lado, foi utilizado um modelo de cobertura de conjuntos, que pode ser considerado uma tendência entre os sistemas desenvolvidos mais recentemente. Contudo, o algoritmo genético utilizado para resolução deste modelo, adaptado a partir do trabalho publicado por Wren (veja [WRE95]), pode ser considerado uma contribuição, na medida em que neste trabalho o mesmo encontra-se integrado a um sistema de apoio à decisão.

Na realização deste trabalho, ficou confirmado o desempenho obtido pelos GA's no trabalho original de Wren. Obtendo-se, em alguns casos, resultados superiores aos considerados ótimos com o uso do IMPACS, conforme observa-se no quadro 3.1. Neste quadro, para alguns problemas resolvidos pelo IMPACS, não estão disponíveis o valor do custo. Para estas instâncias de problemas, deverá ser levado em consideração, na avaliação dos resultados obtidos, o fato dos objetivos considerados por cada algoritmo ser diferente. Isto é, enquanto que a ênfase do IMPACS foi a minimização do número de *duties* e em segundo plano a minimização dos custos, no caso do GA o objetivo principal foi o de minimização dos custos.

Problema	Características			Solução IMPACS		Solução GA		Diferença %
	Pieças	Duties	Dens.	Duties	Custo	Duties	Custo	
1	200	539	8,17%	15	7.865	15	7.856	-0,11%
2	222	5.522	3,33%	31	14.218	31	14.065	-1,08%
3	219	4.990	3,27%	30	(*)	31	14.112	
4	798	4.569	1,07%	109	(*)	115	58.401	

(*) Solução não disponível para o IMPACS.

Quadro 3.1 - Quadro comparativo do valor da função objetivo para problemas de cobertura IMPACS x GA.

Finalmente, na última etapa do modelo proposto, isto é, no processo de distribuição de escalas de trabalho, dois critérios foram utilizados para alocação semanal das escalas de trabalho geradas. Diferentemente dos trabalhos existentes na literatura, que consideram como único critério de distribuição a equalização da carga de trabalho, no modelo desenvolvido considerou-se os critérios de equalização da carga de trabalho e de equalização dos salários pagos aos condutores, com o que obtém-se uma distribuição mais justa do trabalho realizado.

CAPÍTULO IV

4. SISTEMA COMPUTACIONAL

4.1. Considerações Gerais

O planejamento operacional das empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, mesmo para aquelas de pequeno e médio porte, envolve a consideração de algumas centenas ou até milhares de viagens realizadas todos os dias. Tais viagens devem ser distribuídas entre dezenas e até centenas de veículos, segundo critérios que envolvem custos de operação, riscos de atrasos nos horários estabelecidos, adequação entre veículos e roteiros, entre outros aspectos. A condução destes veículos, por sua vez, deve ser distribuída entre centenas de motoristas, de modo a satisfazer as condições impostas pela legislação trabalhista.

Dado a complexidade da realização deste tipo de planejamento, é necessário, para se obter bons resultados, a aplicação de modelos de otimização. Isto implica, necessariamente, na utilização de sistemas computacionais capazes de realizar a manutenção de um grande número de informações, a realização de milhões de cálculos repetitivos e a geração de relatórios contendo centenas de páginas referentes ao acompanhamento e implantação dos planos gerados. Tudo isto ainda é reforçado pela necessidade de repetir estes procedimentos para vários conjuntos de parâmetros, com o objetivo de testar políticas alternativas de alocação.

A fim de demonstrar as características do sistema computacional desenvolvido, bem como a sua capacidade em servir de apoio no processo de planejamento de empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, será apresentado neste capítulo um tutorial no qual são descritas as principais funções do sistema e aos passos a serem seguidos na sua utilização.

4.2. Visão Geral do Sistema

O modelo apresentado no terceiro capítulo, divide o planejamento operacional em três etapas: (a) alocação dos veículos, (b) geração das escalas e (c) distribuição das escalas entre os condutores. Além destas etapas, o sistema *WinBUS*¹ possui alguns recursos adicionais que permitem a manutenção da base de dados, a geração de relatórios e a consulta aos planos gerados. A estrutura deste sistema é apresentada no esquema da figura 4.1.

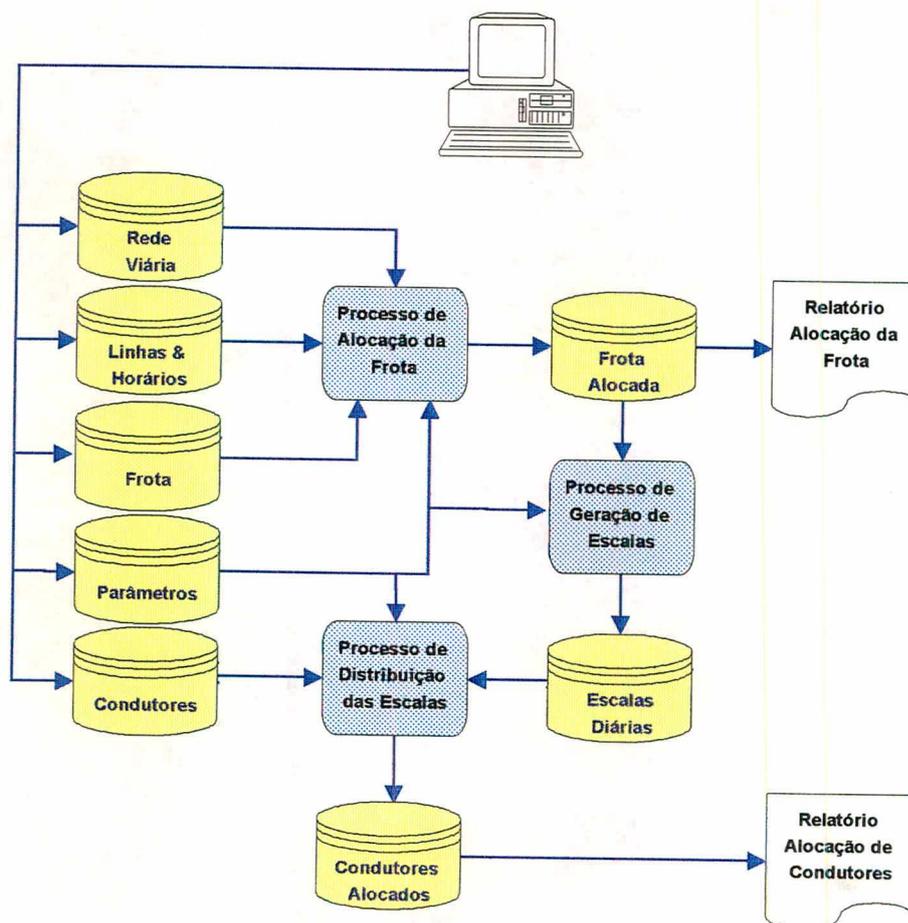


Figura 4.1. Esquema simplificado do sistema *WinBUS*.

As tabelas que formam a base de dados foram geradas no padrão PARADOX 5.0 para Windows, o que facilita a interação de outros aplicativos que venham a ser desenvolvidos no futuro.

¹ Encontra-se anexado a este trabalho os disquetes contendo uma versão de demonstração do sistema *WinBUS para Windows 95*, que foi desenvolvido para o planejamento operacional de empresas de transporte urbano de passageiros, com base no modelo proposto.

4.3. Tutorial - Um Exemplo Prático

4.3.1. Menu Principal do Sistema WinBUS

A janela principal do sistema *WinBUS*, apresentada na figura 4.2, contém um menu que permite o acesso às funções do sistema. Além do menu, esta janela dispõe de um conjunto de barras de ferramentas, as quais contém botões de acesso rápido a algumas destas funções. As barras de ferramentas são apresentadas segundo os grupos: Identificação, Cadastro, Relatórios, Processamento e Consulta.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2. Algumas visões da janela principal do sistema *WinBUS*: (a) identificação da base de dados corrente; (b) barra de ferramentas para acesso ao cadastro; (c) barra de ferramentas para processamento do plano de alocação

Ao permanecer com o *mouse* sobre as teclas da barra de ferramentas por um período um pouco mais prolongado, o sistema apresenta um resumo informativo sobre a operação que a mesma realiza.

4.3.2. Cadastro do Sistema WinBUS

O sistema desenvolvido permite que sejam mantidas, sob a forma de uma base de dados relacional, todas as informações utilizadas no desenvolvimento dos planos de alocação de frota e condutores. As operações admitidas sobre esta base de dados incluem a consulta, inserção, exclusão e alteração de registros. Estas operações são realizadas com a ajuda de barra de ferramentas cujo formato genérico é apresentado na figura 4.3.



Figura 4.3. Barra de ferramentas para manipulação de registros da base de dados.

Nesta barra de ferramentas, estão contidos os botões para realização das seguintes funções:

- a) localizar o primeiro registro,
- b) localizar o registro anterior,
- c) localizar o próximo registro,
- d) localizar o último registro,
- e) inserir um novo registro,
- f) excluir um registro existente,
- g) ativar o modo de edição do registro corrente,
- h) aceitar as alterações realizadas sobre o registro corrente,
- i) cancelar as alterações realizadas no registro corrente e
- j) recuperar as informações atualizadas da base de dados.

Os dados são agrupados de acordo com as seguintes categorias de cadastro: cadastro da empresa, cadastro da rede viária, cadastro de linhas e horários, cadastro de condutores, cadastro da frota e cadastro da política de alocação da frota.

4.3.2.1. Cadastro da Empresa

Os dados contidos neste cadastro, conforme se apresenta na figura 4.4, são utilizados como elementos de identificação da empresa na geração dos relatórios emitidos pelo

sistema (veja os relatórios emitidos pelo sistema anexado a este trabalho). Além disto, o cadastro mantém uma senha que permite ao usuário ter acesso às funções que requerem autorização especial (alteração do cadastro e geração de planos de alocação).

Identificação	
Razão Social	Transporte Coletivo Estrela Ltda. - Parcial
C.G.C.	89.987.234/0001-45
Senha	WinBUS

Endereço	
Rua, Número	Rod. Admar Gonzaga, 1747
Complemento	Apto. 302 Bloco B
Bairro	Itacorubi
Cidade / UF	Florianópolis
CEP	88.034-000

Figura 4.4. Janela de diálogo para alimentação do Cadastro da Empresa.

4.3.2.2. Cadastro da Rede Viária

Neste cadastro são mantidas as informações sobre o grafo orientado que define a rede viária. O grafo da rede viária é caracterizado pelos nós (locais relevantes para a operação da empresa) e pelos arcos (ligações existentes entre os nós), os quais poderão vir a ser utilizadas no deslocamento de veículos vazios.

Conforme apresentado na figura 4.5a, para cada local (*origem*) são caracterizados os seguintes aspectos:

- a) código de identificação;
- b) descrição do local;
- c) possibilidade de se realizar o abastecimento de combustível no local;
- d) permissão para troca de condutores (duplas);
- e) possibilidade de estacionamento ao longo do dia;

- f) caracterização do local como uma garagem, permitindo que o veículo permaneça estacionado no local durante o período noturno;
- g) tempo máximo de permanência para os casos em que se admite o estacionamento do veículo.

Figura 4.5a. Janela de diálogo para acesso aos dados do Cadastro da Rede Viária - pasta de Dados da Rede Viária.

Para cada local de origem, devem ser cadastrados todos os *destinos* existentes, que correspondem aos nós terminais das ligações que tem como ponto de partida o local de origem fixado. Além da identificação do nó de destino associado a cada ligação, são registrados os respectivos tempo de viagem e distância.

A inclusão dos registros deste cadastro é iniciada pela definição de todos os locais de origem e seus atributos, seguido da definição das ligações existentes para cada local de origem.

Além do modo texto, o Cadastro da Rede Viária pode ser manipulado no modo gráfico através das ferramentas existentes na pasta de Representação Gráfica da Rede Viária, conforme apresentado na figura 4.5b.

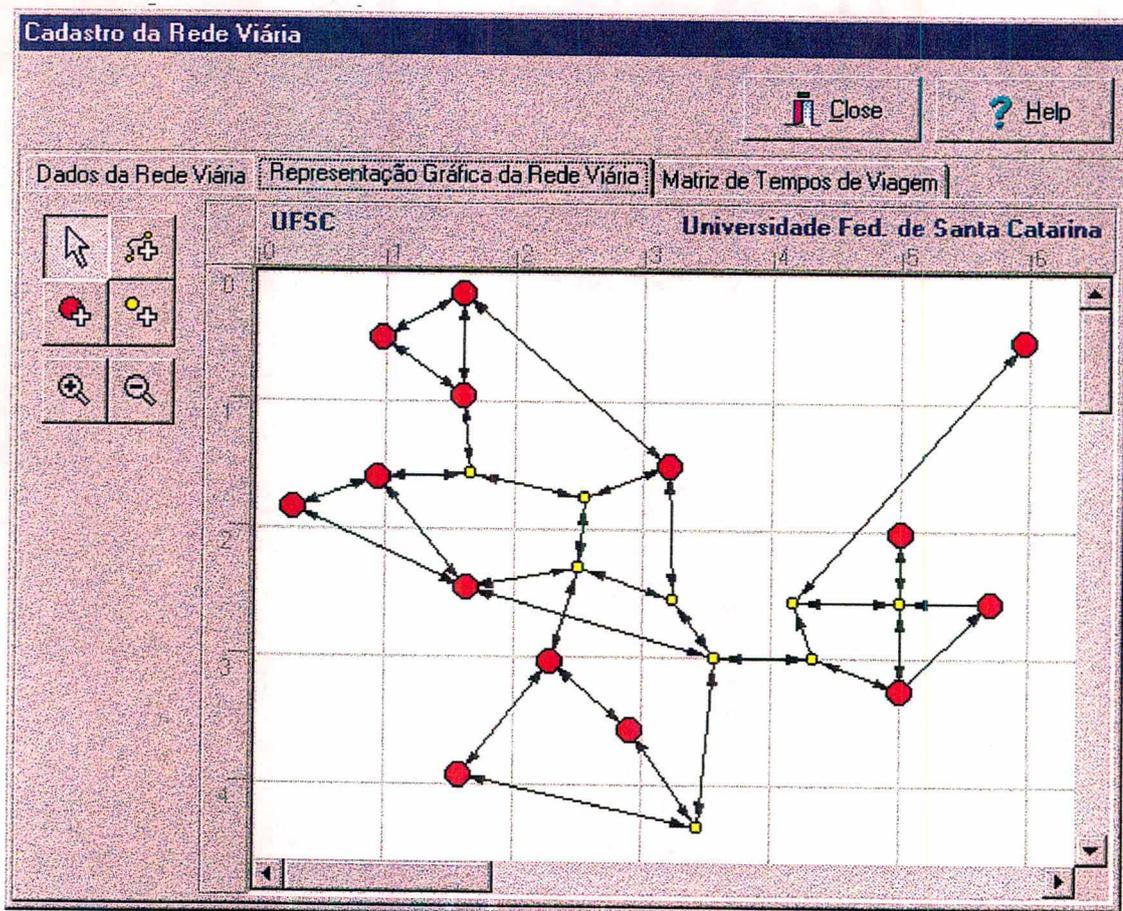


Figura 4.5b. Janela de diálogo para acesso aos dados do Cadastro da Rede Viária - pasta de Representação Gráfica da Rede Viária.

Além destas duas pastas, existe um terceira que permite ao usuário verificar os tempos mínimos de deslocamento entre os diversos pontos da rede viária.

4.3.2.3. Cadastro de Linhas e Horários

No sistema *WinBUS*, os deslocamentos produtivos são caracterizados por linhas, roteiros e horários.

Na figura 4.6 é apresentado uma das visualizações da janelas de diálogo do Cadastro de Linhas e Horários, a qual mostra a pasta de informações sobre linhas e roteiros.

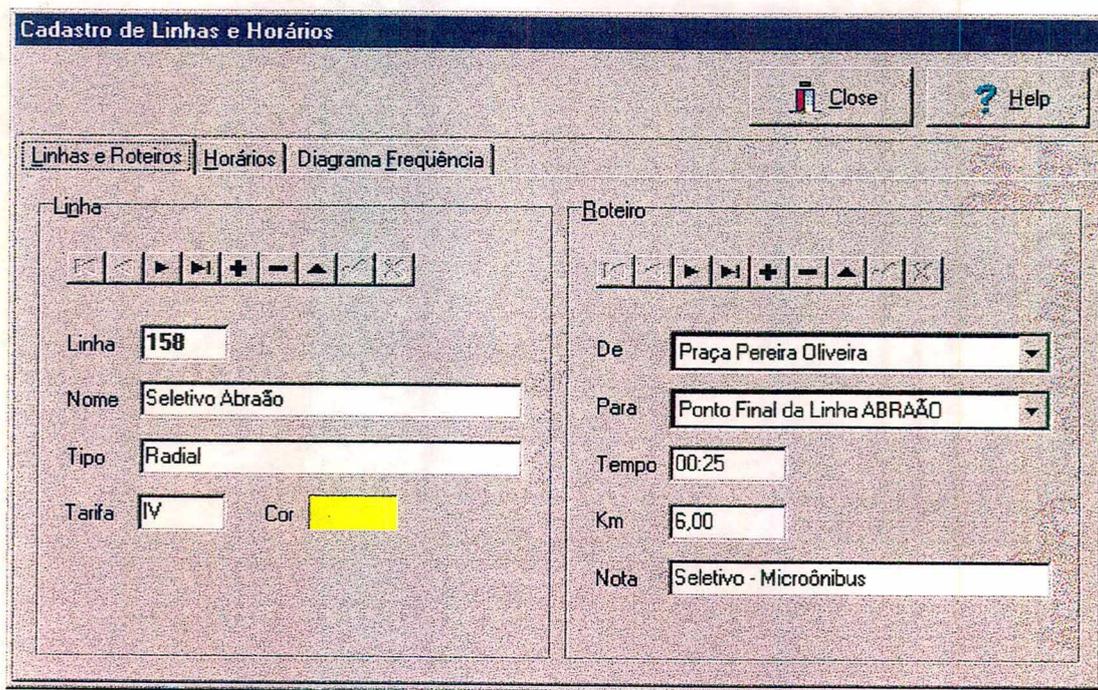


Figura 4.6. Janela de diálogo do Cadastro de Linhas e Horários, com a visualização da pasta de informações sobre as linhas e roteiros.

Nesta janela de diálogo o usuário poderá definir as características de cada linha cadastrada (número de identificação, nome, tipo e tarifa). A atribuição de uma cor a cada linha, permite que sejam construídos diagramas representativos dos planos de alocação de viagens gerados pelo sistema. A escolha da cor é realizada pelo usuário, pressionando o *mouse* sobre a área da palheta.

Associado a cada linha podem ser definidos diversos roteiros alternativos, os quais são caracterizados pelo local de origem, local de destino, tempo e distância de deslocamento, além de uma eventual observação sobre o percurso.

Ainda na mesma janela de diálogo, o usuário poderá abrir a pasta de horários, conforme mostra a figura 4.7.

Nesta pasta, para cada linha e roteiro, são cadastradas os horários de saída e as durações de cada viagem a ser realizada em cada dia típico da semana. A duração de cada viagem, em princípio, será igual ao tempo de percurso do roteiro. No caso em que o usuário desejar, esta duração poderá ser ajustada para se adequar às condições específicas de cada viagem em particular.

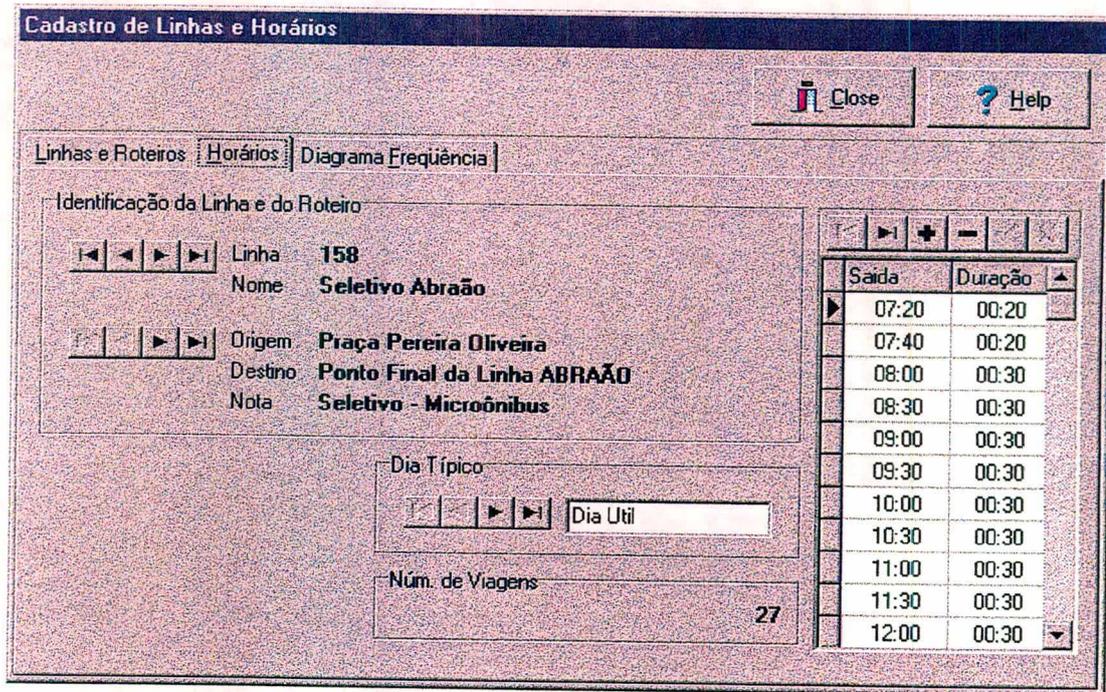


Figura 4.7. Janela de diálogo do Cadastro de Linhas e Horários, com a visualização do acesso às informações sobre os horários.

Ao pressionar o botão direito do *mouse* sobre o quadro de horários, o usuário terá acesso a um *menu de sobreposição* contendo opções de geração e eliminação de viagens em bloco. A opção de *limpar horários* realiza a eliminação completa de todas as viagens contidas no quadro de horários para o dia, roteiro e linha em destaque. A opção de *gerar horários* deste *menu*, pressupõe a definição prévia de um esquema de frequência, conforme mostra a janela de diálogo apresentada na figura 4.8.

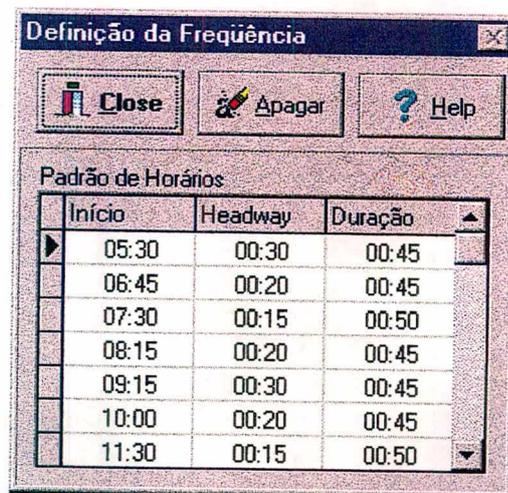


Figura 4.8. Janela de diálogo para Definição da Frequência no processo de geração de viagens em bloco.

No exemplo da figura, durante o primeiro intervalo (entre 05:30 e 06:45), deverá ser realizada uma viagem com duração de 45 minutos com saídas a cada 30 minutos. No intervalo seguinte (entre 06:45 e 07:30), o intervalo entre viagens passa a ser de 20 minutos, e a duração das viagens se mantém em 45 minutos. No terceiro intervalo (entre 07:30 e 08:15), o intervalo entre viagens cai para 15 minutos, enquanto que a duração das viagens aumenta para 50 minutos, e assim sucessivamente.

Concluída a definição de frequência, o usuário deverá fechar esta janela, ativar novamente o *menu de sobreposição* do quadro de horários e escolher a opção *gerar horários*. Com isto, os horários serão gerados e incluídos automaticamente na base de dados do sistema.

A terceira pasta da janela de diálogo do Cadastro de Linhas e Horários apresenta, para uma linha escolhida, as viagens a serem realizadas em um dia típico sob a forma de um diagrama espaço \times tempo. Além de permitir que o usuário visualize a distribuição de horários, o diagrama permite que sejam feitas inclusões, exclusões e alterações dos horários, com o uso de recursos gráficos disponíveis na barra de ferramentas disposta no lado direito da pasta, conforme mostra a figura 4.9.

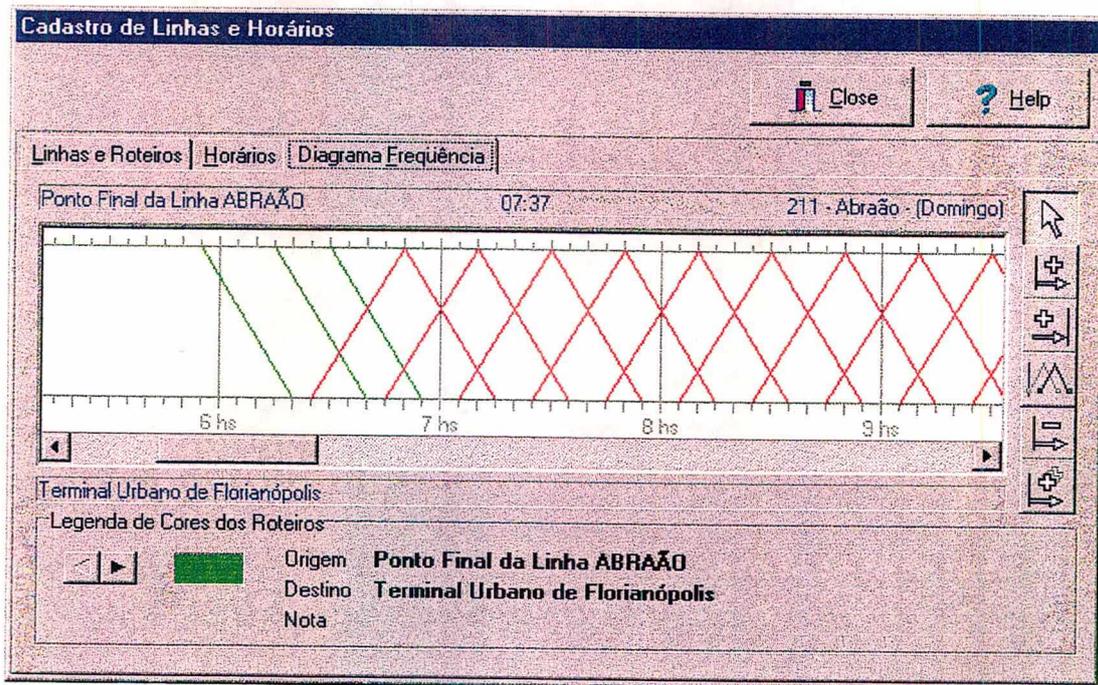


Figura 4.9. Janela de diálogo do Cadastro de Linhas e Horários, com a visualização da pasta contendo o diagrama de frequência de horários para uma linha e um dia típico.

A inclusão de novos horários poderá ser feita selecionando o roteiro apropriado no quadro de Legenda de Cores dos Roteiros, e ativando uma das ferramentas de inclusão

(incluir horário pela saída, incluir horário pela chegada ou incluir seqüência de horários). A operação de inclusão se realiza ao acionar o *mouse* sobre a área do diagrama, o qual dá indicações a respeito do posicionamento das novas viagens geradas. Procedimentos similares permitem que sejam excluídos e modificados horários, desde que selecionadas as ferramentas apropriadas. Concluindo as operações de alteração na base de dados, seleciona-se a ferramenta *default* (ponteiro), de modo a prevenir a realização modificações acidentais.

4.3.2.4. Cadastro de Condutores

No cadastro de condutores são mantidas as informações referentes aos motoristas e cobradores contratados pela empresa. São disponíveis os seguintes dados para cada contratado: código de identificação, nome do indivíduo, fotografia, número do CPF, número da identidade, data de nascimento, data de contratação, salário base, sexo, estado civil, função, situação operacional. Do ponto de vista do processo de alocação, utiliza-se apenas o nome dos indivíduos, que são apresentados juntamente com as escalas nos relatórios de alocação dos condutores.

Na figura 4.10 é apresentado a janela de diálogo para acesso aos dados do Cadastro de Condutores.

A fotografia do condutor pode ser inserida no cadastro, utilizando-se o *clipboard* do *Windows* como elemento intermediário da operação. Os três botões existentes abaixo da área da foto permitem, respectivamente:

- a) copiar a foto do *clipboard* para o cadastro;
- b) copiar a foto do cadastro para o *clipboard*; e
- c) apagar a foto do *clipboard*.

Com a opção *auto* ativada, a visualização das fotografias é automática sempre que se muda o registro. A busca por novos registros poderá ser feita mais rapidamente, se a opção *Auto* estiver desativada. Neste caso, a fotografia do condutor poderá ser visualizada pressionando-se duas vezes o *mouse* sobre a área da foto, ou voltando a ativar a opção *Auto*.

Cadastro de Condutores

Close Help

Identificação

C N D \$

Código: 1711 Nome: Jacinto Manoel Matos

CPF: _____ RG: _____ Data de Nascimento: _____

Salário Base: _____ Data Contratação: _____

Auto

Sexo: Masculino Feminino
 Estado Civil: Solteiro Casado Viúvo Desquitado
 Função: Motorista Cobrador
 Situação: Operação Afastado

Figura 4.10. Janela de diálogo para acesso aos dados do cadastro de condutores.

4.3.2.5. Cadastro da Frota

Com o objetivo de simplificar a inserção e manutenção dos dados do Cadastro da Frota, o sistema foi desenvolvido de modo a agrupar os veículos em função de suas características básicas. Na figura 4.11 é apresentada a janela de diálogo do Cadastro de Veículos, a qual é composta de duas seções distintas: na parte superior da janela, o usuário define os grupos existentes, de acordo com suas características técnicas (carroceria, motor, ano, potência, distância entre eixos, comprimento, número de passageiros e autonomia em km), e na parte inferior, os veículos que compõe o grupo, caracterizados pelo número de identificação, garagem associada e a situação operacional em que se encontra.

Cadastro de Veículos

Close Help

Modelo de Veículo

Carroceria: Marcopolo Torino Ano Car.: 1994 Compr.:
 Chassis / Motor: Mercedes Benz OF 1620 Ano Mot.: 1994 Potência:
 D. Eixos: Pass.: Autonom.: 600

Veículo

Número: 4367 Garagem: Garagem da Empresa

Situação: Operacional Manutenção Garagem Fixa

Figura 4.11. Janela de diálogo para acesso aos dados do Cadastro de Veículos.

4.3.2.6. Cadastro da Política de Alocação da Frota

Na figura 4.12 é apresentada a janela de diálogo para inserção dos valores do grau de ajustamento entre os modelos da frota e as diversas linhas cadastradas. Para cada combinação de linha e modelo, o usuário deve definir o grau de ajustamento a ser considerado no processo de alocação dos veículos. A escala adotada é graduada em termos dos valores lingüísticos (*alto*, *médio* e *baixo*).

Nesta escala, o valor *alto* corresponde a situação ideal de alocação, isto é, indica que o modelo de veículo considerado pode ser perfeitamente alocado na linha em questão. O valor *baixo* indica a situação oposta. A escala apresenta, também, outros valores intermediários. A definição do valor mais pertinente para esta relação entre modelos e linhas poderá ser realizada com o uso do *mouse*, acionando o mesmo sobre a seta de ajuste existente no quadro.

No Relatório da Frota, apresentado pelo sistema, encontra-se a lista de linhas adequadas a cada modelo de veículo, com o respectivo grau de adequação. Neste relatório, os valores lingüísticos foram traduzidos para uma escala numérica, na qual o valor mínimo (0 = zero) corresponde a *baixo*, e o valor máximo (10 = dez) corresponde a *alto*.

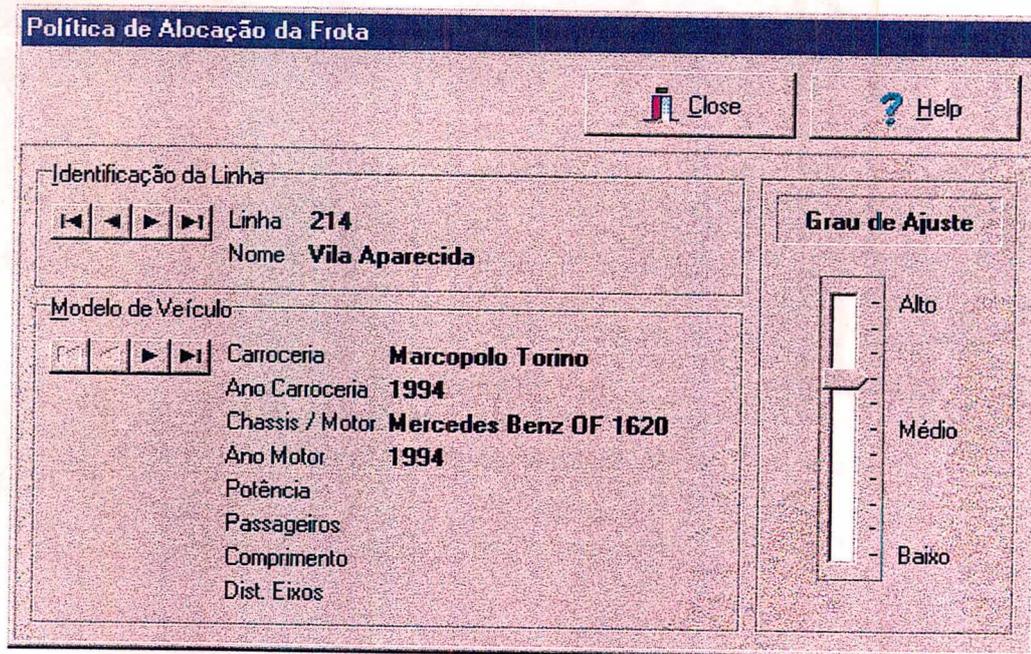


Figura 4.12. Janela de diálogo para definição da Política de Alocação da Frota.

4.3.2.7. Definição da Base de Dados

No sistema desenvolvido, a identificação de um plano de operação e seu respectivo cadastro é feita com base na data de sua geração, conforme pode ser observado na pasta de identificação da janela principal do sistema. Esta data pode ser modificada através da janela de Alteração da Data de Referência, que é mostrada na figura 4.13.



Figura 4.13. Janela de diálogo para Alteração da Data de Referência.

Além de permitir a manipulação dos dados segundo as categorias de cadastro já citadas, o sistema permite, ainda, a manipulação de cópias de segurança ou cadastros alternativos, que apresentam três finalidades distintas:

- a) manter o registro dos dados e planos de operação, realizados ao longo do tempo;
- b) proteger os dados atualizados de eventuais perdas que possam ocorrer no sistema;
- c) manter informações sobre os planos alternativos de operação para um dado período do ano, com o objetivo de comparar e escolher a solução mais adequada.

As operações de *backup* e recuperação das bases de dados são realizadas através das ferramentas do sistema operacional. Cada base deve ser armazenada em um diretório específico, que poderá ser acessado, em tempo de execução, através da janela de Escolha da Base de Dados. Após realizada a escolha, o usuário deverá pressionar a tecla Trocar.

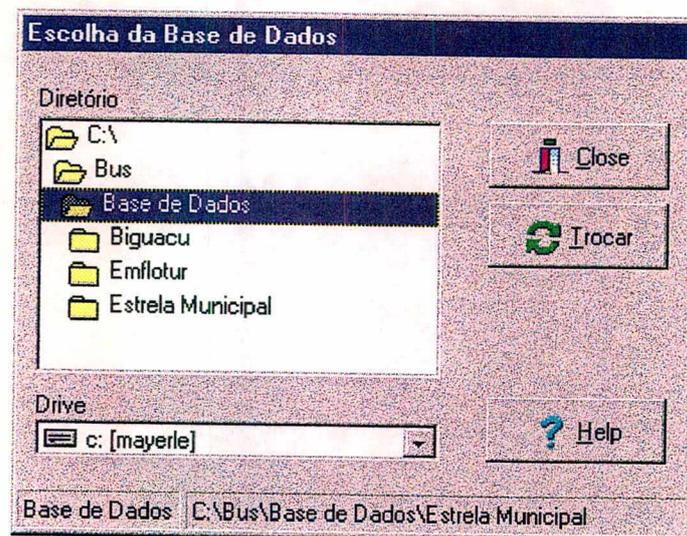


Figura 4.14. Janela de diálogo para Escolha da Base de Dados.

4.3.3. Parâmetros de Geração do Plano de Operação

A geração do plano de operação é realizado em três etapas: (a) alocação de veículos, (b) geração de escalas para os dias típicos, e (c) distribuição semanal das escalas entre os condutores. O resultado destas três etapas é determinado por um conjunto de parâmetros de ajuste, que permitem ao usuário controlar uma série de critérios, como será

apresentado a seguir. Nas figuras 4.15 a 4.19 estão registrados os parâmetros utilizados na resolução do problema exemplo.

4.3.3.1. Parâmetros de Geração dos Blocos

Na figura 4.15 está apresentada a janela de diálogo para definição de parâmetros de alocação, com a visualização da pasta contendo os parâmetros que definem a geração dos blocos (conjunto de viagens a serem alocadas a um veículo).

Nesta pasta, o usuário poderá manter diversos conjuntos de parâmetros, identificados por um memorando, cada qual representando uma política distinta de geração de blocos. Entre os parâmetros mantidos pelo sistema nesta pasta tem-se a definição de tolerâncias em relação ao horário de saída, variações percentuais em relação aos tempos de viagem, duração do abastecimento, além de custos extraordinários (penalidades) relativos ao cancelamento de viagens, utilização de veículos inadequados e troca de linhas.

Parâmetros e Opções de Alocação	
OK Cancel Help	
Blocos Escalas Rodízio Custos da Frota Custos Pessoal	
Duração do Abastecimento: 00:00	
Tempo de Viagem	
Spread Positivo (%)	10,00
Spread Negativo (%)	5,00
Tolerância no Horário de Saída	
Máximo Adiantamento	00:05
Máximo Atraso	00:05
Tempo de Troca de Linha	00:01
Custos Extraordinários	
Cancelar Viagem (\$/km)	100,00
Veículo Inadequado (\$/km)	0,40
Troca de Linha (\$/troca)	15,00

Figura 4.15. Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta de parâmetros dos blocos.

Com o objetivo de criar um novo conjunto de parâmetros, a partir de um conjunto já cadastrado, o usuário poderá pressionar a tecla de duplicação que se encontra à direita da barra de ferramentas de manipulação da base de dados. Em seguida, as modificações que se fizerem necessárias neste novo registro poderão ser realizadas através dos mecanismos de edição da base de dados.

4.3.3.2. Parâmetros de Geração das Escalas

Na figura 4.16 está apresentada a janela de diálogo para definição de parâmetros de alocação, com a visualização da pasta contendo os parâmetros que definem a geração das escalas (conjunto de viagens a serem alocadas a um condutor).

O usuário poderá manter diversos conjuntos de parâmetros, cada um dos quais identificado por um memorando, representando políticas distintas de geração de escalas. Entre os parâmetros mantidos pelo sistema nesta pasta, tem-se a definição de durações mínimas e máximas para cada *piece* (conjunto de viagens alocadas a um condutor sem troca de veículo), tempo para troca de *piece*, máximo período de trabalho sem descanso, e duração mínima e máxima do intervalo de descanso.

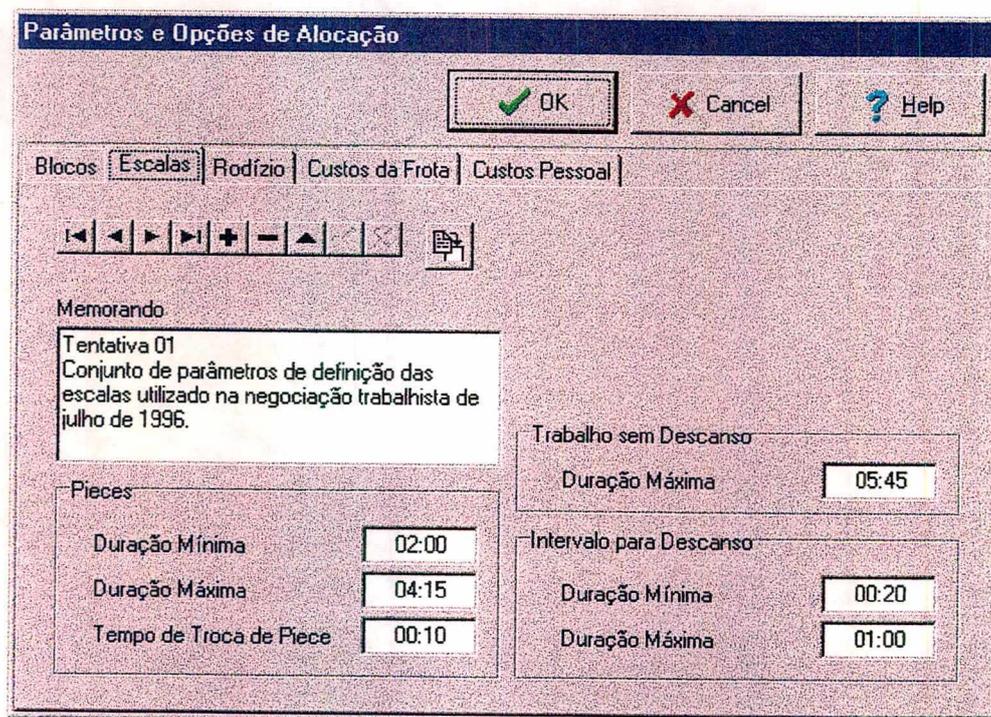


Figura 4.16. Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta de parâmetros das escalas.

Com o objetivo de criar um novo conjunto de parâmetros, a partir de um conjunto já cadastrado, o usuário poderá pressionar a tecla de duplicação que se encontra à direita da barra de ferramentas de manipulação da base de dados. Em seguida, as modificações que se fizerem necessárias neste novo registro poderão ser realizadas através dos mecanismos de edição da base de dados.

4.3.3.3. Parâmetros da Distribuição Semanal das Escalas

Na figura 4.17 está apresentada a janela de diálogo para definição dos parâmetros de alocação, com a visualização da pasta contendo os parâmetros que definem a distribuição semanal das escalas (rodízio).

É usual, entre as empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, a programação dos horários de acordo com dias típicos da semana (dia útil, sábado, domingo, feriados, etc.). Entre os dados existentes nesta pasta, tem-se a definição da programação típica a ser seguida para cada dia da semana, a definição da quantidade de dias de folga a ser alocada a cada condutor semanalmente, além do tempo de descanso a ser mantido entre duas jornadas de trabalho consecutivas.

Parâmetros e Opções de Alocação

OK Cancel Help

Blocos Escalas Rodízio Custos da Frota Custos Pessoal

Programação Semanal

Segunda-Feira	Dia Útil
Terça-Feira	Dia Útil
Quarta-Feira	Dia Útil
Quinta-Feira	Dia Útil
Sexta-Feira	Dia Útil
Sábado	Sábado
Domingo	Domingo

Tempo entre Jornadas de Trabalho

11:00

Número de Dias de Descanso Semanal

1

Figura 4.17. Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta contendo os parâmetros de distribuição semanal das escalas (rodízio).

4.3.3.4. Custo Operacional da Frota

Na figura 4.18 está apresentada a janela de diálogo para definição de parâmetros de alocação, com a visualização da pasta contendo os custos operacionais da frota.

No sistema desenvolvido, é feita a diferenciação entre custos de deslocamento com lotação e vazio. São considerados, na composição destes custos, o consumo de combustível, de pneus, graxas e filtros, além dos custos com a manutenção, a

depreciação e os juros. A depreciação dos veículos é realizada com base em dois fatores: tempo e uso.

Parâmetros e Opções de Alocação

OK Cancel Help

Blocos Escalas Rodízio **Custos da Frota** Custos Pessoal

Formação do Custo de Deslocamento da Frota

	Com Lotação	Vazio
Consumo de Combustível (\$/mil km)	140,62	98,43
Consumo de Pneus (\$/mil km)	270,00	210,00
Consumo de Graxas, Filtros, etc (\$/mil km)	14,78	10,00
Custo de Peças e Serviços de Manutenção (\$/mil km)	356,00	310,78
Depreciação por Uso (\$/mil km)	167,65	143,44
Depreciação por Tempo + Juros (\$/ano)		8.750,00

Minimizar o número de veículos utilizados, com o objetivo de reduzir o tamanho da frota

Figura 4.18. Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta de custo operacional da frota.

Parâmetros e Opções de Alocação

OK Cancel Help

Blocos Escalas Rodízio Custos da Frota **Custos Pessoal**

Salário Nominal Mensal

Motorista	567,90
Cobrador	423,80
Horas Semanais	44,00

Percentuais (%)

Encargos Sociais	56,00
Adicional Horas Extras	60,00
Adicional Noturno	100,00

Horas Trabalhadas por Dia

Horas Normais	06:40
Horas Extras (max.)	02:00

Período Diurno

Horário de Início	05:00
Horário de Término	22:00

Figura 4.19. Janela de diálogo para definição de Parâmetros de Alocação, com a visualização da pasta de custo de pessoal.

A opção de minimização do número de veículos, quando acionada, faz com que sejam utilizados o menor número de veículos da frota disponível. Esta opção é particularmente útil nos casos em que a empresa deseja dimensionar o tamanho da frota.

4.3.3.5. Custo de Pessoal

A pasta de custos do pessoal, contida na janela de diálogo de acesso aos Parâmetros de Alocação, está apresentada na figura 4.19. Nesta pasta são declarados os valores de referência para os salários dos motoristas e cobradores, os percentuais referentes aos encargos sociais e trabalhos extraordinários, além da quantidade de horas de trabalho diário e semanal previstos na legislação e nos acordos coletivos de trabalho.

4.3.4. Geração do Plano de Operação

A geração do plano de operação, conforme descrito anteriormente, é composta de três etapas, as quais serão detalhadas a seguir.

4.3.4.1. Etapa 1 - Alocação de Veículos (geração de blocos)

A etapa de geração de blocos e alocação de veículos é realizada pelo módulo de Alocação de Veículos ao qual se pode ter acesso a partir da pasta *Processamento* da janela principal do sistema, ou através da *menu* principal do sistema.

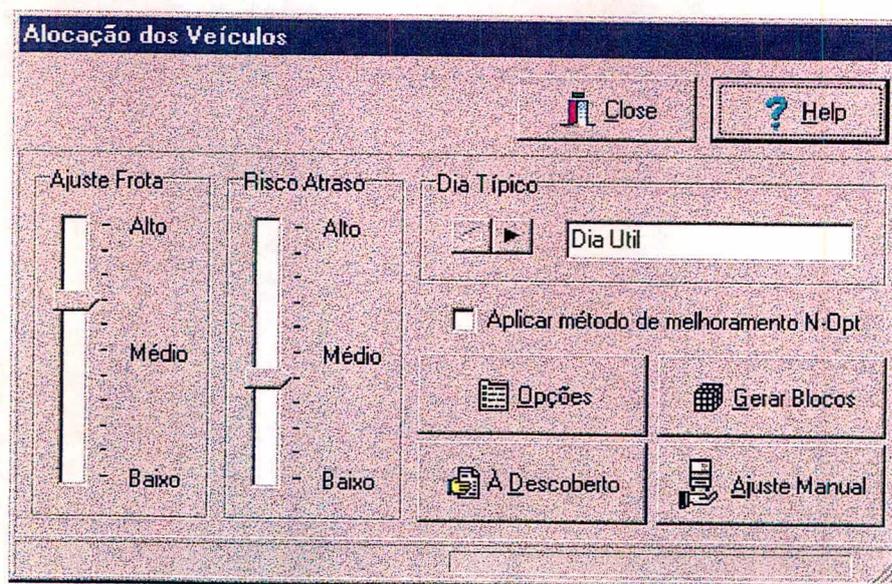


Figura 4.20. Janela de diálogo para Alocação dos Veículos.

Na figura 4.20 é apresentada a janela de diálogo que contém os comandos para execução desta operação. Nesta janela escolhe-se o dia típico no qual se deseja executar a alocação

de veículos, o grau mínimo de ajuste a ser observado entre linhas e frota, e o nível de risco em relação a atrasos que se está disposto a correr. Escolhidos estes parâmetros, pressiona-se o botão de *Gerar Blocos*, dando início ao processamento. A evolução deste processo poderá ser acompanhada pela barra de medição localizada na parte inferior da janela.

Com a opção *Método N-Opt* assinalada, o sistema executa, em continuidade ao procedimento básico de alocação, a rotina de melhoramento discutida na seção 3.2.5. Ao terminar o processo de alocação, as viagens que não foram possível alocar, poderão ser listadas pressionando-se o botão *À Descoberto* (veja o quadro da figura 4.21).

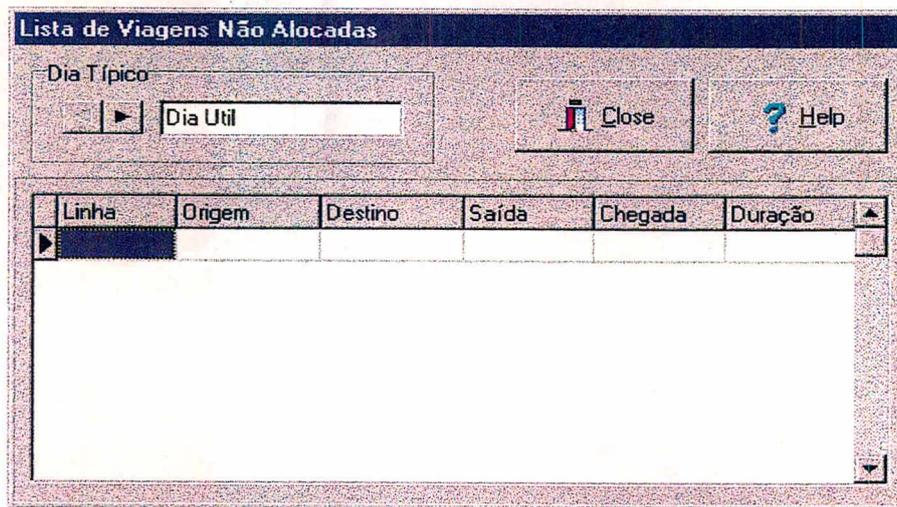


Figura 4.21. Janela contendo a Lista de Viagens Não Alocadas (vazia).

Com o botão *Ajuste Manual*, pode-se ter acesso à janela da figura 4.22, na qual o usuário dispõe das seguintes informações, referentes ao programa de alocação da frota de cada dia típico:

- esquema gráfico de formação dos blocos, *pieces* e viagens alocadas, para cada veículo, no qual o esquema de cores segue a convenção definida no Cadastro de Linhas e Horários, e que é apresentada no canto esquerdo inferior desta janela;
- características técnicas dos veículos (pressionando o *mouse* sobre o número do veículo, à esquerda);
- localização da garagem e respectivos horários de saída e chegada; e
- localização do abastecimento e respectivos horários de início e término.

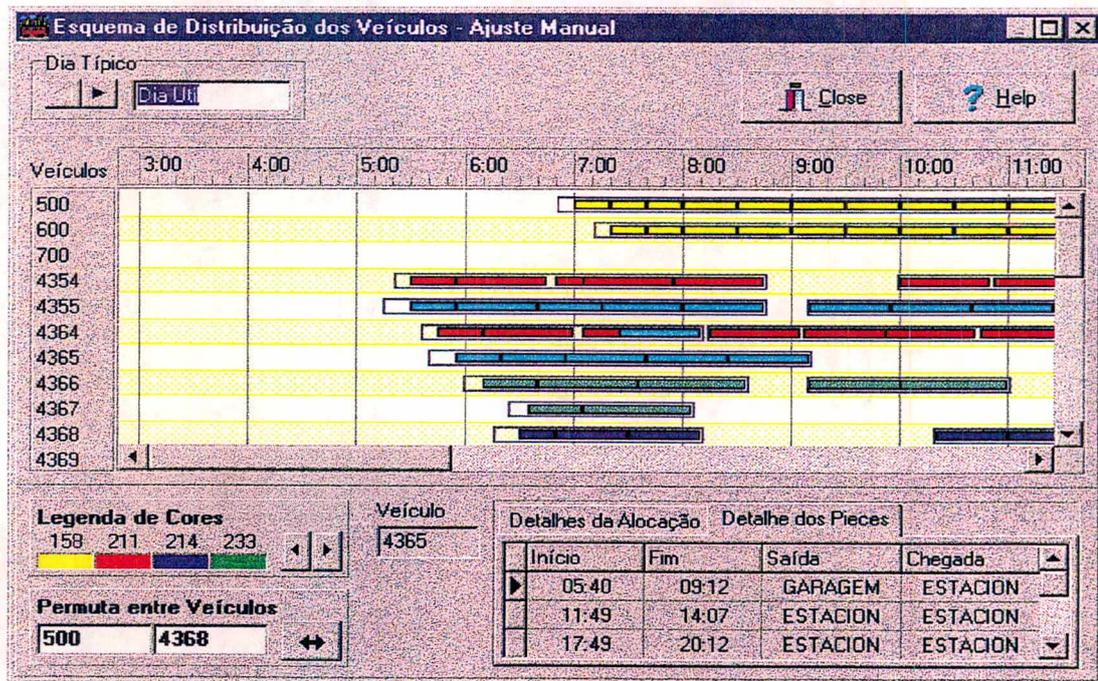


Figura 4.22. Janela de diálogo para verificação do programa de alocação da frota e realização de ajustes manuais.

Nesta janela de diálogo, o usuário poderá realizar manualmente a permuta na programação de dois veículos distintos. Para tanto, basta digitar os número dos veículos nas janelas de edição existentes no canto inferior esquerdo. Tendo sido assinalados os dois veículo, pressiona-se a tecla *Trocar* para efetivar a troca da programação.

4.3.4.2. Etapa 2 - Geração de Escalas

A segunda etapa no processo de geração do plano de operação consiste em gerar as escalas de trabalho para os vários dias típicos. Esta operação é realizada através dos procedimentos disponíveis na janela de *Formação de Escalas*, a qual pode ser observada na figura 4.23.

O primeiro passo, na resolução deste problema, consiste em gerar as combinações viáveis entre os *pieces*. Este procedimento é desencadeado ao pressionar a tecla *Criar SCP*. Durante esta fase, é apresentado um pequeno relatório contendo informações sobre o tamanho do problema gerado (número de *pieces* simples, número de *pieces* duplos, quantidade de escalas de cada tipo e número de linhas, colunas e elementos da matriz), de acordo com o formato a seguir:

Geração de Peças	
Pieças Simples.....	94
Pieças Duplos.....	126
Geração de Escalas	
Escalas Simples.....	102
Escalas 1 + 1.....	1058
Escalas 2 + 1.....	571
Escalas 1 + 2.....	555
Escalas 2 + 2.....	2
Número Total de Escalas	2288
Problema de Cobertura de Conjuntos	
Linhas.....	94
Colunas.....	2288
Elementos.....	5612

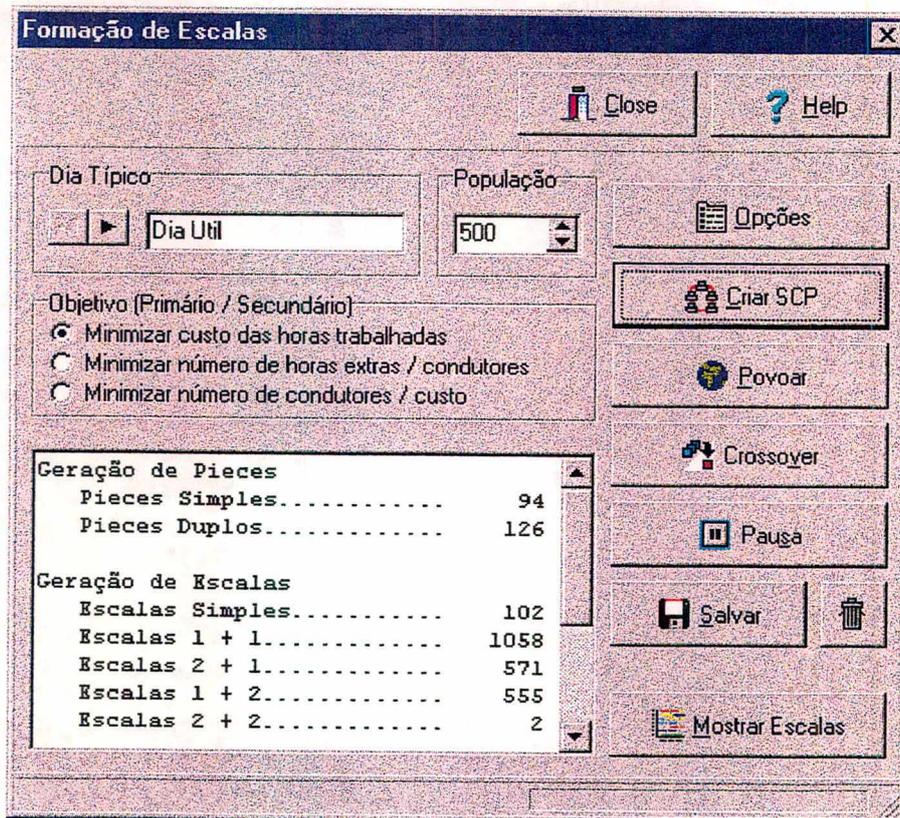


Figura 4.23. Janela de diálogo para realizar a geração das escalas de trabalho dos diversos dias típicos.

Na seqüência, ainda nesta fase do processamento, é realizada a ordenação das colunas do problema de cobertura.

A solução propriamente dita para este problema de cobertura é obtida por meio de um algoritmo de busca genético, cujos parâmetros básicos são:

- a) tamanho da população: quanto maior a população melhor é o resultado obtido e maior é o tempo de processamento necessário para se obter a convergência do algoritmo;
- b) tipo de função objetivo: o usuário poderá escolher entre três objetivos distintos, conforme a estratégia que deseja seguir: minimização do custo das escalas, minimização da quantidade de horas extras (minimizando o número de condutores em caso de empate) e minimização do número de condutores (minimizando o custo em caso de empate).

Com a definição destes parâmetros, e ao pressionar a tecla *Povoar*, dá-se o início da fase de geração de um conjunto inicial de soluções viáveis.

A fase seguinte, constituída pelo processo de cruzamento e mutação, é acionada pela tecla *Crossover*, que dá início ao processo de busca genética. Durante esta fase, a cada 250 novas soluções geradas, é apresentado um relatório com o seguinte formato:

População.....		500
Iteração.....		40250
Fitness MAX.....	2700.04	592 47
MIN.....	2673.36	470 47
DIF.....		1.00 %
Taxa Mutação....		10.17 %

Neste relatório constam informações sobre o estágio da busca, no qual pode-se observar o número de iterações realizadas, o valor dos *fitness* associados a melhor (MIN) e a pior (MAX) solução mantida na população corrente², a diferença percentual existente entre estes *fitness*, além da taxa de mutação considerada na iteração corrente.

A evolução é interrompida naturalmente, quando a diferença percentual entre o *fitness* do melhor e do pior indivíduo da população ficar abaixo de 1,0 %. Entretanto, a interrupção deste processo pode ser feita antes deste fato ocorrer, se o usuário assim o desejar, pressionando a tecla *Pausa*. Voltando a pressionar a tecla *Crossover*, o processo tem continuidade. Ao encontrar um resultado satisfatório, ou não podendo mais ser melhorada, a solução encontrada deverá ser salva na base de dados (tecla *Salvar*).

² Para cada solução mantida na população é registrado o valor do custo, a quantidade de horas extras (minutos) e o número de condutores associados.

Se o valor do *fitness* encontrado não é satisfatório, uma segunda população poderá ser criada e processada de modo análogo à primeira. Entretanto, neste caso recomenda-se a utilização de uma população maior.

Para visualizar o resultado obtido, após ter salvo a solução encontrada, pode-se consultar as escalas geradas pressionando a tecla *Mostrar Escalas*. Com este procedimento abre-se a janela de Escalas Diárias de Trabalho apresentada na figura 4.24. Nesta janela podem ser observadas as diversas escalas de trabalho, para cada dia típico da semana, através de esquemas gráficos nos quais ficam caracterizados os *pieces* e viagens de cada escala, de acordo com a convenção de cores associadas às linhas, e que é apresentada no canto esquerdo inferior desta janela.

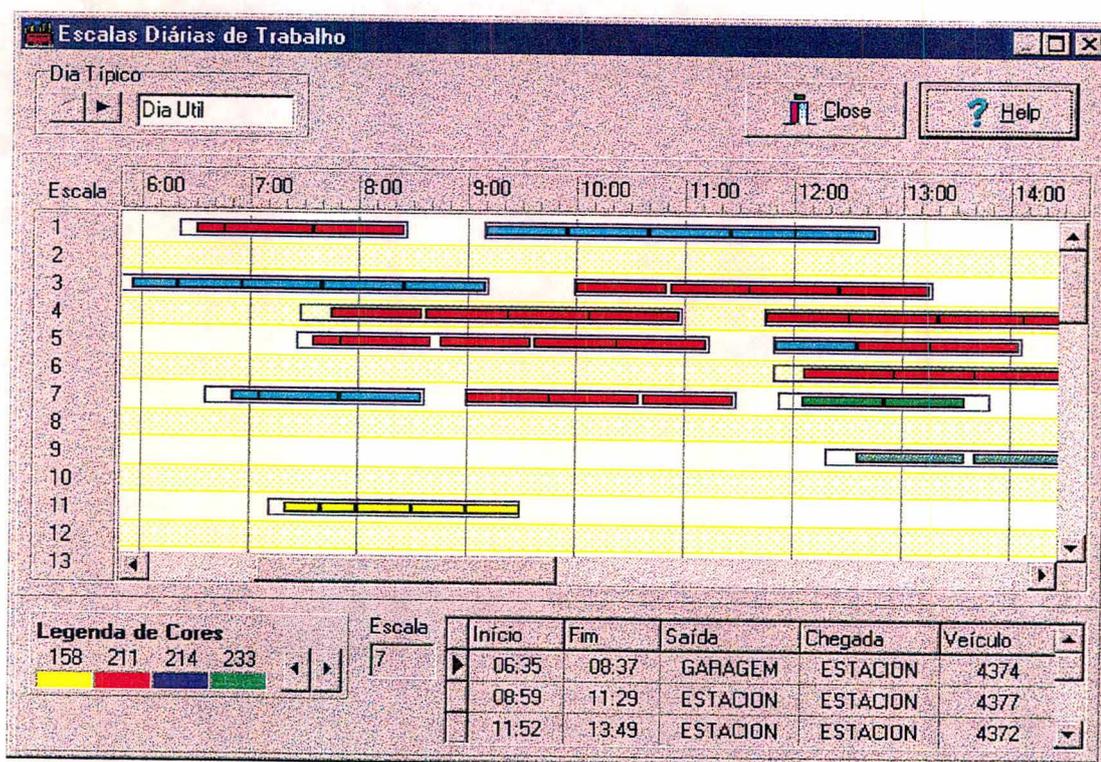


Figura 4.24. Janela de visualização das Escalas Diárias de Trabalho, com a apresentação das escalas dos dias úteis.

4.3.4.2. Etapa 3 - Distribuição Semanal da Escalas entre Condutores

A terceira e última etapa da elaboração do plano operacional, consiste em distribuir as escalas geradas, de modo a formar um esquema semanal de trabalho. Nesta etapa, busca-se satisfazer critérios de homogeneização da carga de trabalho alocada entre os condutores. Esta operação é realizada pelo módulo de Distribuição Semanal de Escalas, cuja janela de diálogo contém um dispositivo para escolha do tipo de gráfico (horas

trabalhadas, horas extras e análise de *trade-off*) que se deseja acompanhar. Nas figuras 4.25, 4.26 e 4.27 estão apresentadas estas três alternativas de visualização desta janela.

Na distribuição semanal das escalas de trabalho, o sistema permite a escolha entre os métodos europeu (rodízio diário das escalas ao longo da semana) e americano (manutenção das escalas de trabalho ao longo da semana). Quanto à ênfase na distribuição das escalas, o usuário poderá optar por uma maior homogeneidade da carga semanal de trabalho (fatores próximos de 100) ou por uma maior homogeneidade na quantidade de horas extras alocadas (fatores próximos a zero).

Para iniciar a distribuição das escalas, em se tratando de um novo plano de operação, o usuário deverá, primeiramente, pressionar a tecla *Apagar*, eliminando eventuais registros de projetos antigos.

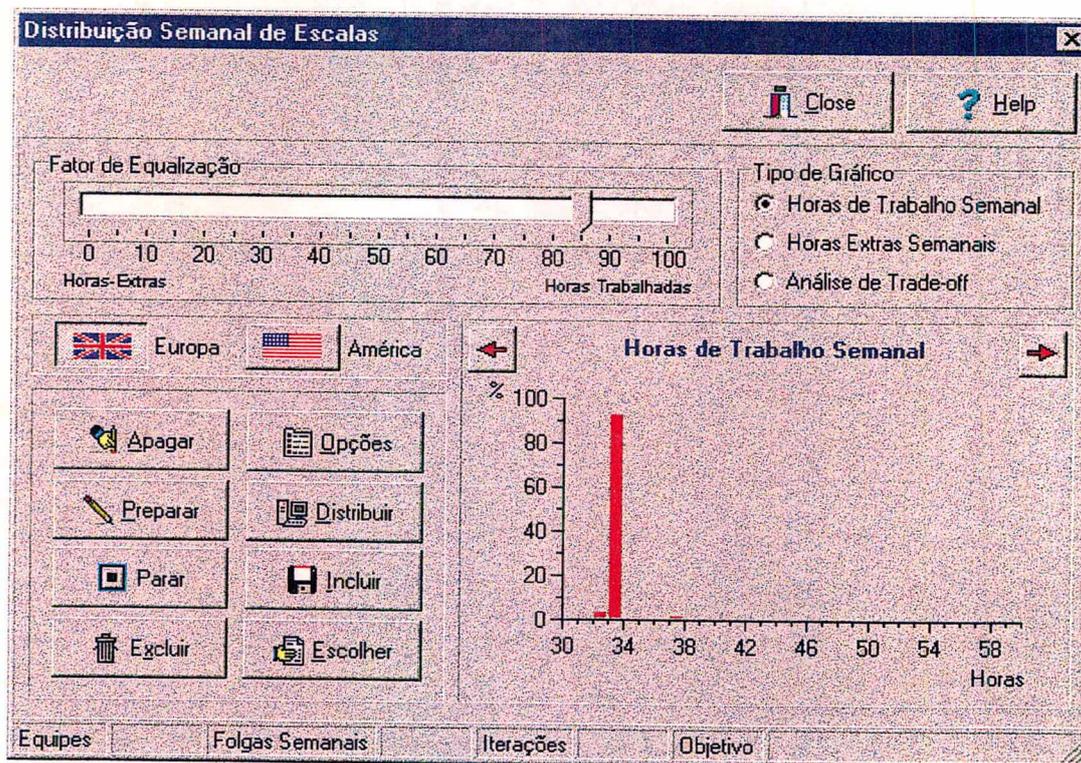


Figura 4.25. Janela de controle do módulo de Distribuição Semanal de Escalas, contendo a visualização do gráfico de Horas de Trabalho Semanal.

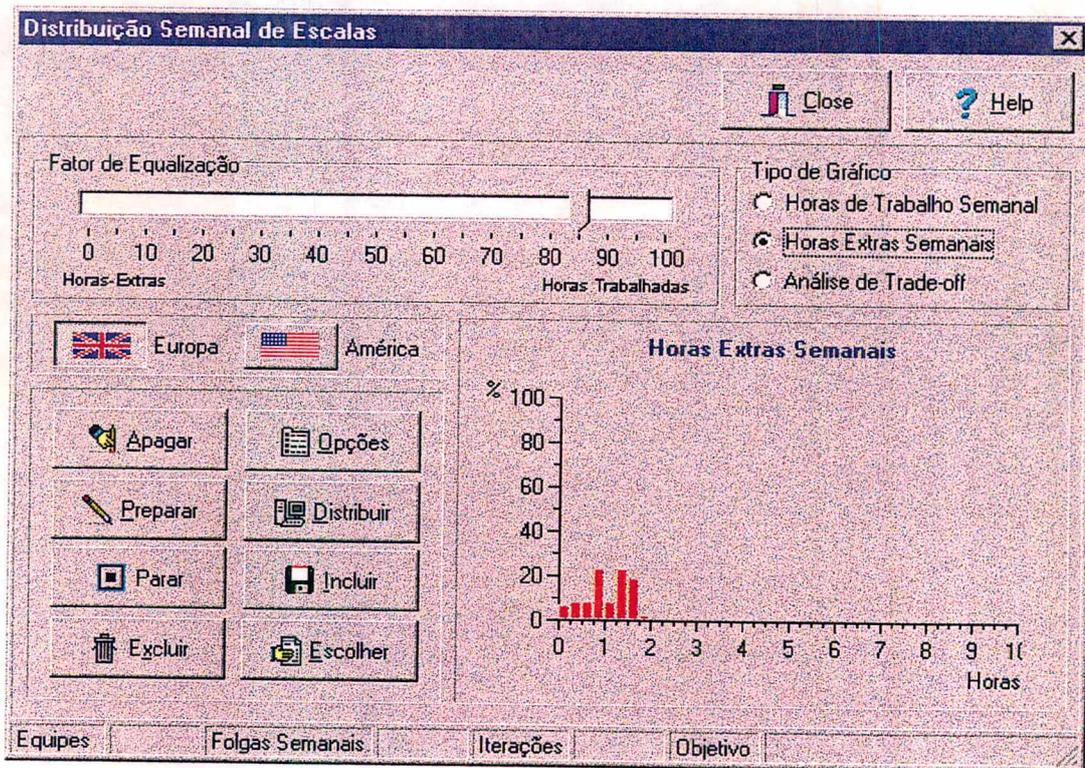


Figura 4.26. Janela de controle do módulo de Distribuição Semanal de Escalas, contendo a visualização do gráfico de Horas Extras Semanais.

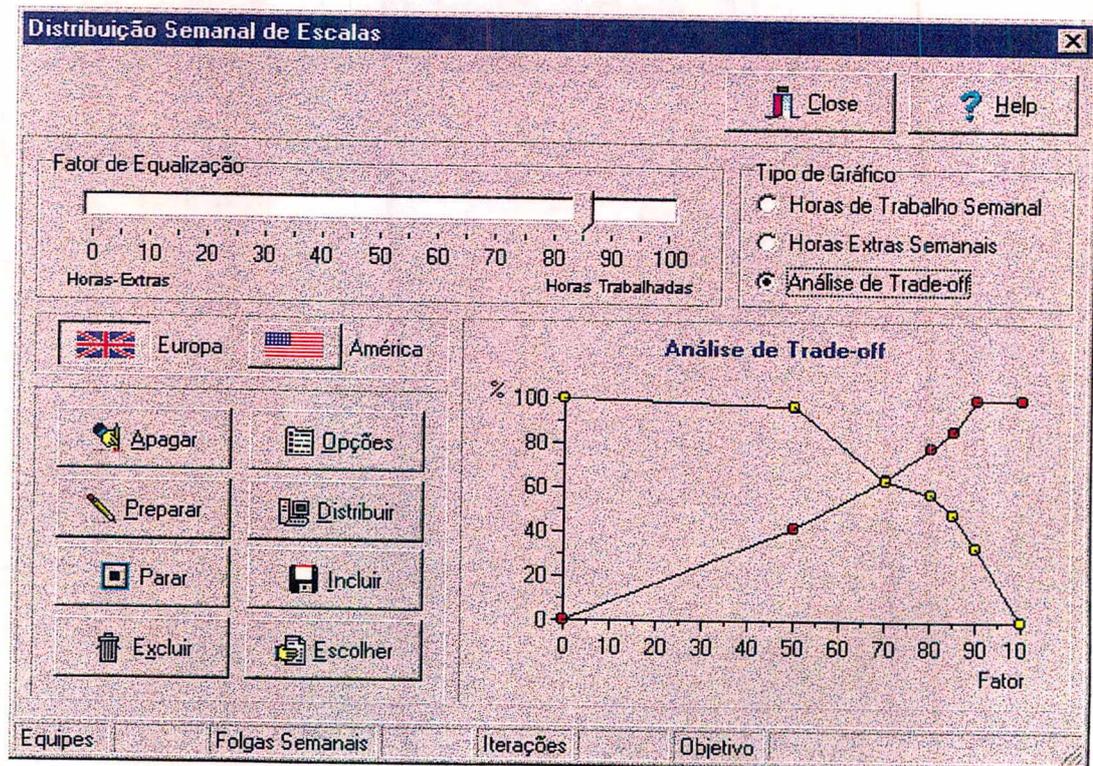


Figura 4.27. Janela de controle do módulo de Distribuição Semanal de Escalas, contendo a visualização do gráfico para Análise de Trade-off.

Posteriormente, escolhido o valor do fator de equalização, deve-se pressionar a tecla *Preparar*, a qual aciona o procedimento de determinação do número de equipes necessárias, além de gerar uma distribuição inicial viável das escalas. Pressionando, na seqüência, a tecla *Distribuir*, tem início um procedimento iterativo de refinamento da solução inicial, cujos resultados intermediários podem ser acompanhados nos vários gráficos existentes e através do valor objetivo que tende a reduzir de iteração para iteração. Em termos gerais, 15 a 20 iterações são suficientes para a convergência do processo. Quando isto ocorre, pressiona-se a tecla *Parar*, e aguarda-se a finalização da iteração em andamento. Para adicionar este resultado à análise, o usuário deverá pressionar a tecla *Incluir*. Por outro lado, se houver o interesse na eliminação de um dos resultados da análise, utiliza-se a tecla *Excluir*, após selecionar o fator de equalização correspondente.

Este procedimento de distribuição de escalas pode ser realizado para diversos fatores. Através da análise dos resultados obtidos, o usuário poderá escolher aquele que julgar o mais adequado. Para tanto, dispõe-se do gráfico de *trade-off*, o qual apresenta, em uma escala vertical normalizada de 0 a 100, os valores obtidos para a dispersão das horas trabalhadas e das horas extras, em função do fator arbitrado na distribuição da carga de trabalho. Um valor 100, nesta escala, representa o melhor resultado obtido, contrariamente ao valor zero que corresponde ao pior. O gráfico mostra simultaneamente as duas funções³ (horas trabalhadas e horas extras), permitindo ao usuário a comparação das perdas e ganhos obtidos com a variação do fator de equalização.

Definido e ajustado o fator que será considerado no plano de operação a ser implantado, o usuário deverá pressionar a tecla *Escolher*, para atualizar a base de dados e ativar a janela de diálogo para Alocação de Condutores.

Na janela de Alocação de Condutores, que se encontra apresentada na figura 4.28, cada equipe de condutores (motorista + cobrador) deverá ser associada a um conjunto de *pieces* a serem alocados ao longo da semana. A definição da composição da equipe fica a cargo do usuário, que deverá fazer a escolha entre os nomes disponíveis nas janelas de motoristas e cobradores, pressionando o *mouse* duas vezes sobre o nome escolhido, ou selecionando o nome e pressionando a tecla de escolha correspondente. Este procedimento poderá ser repetido para uma mesma equipe tantas vezes quanto for necessário, com o objetivo de trocar o nome registrado por outro escolhido. Com isso, o

³ O critério de equalização da carga de trabalho é representado no gráfico pelos pontos em vermelho, enquanto que o critério de equalização das horas extras é representado pelos pontos em amarelo.

antigo nome que havia sido registrado é liberado para outras associações. Se o usuário desejar, a alocação de condutores poderá ser realizada automaticamente na ordem alfabética, através do modo *Alocação Automática*, pressionando a tecla correspondente na parte superior da janela.

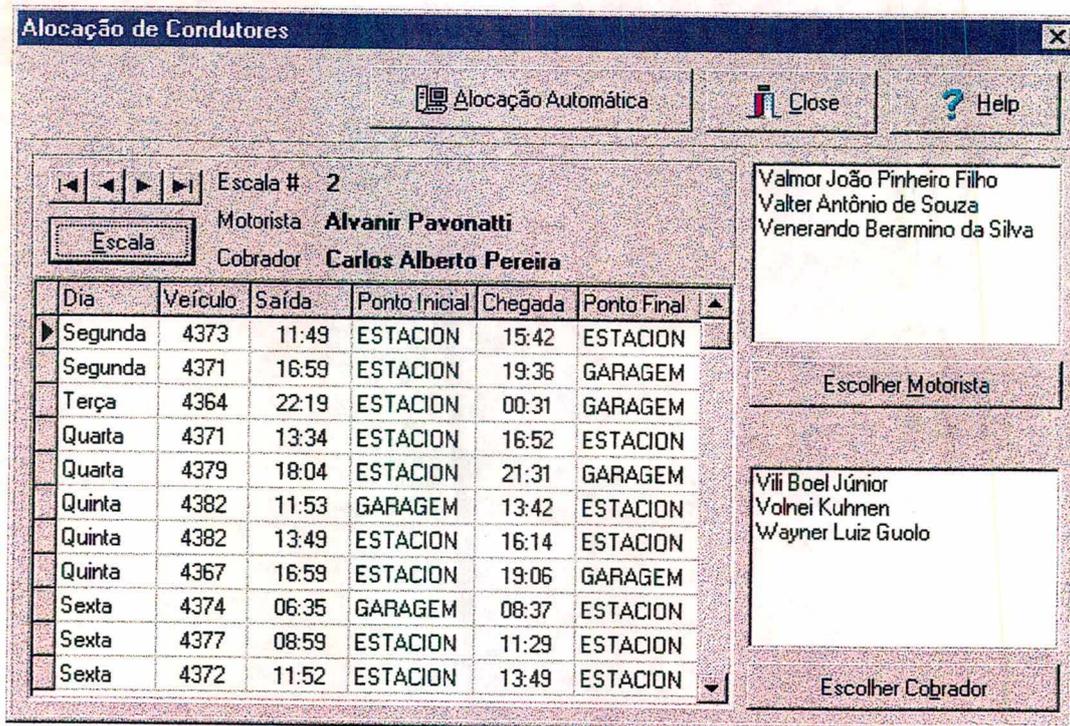


Figura 4.28. Janela de diálogo para Alocação dos Condutores.

4.3.5. Geração de Relatórios

O sistema *WinBUS* gera diversos relatórios impressos para consulta aos dados de cadastro, bem com dos planos operacionais gerados pelo sistema.

A figura 4.29 apresenta a janela de diálogo para geração dos relatórios do cadastro, que compreende as seguintes opções:

- a) relatório do cadastro da rede viária;
- b) relatório do cadastro de veículos;
- c) relatório do cadastro de condutores;
- d) relatório do cadastro de linhas e roteiros; e
- e) relatório do cadastro de horários das viagens.

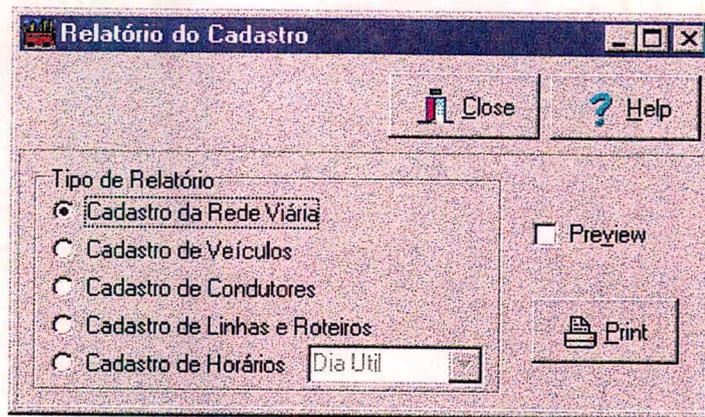


Figura 4.29. Janela de diálogo para geração dos Relatórios do Cadastro.

Na figura 4.30 é apresentada a janela de diálogo para geração dos relatórios de alocação, que compreende as seguintes opções:

- a) relatório de viagens não alocadas;
- b) relatório de escalas diárias;
- c) relatório do esquema semanal de distribuição de escalas;
- d) relatório de alocação dos veículos;
- e) relatório de formação de duplas; e
- f) relatório semanal de alocação dos condutores.

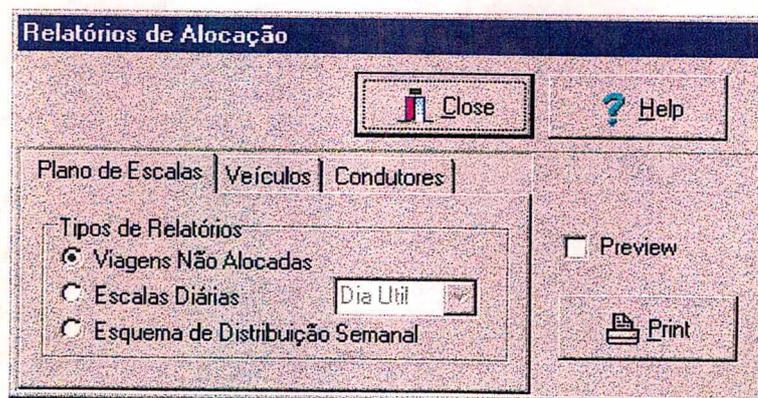


Figura 4.30. Janela de diálogo para geração dos Relatórios de Alocação.

A opção *Preview*, existente nestas janelas permite, quando assinalada, que os relatórios possam ser visualizados na tela do computador antes da impressão ser efetivada.

4.3.6. Diagrama de Carga e Consulta aos Planos de Alocação

O módulo de consulta existente no sistema *WinBUS* permite ao usuário obter informações sobre o perfil da demanda e sobre os planos de alocação de veículos e condutores.

O diagrama de carga, apresentado na figura 4.31, é útil para verificar o perfil da demanda e a forma como a mesma é atendida. O acesso a este diagrama é realizado a partir do *menu* principal do sistema ou usando os botões de acesso rápido das barras de ferramentas.

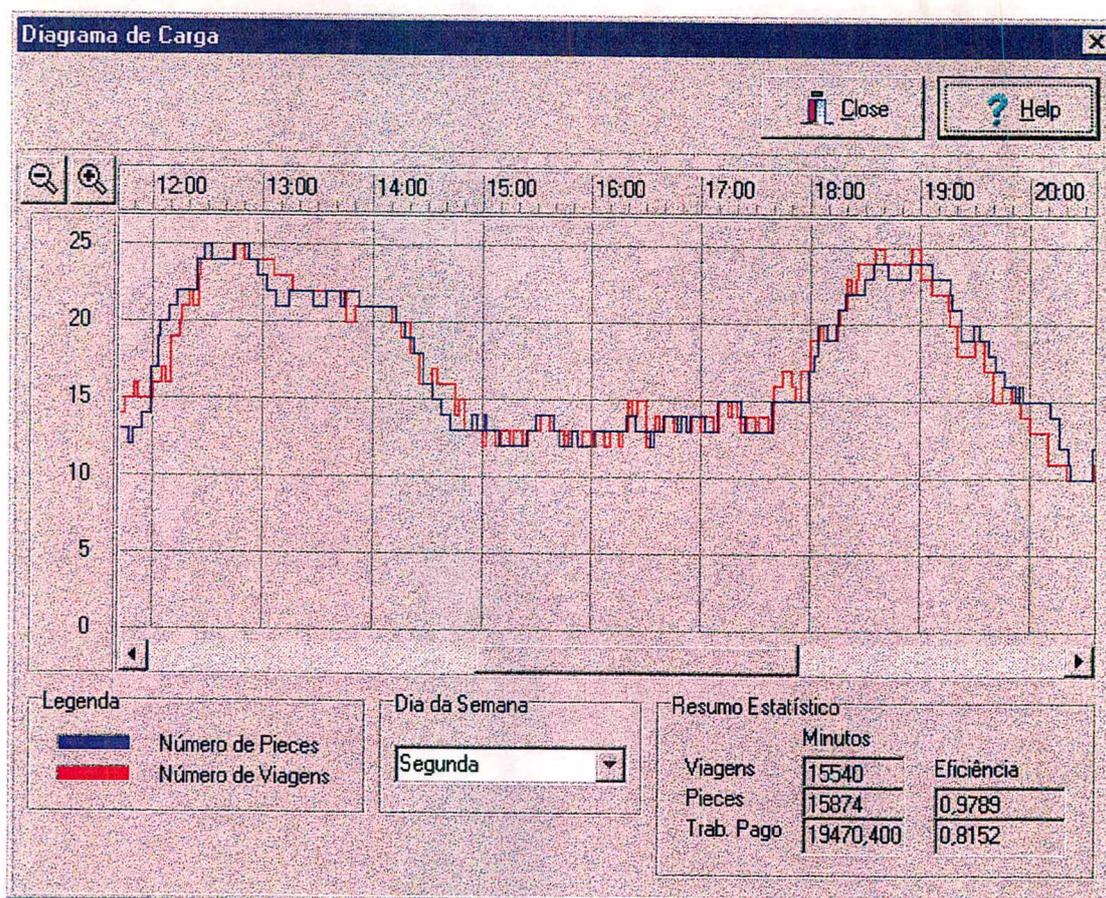


Figura 4.31. Janela de consulta ao Diagrama de Carga.

O diagrama de carga é composto por duas curvas, cujos registros são mantidos ao longo de todo dia, minuto a minuto, permitindo ao usuário identificar os períodos de pico na demanda. Uma destas linhas (vermelha) representa o número de viagens previstas, enquanto que a outra (azul) representa o número de *pieces* alocados para cobrir a demanda.

No canto inferior direito, o resumo estatístico apresenta o tempo total gasto na execução das viagens, o tempo total alocado aos *pieces* e o tempo total pago, este último considerando o acréscimo relativo às horas extras trabalhadas. Os indicadores de eficiência apresentados, por sua vez, demonstram, no caso dos *pieces*, a relação existente entre o tempo gasto no trabalho produtivo (viagens) e o tempo total de operação, o qual inclui pequenas paradas entre viagens, os tempos dos deslocamentos não produtivos e as operações com o abastecimento. O indicador de eficiência associado ao trabalho pago, por sua vez, mede a relação existente entre o custo do pessoal teoricamente necessário para operar os veículos (incluindo deslocamentos não operacionais, abastecimentos e pequenas paradas), e o custo efetivo realizado com o pessoal.

Estas duas medidas de eficiência permitem avaliar, isoladamente, o desempenho das duas primeiras etapas do planejamento, isto é, do processo de alocação dos veículos (geração dos blocos) e do processo de geração das escalas de trabalho.

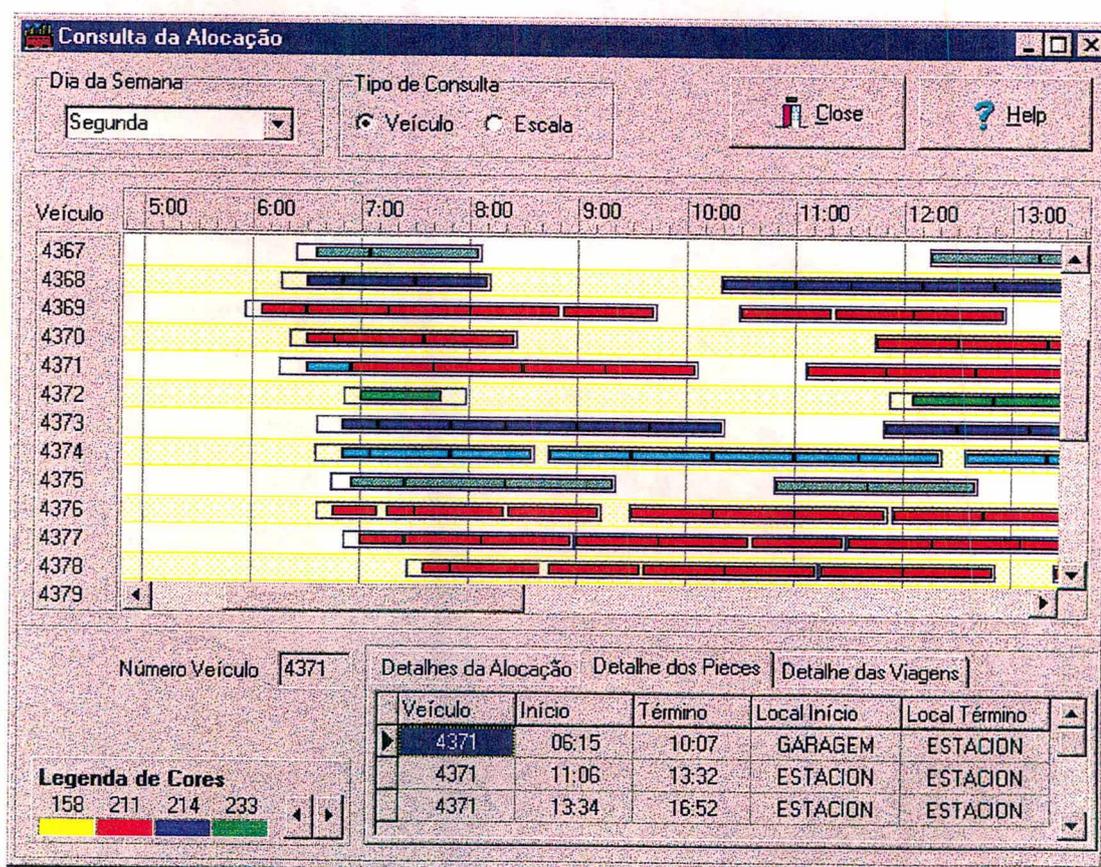


Figura 4.32. Janela de Consulta da Alocação, apresentando o plano operacional da frota.

A consulta aos planos de alocação da frota e condutores pode ser realizada na janela gráfica apresentada na figura 4.32, que pode ser aberta no *menu* principal do sistema ou usando os botões de acesso rápido das barras de ferramentas.

Nesta janela, o usuário dispõe opções de escolha para o dia da semana e o tipo de consulta desejada (por veículos ou por escalas). No canto inferior esquerdo, é apresentada uma legenda caracterizando a linha associada a cada cor da figura. Ao pressionar o *mouse* sobre o diagrama, obtém-se, nas pastas de *Detalhes*, as informações sobre a alocação (do veículo ou escala), com os respectivos *pieces* e viagem alocadas, relacionados com a escala ou veículo visado.

Outra forma de consultar o programa de alocação gerado consiste em abrir a janela de *Geração de Relatórios*, na qual o usuário poderá personalizar a pesquisa sobre a base de dados, a partir da definição dos seguintes elementos:

- a) campos a serem incluídos no relatório;
- b) critério de seleção dos registros de interesse;
- c) critério de ordenação dos registros selecionados.

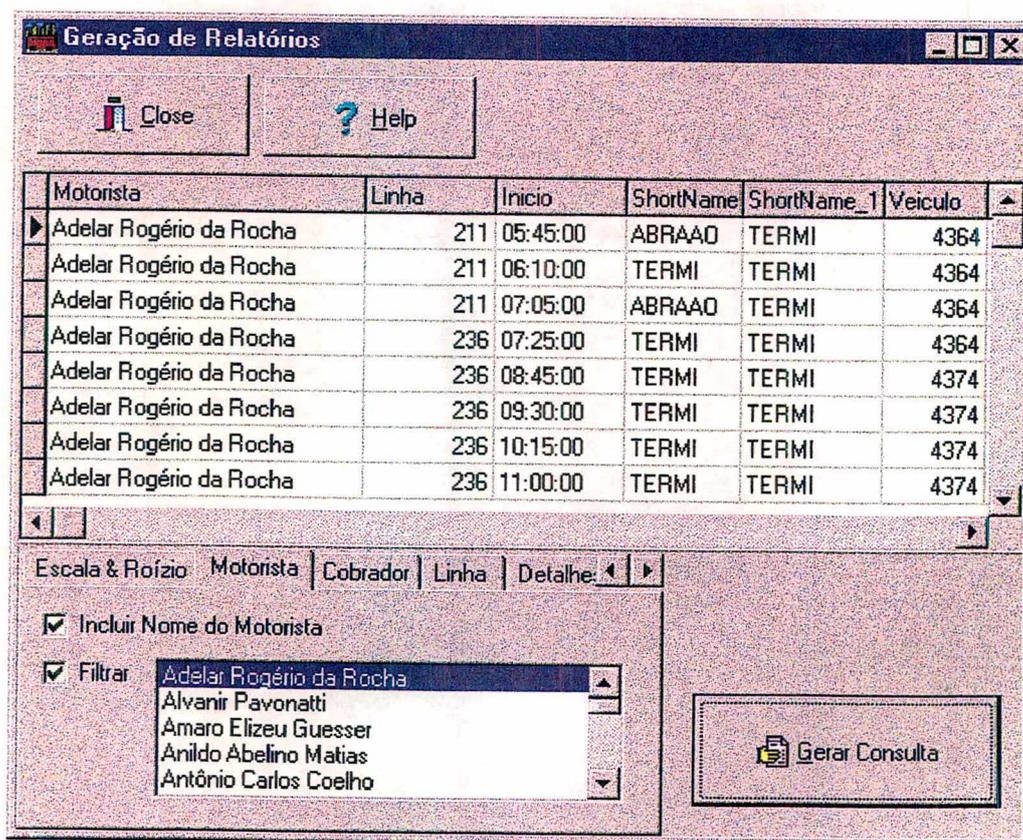


Figura 4.33. Janela de Geração de Relatórios, apresentando o resultado de uma busca sobre as viagens alocadas a um motorista em um dia da semana.

Esta janela de *Geração de Relatórios* é apresentada na figura 4.33, na qual é mostrado o resultado de uma pesquisa em que foram solicitados os registros das viagens (número da linha, início, origem, destino e número do veículo), ordenados pelo horário de saída, realizadas na “Segunda-Feira” pelo motorista “Adelar Rogério da Rocha”.

Este tipo de pesquisa pode ser realizado através das pastas de identificação dos campos disponíveis na base de dados, nas quais o usuário deve especificar as informações que deseja incluir no relatório, bem como os respectivos valores de interesse. Dado a flexibilidade apresentada pelo gerador de consultas, cabe ao usuário o cuidado de compor a especificação do relatório que atenda as suas necessidades.

4.3.7. Ajuda On-line

A *Ajuda on-line* é um manual de utilização do sistema que contém a descrição detalhada dos procedimentos, organizados sob a forma de um hipertexto. Os tópicos disponíveis são indexados de acordo com os tipos de operações realizadas pelo sistema, conforme mostra a janela da figura 4.34.

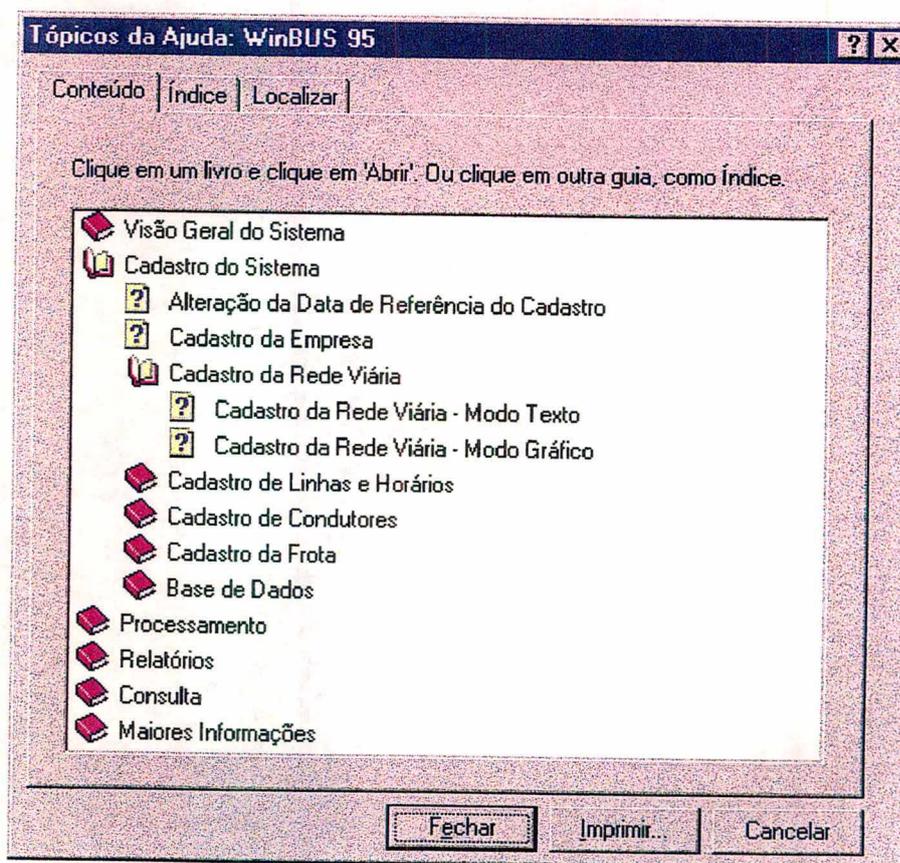


Figura 4.34. Janela de consulta aos Tópicos de Ajuda do sistema *WinBUS*.

A consulta aos tópicos de ajuda pode ser realizada de forma direta através da pasta do *Conteúdo*, ou usando o *Índice* e o *Localizar* para procurar tópicos com base em palavras ou frases. Para obter ajuda sobre uma janela em particular, na qual o usuário se encontra, pode-se pressionar a tecla *Help* existente na janela ou a tecla F1.

O módulo de *Ajuda On-line* contém, ainda, recursos para imprimir tópicos e realizar anotações pessoais. Para imprimir um tópico isolado, basta abrir a janela com o tópico desejado e ordenar a impressão através do *menu* ou da tecla existente na barra de ferramentas desta janela. Para imprimir um tópico ou um grupo de tópicos a partir da pasta do *Conteúdo*, o usuário deverá selecionar o título desejado e depois pressionar o botão *Imprimir*.

Além disto, para cada tópico de ajuda disponível, o usuário poderá associar uma anotação com o objetivo de registrar detalhes e esclarecimentos que julgar relevante. Para esta operação o usuário dispõe da janela *Anotar* que, ao ser acionada a partir do *menu* existente na janela de apresentação do tópico, permite a edição de um memorando.

4.4. Metodologia de Utilização do Sistema WinBUS

Na utilização do Sistema *WinBUS*, para o planejamento operacional das empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, é necessário considerar uma metodologia de trabalho, cujo objetivo é assegurar a coerência entre os dados cadastrados e plano de operação gerado pelo sistema. Esta metodologia é definida por uma seqüência de etapas, que em linhas gerais são apresentadas a seguir:

Etapa 1. Criação de um Cadastro

- 1.1. Criar um *diretório* para manutenção dos dados de um novo plano operacional.
- 1.2. Copiar os arquivos do *diretório* de um plano operacional existente para o diretório recém criado.
- 1.3. Limpar o conteúdo da base de dados recém criada.

Etapa 2. Atualização do Cadastro

- 2.1. Atualizar os dados cadastrais da empresa e a data em que o plano esta sendo atualizado.
- 2.2. Atualizar os dados do cadastro da rede, iniciando com os locais e, posteriormente, as ligações. Paralelamente, ajustar o grafo que define a rede.
- 2.3. Atualizar as linhas e os roteiros. Para cada roteiro, registrar os horários das viagens existentes em cada dia típico.

- 2.4. Atualizar o cadastro de condutores (motoristas e cobradores) e seus respectivos dados pessoais.
- 2.5. Atualizar o cadastro de veículos, iniciando com a definição das características técnicas dos modelos existentes, para em seguida incluir os veículos de cada modelo.
- 2.6. Atualizar a política de utilização da frota, definindo para cada linha os valores do *grau de ajuste* associados a cada modelo de veículo.

Obs.: Em caso da realização de modificações na base de dados que possam comprometer o plano operacional existente, é necessário refazer os procedimentos de alocação descritos nas etapas a seguir, sob pena de não se garantir a coerência entre os dados do cadastro e o plano operacional gerado.

Etapa 3. Definição dos Custos de Alocação

- 3.1. Atualizar os custos da frota.
- 3.2. Atualizar os custos e parâmetros de pessoal.

Etapa 4. Alocação de Veículos

Os procedimentos de alocação dos veículos deverão ser aplicados de modo isolado e independente, para cada dia típico da semana, conforme segue:

- 4.1. Ajustar os parâmetros de geração de blocos e escalas.
- 4.2. Definir o nível de risco e o grau de ajuste da frota que deverá ser considerado na alocação dos veículos.
- 4.3. Realizar a geração dos blocos verificando a existência de viagens não alocadas.
- 4.4. Verificar o resultado da alocação de cada dia típico, e, se necessário for, refazer manualmente a designação dos veículos alocados aos blocos.

Obs.: Se houver necessidade, realizar os procedimentos de alocação de veículos para outros valores do nível de risco, do grau de ajuste da frota e dos parâmetros de geração de blocos e escalas.

Etapa 5. Geração das Escalas Diárias

Os procedimentos de geração de escalas deverão ser aplicados de modo isolado e independente, para cada dia típico da semana, conforme segue:

- 5.1. Gerar o SCP (Problema de Cobertura de Conjuntos);
- 5.2. Definir o tamanho da população, o tipo de otimização desejada, e gerar a população de soluções iniciais.
- 5.3. Ativar o procedimento de otimização genética (*crossover*), acompanhando os resultados da evolução do processo.

- 5.4. Se o resultado obtido é satisfatório em termos do custo, número de escalas e quantidade de horas-extras, salvar o resultado na base de dados.

Obs.: Se houver necessidade de uma maior precisão nos resultados desta etapa ou ainda se é desejável melhorar o resultado obtido, deve-se refazer os procedimentos de geração de escalas considerando uma população de maior tamanho.

Etapa 6. Geração do Rodízio Semanal

- 6.1. Apagar eventuais planos de distribuição de escalas (rodízio semanal) existentes na base de dados.
- 6.2. Atualizar os parâmetros de geração do rodízio semanal de escalas.
- 6.3. Definir o tipo de rodízio que deverá ser implantado (método americano ou método europeu).
- 6.4. Para valores diversos do fator de equalização, realizar as operações de preparação dos dados, distribuição de escalas e inclusão dos resultados na base de dados.
- 6.5. Escolher, em função dos resultados obtidos, o valor do fator equalização mais adequado.
- 6.6. Realizar a distribuição das escalas semanais entre os motoristas e cobradores da empresa.

Etapa 7. Emissão de Relatórios e Realização de Consultas

A emissão de relatórios e a realização de consultas poderá ser feita sem restrições após a conclusão de todas as etapas acima descritas, ou, dependendo do tipo de informação desejada, após a respectiva etapa de geração da informação. Assim, relatórios ou consultas que envolvam apenas dados cadastrais poderão ser realizados após a conclusão da segunda etapa, enquanto que aqueles que implicam no conhecimento do pessoal alocado somente poderão ser realizados após a sexta etapa desta metodologia.

Alguns relatórios, contudo poderão ser emitidos após etapas parciais do processamento, como é o caso dos relatórios de escalas dos dias típicos (etapa 5) e os relatórios de alocação de veículos (etapa 4).

CAPÍTULO V

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Considerações Iniciais

A validação de sistemas computacionais, é uma tarefa que envolve não somente os aspectos numéricos, tais como valor da função objetivo, iterações e tempo de processamento. É necessário observar, também, outros aspectos, já discutidos no capítulo IV, como por exemplo: características funcionais, interface, flexibilidade e possibilidade de interação com outros sistemas.

Em relação ao aspecto numérico propriamente dito, embora existam diversos trabalhos publicados na literatura, que tratam de modelos, algoritmos e sistemas para resolução de problemas relacionados com a alocação de veículos e problemas relacionados com a alocação de condutores (veja por exemplo [BAL80], [BAL83], [BAL85], [BLA80], [BLA88], [BOD78], [BOD81], [BOD83], [CED88], [DES88], [DES89], [HOF81], [MIT81], [SMI81] e [WRE95]), não foi encontrado nenhum que dispusesse de dados e resultados completos com os quais se pudesse fazer uma comparação. Além disso, os trabalhos que tratam dos dois problemas em conjunto, referem-se às características dos sistemas desenvolvidos, e não aos resultados numéricos propriamente ditos.

Assim sendo, na falta de uma alternativa mais adequada, e com o objetivo de avaliar o sistema do ponto de vista da qualidade dos resultados obtidos, serão realizadas algumas considerações sobre a situação atual existente e o plano operacional realizado com o sistema, para duas empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros com sede em Florianópolis (SC). Os dados de cadastro e o plano operacional gerado pelo *WinBUS* estão disponíveis, juntamente com um demonstrativo do sistema, nos disquetes que acompanham este trabalho.

5.2. Análise dos Resultados Obtidos para a ESTRELA

Os dados utilizados para geração do plano de operação para a ESTRELA (Transporte Coletivo Estrela Ltda.), foram obtidos a partir do Guia de Transporte Coletivo, publicado pelo Núcleo de Transportes da Prefeitura Municipal de Florianópolis, no qual constam os diversos roteiros seguidos pela empresa em questão, e seus respectivos horários de saída.

A síntese dos resultados obtidos com a geração do plano operacional, neste caso, pode ser apresentada sob a forma de alguns gráficos e tabelas.

No quadro 5.1, observa-se o tempo total (em minutos) gasto na execução das viagens realizadas semanalmente. Para que estas viagens possam ser executadas, é necessário a realização do abastecimento e de alguns deslocamentos vazios entre garagens e os pontos de saída e chegada. Além disto, pequenas paradas entre viagens não podem ser desconsideradas, pois nestes casos o veículo continua mobilizado na execução do plano de operação.

Indicadores de Desempenho	Dia da Semana			Total Semanal
	Dia Útil	Sábado	Domingo	
Tempo Operacional (min.)				
Em Viagens	32.725	17.085	10.685	191.395
Em Pieces	34.770	17.626	11.253	202.729
Veículos Alocados	52	24	12	
Taxa de Utilização Produtiva	94,1%	96,9%	95,0%	94,4%

Quadro 5.1. Indicadores de desempenho para o processo de alocação da Frota.

Para uma melhor avaliação do tempo total em que os veículos se encontram mobilizados, foi calculado a soma dos tempos dos *pieces*. Nesta soma estão incluídos os tempos correspondentes aos deslocamentos vazios e pequenas paradas, os quais são considerados improdutivos. A taxa de utilização produtiva, dada pela relação entre tempo total das viagens e o tempo alocado aos *pieces*, pode ser considerada uma medida de quão “compacto” estão alocadas as viagens, e que neste caso foi da ordem de 94,4%. Em outras palavras, 94,4% do tempo em que os veículos permaneceram mobilizados na execução do plano operacional, foram gastos na realização de viagens produtivas.

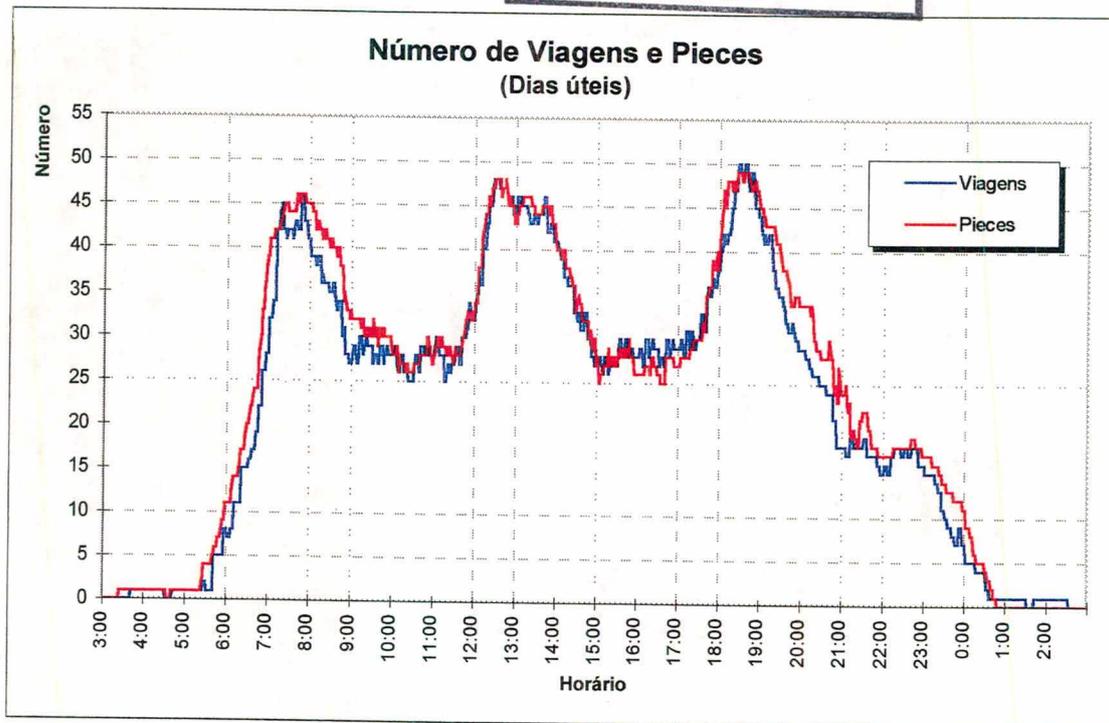


Figura 5.1. Gráfico demonstrativo do perfil da demanda nos dias úteis.

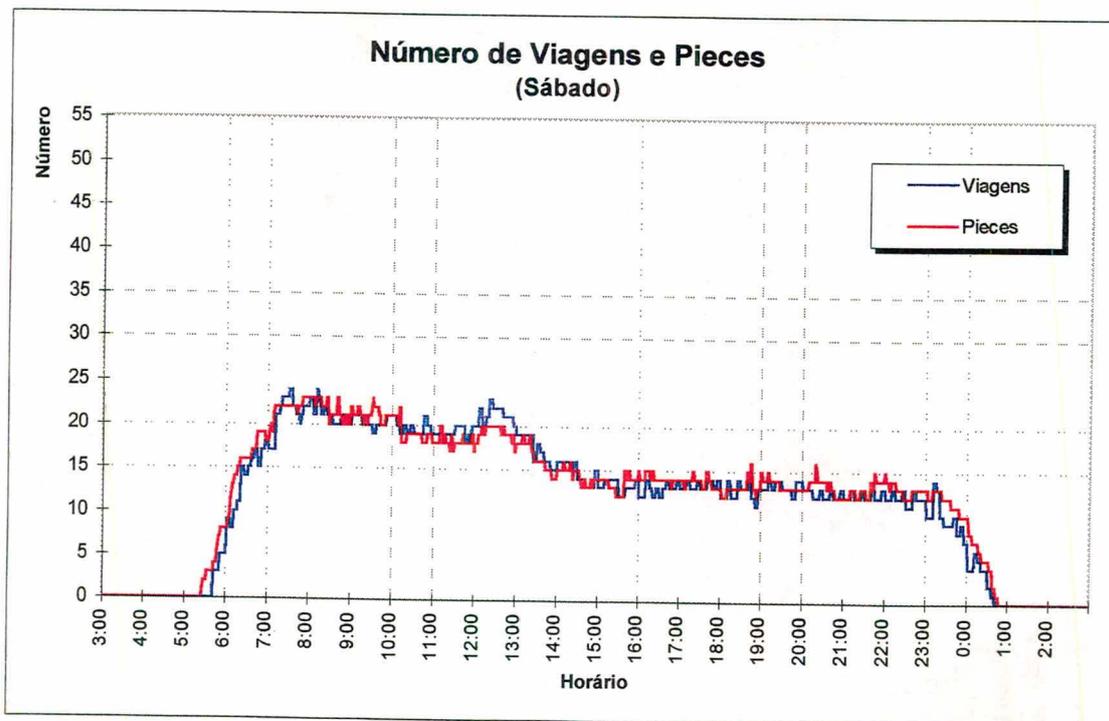


Figura 5.2. Gráfico demonstrativo do perfil da demanda nos sábados.

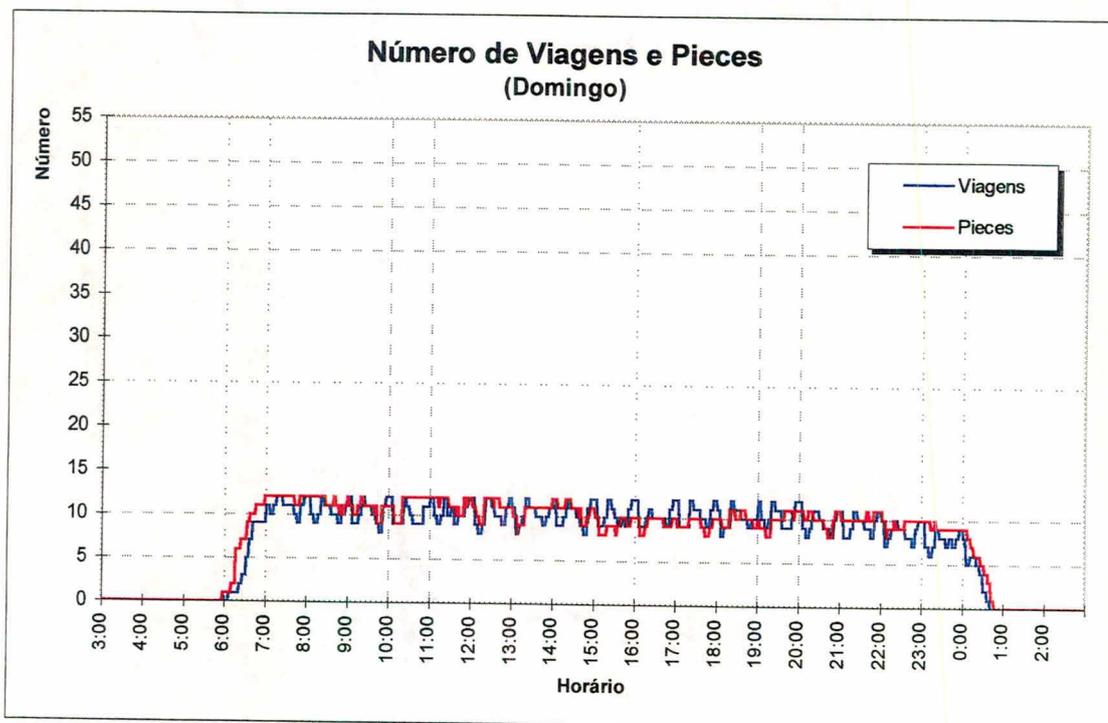


Figura 5.3. Gráfico demonstrativo do perfil da demanda nos domingos.

Outra medida de eficiência que deve ser considerada na análise, diz respeito ao número de veículos utilizados. Observa-se nos gráficos das figuras 5.1, 5.2 e 5.3 os seguintes dados referentes ao número máximo de viagens e peças simultâneos:

Indicadores de Desempenho	Dia da Semana		
	Dia Útil	Sábado	Domingo
Viagens simultâneas (máx.)	50	24	12
Peças simultâneas (máx.)	49	23	12
Número de veículos alocados	52	24	12
Número de veículos adicionais	2	0	0
Veículos adicionais (%)	4,0%	0,0%	0,0%

Quadro 5.2. Comparação entre viagens, peças e veículos alocados.

Em termos teóricos, considerando um plano semanal, o número de veículos necessários não poderia ser inferior a 50, tendo em vista que este é número correspondente a máxima quantidade de viagens realizadas simultaneamente.

Portanto, considerando que foram alocados 52 veículos, conclui-se que o plano gerado não utilizou mais do que 4,0% de veículos além do que seria estritamente necessário para realizar as viagens previstas na programação.

Por outro lado, com relação a geração de escalas, foram considerados os parâmetros do esquema de trabalho acordado por empresas e condutores da região de Florianópolis, através dos dissídios trabalhistas, o qual apresenta as seguintes características básicas:

- a) horas normais de trabalho 06:40 horas
- b) máximo número de horas extras 02:00 horas
- c) intervalo mínimo para descanso 00:20 horas
- d) intervalo máximo para descanso 01:00 horas
- e) máximo período de trabalho sem descanso 05:15 horas
- f) adicional para realização de horas extras..... 60 %

Alguns indicadores de desempenho do processo de geração de escalas podem ser observados no quadro 5.3.

Indicadores de Desempenho	Dia da Semana			Total Semanal
	Dia Útil	Sábado	Domingo	
Número de Escalas	104	55	37	612
Tempo Operacional (min.)				
Em Viagens	32.725	17.085	10.685	191.395
Em Pieces	34.770	17.626	11.253	202.729
Trabalho Normal Pago (minutos)	41.600	22.000	14.800	244.800
Trabalho Extra Pago (minutos)	987	20	-	4.955
Trabalho Equivalente (minutos)	43.179	22.032	14.800	252.728
Índice de Produtividade	80,5%	80,0%	76,0%	80,2%
Trabalho Extra / Escala (minutos)	9,5	0,4	-	8,1

Quadro 5.3. Indicadores de desempenho para o processo de geração de escalas, na qual o Trabalho Equivalente é calculado considerando um adicional de 60% referente às horas extras.

Neste quadro, com o objetivo de avaliar especificamente a eficiência do processo de alocação de condutores, considerou-se o tempo de operação associado aos *pieces* como sendo o necessário em termos do pessoal alocado.

De acordo com o esquema de trabalho considerado, um condutor pode dar cobertura a viagens inseridas em um período máximo de 09:40 horas (06:40 horas normais + 02:00 horas extras + 01:00 hora de descanso). Analisado o gráfico na figura 5.1, observa-se nos dias úteis a ocorrência de três períodos de pico bastante acentuados, sendo que entre o primeiro e o último, existe uma defasagem da ordem de 11:00 horas. Como consequência deste fato, não é possível elaborar uma escala viável que contenha viagens

do primeiro e do terceiro pico. Em outras palavras, teoricamente serão necessários pelo menos 46 condutores para dar cobertura aos *pieces* do primeiro período de pico, os quais não atuarão no terceiro, e outros 49 para o terceiro período de pico, e que não atuarão no primeiro. Ao todo, serão necessários, portanto, no mínimo 95 condutores. No plano gerado, foram criadas 104 escalas de trabalho, o que representa um adicional da ordem de 9,5 % em relação ao valor teórico do número de condutores a serem contratados.

Outro fator que deve ser observado nesta avaliação, é o índice de produtividade, que representa a relação entre o valor do trabalho realizado e o valor efetivamente pago. Considerando os dias úteis, que representam mais de 80% do volume de trabalho realizado, observa-se um índice de eficiência da ordem de 80,5%. Se em princípio este valor é considerado não muito elevado, é necessário ponderar que, teoricamente é impossível este índice superar o limite de 91,5%. Este limite é determinado considerando que idealmente toda a carga de trabalho poderá ser absorvida por 95 condutores, cada um dos quais trabalhando exatamente 06:40 horas ou 400 minutos [$34770 \div (95 \times 400)$]. Em outras palavras, existe uma parcela de ineficiência que se justifica em função do perfil da demanda e das características do esquema de trabalho negociados entre empresas e condutores nos dissídios trabalhistas.

Em relação ao processo de distribuição semanal de escalas, os resultados obtidos podem ser considerados extremamente positivos, conforme observa-se nas distribuições de frequência apresentadas nos quadros 5.4 e 5.5.

Trabalho Semanal Efetivo		
Horas Trabalhadas	Freqüência	%
28	0	0,0%
29	95	91,3%
30	4	3,8%
31	0	0,0%
32	5	4,8%
33	0	0,0%
Total	104	100,0%

Quadro 5.4. Distribuição de frequência dos tempos totais das viagens alocadas semanalmente aos condutores (trabalho efetivo).

Horas Extras Semanais		
Horas Extras	Freqüência	%
00:00	10	9,6%
00:15	10	9,6%
00:30	9	8,7%
00:45	13	12,5%
01:00	18	17,3%
01:15	27	26,0%
01:30	17	16,3%
01:45	0	0,0%
02:00	0	0,0%
Total	104	100,0%

Quadro 5.5. Distribuição de freqüência da quantidade de horas extras alocadas semanalmente aos condutores.

Embora o esquema europeu de distribuição semanal de escalas não seja o adotado pelas empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros na cidade de Florianópolis, a escolha deste modo de distribuição deu-se com o objetivo de apresentar a capacidade do sistema em homogeneizar a carga de trabalho entre condutores.

Conforme pode ser observado nas distribuições de freqüência, 95% dos condutores foram contemplados com uma carga de trabalho que varia entre 29 e 30 horas semanais de trabalho efetivo (tempo das viagens), e 72% destes condutores recebem adicionais sobre horas extras que variam entre 0:30 e 01:30 horas por semana. Como parâmetro de referência, considere o fato de que, em um processo convencional de distribuição, no qual todos os condutores realizam a mesma escala durante os dias úteis, estes intervalos seriam bem mais amplos: entre 15 e 40 horas semanais de trabalho efetivo e entre 00:00 e 04:00 horas extras semanais.

Na época da realização desta análise não se dispunha do plano de operação desenvolvido pela empresa. De fato, esta empresa já vinha utilizando um sistema computacional experimental, que deu origem ao *WinBUS 95*, e não mantinha os dados referentes às programações das escalas praticadas anteriormente. Assim ficou prejudicada uma comparação direta entre os resultados apresentados pelo modelo proposto e os desenvolvidos sem ajuda do sistema computacional.

Desta forma, para não introduzir a influência do sistema experimental na geração das escalas, um dos parâmetros que pode ser considerado nesta avaliação, é o índice de utilização dos veículos adotado no cálculo tarifário. Segundo este índice, para cada ônibus em operação na cidade de Florianópolis/SC, é alocado em média um custo de pessoal equivalente a 2,49 duplas. Considerando que nos dias úteis foram alocados 52

veículos e o equivalente a 43.179 minutos de trabalho, e ainda que cada dupla nominalmente produz 400 minutos de trabalho por dia, conclui-se que para a alocação em questão o índice de utilização de veículos é da ordem de:

$$I_{Util} = \frac{43.179}{52 \times 400} = 2,08 \text{ duplas equivalentes / veículo}$$

Sob este ponto de vista, o custo de pessoal obtido com a alocação realizada representa 83,5% ($2,08 \div 2,49$) do custo médio observado nas empresas, segundo o cálculo da tarifa. Fundamentalmente, esta diferença se justifica pela excessiva utilização de horas extras por parte das empresas, as quais apresentam um custo adicional de 60% em relação às horas normais de trabalho.

Em relação às horas extras, observa-se que no caso da alocação realizada, apenas 3,17% das horas semanais são extraordinárias, conforme apresentado no cálculo abaixo:

$$\%HorasExtras = \frac{4.955}{244.800 + 4.955} = 1,98\%$$

Este valor está bastante abaixo daqueles observados nas empresas em geral, as quais chegam a utilizar até 20% de horas extras ao longo de uma semana.

Finalmente, há de se considerar que, apesar dos acordos trabalhistas preconizarem para cada condutor a realização diária de 06:40 horas de trabalho normal, eventualmente acrescidas de 02:00 horas extraordinárias, é comum a geração manual de escalas que não atendem a estas especificações. Tal procedimento, tem por objetivo evitar a implantação de escalas pouco produtivas. Contrariamente ao que acontece no sistema *WinBUS 95*, este artifício, além de não atender aos acordos trabalhistas firmados, representa um risco em potencial para o condutor e para o próprio usuário, na medida em que submete o motorista a uma carga de trabalho acima do que seria desejável.

5.2. Análise dos Resultados Obtidos para a EMFLOTUR

Com o objetivo de realizar uma comparação mais realista em termos das escalas geradas, tanto pelas empresas como pelo sistema apresentado, optou-se por realizar um segundo estudo, em uma empresa que tem o seu plano de operação gerado manualmente, e que sabidamente opera segundo as regras trabalhistas vigentes. A empresa escolhida foi a EMFLOTUR (Empresa Florianópolis Ltda.), que opera com um plano operacional desenvolvido pelos controladores de tráfego da empresa, com base em procedimentos manuais, o qual vem sendo gradualmente melhorado ao longo dos últimos dois a três anos.

Para possibilitar a comparação dos resultados obtidos com a solução adotada atualmente pela empresa, foi elaborado um resumo demonstrativo das escalas de trabalho em vigor, com os indicativos da quantidade de veículos alocados e a quantidade de horas trabalhadas (veja o quadro 5.6).

	Dias Úteis	Sábados (*) Domingos	Semanal
PESSOAL			
Número de Duplas	61	< 61	61
Trab. Normal (min)	24.400	< 24.400	146.400
Trab. Extra (min)	1.185	870	6.795
Trab. Equivalente (min)			157.272
NÚMERO DE VEÍCULOS	31	< 31	31

(*) Os dados disponíveis encontram-se agregados para os finais de semana.

Quadro 5.6. Quadro resumo demonstrativo das escalas de trabalho em vigor na EMFLOTUR, obtidas com a utilização de procedimentos manuais.

Para o desenvolvimento do plano operacional com o sistema *WinBUS 95*, foram obtidos, junto aos setores de tráfego e de informática da empresa, as informações disponíveis relativas às linha, roteiros, horários, frota e políticas de alocação mantidas pela empresa. Considerando o perfil das escalas de trabalho descritas para a ESTRELA, obteve-se os resultados que se encontram resumidos, para fins de comparação, no quadro 5.7.

	Dias Úteis	Sábados	Domingos	Semanal
PESSOAL				
Número de Duplas	61	36	25	61
Trab. Normal (min)	24.400	14.400	10.000	146.400
Trab. Extra (min)	715	71	76	3.722
Trab. Equivalente (min)				152.355
NÚMERO DE VEÍCULOS	30	15	11	30

Quadro 5.7. Quadro resumo demonstrativo das escalas de trabalho propostas para a EMFLOTUR, com base no plano operacional gerado pelo *WinBUS*.

Conforme pode ser observado nos resumos apresentados, foram geradas escalas semanais de trabalho para 61 duplas. Comparando este resultado com as escalas fornecidas pela própria empresa, observa-se que não ocorreu redução no número de duplas necessárias.

Contudo, em relação ao trabalho extra realizado, a redução observada é significativa. Nas escalas propostas, deverá ser pago semanalmente 3.722 minutos de trabalho extra,

enquanto que nas escalas fornecidas pela empresa a quantidade total de trabalho extraordinário chega a contabilizar 6.795 minutos semanais. Conclui-se portanto, que neste aspecto houve uma redução percentual de 45,2 %.

Transformando estes indicadores em horas semanais equivalentes de trabalho, levando em consideração que ao custo das horas extras são acrescidos 60 %, de acordo com a convenção coletiva de trabalho, conclui-se que a empresa desembolsa, no caso das escalas fornecidas, a título de folha de pagamento, o valor equivalente a 157.272 minutos de trabalho. No caso das escalas geradas, este valor fica reduzido para 152.355 minutos de trabalho, representando uma redução percentual de 3,1 % na folha de pagamento.

Outro aspecto que deve ser ressaltado em relação ao resultado proposto, é a possibilidade da empresa utilizar um frota de apenas 30 veículos, enquanto que no caso das escalas fornecidas pela empresa, são necessários 31 veículos, o que corresponde a um acréscimo de 3,3 % em relação ao tamanho da frota proposta. Estes valores, em ambos os casos, não leva em consideração os veículos reservas necessários.

5.3. Considerações Finais

O desenvolvimento de planos operacionais em empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, seja ele realizado por meio de métodos manuais ou com o auxílio de um sistema computacional, sempre é acompanhado de um árduo e moroso processo de coleta de dados, o qual não pode ser evitado. Contudo, a etapa de processamento tem no método computacional, um aliado de grande valor.

No processo de geração de escalas dos dias típicos para a ESTRELA, foram testados em torno de 1.250.000 planos operacionais (escalas para condutores), enquanto que para a EMFLOTUR, foram testados 620.000 planos. No caso da geração de manual, os especialistas centralizam a sua atenção na geração de apenas uma única escala para cada dia típico.

Segundo informações do pessoal envolvido com este tipo de tarefa, é comum ser gasto na ordem de uma ou duas semanas para refazer manualmente as escalas, nos casos de inclusão de alguns horários, ou mesmo de algumas linhas novas. No caso em que a programação é totalmente refeita, esta tarefa poderá levar, segundo se observou, até três meses, incluindo-se, neste caso, a tarefa de levantamento de dados.

No caso dos planos gerados pelo sistema *WinBUS 95*, este tempo é substancialmente reduzido. Utilizando um microcomputador PENTIUM 200 MHz, foi gasto em torno de uma hora de processamento para gerar a alocação dos veículos nos diversos dias típicos,

as respectivas escalas diárias de trabalho, além da distribuição eqüitativa destas escalas entre os condutores da empresa ESTRELA. Para a empresa EMFLOTUR, este tempo foi de apenas 30 minutos.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

Com a execução deste trabalho, algumas contribuições teóricas e práticas foram apresentadas.

Do ponto de vista teórico, a formulação dos modelos e algoritmos utilizados, apresentam características não observadas na literatura pesquisada, como por exemplo a consideração de fatores subjetivos (definição da política de alocação da frota), a consideração de tolerâncias nos horários previstos para saída, a consideração de variação nos tempos de execução das viagens, entre outros.

Do ponto de vista prático, a maior virtude do trabalho consiste na verificação da viabilidade em desenvolver-se um sistema de apoio à decisão para o planejamento operacional de empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros, e na demonstração da capacidade deste tipo de sistema em oferecer respostas de boa qualidade em um tempo razoável, compatível com as situações nas quais a sua utilização se faz recomendada e até necessária. Conforme se verificou, o tempo gasto no desenvolvimento de planos operacionais, com o auxílio do sistema proposto, geralmente consome algumas horas de trabalho, contrastando com as semanas e até meses de trabalho intenso por parte dos especialistas, segundo o relato de alguns especialistas da área. Deve-se ressaltar, ainda, que os planos gerados por estes especialistas, por serem obtidos de modo empírico, raramente apresentam um compromisso firme com a minimização de custos, a eficiência e a racionalização no uso dos recursos disponíveis.

Conforme pode ser observado no estudo realizado para a EMFLOTUR, os ganhos obtidos em um caso real, relacionados com a redução de frota e com a redução da folha de pagamento, são significativos. Embora seja um valor pequeno em termos percentuais (na ordem de 3 %), a redução de um veículo na frota corresponde a redução dos investimentos na ordem de US\$ 100.000,00. Já do ponto de vista da folha de pagamento, esta redução representa uma economia anual da ordem de US\$ 40.000,00.

Outro fato importante, verificado com o uso deste tipo de sistema, é a possibilidade de quebra de alguns paradigmas existentes, gerados a partir de conclusões precipitadas ou de análises inconsistentes. Como estes paradigmas são de difícil verificação, sem a realização de um trabalho extenso e demorado, a sua aceitação, na prática, se torna uma consequência natural. O uso excessivo de horas extras, por exemplo, com o objetivo de evitar a contratação de condutores e, conseqüentemente, reduzir os custos com pessoal, é uma prática adotada indiscriminadamente pelas empresas, e que nem sempre produz o efeito de redução de custos desejado pela gerência.

O sistema desenvolvido, entretanto, não pode ser considerado como um *software* de otimização por excelência, e nem ser comparado com outros algoritmos, do ponto de vista do tempo de processamento. Com o objetivo de atender uma gama bastante diversificada de situações, e a possibilidade de aceitar novas extensões, o sistema teve de ser desenvolvido de modo a comprometer parte de seu desempenho.

Se por um lado a possibilidade de ajuste dos modelos desenvolvidos, através de um conjunto de parâmetros, pode ser considerado um dos pontos fortes do sistema, por outro lado é necessário ponderar que, neste fato, também reside a origem de uma série de problemas encontrados na prática. Em outras palavras, a possibilidade de ajuste neste conjunto de parâmetros pode fazer do planejamento um processo caótico, caso não sejam seguidas algumas orientações básicas. Apesar do sistema ter sido desenvolvido sobre uma plataforma bastante amigável, e com o uso de interfaces gráficas, que facilitam o entendimento e operação do mesmo, deve-se reconhecer a necessidade de treinamento do usuário para que este possa tirar proveito de toda a potencialidade do sistema. Neste sentido, o entendimento dos modelos e algoritmos utilizados, mesmo que superficialmente, pode ser de grande ajuda nos casos de realização do “ajuste fino” de um plano operacional em estudo.

6.2. Recomendações

Deve-se considerar o sistema de apoio a decisão apresentado neste trabalho, como um protótipo que deve continuar sendo desenvolvido, pois diversos aspectos ainda não estão suficientemente explorados, e merecem algum estudo adicional.

Em primeiro lugar, recomenda-se a realização de uma maior quantidade de testes práticos, a fim de se aumentar a confiabilidade sobre o sistema. A realização destes testes em ambientes experimentais, poderá indicar a necessidade de pequenos ajustes nos modelos elaborados. Além disto, estes testes também poderão ser importantes para

detectar as maiores dificuldades encontradas pelos usuários, especialmente no que diz respeito aos aspectos de melhoramento da interface desenvolvida.

Em segundo lugar, é necessário desenvolver um subsistema de apoio ao usuário, nos moldes de um sistema especialista, que apresente indicações claras a respeito dos ajustes necessários nos parâmetros dos modelos, com vistas a se alcançar os objetivos fixados pela gerência da empresa. Tal subsistema permitiria a utilização do *WinBUS* por pessoas menos habilitadas.

Em terceiro lugar, propõe-se a realização de estudos com o objetivo de reduzir o tempo de processamento. É notório o fato de que os problemas de alocação de veículos e condutores são NP-completos. Assim sendo, o tempo necessário para a elaboração dos planos de operação, em empresas de maior porte, pode ser sensivelmente aumentado. Uma estratégia que pode reduzir significativamente o tempo de processamento, consiste em particionar o problema original em um conjunto de subproblemas de menor dimensão, de modo que se possa resolvê-los de modo independente dos demais. Considerando que este procedimento de particionamento tende a apresentar resultados piores que os obtidos na solução do problema original, faz-se necessário verificar os efeitos desta simplificação nos indicadores de desempenho, avaliando se os mesmos podem ser aceitos.

BIBLIOGRAFIA

- [AGA90] AGAPIOU, J. S. (1990). "Optimization of single-stage multifunctional systems," *Proceedings of Manufacturing International '90*, p.289-99 vol.1.
- [AND94] ANDERSON, Edward J.; FERRIS, Michael C. (1994). "Genetic algorithms for combinatorial optimization: the assembly line balancing problem," *ORSA Journal on Computing*, Vol. 6, No. 2, 161-173.
- [ANT91] "Transportes Públicos Refazem Cidades" (1991). Relatório Técnico produzido no 8º Congresso da Associação Nacional de Transportes Públicos - ANTP, Junho de 1991, Fortaleza.
- [BAE91] BAECK, T.; HOFFMEISTER, F.; SCHWEFEL, H. P. (1991). "A Survey of Evolution Strategies," *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers
- [BAG91] BAGCHI, S.; UCKAN, S.; MIYABE, Y.; KAWAMURA, K. (1991). "Exploring Problem-Specific Recombination Operators for Job-Shop Scheduling," *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers.
- [BAL80] BALL, Michael (1980). *A comparison of relaxations and heuristics for certain crew and vehicle scheduling*. Presented at National ORSA/TIMS Meeting, Washington DC.
- [BAL83] BALL, Michael; BODIN, Lawrence; DIAL, Robert (1983). "A matching based heuristic for scheduling mass transit crews and vehicles," *Transportation Science*, Vol. 17, No. 1, 4-31.
- [BAL84] BALL, Michael; ASSAD, Arjang; BODIN, Lawrence; GOLDEN Bruce (1984). "Garage location for urban mass transit system," *Transportation Science*, Vol. 18, No. 1, 56-75.

- [BAL85] BALL, Michael; ROBERTS, Anito (1985). "A graph partitioning approach to airline crew schedule," *Transportation Science*, Vol. 19, No. 2, 107-126.
- [BEA87] BEASLEY, J. E. (1987). "An algorithm for set covering problem", *European Journal of Operations Research* 31, 85-93.
- [BEA90] BEASLEY, J. E. (1990). "OR-Library: distributing test-problems by electronic mail", *Journal of the Operational Research Society* 41(11), pp. 1069-1072.
- [BEA93a] BEASLEY, D.; BULL, D. R.; MARTIN, R. R. (1993). "An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals," *University Computing*, Vol. 15, No. 2, 58-69.
- [BEA93b] BEASLEY, D.; BULL, D. R.; MARTIN, R. R. (1993). "An Overview of Genetic Algorithms: Part 2, Research Topics," *University Computing*, Vol. 15, No.4, 170-181.
- [BEA94] BEASLEY, J. E.; CHU, P. C. (1994). "A Genetic Algorithm for the Set Covering Problem", The Management School - Imperial College, July 1994.
- [BEN68] BENNET; B.; POTTS, R. (1968). "Rotating roster for a transit system". *Transportation Science* 2(1), 14-34.
- [BER88] BERTRAM, H.-H.; WINCKLER, J. (1988). "Scheduling on microcomputers using MICROBUS". In: Daduna, J. R. and Wren, A. (Eds.) Computer-aided transit scheduling. *Lecture notes in economics and mathematical systems*, 308. Springer-Verlag, Berlin.
- [BIE90] BIEGEL, Daverns (1990). "Genetic Algorithms and Job Shop Scheduling," *Proceedings of the 12th Annual Conference on Computers and industrial Engineering*.
- [BLA80] BLAIS, J.-Y.; ROUSSEAU, J.-M. (1980). *HASTUS: an evaluation model for drivers union negotiation in transit companies*. Publications 163. Centre de Recherche sur les Transports. Universite de Montreal.
- [BLA88] BLAIS, J.-Y.; ROUSSEAU, J.-M. (1988). "Overview of HASTUS Current and Future Versions," In J. R. Daduna, A. Wren, Eds, *Computer-Aided Transit Scheduling*, pp. 175-187. Springer-Verlag, Berlin.

- [BLA93] BLANTON Jr., Joe L.; WAINWRIGHT, Roger L. (1993). "Multiple vehicle routing with time and capacity constraints using genetic algorithms," *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, July 1993, 452-459.
- [BOD78] BODIN, L.; ROSENFELD, D.; KYDES, A. (1978). "UCOST - A micro approach to a transit planing problem". *J. Urban Anal.*, 5(1), 47-69.
- [BOD81] BODIN, L.; ROSENFELD, D.; KYDES, A. (1981). "Scheduling and estimation techniques for transportation planning". *Computing Ops. Res.* 8, 25-38.
- [BOD83] BODIN, Lawrence; GOLDEN, Bruce; ASSAD, Arjang; BALL, Michael (1983). "Routing and scheduling of vehicles and crews - The state of the art," *International Journal of Computers and Operations Research*, Vol. 10, No. 2, 63-211.
- [BRU93a] BRUNS, R. (1993). "Direct Chromosome Representation and Advanced Genetic Operators for Production Scheduling," *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms* (ed. Stephanie Forrest) Morgan Kaufmann Publishers
- [BRU93b] BRUNS, R. (1993). "Knowledge-Augmented Genetic Algorithm for Production and Scheduling", *IJCAI 93 Workshop on Knowledge-Based Production Planning, Scheduling and Control*.
- [BUC94] BUCKLEY, James J.; HAYASHI, Yoichi (1994). "Fuzzy genetic algorithm and applications," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 61, 129-136.
- [CAL95] CALVERT, Charles (1995). "Delphi Programming", Sams Publishing.
- [CAR71] CARBONELL, Márcio (1971). "Manual do Empregador", Editora Globo.
- [CAR93] CARTWRIGHT, H. M.; LONG, R., A. (1993). "Simultaneous optimization of chemical flowshop sequencing and topology using genetic algorithms," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 32, No. 11, pp. 2706-2713.

- [CAR94] CARTWRIGHT, H. M.; TUSON, A. (1994). "Genetic Algorithms and Flow shop scheduling: towards the development of a real-time process control system," *Proceedings of the AISB Workshop on Evolutionary Computing*, Leeds University.
- [CED88] CEDER, A.; FJORNES, B.; STERN, H. I. (1988). "OPTIBUS: a scheduling package". In: Daduna, J. R. and Wren, A. (Eds.) *Computer-aided transit scheduling. Lecture notes in economics and mathematical systems*, 308. Springer-Verlag, Berlin.
- [CHE90] CHEN, C. L. P. (1990). "And or Precedence constraint Traveling Salesman Problem and its application to Assembly Schedule Generation", *1990 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Ch. 212 pp. 560-562.
- [CHR75] CHRISTOFIDES, Nicos (1975). *Graph Theory: An Algorithm Approach*. Academic Press, New York.
- [CHU95] CHU, P. C.; BEASLEY, J. E. (1995). "A Genetic Algorithm for the Set Partitioning Problem", The Management School - Imperial College, April 1995.
- [CLE89] CLEVELAND, G. A.; SMITH, S. F. (1989). "Using genetic algorithms to schedule flow-shop releases," *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*.
- [CLE93] CLEMENT, R.; WREN, A. (1993). "Greedy Genetic Algorithms, Optimizing Mutations and Bus Driver Scheduling", University of Leeds, School of Computer Studies, *Report 93.28*.
- [CNI94] "O Transporte nas Megacidades Brasileiras" / CNI - Confederação Nacional da Indústria (1994), Conselho para Assuntos de Energia, Rio de Janeiro.
- [CON92] CONNOLLY, David (1992). "General purpose simulated annealing," *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 43, No. 5, 495-505.
- [COO71] COOK, S. A. (1971). "The complexity of theorem-proving procedures", in: *Proceedings of the Third Annual ACM Symposium on Theory of Computing* (Shaker Heights, Ohio, 1971), ACM, New York, 151-158.

- [CUN92] CUNHA, C. B. (1992). "O Problema da Escala de Pessoal Operacional no Transporte Coletivo Urbano por Ônibus," *Anais do VI Congresso Nacional da ANPET*, pp. 609-622, ANPET, Rio de Janeiro.
- [DAD88] DADUNA, J. R.; WREN, A. (Eds.) (1988). *Computer-Aided Transit Scheduling*, Springer-Verlag, Berlin.
- [DAD88a] DADUNA, J. R.; MOJSILOVIC, M. (1988). "Computer-aided vehicle and duty scheduling using the HOT program system". In: Daduna, J. R. and Wren, A. (Eds.) *Computer-aided transit scheduling. Lecture notes in economics and mathematical systems*, 308. Springer-Verlag, Berlin.
- [DAN54] DANZIG, G.; FULKERSON, D. R. (1954). "Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule", *Naval Res. Logistics Quart.*, 1,217-222.
- [DAV85] DAVIS, L. (1985). "Job Shop Scheduling with Genetic Algorithms," *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, (ed. J. J. Grefenstette). Lawrence Erlbaum Publishers.
- [DAV91] DAVIS, L. (1991). *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- [DAV93] DAVIDOR, Y.; YAMADA, T.; NAKANO, R. (1993). "The ECOlogical framework II: Improving GA Performance at Virtually Zero Cost", ICGA5.
- [DEL93] DELLA CROCE, F.; TADEI, R.; VOLTA, G. (1993). "A Genetic Algorithm for the Job Shop Problem." *Report*, Politecnico di Torino (Italy).
- [DES88] DESROCHERS, M.; SOUMIS, F. (1989). "CREW-OPT: crew scheduling by column generation". In: Daduna, J. R. and Wren, A. (Eds.) *Computer-aided transit scheduling. Lecture notes in economics and mathematical systems*, 308. Springer-Verlag, Berlin.
- [DES89] DESROCHERS, M.; SOUMIS, F. (1989). "A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem," *Transportation Science*, Vol. 23, No. 1, 1-13.
- [DES90] DESROCHERS, M.; ROUSSEAU, J. M.; Eds. (1990). *Computer-Aided Transit Scheduling*, Springer-Verlag, Berlin.

- [DES92] DESROCHERS, M.; GILBERT, J.; SAUVÉ, M.; SOUMIS, F. (1992). "CREW-OPT: subproblem modeling in a column generation approach to urban crew scheduling". In: DESROCHERS, M. and ROUSSEAU, J. M.; (Eds.) *Computer-Aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in economics and mathematical systems, 386, Springer-Verlag, Berlin.
- [DOR92] DORNDORF, U.; PESCH, E. (1992). "Evolution Based Learning in a Job shop Environment", Working Paper, INFORM - Institute of Operations Research and Management, GmbH, Pascalstrasse 23, D-5100 Aachen, Germany.
- [ECG95] Enciclopédia Compacta IstoÉ-Guinness de Conhecimentos Gerais (1995). Editora Três Ltda.
- [ELD92] EL-DARZI, Elia; MITRA, Gautam (1992). "Solution of set-covering and set-partitioning problems using assignment relaxation," *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 43, No. 5, 483-493.
- [ELI64] ELIAS, S. E. G. (1964). "The use of digital computers in the economic scheduling for both man and machine in public transportation". *Kansas State University Bulletin*, Special Report Number 49.
- [EUS88] EUSÉBIO, J. R.; AMADO, L.; FRAGOSO, L.; PAIXÃO, J. (1988). "Desenvolvimento e Implementação de um Sistema Automático de Escalas de Autocarros e Tripulações na Rodoviária Nacional," *Investigação Operacional*, Vol. 8, No. 1, 35-46.
- [FAL91] FALKENAUER, E.; BOUFFOUIX, S. (1991). "A genetic algorithm for job shop," *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 824-9 vol.1
- [FAL92] FALKENAUER, E.; DELCHAMBRE, A. (1992). "A genetic algorithm for bin packing and line balancing," *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, May 1992, 1186-1192.
- [FAN93] FANG, H. L.; ROSS, P.; CORNE, D. (1993). "A Promising Genetic Algorithm Approach to Job shop Scheduling, Rescheduling and Open-Shop Scheduling Problems", *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, (ed. S. Forrest). Morgan Kaufmann Publishers.

- [FER90] FERNANDES, Aguinaldo A.; KUGLER, José L. C. (1990). "Gerência de Projetos de Sistemas", Livros Técnicos e Científicos Editora.
- [FIL92] FILIPIC, B. (1992). "Enhancing general search to schedule a production unit", *ECAI 92: Tenth European Conference on Artificial Intelligence*, pp603-7.
- [FIL93] FILIPIC, B. (1993). *Scheduling of Production Processes*, Ellis Horwood Chichester (chapter on applications of GAs)
- [FIS90] FISHER, Marshall L.; KEDIA, Pradeep (1990). "Optimal solution of set covering/partitioning problems using dual heuristics," *Management Science*, Vol. 36, No. 6, 674-688.
- [FON88] FONSECA, M. C. (1988). "Implementação de uma Heurística para Determinação das Rotações de Serviços do Pessoal Tripulante," *Investigação Operacional*, Vol. 8, No. 1, 55-64.
- [FOR62] FORD, L. R.; FULKERSON, D. R. (1962). *Flows in Networks*. Princeton University Press.
- [FOX90] FOX, B. R.; MACMAHON, M. B. (1990). "An investigation of genetic operators for sequencing problems", *Foundations of Genetic Algorithms*, ed. G. E. J. Rawlins, Morgan Kaufmann Publishers.
- [GAR79] GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. (1979). *Computers and Intractability, a guide to the theory of NP-completeness*, W. H. Freeman and Company.
- [GOL89] GOLDBERG, D. E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [GOL92] GOLDBERG, D. E.; MILMAN, K.; TIDD, C. (1992). *Genetic Algorithms: A Bibliography*, IlliGAL, Urbana.
- [GRO88] GRÖTCHEL, Martin; LOVÁSZ, László; SCHRIJVER, Alexander (1988). *Geometric Algorithms and Combinatorial Optimization*, Springer-Verlag.
- [GUH75] GUHA, D.; BROWNE, J. (1975). Optimal scheduling of tours and days off". *Workshop on Automated Techniques for Scheduling of Vehicle Operators for Urban Public Transportation Services*, Chicago, Illinois.

- [HEU72] HEURGON, E. (1972). "Un problème de recouvrement: l'habillage des horaires d'une ligne d'autobus", *RAIRO* 6, 13-29.
- [HEU75] HEURGON, E. (1975). "Preparing Duty Roster for Bus Routes by Computer", in: D. R. Bergmann and L. Bodin, (eds), "Preprint Workshop on Automated Technique for Scheduling of Vehicle Operators for Urban Public Transportation Services", Chicago.
- [HIL87] HILLIARD, M. E.; LIEPINS, G. E.; PALMER, M.; MORROW, M.; RICHARDSON, J. (1987). "A classifier-based system for discovering scheduling heuristics," *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*, Lawrence Erlbaum Associates
- [HIL88] HILLIARD, M. E., LIEPINS, G. E.; PALMER, M. R. (1988). "Machine Learning applied to Job Shop Scheduling", *Proceedings of the First International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*.
- [HOF81] HOFFSTADT, J. (1981). "Computerized vehicle and driver scheduling for the Hamburger Hochbahn Aktiengesellschaft". In: Wren, A. (Ed.), *Computer scheduling of public transport*. North-Holland, Amsterdam.
- [HOL93] HOLSAPPLE, C. W.; JACOB, V. S.; PAKATH, R.; ZAVERI, J. S. (1993). "A Genetics-Based Hybrid Scheduler for Generating Static Schedules in Flexible Manufacturing Contexts", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 4.
- [HOM93] HOMAIFAR, Abdollah; GUAN, Shanguchuan; LIEPINS, Gunar E. (1993). "A new approach on the traveling salesman problem by genetic algorithms," *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, July 1993, 460-466.
- [HOU91] HOU, E. S. H.; LI, H.-Y. (1991). "Task scheduling for flexible manufacturing systems based on genetic algorithms", *Conference Proceedings 1991 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Decision Aiding for Complex Systems*, pp. 397-402 vol.1
- [HUS91a] HUSBANDS, P.; MILL, F.; WARRINGTON, S. (1991). "Genetic Algorithms, Production Planning optimization and Scheduling". *Parallel Problem Solving from Nature*, Vol. 496, 68, pp. 80 - 84.

- [HUS91b] HUSBANDS, P.; MILL, F. (1991). "Simulated co-evolution as the mechanism for emergent planning and scheduling," *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers
- [HUS93] HUSBANDS, P. (1993). "An ecosystems model for integrated production planning," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* Vol.: 6 Iss: 1-2 p. 74-86.
- [HUS94] HUSBANDS, P. (1994). "Genetic Algorithms for Scheduling", *AISB Quarterly*, No. 89, 38-45.
- [IBA87] IBARAKI, T. (1987). "Combinatorial Optimization Problems and their Complexity", In: *Enumerative Approaches to Combinatorial Optimization - Part I. Annals of Operations Research*, v. 10
- [IBG95] FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. "Pesquisa anual do transporte rodoviário", Vol. 5.
- [IIM92] IIMA, H.; SANNOMIYA, N. (1992). "Genetic algorithm approach to a production ordering problem", *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers* Vol. 28 Iss: 11 p. 1337-44.
- [JEN75] JENKINS, R. (1975). "An automated technique for scheduling motormen and conductors for the New York City Subways". *Workshop on Automated Techniques for Scheduling of Vehicle Operators for Urban Public Transportation Services*, Chicago, Illinois.
- [KAN91] KANET, J. J.; SRIDHARAN, V. (1991). "PROGENITOR: a genetic algorithm for production scheduling", *Wirtschaftsinformatik*, Vol. 33 Iss: 4 p. 332-6.
- [KAN92] KANET, J. J.; SRIDHARAN, V. (1992). "PROGENITOR - A Genetic Algorithm for production scheduling," *Wirtschaftsinformatik*, Vol. 34, issue 2, p 256.
- [KAR82] KARP, R. M. (1972). "Reducibility among combinatorial problems", in: R. E. Miller and J. W. Thatcher (eds.), *Complexity of Computer Computations*, Plenum Press, New York, 85-103.
- [KEN80] KENNINGTON, J.; HELGASON (1980). *Algorithms for Network Programming*, Wiley, New York.

- [KER94] KERN, Vinícius Medina (1994). "Banco de dados relacionais: teoria e prática de projeto"; São Paulo, Editora Érica.
- [KHU90] KHURI, S.; BATEREKH, A., (1990). "Genetic algorithms and discrete optimization, Methods of Operations Research", Vol.: 64 p. 133-42, 1991, *Operations Research 1990 XV Symposium*.
- [KOL87] KOLEN, A. W. J.; KAN, A. H. G. Rinnooy; TRIENEKENS, H. W. J. M. (1987). "Vehicle routing with time windows," *Operations Research*, Vol. 35, No. 2, 266-273.
- [KWA94] KWAN, R. S.; WREN, A. (1994). *Hybrid Genetic Algorithms for Bus Driver Scheduling*, Capri.
- [LAM87] LAMONT, J. (1987). "The Transition to Computerized Bus and Crew Scheduling at the Montreal Urban Community Transit Company". Paper presented at the Fourth International Workshop on Computer-aided Scheduling of Public Transport, Hamburg, Germany.
- [LAP92] LAPORTE, Gilbert; MERCURE, Hélène; NOBERT, Yves (1992). "A branch and bound algorithm for a class of asymmetrical vehicle routing problems," *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 43, No. 5, 469-481.
- [LAW92] LAWTON, G. (1992). "Genetic Algorithms for schedule optimization", *AI Expert*, Vol. 7, issue 5, p23 - 7.
- [LEE93] LEE, I.; SIKORA, R.; SHAW, M. J. (1993). "Joint Lot Sizing and Sequencing with Genetic Algorithms for Scheduling - Evolving the Chromosome Structure," *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, (ed. S. Forrest). Morgan Kaufmann Publishers.
- [LEN81] LENSTRA, J.; KAN, Rinnooy (1981). "Complexity of vehicle routing and scheduling problems", *Networks*, 11 (2), 221-227.
- [LES81] LESSARD, R.; ROUSSEAU, J.; DUPUIS, D. (1981). "Hastus I: a mathematical programming approach to the bus driver scheduling problem". *Computer Scheduling of Public Transport: Urban Passenger Vehicle and Crew Scheduling*, 259-268. North-Holland, Amsterdam.

- [LES89] LESSARD, R; MINOUX, M.; ROUSSEAU, J. (1989). "A new approach to general matching problems using relaxation and network flows subproblems". *Networks* 19(4), 459-480.
- [LEV93] LEVINE, David M. (1993). "A genetic algorithm for the set partitioning problem," *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, July 1993, 481-487.
- [LIE87] LIEPINS, G. E.; HILLIARD, M. R. (1987). "Greedy Genetics", *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, (ed. J. J. Grefenstette). Lawrence Erlbaum Publishers
- [LIN65] LIN, S. (1965). "Computer solutions of the traveling salesmen problem". *Bell System Tech. J.*, 44, 2245-2269.
- [LIT93] LITTLE, J. (1993). "A searching technique!," *OR Insight*, Vol. 6, No. 4, 24-31.
- [MAR74] MARSTEN, Roy E. (1974). "An algorithm for large set partitioning problems," *Management Science*, Vol. 20, No. 5, 774-787.
- [MAS92] MASON, A. J. (1992). *Genetic Algorithms and Job Shop Scheduling*, PhD thesis, University of Cambridge, Management Studies Group, Department of Engineering.
- [MEH84] MEHLHORN, Kurt (1984). *Graph Algorithms and NP-Completeness*, Springer-Verlag.
- [MET76] METRÔ-RJ (1976). "O metrô do Rio de Janeiro e o futuro sistema integrado de transporte de massa". Rio de Janeiro.
- [MIL75] MILLER, J. (1975). Relationships between automated scheduling techniques for nurses and public transportation vehicle operators". *Workshop on Automated Techniques for Scheduling of Vehicle Operators for Urban Public Transportation Services*, Chicago, Illinois.
- [MIT81] MITRA, G.; WELSH, A. P. G. (1981). "A Computer Based Crew Scheduling System Using Mathematical Programming Approach". In A. Wren, Eds *Computer Scheduling of Public Transport*, pp. 193-221. North-Holland, Amsterdam.

- [MIT85] MITRA, G.; DARBY-DOWMAN, K. (1985). "CRU-SHED: A computer Based Bus Crew Scheduling System Using Integer Programming", in: J.-M. Rousseau (ed.), *Computer Scheduling of Public Transport 2*, Elsevier, Amsterdam.
- [MON70] MONROE, G. (1970). "Scheduling manpower for service operations". *Ind. Engineering*, 10-17, August 1970.
- [MOR92] MORIKAWA, K.; FURUHASHI, T.; UCHIKAWA, Y. (1992). "Single populated GA and its application to Job shop scheduling", *Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation*, Vol. 1-3, pp1014-1019.
- [NAK91] NAKANO, R.; YAMADA, T. (1991). "Conventional Genetic Algorithm for Job Shop Problems", *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, (ed. R. K. Belew and L. B. Booker). Morgan Kaufmann Publishers
- [NIS91] NISHIKAWA, Y.; TAMAKI, H. (1991). "A genetic algorithm as applied to the job shop scheduling", *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 27 Iss: 5 p. 593-9.
- [PAI88] PAIAS, A. M. (1988). "Sistema Interactivo para Geração dos Horários de Condutores de Viaturas," *Investigação Operacional*, Vol. 8, No. 1, 47-53.
- [PAI93] PAIAS, A. M.; PAIXÃO, J. (1993). "State space relaxation for set covering problems related to buss driver scheduling," *European Journal of Operational Research*, Vol. 71, No. 2, 303-316.
- [PAL93] PALUCH, S. (1993). "Decomposition of Bus Scheduling Problem," *Sixth International Workshop on the Scheduling of Public Transport*, Lisbon.
- [PAR81] PARKER, M. E.; SMITH, B. M. (1981). "Two Approaches to Computer Crew Scheduling". In A. Wren, Eds *Computer Scheduling of Public Transport*, pp. 193-221. North-Holland, Amsterdam.
- [PET93] PETZOLD, P.; SCHUTZE, P. (1993). "Integrated Data Processing for Public Transport in Hamburg," *Sixth International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Lisbon.
- [REE93] REEVES, C. R., Eds. (1993). *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Blackwell, Oxford.

- [REE94] REEVES, C. R. (1994). "Genetic Algorithms for Optimization," *AISB Quarterly*, No. 89, 31-37.
- [ROS92] ROSSETO, C. F. (1992), "O Estado da Arte no Dimensionamento da Oferta de Transporte Coletivo," *Anais do VI Congresso da ANPET*, pp. 365-375, ANPET, Rio de Janeiro.
- [ROS93] ROSS, J. (1993). "BERTA - Compute-aided system for the scheduling and evaluation of public transport operations on its way to realization," *Sixth International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, Lisbon.
- [ROS94] ROSS, P.; D. Corne (1994). "Applications of Genetic Algorithms," *AISB Quarterly*, No. 89, 23-30.
- [ROU82] ROUSSEAU, J.-M. (1982). *Crew Scheduling Methods in Operational Planning of Transportation Systems*, Centre de Recherche sur les Transports, Montreal.
- [ROU85] ROUSSEAU, J.-M., Eds. (1985). *Computer Scheduling of Public Transport 2*, North-Holland, Amsterdam.
- [ROU93] ROUSSEAU, J.-M. (1993). "Results Obtained with Crew-Opt, a Column Generation Method for Transit Crew Scheduling," *Sixth International Workshop on the Scheduling of Public Transport*, Lisbon.
- [RUD94] RUDOLPH, Günter (1994). "Massively parallel simulated annealing and its relation to evolutionary algorithms," *Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 4, 361-383.
- [RYA80] RYAN, D. M. (1980). "ZIP, a zero-one integer programming package for scheduling". Report CSS 85, AERE, Harwell.
- [RYA81] RYAN, D. M.; FOSTER, B. A. (1981). "An Integer Programming Approach to Scheduling", in: A. Wren, Eds *Computer Scheduling of Public Transport*, North-Holland, Amsterdam.
- [RYA92] RYAN, D. M. (1992). "The solution of massive generalized set partitioning problems in aircrew rostering," *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 43, No. 5, 459-467.

- [RYO93] RYOKAWA, A.; OBA, Y.; HENDA, H.; OBIKANE, T.; MAEYAMA, O. (1993). "Integrated Railway Operation System of East Japan Railway Company," *Sixth International Workshop on the Scheduling of Public Transport*, Lisbon.
- [SAN93] SANNOMIYA, N.; IIAMA, H. (1993). GA approach to a production ordering problem in an assembly process with buffers, *Information Control Problems in Manufacturing Technology*, Ch. 84, pp403-408
- [SCH89] SHAFFER, J. D., Eds. (1989). *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, Arlington.
- [SEG74] SEGAL, M. (1974). "The operator-scheduling problem: a network-flow approach. *Op. Res.* 22, 808-823.
- [SHE85] SHEPARDSON, F. (1985). "Modeling the Bus Crew Scheduling Problem." In J.-M. Rousseau, Eds *Computer Scheduling of Public Transport 2*, pp. 247-261. North-Holland, Amsterdam.
- [SHE80] SHEPARSON, F.; MARSTEN, R. E. (1980). "A Lagrangean Relaxation Algorithm for the Two Duty Period Scheduling Problem", *Management Science* 26, 274-281.
- [SHI92] SHIBATA, T.; FUKUDA, T.; KOSUGE, K.; ARAI, F. (1992). "Selfish and Coordinative planning for Multiple Mobile Robots by Genetic Algorithm", *Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 1-4.
- [SMI81] SMITH, B. M.; WREN, A. (1981). "VAMPIRES and TASC: Two Successfully Applied Bus Scheduling Programs. In A. Wren, Eds *Computer Scheduling of Public Transport*, pp. 97-124. North-Holland, Amsterdam.
- [SMI86] SMITH, B. M. (1986). *Bus Crew Scheduling Using Mathematical Programming*, Ph.D. thesis, The University of Leeds.
- [SMI88] SMITH, B. M.; WREN, A. (1988). "A bus crew scheduling system using a set covering formulation". *Transportation Research*, Vol. 22A, 97-108.
- [SMI93] SMITH, B. M.; PARKER, M. E. (1993). "IMPACS Crew-Scheduling System - User Manual", unpublished document, Leeds.

- [SOL87] SOLOMON, Marius M. (1987). "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints," *Operations Research*, Vol. 35, No. 2, 254-265.
- [SPO89] SPONSLER, J. L. (1989). "Genetic algorithms applied to the scheduling of the Hubble Space Telescope, Telematics and Informatics", Vol. 6 Iss: 3-4 p. 181-90, *1989 Goddard Conference on Space Applications of Artificial Intelligence*.
- [SRF93] SECRETARIA DA RECEITA FEDERAL (1993). Imposto de Renda Pessoa Física - Instruções para Preenchimento da Declaração de Ajuste - Ano Base 1992.
- [STA91] STARKWEATHER, T.; MCDANIEL, S.; MATHIAS, K.; WHITLEY, D.; WHITLEY, C. (1991). "A Comparison of Genetic Sequencing Operators", *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, (ed. R. K. Belew and L. B. Booker). Morgan Kaufmann Publishers.
- [STA93] STARKWEATHER, T.; WHITLEY, D. (1993). "A Genetic Algorithm for Scheduling and Resource Consumption", *Operations Research in Production Planning and Control, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, pp. 567 - 583, Springer-Verlag 1993.
- [STO92] STORER, R. H.; WU, S. D.; VACCARI, R. (1992). "New Search Spaces for Sequencing Problems with Application to Job Shop Scheduling", *Management Science*, Vol. 38, No. 10, 1495-1509
- [SUH87] SUH, J. Y.; VAN GUCHT, D. (1987). "Incorporating heuristic information into genetic search", *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, Lawrence Erlbaum Publishers, pp100-107.
- [SYS90] SYSWERDA, G.; GERYS (1990). "Knowledge Based Genetic Search in Scheduling Optimization", *Proceedings of the Fourth International Conference: Expert Systems in Production and Operations Management*, 125-133.
- [SYS91a] SYSWERDA, G. (1991). "Schedule Optimization Using Genetic Algorithms." In L. Davis, Eds *Handbook of Genetic Algorithms*, pp. 332-349. Van Nostrand Reinhold, New York.

- [SYS91b] SYSWERDA, G. (1991). "Schedule optimization using genetic algorithms". *The Genetic Algorithms Handbook*, (ed. L. Davis), Van Nostrand Reinhold.
- [SYS91c] SYSWERDA, G.; PALMUCCI, J. (1991). "The Application of Genetic Algorithms to Resource Scheduling", *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, (ed. R. K. Belew and L. B. Booker). Morgan Kaufmann Publishers
- [THA93] THANGIAH, Sam R.; VINAYAGAMOORTHY, Rajini; GUBBI, Ananda V. (1993). "Vehicle routing with time deadlines using genetic and local algorithms," *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, July 1993, 506-513.
- [UCK93] UCKAN, S.; BAGCHI, S.; KAWAMURA, K. (1993). "Managing Genetic Search in Job Shop Scheduling", *IEEE Expert*, Vol. 8, No. 5.
- [URV88] URVOY, J.-C. (1988). "CHIC Graphics and CHIC Services: RATP-developed software packages for time-scheduled design". In: Daduna, J. R. and Wren, A. (Eds.) Computer-aided transit scheduling. *Lecture notes in economics and mathematical systems*, 308. Springer-Verlag, Berlin.
- [VAC95] VACA, Oscar C. L. (1995). "Um algoritmo evolutivo para a programação de projetos multi-modos com nivelamento de recursos limitados", Tese de Doutorado da UFSC.
- [VAS84] VASKO, Francis J.; WILSON, George R. (1984). "An Efficient Heuristic for Large Set Covering Problems", *Naval Logistics Quarterly*, Vol. 31, pp. 163-171.
- [VAN91] VANCZU, J.; MARKUS, A. (1991). "Genetic Algorithms in Process Planning", *Computers in Industry*, 17 (2 - 3), 161 -164.
- [VEN92] VENUGAL, V.; NARENDAN, T. T. (1992). "A Genetic Algorithm to the machine component grouping problem with multi-objectives", *Computers and Industrial Engineering*, 22 (1), pp. 169 - 180.
- [VEN94] VENTUROLI, Thereza (1994). "Os construtores de átomos", *Revista Super Interessante*, No. 10, Outubro de 1994.

- [WAL93] WALLACE, R. (1993). "Train Scheduling - Migration of Manual Methods to Scaleable Computer Platforms", *Sixth International Workshop on the Scheduling of Public Transport*, Lisbon.
- [WHI89] WHITLEY, D.; STARKWEATHER, T.; FUQUAY, D. (1989). "Scheduling Problems and Traveling Salesmen: The Genetic Edge Recombination Operator", *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, (ed. J. D. Schaffer). Morgan Kaufmann Publishers.
- [WHI90] WHITLEY, D., STARKWEATHER, T.; SHANER, D. (1990). "Using simulations with Genetic Algorithms for optimizing schedules", *Proceedings of the 1990 Summer Computer Simulation Conference*, ch. 195., pp. 288 - 293.
- [WHI91a] WHITLEY, D.; STARKWEATHER, T.; SHANER, D. (1991). "The Traveling Salesman and Sequence Scheduling: Quality Solutions Using Genetic Edge Recombination", Chapter 22, *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold.
- [WHI91b] WHITLEY, D., STARKWEATHER, T.; SHANER, D. (1991). "The Traveling Salesman and Sequence Scheduling: Quality Solutions Using Genetic Edge Recombination." In L. Davis, Eds *Handbook of Genetic Algorithms*, pp. 350-372. Van Nostrand Reinhold, New York.
- [WHI93] WHITLEY, D. (1993). *A Genetic Algorithm Tutorial*, Department of Computer Science Colorado State University, Report CS-93-103.
- [WIN91] WINSTON, W. L. (1991). *Operations Research: applications and algorithms*, Duxbury Press, Belmont.
- [WRE81a] WREN, A. (1981). "General Review of the Use of Computers in Scheduling Buses and their Crews." In: A. Wren, Eds *Computer Scheduling of Public Transport*, pp. 3-16. North-Holland, Amsterdam.
- [WRE81b] WREN, A., Eds. (1981). *Computer Scheduling of Public Transport*, North-Holland, Amsterdam.
- [WRE85] WREN, A., SMITH, B. M.; MILLER, A. J. (1985). "Complementary Approach to Crew Scheduling", in: ROUSSEAU, J.-M., Eds. (1985). *Computer Scheduling of Public Transport 2*, North-Holland, Amsterdam.

- [WRE88a] WREN, A.; SMITH, B. M. (1988). "Experience with a Crew Scheduling System Based on Set Covering." In J. R. Daduna, A. Wren, Eds *Computer-Aided Transit Scheduling*, pp. 104-118. Springer-Verlag, Berlin.
- [WRE88b] WREN, A.; CHAMBERLAIN, M. (1988). "The Development of Micro-BUSMAN: Scheduling on Micro-Computers." In J. R. Daduna, A. Wren, Eds *Computer-Aided Transit Scheduling*, pp. 160-174. Springer-Verlag, Berlin.
- [WRE93] WREN, A.; ROUSSEAU, J.-M. (1993). "Bus Driver Scheduling - an Overview," *Sixth International Workshop on the Scheduling of Public Transport*, Lisbon.
- [WRE95] WREN, A.; WREN, D. O. (1995). "A Genetic Algorithm for Public Transport Driver Scheduling," *Computers Ops. Res.*, Vol. 22, No. 1, 101-110.
- [WUX93] WU, X.; DISSANAYAKE, M. W. M. G. (1993). "An approach for supervised Job Shop Scheduling using genetic algorithms", *A NZIIS-93 Proceedings of Inaugural Australian and New Zealand Conference on Intelligent Information Systems*.
- [YAM92] YAMADA, T.; NAKANO, R. (1992). "A genetic algorithm applicable to large scale job shop problems", *Parallel Problem Solving from Nature*, 2, pp. 281 - 291.
- [ZAH65] ZADEH, L. A. (1965); Fuzzy sets; *Inf. Control* 8, pp. 338-353.
- [ZAH75] ZADEH, L. A. (1975); "The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning"; Parts 1 and 2, *Inf. Science*, 8, pp.199-249, pp.301-357; Part 3, *Inf. Science*, 9, pp. 43-80.

ANEXO A

PROBLEMA DE DESIGNAÇÃO

Problema de Designação - Definição

O Problema de Designação consiste em atribuir n tarefas a n máquinas, de modo que toda tarefa seja atribuída, e que cada máquina realize uma e somente uma tarefa, e que além disto o custo total desta atribuição seja mínimo. Seja c_{ij} o custo de atribuir a tarefa i à máquina j . Então, este problema poderá ser definido como:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{s.a.} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq 1$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

Problema de Designação - Algoritmo Húngaro

Para obter a solução deste problema, é utilizado um algoritmo específico, conhecido como algoritmo húngaro, cuja aplicação necessita que o número de máquinas seja igual ao número de tarefas. Na prática isto sempre é possível obter, fazendo-se com que sejam criadas máquinas ou tarefas fictícias, cujos custos de atribuição são nulos, por se tratar de atribuições que não serão efetivadas. Como resultado desta operação é obtida uma matriz quadrada de custos de atribuição, denotada por $C = [c_{ij}]_{n \times n}$.

Os passos do algoritmo são os seguintes:

Passo 1 Subtraia de cada linha da matriz C o menor elemento da linha, obtendo a matriz C' . Subtraia de cada coluna da matriz C' o menor elemento da coluna, obtendo a matriz C^0 . Faça $k = 0$.

Passo 2 Assinale o máximo número de zeros na matriz C^k , de modo que não exista mais do que um zero assinalado por linha e coluna. Se n zeros foram assinalados em C^k , então PARE. Os zeros assinalados correspondem à atribuição ótima.

- Passo 3** Cubra os zeros da matriz C^k com o menor número de retas horizontais e verticais, efetuando, para tanto, as seguintes operações:
- marque cada uma das linhas que não tiveram zeros assinalados;
 - marque cada uma das colunas que possui um zero não assinalado em linha marcada;
 - marque as linhas que possuem zeros assinalados em colunas marcadas;
 - repita as operações (b) e (c) até que nenhuma marca adicional possa ser realizada;
 - cubra com retas horizontais as linhas não marcadas da matriz;
 - cubra com retas verticais as colunas marcadas da matriz.
- Passo 4** Encontre o menor elemento da matriz C^k não coberto por reta (vertical ou horizontal). Subtraia este valor de todos os elementos não cobertos por reta, e adicione este mesmo valor aos elementos cobertos por duas retas: uma vertical e outra horizontal. Denomine a matriz resultante de C^{k+1} , faça $k = k + 1$, e retorne ao passo 2.

ANEXO B

BUSCA DE CAMINHOS MÍNIMOS EM GRAFOS

Busca de Caminhos Mínimos em Grafos

Definições

Definição 1

Grafo é uma estrutura matemática $G(X, A)$, onde $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ é um conjunto de nós (ou vértices) do grafo, e $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ é o conjunto de arcos do grafo. O arco $a_r = (x_i, x_j)$ conecta os vértices $x_i \in X$ e $x_j \in X$, no sentido do primeiro nó para o segundo.

Definição 2

$\Gamma(x_i) = \{x_j \in X \mid a_r = (x_i, x_j) \in A\}$ é o conjunto de vértices sucessores de $x_i \in X$ no grafo $G(X, A)$ e $\Gamma^{-1}(x_i) = \{x_j \in X \mid a_r = (x_j, x_i) \in A\}$ é o conjunto de vértices predecessores de $x_i \in X$ no grafo $G(X, A)$.

Definição 3

Um caminho que conecta dois vértices do grafos, digamos $x_s, x_t \in X$, é definido por uma seqüência $K_{st} = \{x_s, \dots, x_{j_k}, x_{j_{k+1}}, \dots, x_t\}$, onde $x_{j_{k+1}} \in \Gamma(x_{j_k}), \forall x_{j_k}$.

Algoritmo de Dijkstra

Algoritmo de Dijkstra foi desenvolvido para determinar o caminho mínimo entre dois vértices $x_s, x_t \in X$, em grafos nos quais a cada arco $a_r = (x_i, x_j)$ está associado um custo de transposição dado por $c_{ij} \geq 0$.

Seja (p_i, l_i, s_i) um rótulo associado a cada vértice $x_i \in X$, onde:

- p_i é o vértice predecessor de $x_i \in X$ no caminho de custo mínimo entre x_s e x_i ;
- l_i é o custo acumulado associado ao caminho mínimo entre x_s e x_i ;
- s_i é a situação do vértice $x_i \in X$, que pode ser N (não-rotulado), R (rotulado) e P (processado).

Algoritmo propriamente dito

- Passo 1 Rotule o vértice inicial x_s com $(p_s, l_s, s_s) = (\phi, 0, R)$, e os demais vértices com $(p_i, l_i, s_i) = (\phi, +\infty, N)$.
- Passo 2 Seja $\Psi = \{x_i \in X \mid s_i = R\}$.
Se $\Psi = \emptyset$, então PARE, pois não existe caminho que conecta x_s a x_t .
Se $\Psi \neq \emptyset$, então determine $x_k \in \Psi$ tal que:
$$l_k = \min_{x_i \in \Psi} l_i$$
- Passo 3 Se $x_k = x_t$, então PARE (o custo do caminho mínimo é l_k , e a seqüência de vértices do caminho é definida pelos predecessores). Em caso contrário, vá ao passo 4.
- Passo 4 Para cada $x_j \in \Gamma(x_k)$, calcule: $v = l_k + c_{kj}$ e se $v < l_j$, então rotule novamente o vértice x_j com $(p_j, l_j, s_j) = (x_k, v, R)$.
- Passo 5 Rotule novamente x_k com $(p_k, l_k, s_k) = (p_k, l_k, P)$ e volte ao passo 2.

Algoritmo de Floyd

Determina o caminho mínimo entre todos os pares de vértices $x_i, x_j \in X$, em grafos nos quais a cada arco $a_r = (x_i, x_j)$ está associado um custo de transposição dado por $-\infty < c_{ij} < \infty$.

Seja $C^0 = [c_{ij}^0]$ a matriz de custos, onde $c_{ij}^0 = \begin{cases} 0 & \text{se } i = j \\ c_{ij} & \text{se } i \neq j \text{ e } (x_i, x_j) \in A \\ \infty & \text{se } i \neq j \text{ e } (x_i, x_j) \notin A \end{cases}$

Seja $\theta^0 = [\theta_{ij}^0]$ a matriz de predecessores, onde $\theta_{ij}^0 = x_i, \forall i, j$, e indica o predecessor do vértice x_j no caminho de custo mínimo entre os vértices x_i e x_j .

Algoritmo propriamente dito

Passo 1 Monte as matrizes $C^0 = [c_{ij}^0]$ e $\theta^0 = [\theta_{ij}^0]$. Faça $k = 0$.

Passo 2 Faça $k = k + 1$.

Passo 3 Para todo $i \neq k$ e $j \neq k$ calcule

$$c_{ij}^k = \min(c_{ij}^{k-1}, c_{ik}^{k-1} + c_{kj}^{k-1})$$

Se $c_{ij}^k < c_{ij}^{k-1}$ então faça $\theta_{ij}^k = \theta_{kj}^{k-1}$. Em caso contrário faça $\theta_{ij}^k = \theta_{ij}^{k-1}$

- Passo 4
- se existir algum $c_{ii}^k < 0$, então PARE. O grafo tem um circuito de custo negativo;
 - se $k = n$ e $c_{ii}^k \geq 0, \forall i$, então PARE. Os caminhos mínimos são dados pela matriz $\theta^k = [\theta_{ij}^k]$, e os custos destes caminhos são dados pela matriz $c^k = [c_{ij}^k]$.
 - se $k < n$ e $c_{ii}^k \geq 0, \forall i$, então volte ao passo 2.

ANEXO C

TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS

Teoria dos Conjuntos Difusos

Definições Básicas (veja [ZAH65])

Definição 1

Seja X um conjunto clássico de objetos, chamado de universo, cujos elementos genéricos são denotados por x . A função de pertinência de um elemento em um subconjunto clássico $A \subseteq X$ é uma função característica $\mu_A(x): x \rightarrow \{0,1\}$, tal que:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{sse } x \notin A \\ 1 & \text{sse } x \in A \end{cases}$$

onde $\{0,1\}$ é chamado de conjunto de avaliação. Se o conjunto de avaliação for o intervalo real $[0,1]$, então A é um conjunto difuso.

Nesta definição é importante ressaltar que:

- quanto mais próximo do valor 1 for o valor de $\mu_A(x)$, maior é a pertinência de x em relação ao conjunto difuso A ;
- o conjunto universo X nunca é difuso.

Para caracterizar o conjunto difuso, poderá ser utilizada a seguinte notação:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

Zadeh, em 1972 propôs uma notação alternativa para a representação de conjuntos difusos. Quando X é um conjunto discreto $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, o conjunto difuso $A \subseteq X$ poderá ser expresso como:

$$A = \mu_A(x_1) / x_1 + \mu_A(x_2) / x_2 + \dots + \mu_A(x_n) / x_n = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i$$

onde os elementos com grau de pertinência nulo podem ser omitidos. Quando X é um conjunto contínuo, esta expressão é a seguinte:

$$A = \int_X \mu_A(x) / x$$

Definição 2

Nos termos da definição 1, tem-se que:

- o suporte de A é um subconjunto ordinário de X caracterizado por

$$\text{supp } A = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\};$$

- o conjunto A é dito normalizado se, e somente se, $\exists x \in X$ tal que $\mu_A(x) = 1$, e para $\forall x \in X$ tem-se $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$;

- c) \emptyset é o conjunto vazio, definido como tendo $\mu_{\emptyset}(x) = 0$ para $\forall x \in X$;
- d) dois conjuntos difusos A e B são iguais, e denota-se por $A = B$, sse $\mu_A(x) = \mu_B(x), \forall x \in X$;
- e) a altura de um conjunto difuso A é definida por:

$$hgt(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x)$$

ou seja, é o limite superior de $\mu_A(x)$.

Definição 3

Sejam A e B conjuntos difusos definidos em um universo X . Então:

- a) o conjunto união, denotado por $A \cup B$ é definido pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad \forall x \in X$$

- b) o conjunto interseção, denotado por $A \cap B$, tem a seguinte função de pertinência:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)), \quad \forall x \in X$$

- c) o complemento \bar{A} de um conjunto difuso é definido pela função de pertinência:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad \forall x \in X$$

Para os operadores acima, seguem-se algumas das propriedades válidas:

- i) Comutatividade

$$A \cup B = B \cup A$$

$$A \cap B = B \cap A$$

- ii) Associatividade

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$$

- iii) Idempotência

$$A \cup A = A$$

$$A \cap A = A$$

- iv) Distributividade

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

- v) Identidade

$$A \cup \emptyset = A$$

$$A \cap X = A$$

$$\text{vi) } A \cup X = X$$

$$\text{vii) } A \cap \emptyset = \emptyset$$

viii) Absorção

$$A \cup (A \cap B) = A$$

$$A \cap (A \cup B) = A$$

ix) Involução

$$\overline{\overline{A}} = A$$

Estes operadores não satisfazem, entretanto, a seguinte lei, válida somente para os conjuntos ordinários:

$$\text{i) } A \cap \overline{A} = \emptyset$$

$$\text{ii) } A \cup \overline{A} = X$$

Definição 4

Seja A um conjunto difuso definido sobre o universo de discurso X , e seja $\alpha \in (0,1]$. O conjunto ordinário A_α , definido por $A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$ é denominado de conjunto de nível α .

Definição 5

Um conjunto difuso A é convexo se, e somente se, seus conjuntos de nível α são todos convexos, ou $\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2))$, para $\forall x_1, x_2 \in X$ e $\forall \lambda \in [0,1]$.

Esta definição de conjunto difuso convexo não implica no fato de que μ_A seja uma função convexa de x . Note-se, ainda, que se A e B forem conjuntos convexos, então $A \cap B$ também será um conjunto difuso convexo.

Definição 6

Um número difuso é um conjunto difuso convexo normalizado A , definido sobre o conjunto de números reais R , que satisfaz as seguintes condições:

i) $\exists! x_0 \in R$, chamado de valor mais provável, tal que $\mu_A(x_0) = 1$;

ii) μ_A é contínua por partes.

Definição 7

Sejam n universos, denotados por X_1, X_2, \dots, X_n . Uma relação difusa R de ordem n em $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ é um conjunto difuso em $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$.

Princípio da Extensão (veja [ZAH75])

Definição 8

Seja X o produto cartesiano de universos, $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_r$, e seja A_1, A_2, \dots, A_r , r conjuntos difusos em X_1, X_2, \dots, X_r , respectivamente. O produto cartesiano $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_r$ é definido como:

$$A_1 \times \dots \times A_r = \int_{X_1 \times \dots \times X_r} \min(\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_r}(x_r)) / (x_1, \dots, x_r)$$

Definição 9

Seja um mapeamento de $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_r$ para o universo Y , tal que $y = f(x_1, \dots, x_r)$. Então os r conjuntos difusos, denotados por A_i , induzem um conjunto difuso B em Y , através do mapeamento f , tal que:

$$\mu_B(y) = \begin{cases} \sup_{\substack{x_1, \dots, x_r \\ y=f(x_1, \dots, x_r)}} \min(\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_r}(x_r)) \\ 0 \text{ se } f^{-1}(y) = \emptyset \end{cases}$$

onde $f^{-1}(y)$ é a imagem inversa de y , e $\mu_B(y)$ é o grau de pertinência do valor y no conjunto difuso B definido em Y .

Adição de Números Difusos

A adição é uma operação crescente, isto é, dados $x_1 > x_2$, e $y_1 > y_2$, então $x_1 + y_1 > x_2 + y_2$. Sua extensão difusa também é crescente, e é definida através do princípio da extensão como:

$$\mu_{A \oplus B}(z) = \sup_{\substack{z=x+y \\ x \in A \\ y \in B}} \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

onde $A \oplus B$ é o número difuso resultante da soma dos números difusos A e B definido sobre os reais.

Esta operação, tal como foi definida, satisfaz as seguintes propriedades:

- a) Comutatividade: $A \oplus B = B \oplus A$
 b) Associatividade: $A \oplus (B \oplus C) = (A \oplus B) \oplus C$
 c) Identidade: $A \oplus 0 = A$ (zero não difuso)
 d) Elemento Simétrico: $\mu_{-M}(x) = \mu_M(-x)$

Ressalta-se, contudo, que \oplus não tem elemento simétrico no sentido da estrutura de grupo. Em outras palavras, a propriedade $M \oplus (-M) = 0, \forall M$ não se verifica.

Máximos e Mínimos entre Números Difusos

Dados os números difusos M_1, M_2, \dots, M_n , o operador máximo difuso é definido pelo princípio da extensão, como:

$$\mu_{\tilde{m}ax(M_1, \dots, M_n)}(z) = \sup_{\substack{z = \max(x_1, \dots, x_n) \\ x_i \in M_i}} \min(\mu_{M_1}(x_1), \dots, \mu_{M_n}(x_n))$$

Para o operador mínimo, tem-se:

$$\mu_{\tilde{m}in(M_1, \dots, M_n)}(z) = \sup_{\substack{z = \min(x_1, \dots, x_n) \\ x_i \in M_i}} \min(\mu_{M_1}(x_1), \dots, \mu_{M_n}(x_n))$$

As seguintes propriedades são satisfeitas para estes operadores:

- a) Comutatividade

$$\tilde{m}ax(A, B) = \tilde{m}ax(B, A)$$

$$\tilde{m}in(A, B) = \tilde{m}in(B, A)$$

- b) Associatividade

$$\tilde{m}ax(A, \tilde{m}ax(B, C)) = \tilde{m}ax(\tilde{m}ax(A, B), C)$$

$$\tilde{m}in(A, \tilde{m}in(B, C)) = \tilde{m}in(\tilde{m}in(A, B), C)$$

- c) Distributividade

$$\tilde{m}in(A, \tilde{m}ax(B, C)) = \tilde{m}ax(\tilde{m}in(A, B), \tilde{m}in(A, C))$$

$$\tilde{m}ax(A, \tilde{m}in(B, C)) = \tilde{m}in(\tilde{m}ax(A, B), \tilde{m}ax(A, C))$$

$$A \oplus \tilde{m}ax(B, C) = \tilde{m}ax(A \oplus B, A \oplus C)$$

$$A \oplus \tilde{m}in(B, C) = \tilde{m}in(A \oplus B, A \oplus C)$$

- d) Absorção

$$\tilde{m}ax(A, \tilde{m}in(A, B)) = A$$

$$\tilde{m}in(A, \tilde{m}ax(A, B)) = A$$

Ressalta-se que, enquanto a operação de máximo (ou mínimo) definida para os números ordinários determina o maior (ou menor) argumento da lista, o mesmo não acontece com estes operadores quando definidos para os números difusos.

Comparação de Números Difusos

Dados dois número difusos, M e N , a comparação entre eles consiste em determinar o grau de possibilidade de $M \geq N$, denotado por $\mu(M \geq N)$, e definido pelo princípio da extensão como:

$$\mu(M \geq N) = \sup_{\substack{x \geq y \\ x \in M \\ y \in N}} \min(\mu_M(x), \mu_N(y))$$

Observa-se, entretanto, que o fato de $\mu(M \geq N) = 1$ não implica necessariamente que $\mu(M < N)$ seja nulo. De fato, $\mu(M < N)$ poderá ser diferente de zero, porém, quanto mais próximo de zero for, maiores serão as razões para se supor que M é maior que N .

ANEXO D

DISQUETES PARA INSTALAÇÃO DO SISTEMA WINBUS