

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

**OTIMIZAÇÃO DE ESCALA DE TRABALHO PARA CONDUTORES DE  
TREM: SEQUENCIAMENTO DE TAREFAS E ALOCAÇÃO BASEADA  
EM PREFERÊNCIA DECLARADA**

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

**ADEMIR APARECIDO CONSTANTINO**

Florianópolis - SC

1997

**OTIMIZAÇÃO DE ESCALA DE TRABALHO PARA CONDUTORES DE  
TREM: SEQUENCIAMENTO DE TAREFAS E ALOCAÇÃO BASEADA  
EM PREFERÊNCIA DECLARADA**

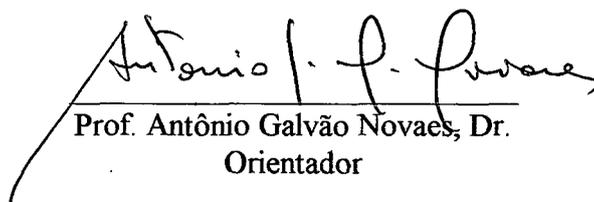
ADEMIR APARECIDO CONSTANTINO

Esta Tese foi julgada adequada para a 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 Afonso Barcia, Ph. D.  
Xôfâenador

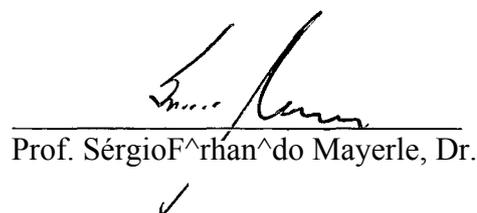
BANCA EXAMINADORA:



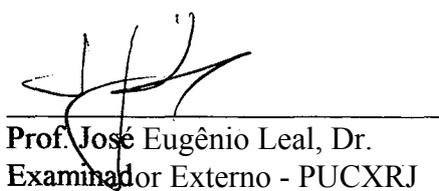
Prof. Antônio Galvão Novaes, Dr.  
Orientador



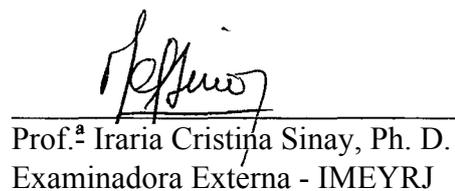
Prof. João Carlos Souza, Dr.



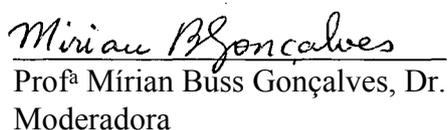
Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.



Prof. José Eugênio Leal, Dr.  
Examinador Externo - PUCXRJ



Prof.ª Iraria Cristina Sinay, Ph. D.  
Examinadora Externa - IMEYRJ



Prof.ª Mirian Buss Gonçalves, Dr.  
Moderadora

Este trabalho é dedicado aos meus pais:

José Constantino

Maria Aparecida Toniette Constantino

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. Antonio Galvão Novaes pela excelente orientação, pela amizade e apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao prof. Neri dos Santos pela amizade e por ter oportunizado o início do meu curso de doutorado neste programa de pós-graduação.

Aos meus pais que mesmo distantes fisicamente, estiveram me incentivando e apoiando em todos os momentos.

A minha querida Cristina pelo amor, confiança, incentivo e apoio ao longo deste período.

Aos meus amigos que direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Definição do Problema.....	1
1.2 Aplicação Prática numa Empresa de Transporte Ferroviário de Carga.....	4
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Contribuições.....	5
1.5 Estrutura.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: MÉTODOS PARA CONSTRUÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO.....	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Descrição Geral do Problema.....	9
2.3 Conceitos.....	11
2.4 Escala Cíclica X Escala Individualizada.....	12
2.5 Escala de Serviço para Trabalhadores em Locais Fixos.....	13
2.5.1 O Problema de Alocação.....	15
2.5.2 O Problema de Escala dos Dias de Folga.....	20
2.5.3 O Problema de Escala dos Turnos.....	22
2.5.4 Comentários.....	23
2.6 Escala de Serviços para Condutores de Veículos.....	23
2.6.1 O Problema de Alocação.....	25
2.6.2 O Problema de Escala de Serviços.....	29
2.7 Comentários Gerais.....	45
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ANÁLISE DA PREFERÊNCIA E SOBRE ERGONOMIA DO TRABALHO.....	47

3.1 Introdução.....	47
3.2 Técnicas de Preferência Declarada.....	49
3.2.1 Introdução.....	49
3.2.2 Conceitos.....	49
3.2.3 Preferência Revelada X Preferência Declarada.....	49
3.2.4 Conceito de Função Utilidade.....	50
3.2.5 Características das Técnicas de Preferência Declarada.....	51
3.2.6 Métodos de Pesquisa.....	52
3.2.7 Utilidade Aleatória.....	55
3.2.8 Modelo Logit Multinomial.....	57
3.2.9 Ajuste Através de Máxima Verossimilhança.....	58
3.2.10 Modelo Logit Explodido.....	59
3.2.11 Aplicações de TPD.....	60
3.3 Recomendações Ergonômicas para Construção de Escala de Trabalho.....	62
3.4 Considerações Gerais.....	64
4. PROPOSTA DA TESE.....	66
4.1 O Problema.....	67
4.2 Restrições Legais.....	67
4.3 Propostas para a Construção de Escalas Cíclicas.....	68
4.3.1 O Modelo Matemático.....	69
4.3.2 O Algoritmo Heurístico.....	72
4.4 Proposta para a Distribuição das Escalas aos Condutores.....	76
4.4.1 Considerações Preliminares.....	76
4.4.2 Modelo para a Distribuição das Escalas.....	79
4.5 Medida de Satisfação da Escala de Trabalho.....	82
4.6 Considerações Finais.....	82
5. APLICAÇÃO DA PREFERÊNCIA DECLARADA.....	85
5.1 Definição dos Atributos e Seus Níveis.....	85
5.2 Elaboração das Alternativas (Cartões).....	88

5.3 Construção dos Cartões.....	90
5.4 Realização das Entrevistas.....	91
5.5 Calibração dos Parâmetros.....	92
5.6 A Função Utilidade.....	93
5.7 Considerações Finais.....	93
6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA PROPOSTA.....	94
6.10 Sistema <i>PasLin</i> .....	95
6.2 O Sistema <i>PlanEsc</i> .....	97
6.2.1 Estrutura do Sistema Computacional.....	97
6.2.2 Janela Principal do <i>PlanEsc</i> .....	98
6.2.3 Construção da Escala Cíclica.....	99
6.2.4 Distribuição das Escalas.....	102
6.3 Considerações Finais.....	105
7. RESULTADOS.....	106
7.1 Construção da Escala Cíclica.....	106
7.2 Distribuição das Escalas Truncadas.....	108
7.3 Considerações Finais.....	110
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	111
8.1 Conclusões.....	111
8.2 Recomendações.....	113
BIBLIOGRAFIA.....	114
ANEXO 1 - Cartões Utilizados na Preferência Declarada.....	127
ANEXO 2 - Algoritmo para o Problema de Atribuição.....	133
ANEXO 3 - Algoritmo para o Problema de Atribuição com Gargalo.....	136
ANEXO 4 - A Heurística 2-OPT.....	137
ANEXO 5 - Escalas Cíclicas Obtidas com o Sistema <i>PlanEsc</i> .....	139

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Demanda de mão-de-obra durante um dia de trabalho.....	10
Figura 2-2. Um histograma de folga superposto sobre o histograma de demanda.....	17
Figura 2-3. Escala de veículos e condutores (Fonte: Bodin et al (1983)).....	26
Figura 2-4. Estrutura hierárquica entre as etapas, as jornadas e as rotações. (Fonte: Bodin et al (1983)).....	27
Figura 2-5. Exemplo de um grafo multipartido $G=(N^i)$ com $N=N \cup \dots \cup M$ .....	32
Figura 2-6. Exemplo de uma solução viável para o grafo multipartido. Os nós de cada caminho correspondem á sequência de turnos que será executada por um condutor.....	33
Figura 2-7. Evolução linear ao longo do mês da garantia e do limite máximo de horas por condutor (Fonte: Chiessi, (1984)).....	34
Figura 2-8. Exemplo de uma escala (Fonte: Caprara et al. (1995a).).....	41
Figura 2-9. Um caminho de laços correspondendo a um escala viável (Fonte: Caprara et al. (1995a)).....	42
Figura 4-1. Exemplo de uma escala cíclica de 42 dias.....	69
Figura 4-2. Exemplo de um problema de continuidade das atividades para 4 condutores.....	78
Figura 4-3. Exemplo de um ciclo de programações.....	81
Figura 5-1. Classificação dos atributos.....	86
Figura 5-2. Estrutura fatorial do experimento.....	88
Figura 5-3. Exemplo de um cartão. Nas colunas ‘TAREFA’ e ‘EX-TAR’ são colocados os códigos utilizados pela empresa para identificar a atividade realizada.....	90
Figura 6-1. Comparação entre os dois sistemas computacionais.....	94
Figura 6-2. Fluxograma do sistema <i>PasLin</i> .....	97
Figura 6-3. Visão geral do sistema.....	98
Figura 6-4. Visão da janela principal do <i>PlanEsc</i> .....	99
Figura 6-5. Janela com os parâmetros (pesos) utilizados pela função utilidade.....	99
Figura 6-6. Janela que permite o usuário construir a escala cíclica.....	100
Figura 6-7. Janela com a escala visualizada na forma sequencial.....	101
Figura 6-8. Janela para a distribuição das escalas.....	102
Figura 6-9. Pasta que permite especificar a escala para o próximo período de planejamento. 103	
Figura 6-10. Pasta onde é realizada a distribuição das escalas truncadas aos condutores.....	104
Figura 7-1. Indicadores da distribuição da carga de trabalho calculados pelo <i>PlanEsc</i> .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Uma escala para 4 trabalhadores com período de planejamento de uma semana. São considerados 3 tipos de turnos com demanda variando a cada dia, sendo a folga denotada por x. Cada linha representa uma programação.....	12
Tabela 2-2. Formulação sugerida por Dantzig.....	16
Tabela 5-1. Resultado da calibração dos coeficientes.....	92

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma sistemática para o planejamento mensal de escalas de trabalho para condutores de trem, buscando uma distribuição mais equitativa possível das satisfações. O nível de satisfação de cada condutor é medido por meio de uma única função utilidade ajustada através de técnicas de preferência declarada. Esta função faz uma ponderação dos principais fatores que causam maior atratividade numa escala de trabalho.

O planejamento de escalas é resolvido em duas etapas. A primeira procura obter uma escala cíclica otimizada, particionada em programações. Cada programação corresponde a uma sequência de dias de trabalho entre duas folgas consecutivas. Duas propostas são apresentadas para resolver este problema: uma formulação matemática baseada no modelo *set covering* e um algoritmo heurístico baseado no problema de atribuição.

A segunda etapa consiste em alocar as escalas de trabalho aos condutores, de forma que o nível de satisfação seja equitativamente distribuído. A atribuição é feita levando em consideração o nível de satisfação do histórico de trabalho de cada condutor, e também, o nível de satisfação da escala futura. O problema foi comparado a um problema do caixeiro viajante, cuja a solução baseia-se na heurística 2-opt. A cada iteração são resolvidos dezenas de problemas de atribuição com gargalo, definidos por uma matriz de utilidades.

Essas propostas foram implementadas em sistemas computacionais que mostraram a eficiência da metodologia, a partir dos quais se obteve bons resultados.

## ABSTRACT

The objective of this thesis is to develop a method for the planning of monthly job assignments of train crews, seeking the most satisfying (equitable) work distribution to the workers. The level of worker satisfaction is measured by means of a collective utility function, statistically estimated with stated preference techniques. This utility function contains the weights related to the main attraction factors associated with the crew schedules.

The crew scheduling is solved in two phases. First, one looks for an optimized cyclic crew schedule partitioned into disjoint working programs. Each working program is related to a sequence of working days inserted between two consecutive off-duty resting days. Two methods are proposed to solve this problem: a mathematical formulation based on set covering, and an heuristic model based on the classical OR assignment problem.

The second phase consists in assigning the crew schedules to the conductors trying to equalize their satisfaction levels as much as possible. The monthly assignment is done taking into consideration, for each worker, his past level of satisfaction, together with the level of satisfaction of the possible planned crew schedules that could be assigned to him. This assignment problem is close to a classical traveling salesman problem, whose solution is attained with a 2-opt heuristic. At each iteration the model solves a large number of bottleneck assignment problems, which are defined by a matrix of utility values.

These methods have been implemented in the form of computer programs which have shown the efficiency of the methodology, and have lead to quite good applied results.

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Definição do Problema

Diversos trabalhos na área de serviço de transporte tem surgido na literatura focalizando o gerenciamento a nível operacional da frota de veículos<sup>1</sup> e dos condutores<sup>2</sup> associados. O serviço de transporte de passageiro tem sido o principal alvo. O efetivo gerenciamento destes veículos e condutores dão origem a uma variedade de problemas que são classificados como problemas de roteirização e de escala ( *routing and scheduling problems*). No presente trabalho serão abordados somente os aspectos relacionados ao problema de gerenciamento operacional de condutores de veículos, isto é, o problema de planejamento de escala de serviços para condutores de veículos.

O planejamento de escala de serviço para condutores consiste, basicamente, em construir e atribuir sequências de viagens que deverão ser executadas por cada um dos condutores, respeitando as restrições legais, contratuais e sindicais, de modo que atenda a um determinado objetivo, dado um conjunto de viagens que será executado num período, bem como o quadro de condutores.

A literatura tem apresentado dois tipos de problemas sobre o planejamento de escala de serviços para condutores de veículos: o *crew scheduling problem* e o *crew rostering problem*, sendo identificados aqui como o problema de alocação e o problema de escala de serviços, respectivamente. Normalmente, o problema de alocação está relacionado com o planejamento

---

<sup>1</sup> Um veículo é uma identificação genérica que será utilizada neste trabalho e, dependendo do contexto, pode representar um ônibus, um trem, um avião, etc.

<sup>2</sup> Um condutor também é uma identificação genérica que pode representar uma equipe de trabalho como: um motorista e um cobrador para ônibus de transporte coletivo; um maquinista e um ajudante para um trem de carga; um comandante e um co-piloto para um avião, etc.

diário, enquanto que o problema de escala preocupa-se com o planejamento para um período maior (no mínimo uma semana).

O problema de alocação consiste, basicamente, em construir um conjunto de sequências de trabalho para cada dia da semana, atribuindo cada sequência a um condutor. O objetivo é construir um conjunto de sequências de trabalho que maximize a eficiência de utilização dos condutores e cubra todas as viagens a serem realizadas. Uma sequência de trabalho é cumprida dentro do período de um dia se as viagens realizadas forem de curta distância, possibilitando que o condutor retome para seu domicílio após o término de sua jornada diária. Isso pode ser observado em empresas de transporte urbano de passageiros. Por outro lado, se as viagens realizadas pela empresa forem de longa distância, necessitando que o condutor repouse fora de seu domicílio e o outro condutor assuma a continuação da viagem, então, as sequências de trabalho serão compostas de segmentos de viagens cumpridas em jornadas separadas por períodos de repouso. Ao final dessa sequência o condutor deve retomar para a sua base domiciliar. Essa é uma situação encontrada em algumas empresas de transporte aéreo de passageiros.

Nesse processo de construção das sequências de trabalho deve-se considerar as características relacionadas à disponibilidade espacial, temporal, legal e contratual dos condutores para gerar o conjunto de sequência de viagens que garanta o cumprimento de todas as viagens diárias. A localização espacial dos condutores e dos veículos em cada ponto no tempo é fator muito importante neste problema.

O segundo problema - o problema de escala - consiste em construir sequências de jornadas diárias de trabalho ao longo do período de planejamento (uma semana ou um mês) para cada um dos condutores. Cada uma das sequências será contemplada com dias de folga após alguns dias consecutivos de trabalho conforme as restrições legais.

O planejamento de escala, seja ele semanal ou mensal, pode ser abordado através de dois enfoques: cíclico ou individualizado. O planejamento de escala cíclica consiste em construir uma sequência contendo todas as jornadas diárias de trabalho intercaladas por dias de folga. Esta sequência constitui-se num ciclo de trabalho que é repetida por todos os condutores, sendo que cada um a inicia em uma posição diferente. Já o planejamento individualizado

consiste em construir sequências individuais de jornadas de trabalho, levando em consideração o histórico de cada condutor.

A natureza do problema é essencialmente combinatorial não importando o tipo de abordagem que em geral permite várias soluções viáveis, mesmo com as restrições impostas. Tal problema pode ser resolvido manual ou mecanicamente. Porém, quando um problema de médio ou grande porte é resolvido manualmente, toma-se praticamente impossível enumerar todas as soluções e escolher a melhor. Em geral a pessoa ou o grupo de pessoas que se ocupa desta tarefa, contenta-se em obter uma solução simplesmente viável sob seu ponto de vista, violando, às vezes, alguma restrição. Em função da complexidade do problema, uma otimização só pode ser alcançada, através de um enfoque computacional que permita gerar em tempo adequado uma solução ótima ou quase ótima, respeitando todas as restrições impostas.

Na literatura podem ser encontrados alguns modelos matemáticos aplicados a este tipo de problema. Porém, a maioria deles são adaptados às condições particulares do problema real a que está sendo submetido. Estas adaptações são justificadas pelo propósito de reduzir o esforço computacional, dadas as características combinatoriais. Normalmente, os procedimentos heurísticos são implementados explorando as características do problema. Nota-se, portanto, a dificuldade em desenvolver uma sistemática geral para a geração de escala de serviço para condutores de veículos.

Tipicamente, a solução ótima do problema não é única, ou seja, a solução ótima pode sofrer alterações sem produzir acréscimos no valor da função objetivo. Essa característica é bastante comum neste tipo de problema por se tratar de um problema de programação inteira  $\{0,1\}$  de grande porte. Estas possibilidades de alterações podem ser exploradas no sentido de contemplar algumas preferências dos condutores. O processo de construção de escala traz grandes dificuldades em situações reais. Se neste processo forem ainda consideradas as preferências dos condutores, ou seja, adequando os sequenciamentos das atividades de acordo com as preferências este problema toma-se ainda mais complexo.

## **1.2 Aplicação Prática numa Empresa de Transporte Ferroviário de Carga**

O presente trabalho aborda o problema de planejamento mensal de escalas de trabalho para condutores de trem de uma grande empresa de transporte ferroviário de carga. As jornadas de trabalho envolvidas correspondem às viagens com trem de carga, com trem de minério, manobras e prontidões. As jornadas se repetem todos os dias, porém, muitas destas jornadas não são concluídas no mesmo dia em que elas iniciam, como por exemplo, uma jornada que inicia às 21 horas e termina às 3 horas do dia seguinte. Além disso, algumas jornadas possuem uma duração de até 30 horas, mas somente 14 horas são efetivamente trabalhadas (conduzindo o trem), ou seja, as 7 horas iniciais e finais da jornada, sendo que nas 16 horas intermediárias o condutor descansa em uma base fora de seu domicílio. O objetivo é construir uma escala cíclica que utilize o menor número de condutores possíveis. A vantagem da escala cíclica é que se todos os condutores repetirem o mesmo ciclo de trabalho, ao final do ciclo todos terão, teoricamente, recebido a mesma carga de trabalho. Mensalmente, porém, é constatado um desequilíbrio na carga de trabalho entre os condutores, resultante de dois fatores: primeiro, pelo truncamento da escala cíclica (normalmente maior de 30 dias de duração) em escalas menores (com 30 dias de duração), resultando em escalas diferentes para cada condutor, e segundo, devido as alterações na programação da escala, resultante da falha de cumprimento de algum condutor e/ou da alteração de alguma viagem programada. Mensalmente, o gerente procura corrigir estas distorções atribuindo-lhes novas escalas, de maneira que a carga de trabalho fique melhor distribuída entre os condutores. A medida de carga de trabalho é feita pelo gerente de forma subjetiva em função de vários atributos intrínsecos na escala. Entretanto, nem sempre há uma satisfação entre os condutores com relação a sua escala de trabalho.

## **1.3 Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma sistemática para planejamento mensal de escalas de serviço para condutores de uma empresa de transporte de carga por trem, buscando uma distribuição mais equitativa da satisfação de cada condutor em relação à suas escalas de trabalho. Como medida de satisfação, será utilizada uma função utilidade ajustada através de técnicas de preferência declarada.

### 1.3.1 Objetivos Específicos

- Como objetivo secundário, o trabalho pretende apresentar uma pesquisa bibliográfica sobre o planejamento de escala de serviço que possa servir como referência e estímulo para outros trabalhos relacionados a este tema, que se considera promissor e pouco explorado, principalmente em trabalhos desenvolvidos no Brasil.
- Como medida de satisfação será utilizado o valor da função utilidade obtida através de técnicas de preferência declarada. Para isso, apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre técnica de preferência declarada, assim como, alguns exemplos onde esta técnica foi bem sucedida. É apresentado, também, a elaboração e a aplicação desta técnica para o caso deste trabalho. A técnica de preferência declarada é aplicada para calibrar uma única função utilidade que será utilizada para todo o grupo de condutores.
- A sistemática proposta para resolver o problema é composta de modelos matemáticos e algoritmos que foram implementados em dois sistemas computacionais. O problema de planejamento de escala foi dividido em duas partes: geração da escala cíclica e distribuição das escalas truncadas. O objetivo deste trabalho é apresentar os modelos matemáticos e os algoritmos desenvolvidos para resolver cada um dos problemas.
- Para automatizar o processo de geração e distribuição das escalas fez-se necessário a implementação de um sistema computacional para armazenar e gerenciar as informações, montar e resolver o modelo matemático, e finalmente, fomer a escala alternativa para o gerente operacional. Como conclusão deste trabalho apresenta-se um protótipo de um sistema de suporte para gestão do pessoal.

### 1.4 Contribuições

As contribuições deste trabalho estendem-se a três setores diferenciados: empresa, empregados e a área de conhecimento.

**Para a Área de Conhecimento:**

Os modelos matemáticos e algoritmos empregados para resolver o problema de geração de escalas cíclicas possuem características próprias não encontradas na literatura, portanto, podem ser considerados uma contribuição para área de conhecimento.

São poucos os trabalhos encontrados na literatura que utilizam a abordagem cíclica para a construção de escalas de trabalho para condutores. Dentre todos os trabalhos pesquisados nenhum faz menção sobre modelos matemáticos ou algoritmos para a distribuição das escalas e o planejamento mensal. Portanto, o algoritmo para o planejamento mensal apresentado neste trabalho é, também, um aspecto não encontrado na literatura.

A partir da revisão bibliográfica pôde-se constatar que a maioria das publicações procura apenas gerar escalas de trabalho que respeitem as restrições não deixando espaço para que as preferências do empregado sejam consideradas. Quando relatados na literatura, em casos muito raros, nos quais as preferências são levadas em conta, elas são empregadas de forma bastante simplificada, pois aumentam a complexidade do processo de geração de escala. Desta forma, a integração de modelos de geração de escala e medidas de satisfação em um sistema computacional pode também ser considerado uma contribuição deste trabalho, fornecendo uma nova perspectiva de geração de escala de trabalho que contempla tanto os anseios da empresa como os do empregado.

A utilização de técnicas de preferência declarada como forma de medir estatisticamente as preferências dos empregados com relação a sua escala de trabalho é uma importante contribuição deste trabalho.

**Para os Condutores e a Empresa:**

O objetivo principal da empresa não é de economizar recursos humanos de forma indiscriminada, uma vez que o número de condutores disponíveis está adequado às necessidades atuais da empresa. A empresa objetiva, portanto, racionalizar o processo de formação de escala de trabalho que resultará em benefícios tanto para os condutores quanto para a empresa.

No processo manual é praticamente impossível produzir escalas de trabalho otimizadas e equitativas, simultaneamente. As escalas estão constantemente suscetíveis às variações. Se uma escala de trabalho for mal planejada, no sentido de que algum condutor fique sobrecarregado excessivamente, não só o empregado fica prejudicado pessoalmente em decorrência do seu cansaço físico e mental, como coloca em risco outras pessoas, o patrimônio da empresa e as metas de produção preestabelecidas.

As desigualdades observadas nas escalas realizadas manualmente não são originadas propositadamente, mas oriundas de fatores aleatórios. Com a sistemática proposta neste trabalho é possível gerar escalas de trabalho mais equitativas, levando em consideração vários fatores, tais como: tempo de trabalho, os tipos de tarefas, horas noturnas, progressividade<sup>3</sup> e o dia de folga na semana. Portanto, gerar escalas de trabalho que levem em consideração a ponderação destes fatores favorece a definição de escalas de trabalho mais equitativas, levando a um maior nível de satisfação dos empregados e, conseqüentemente, a uma melhor produtividade.

Além das contribuições já citadas, um sistema computacional permitirá a geração de escalas de trabalho de melhor qualidade em menor espaço de tempo. Desta forma, a empresa tem condições de testar novas alterações no conjunto das atividades diárias e novas políticas operacionais, verificando em tempo hábil o impacto causado na solução. Alterações estas, que podem beneficiar tanto a empresa como os empregados.

## **1.5 Estrutura**

Este trabalho está dividido em 8 capítulos.

**Capítulo 1** - Introdução.

**Capítulo 2** - Apresenta uma revisão bibliográfica das metodologias empregadas para a solução do problema de planejamento de escala de serviço de empregados. A revisão se

---

<sup>3</sup> A progressividade entre duas tarefas é observada quando a hora de início da segunda tarefa não ocorre mais cedo que a hora de início da tarefa do dia anterior.

divide em duas partes. A primeira cobre os aspectos relacionados ao problema de planejamento de escala de serviço para trabalhadores em locais fixos e a segunda parte trata-se do problema de planejamento de escala de serviço para condutores de veículos.

**Capítulo 3** - Apresenta uma revisão bibliográfica sobre técnicas de preferência declarada e recomendações ergonômicas para o processo de geração de escala de trabalho.

**Capítulo 4** - Propõe uma solução do problema de planejamento de escala mensal de serviço para condutores de uma empresa de transporte ferroviário de carga.

**Capítulo 5** - É apresentado a aplicação da técnica de preferência declarada. A apresentação vai desde a identificação dos atributos de uma escala até o ajuste dos parâmetros da função utilidade.

**Capítulo 6** - São apresentados dois sistemas computacionais desenvolvidos. Um considerado mais simples, utilizado para testar um modelo matemático para a geração de escalas cíclicas, e o segundo, considerado um sistema mais completo, que apresenta uma interface amigável, auxiliando tanto na geração da escala cíclica como, também, para a distribuição das escalas entre os condutores.

**Capítulo 7** - Neste capítulo são apresentados os resultados conseguidos com os sistemas a partir de dados reais.

**Capítulo 8** - Traz a conclusão quanto aos resultados obtidos e propõe algumas recomendações para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: MÉTODOS PARA CONSTRUÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO

#### 2.1 Introdução

A literatura sobre o problema de planejamento de escala de serviço para trabalhadores é bastante extensa e diversificada sendo inclusive um tópico de estudo na área de pesquisa operacional. Embora não haja uma terminologia padrão entre todos os autores, o termo mais geral na literatura inglesa que expresse este tipo de problema é o *'manpower scheduling'*. Diferentes autores utilizam uma mesma terminologia, porém suas pesquisas são direcionadas para subproblemas. Como será mostrado neste capítulo, o problema de planejamento de escala de serviços para trabalhadores pode ser dividido em, pelo menos, dois subproblemas (*scheduling problem* e *rostering problem*), sendo muitas vezes tratados separadamente. Também, muitas das metodologias encontradas na literatura são desenvolvidas ou adaptadas para resolver o problema em um domínio particular.

Dentro deste contexto pode ser observado o enquadramento das pesquisas em dois enfoques: escala de trabalhadores em locais fixos e escala de condutores de veículos em empresas de transporte. Este capítulo trata destas duas partes procurando fazer um paralelo das características comuns. As idéias utilizadas para a solução do problema de planejamento de escala de trabalhadores em locais fixos são estendidas para o processo de planejamento de escala de condutores de veículos em empresas de transporte.

#### 2.2 Descrição Geral do Problema

O problema de planejamento de escala de serviços surge, basicamente, em empresas que operam 24 horas por dia, 7 dias por semana e onde o quadro de trabalhadores é dividido em vários turnos de trabalho durante o dia. Uma variação da demanda pode ser observada durante o dia e também durante a semana. A complexidade para a geração das escalas de trabalho

aumenta ou diminui, conforme a variação da demanda de serviços durante o dia e/ou durante a semana, conforme a variação dos tipos de serviços, do início e término de cada turno de trabalho, etc. A geração de escala de trabalho é uma atividade proveniente de organizações de serviço onde os empregados necessitam ser escalados através de vários turnos para cobrir a variação de demandas 24 horas por dia e 7 dias por semana.

Em algumas organizações (unidades) de serviço, como por exemplo, naquelas que prestam serviços ao público diariamente, pode ser notada uma variação da demanda (Figura 2-1) no decorrer do dia. Normalmente, a demanda sofre variações a cada dia da semana, principalmente nos finais de semana e feriados. Exemplos clássicos podem ser encontrados na literatura, tais como, planejamento de escala para enfermeiras (Miller, 1976; Warner, 1976) e operadores de telefone (Keith, 1979; Henderson, 1976; Segai, 1974).

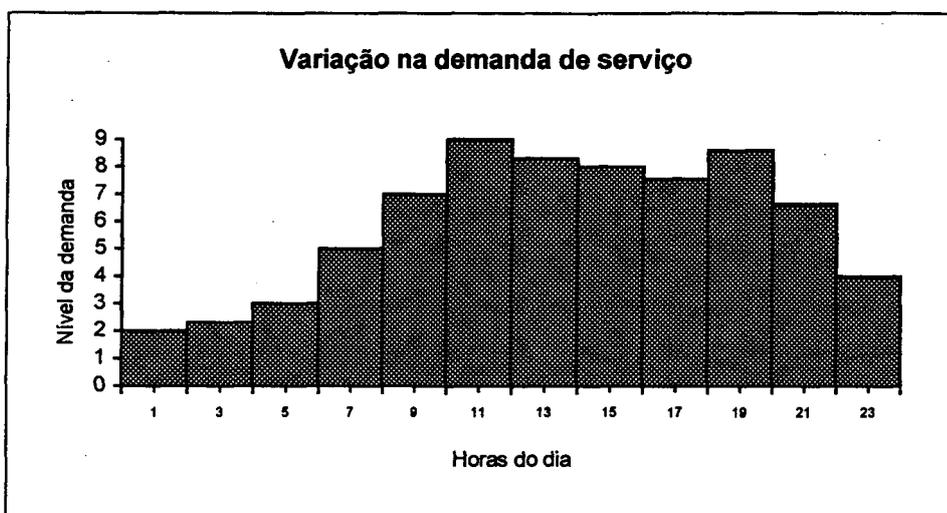


Figura 2-1. Demanda de mão-de-obra durante um dia de trabalho.

O objetivo é determinar o conjunto de turnos de trabalho que cubra a demanda diária e depois especificar os dias de trabalho e dias de folga para cada um dos empregados, satisfazendo a demanda semanal, minimizando o custo global. Neste objetivo podem ser notados dois problemas que costumam ser tratados separadamente. O primeiro refere-se à construção de um conjunto de turnos diário de trabalho de maneira que cubra a variação de demanda com um custo mínimo. Um turno de trabalho pode ser uma sequência de intervalos de trabalho intercalados com intervalos de parada (para descanso, substituição, almoço, lanche, etc). O segundo problema consiste em especificar sequências de turnos de trabalho para cada empregado intercalado por dias de folga. Normalmente, neste problema procura-se minimizar o número de empregados necessários e distribuir a carga de trabalho. Na revisão da literatura

observou-se uma tendência em denominar estes dois problemas de *scheduling problem* e *rostering problem*, respectivamente, principalmente na literatura referente ao planejamento de escala de serviço para condutores de veículos.

Para o planejamento de escala de serviços não basta apenas criar as sequências de trabalho para cada empregado, sendo necessário respeitar as restrições impostas pela legislação do trabalho, pelas regras da empresa e acordos sindicais, e também, algumas recomendações ergonômicas. Restrições típicas no problema de planejamento de escala impõem um limite inferior e um limite superior sobre o número de horas num turno de trabalho; um número mínimo de intervalos de paradas; um limite superior e um limite inferior do número de dias de trabalho e folgas, restrições sobre mudanças específicas de um turno para outro (turno da noite para turno da tarde, turno da tarde para turno da manhã) e restrições sobre o número de períodos consecutivos de alguns tipos de turnos (exemplo, turno noturno). Estas restrições são normais e ocorrem com frequência na prática. A prevenção de mudanças de turnos dentro de um período de tempo é uma cláusula que existe em quase todas as empresas para evitar mudanças bruscas de turnos. A extensão máxima e mínima do período de trabalho são estabelecidas para que o empregado não tenha um período de trabalho nem tão curto nem tão longo. Algumas destas restrições também são reforçadas pelas recomendações ergonômicas (Knauth, 1982; Schwarzenau, 1986)

### 2.3 Conceitos

Antes de prosseguir, convém estabelecer alguns conceitos básicos para facilitar o entendimento posterior. Um *período de planejamento* é o período de tempo para qual o planejamento de escala de serviços é feito. O período de planejamento é um parâmetro que deve ser especificado pelo gerente, sendo muitas vezes estabelecido por restrições legais. Normalmente, um período mínimo de uma semana é estabelecido. Um *empregado* (ou trabalhador) é uma unidade básica de recurso humano no processo de geração da escala de serviços. Um *turno de trabalho* (ou simplesmente turno) é um período de tempo no qual um empregado executará uma atividade no curso de um dia de trabalho. Uma *parada (break)* é um intervalo de tempo durante o turno de trabalho para descansar ou para fazer alguma refeição. Os *tipos de turnos* são identificados pela hora de início, hora de término, duração e pelas janelas de parada (almoço, café, descanso, etc) e pelo tipo de atividade. Um *dia de folga* (ou descanso) é um dia

em que o empregado não executará nenhum trabalho na empresa. Uma *programação* é uma sequência de turnos e folgas que um empregado executará durante o período de planejamento. Uma *escala* é um conjunto das programações de todos os empregados. A Tabela 2-1 é uma simples ilustração dos conceitos:

	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Dom
Antônio	2	1	1	3	2	1	x
José	1	3	2	1	x	x	3
Manoel	3	3	x	x	3	2	1
Pedro	x	1	2	2	2	3	1

**Tabela 2-1.** Uma escala para 4 trabalhadores com período de planejamento de uma semana. São considerados 3 tipos de turnos (1, 2 e 3) com demanda variando a cada dia, sendo a folga denotada por x. Cada linha representa uma programação.

## 2.4 Escala Cíclica X Escala Individualizada

Na literatura podem ser encontradas várias sistemáticas para gerar escala de serviço para um período mínimo de uma semana, cada uma delas enquadrando-se em uma das duas abordagens, nomeadas de *cíclica* e *individualizada* (Khoong et al, 1994).

*Escala cíclica* ( também denominada de rotacional, ou comum) consiste num conjunto de programações que são repetidas ( ou rotacionadas) entre os empregados no decorrer do tempo. Por exemplo, considere o período de planejamento de uma semana. Seja  $w$  o número de empregados. Assim, cada programação é associada a um empregado  $p$ , onde  $p = 1, \dots, w$ . Na semana seguinte o empregado  $p$  é associado à programação  $p+1$  se  $p < w$ , e o empregado  $p=w$  é associado a programação 1. Assim, a mesma escala pode ser utilizada indefinidamente.

A principal motivação para este tipo de escala é que sobre um período de tempo igual a  $w$  vezes o período de planejamento, todos os trabalhadores deverão ter cumprido a mesma sequência de trabalho e de folgas. A única diferença é que a executarão em semanas diferentes, isto é, o que o empregado  $i$  faz na semana 1, o empregado  $i-1$  fará na semana 2, e assim por diante. Com essa abordagem, no final de cada ciclo, a carga de trabalho será uniformemente distribuída entre os empregados, pois todos terão executado as mesmas atividades.

*Escala individualizada* (também denominada de fixa ou não-cíclica) consiste de programações que são únicas para cada empregado. A escala que será construída para cada empregado só depende do período de trabalho anterior e das restrições legais. Isto significa que cada empregado pode executar uma sequência de trabalho diferente dos demais.

Note que não é possível aplicar ambas as abordagens, individualizada e cíclica, ao mesmo tempo. As escalas cíclicas são mais fáceis de serem gerenciadas e são mais estáveis, mas também são pouco flexíveis a mudanças, pois a mesma sequência de trabalho é repetida para todos os empregados. Exemplos podem ser encontrados em Baker e Magazine (1977), Bums e Koop (1987), Emmons (1985) e Balakrishman e Wong (1990). As escalas individualizadas, por outro lado, são mais flexíveis, pois podem ser adaptadas às flutuações do nível de demanda e captar as preferências individuais. Exemplos podem ser encontrados em Bums e Carter (1985), Miller (1976), e Warner (1976).

As diferenças entre as duas abordagens não ficam por aqui, existem outras razões que justificam a utilização de uma ou de outra abordagem. As características do problema real podem influenciar na escolha do tipo de abordagem. Algumas destas características serão vistas no transcorrer deste trabalho.

## **2.5 Escala de Serviço para Trabalhadores em Locais Fixos.**

Este tipo de planejamento de escala se caracteriza pela localização dos trabalhadores dentro de um ambiente de trabalho, como por exemplo, uma fábrica e um hospital. Tipicamente, um dia de trabalho é dividido em  $m$  intervalos de tempo e uma demanda,  $r_p$ , de empregados é associada para cada intervalo de tempo  $l= 1, 2, \dots, m$ . Assim, o problema de alocação de empregados para um dia específico de trabalho, consiste em descobrir um número mínimo de empregados e seus respectivos turnos de trabalho, de maneira que cubra toda a variação de demanda diária. De um modo geral, os empregados podem se revezar entre si, sendo que qualquer empregado pode ser substituído ao final de qualquer intervalo, da mesma forma que qualquer empregado pode começar no início de qualquer intervalo de tempo. Uma diferença nítida e comum para uma empresa de transporte é que os condutores de veículos (ou tripulação de avião ou trem) dependem de sua localização espacial para iniciar ou terminar

uma viagem e/ou para serem substituídos. Normalmente, existem pontos geográficos específicos para que um condutor possa iniciar ou terminar uma viagem, ou mesmo para ser substituído por outro condutor, como por exemplo na garagem e num terminal (ou no aeroporto no caso de tripulação de avião).

Na construção da seqüência de trabalho e folgas o decisor deve considerar um número de questões importantes tais como, quantos empregados contratar, a extensão do período de planejamento, que tipo de seqüências de trabalho usar e como atribuir os turnos de trabalho a estas seqüências, de forma que todas as restrições sejam satisfeitas. Vários algoritmos para construção de escala de serviço encontram-se na literatura respondendo a todas ou a algumas destas questões. Tien e Kamiyama (1982) fazem uma extensa revisão bibliográfica sobre o estado da arte do problema de planejamento de escala de serviço. Esta divisão de processos para geração de escala levou Tien e Kamiyama a considerar um esquema sistemático com 5 estágios diferentes, porém, relacionados para resolver o problema.

**Estágio 1 :** Demanda temporal de empregados. Determina a demanda para cada turno de cada dia da semana. São utilizados alguns procedimentos estatísticos neste estágio.

**Estágio 2:** Demanda mínima total de empregados. Determina o número mínimo total de empregados necessários para atender a demanda temporal.

**Estágio 3:** Identificação dos períodos de folga. Combinar os dias de folga permitidos para formar os períodos de folga, isto é, agrupar os dias de folga em blocos possíveis.

**Estágio 4:** Sequenciar os períodos de folga. Define as seqüência dos períodos de folga encontrados no estágio 3.

**Estágio 5:** Sequenciar os turnos de trabalho. Os períodos de trabalho são formados em função das seqüências de períodos de folga.

A maneira com que o esquema acima é definido reflete uma seqüência usual de passos seguidos para se chegar a uma escala de trabalho geral. A maioria dos métodos utilizados para resolver o problema tem se dirigido para cada estágio sequencialmente, conforme a ordem dada acima. Algumas vezes reverte a ordem ou resolve dois ou mais estágios simultaneamente. Vários algoritmos tentam minimizar o número total de empregados (estágio 2) sujeito às restrições impostas para os períodos de folgas permitidos (estágio 3) e às escalas de trabalho/folgas (estágio 4 e 5). Também ocorrem iterações ou *feedbacks* entre os estágios para corrigir alguma inviabilidade ou escala menos desejada, resultante de estágios anteriores.

Balakrishnan e Wong (1990) combinam os estágios 1 e 2 como sendo um problema de alocação de mão de obra (*workforce allocation*). Os estágios 3 à 5 como sendo um problema de escala (*scheduling*).

Lau (1996) propõe 3 principais estágios: alocação (estágio 1 e 2), escala das folgas (estágio 3 e 4) e escala dos turnos.

### 2.5.1 O Problema de Alocação

A alocação de turnos (ou *shift allocations*) está relacionada com a determinação dos níveis de demanda de serviços para cada turno em cada dia. O problema de alocação depende do conjunto de tipos de turnos e do perfil da demanda temporal. Para o planejamento definido no período de uma semana é uma prática comum resolver o problema de alocação separadamente para cada dia, desde que os turnos iniciem e terminem no mesmo dia. O problema de alocação de turnos está, algumas vezes, ligado com o problema de determinação do número de empregados necessários, isto é, calcular o número de empregados necessários para cobrir a demanda que varia a cada dia durante o período de planejamento.

Tipicamente, um dia de trabalho pode ser dividido em  $m$  intervalos de tempo, e em cada um é observada uma demanda  $r_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ . O objetivo é construir um conjunto de turnos de trabalho de maneira que atenda a variação da demanda com o número mínimo de empregados. Dantzig (1954) foi o primeiro a formular o problema de alocação como um problema de programação linear inteira com variáveis de decisão representando o número de empregados associado à cada turno. A formulação, conhecida como *set covering* generalizado, é dada abaixo:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_{j=1}^n Y_j c_j x_j \\ & \text{sujeito a} \\ & \sum_{j=1}^n H_{ij} x_j \geq R_i, \quad i=1, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j=1, \dots, n \end{aligned} \tag{2-1}$$

onde

$m$  = número de intervalos de tempo;

$n$  = número de turnos possíveis;

$X_j$  = número de empregados associado ao turno  $j$  ( $x_j \geq 0$ , inteiro);

$c_j$  = o custo de um empregado associado ao turno  $j$ ;

$U_i = 1$ , se o intervalo  $i$  é coberto pelo turno  $j$ ;

$a_{ij} = 0$ , caso contrário;

$r_i$  = demanda (número de empregados exigidos) no intervalo de tempo  $i$ .

Cada coluna da matriz ( $\%$ ) representa um tipo de turno possível. Aqui, o valor de  $C_j$  é o custo de alocar um empregado a um turno  $j$ . Se o objetivo é minimizar o número de empregados, então,  $C_j = 1$ , mas, em geral pode refletir uma taxa de custo (por exemplo, salário) ou preferência relativa.

A fim de mostrar a relação do problema de alocação com o modelo acima, será apresentado um exemplo. O exemplo trata de um sistema simples que opera 8 horas por dia. Cada turno tem duração de 4 horas, sendo 1 hora de parada (descanso ou lanche) na segunda ou terceira hora do turno. Cada turno pode começar a qualquer hora do dia, tal que, a última hora do dia não deve ultrapassar a oitava hora do dia de trabalho. Desta forma, é possível obter 10 tipos de turnos conforme representado na Tabela 2-2. Cada linha  $i$  representa uma hora do dia de trabalho, cuja demanda é dada por  $r_i$  ou seja, na primeira hora necessita, no mínimo, de 10 empregados, na segunda de 20 e assim por diante. Cada coluna  $j$  representa um tipo de turno de 4 horas de duração, sendo uma hora de descanso, denotada por 0.

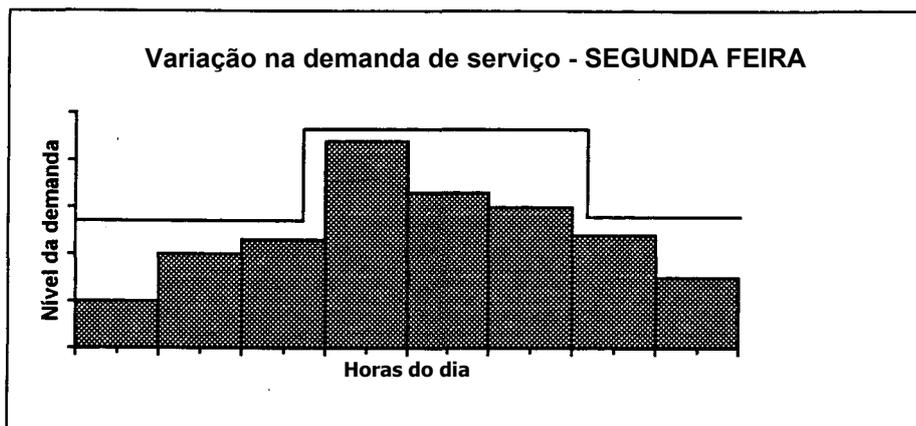
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$r_i$
Horas											
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	$\geq 10$
2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	$\geq 20$
3	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	$\geq 50$
4	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	$\geq 100$
5	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	$\geq 120$
6	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	$\geq 70$
7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	$\geq 30$
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	$\geq 20$

**Tabela 2-2.** Formulação sugerida por Dantzig.

Resolvendo este problema *set covering* associado a Tabela 2-2, obtém-se o número de empregados necessários que será igual a  $2 \times y$ . Além disso, resultam, também, os tipos de turno que deverão ser utilizados.

Existe uma vasta literatura sobre técnicas de solução do problema *set covering*. Por exemplo, Segai (1974) desenvolveu, para este problema, uma heurística baseada em fluxo em rede. O problema de alocação também tem sido resolvido por outras heurísticas, como por exemplo Keith (1979), Barthold (1981) e Henderson e Berry (1976).

Da solução obtida, certamente alguns intervalos serão cobertos com folgas de mão-de-obra, enquanto que, em outros, o número de empregados será justamente o mínimo exigido. Esta ilustração é mostrada na Figura 2-2.



**Figura 2-2.** Um histograma de folga superposto sobre o histograma de demanda. O histograma preenchido representa a demanda, enquanto que a linha superior representa um histograma do número de empregados alocados durante o dia.

Em problemas de alocação mais realistas está envolvido um número muito grande de variáveis. Cada variável representa um tipo de turno. Cada tipo de turno é identificado pela hora de início, hora de término, extensão do período de trabalho diário e do número de intervalos de tempo. Combinando todos estes atributos geram-se todos os turnos legais, isto é, aqueles que respeitam as restrições impostas pela legislação do trabalho, pela empresa e pelos acordos sindicais. Aykin (1996) apresenta um estudo sobre comportamento dos problemas de alocação (denominado de *shift scheduling*) envolvendo situações de múltiplas paradas durante o turno, e propõe um método para reduzir o número de variáveis (tipos de turnos). Em seu estudo, ele toma um problema que envolve um período de trabalho contínuo de 24 horas. A demanda de empregados é determinada para 96 intervalos de 15 minutos.

### 2.5.1.1 Cálculo do Número Mínimo de Empregados

Até aqui tratou-se do problema de como determinar o número mínimo de empregados necessários para um dia de trabalho e o conjunto de turnos a serem realizados a cada dia. Agora, olhando para um horizonte maior, isto é, considerando períodos maiores, digamos, de uma semana, observa-se que a demanda varia de um dia para outro, principalmente nos finais de semana. Além disso, na prática, tem-se observado que alguns empregados não trabalham por ser seu dia de folga. Assim, o número de empregados necessários acaba sendo maior que o mínimo encontrado pelo processo anterior. Surge, portanto, a pergunta: Quantos empregados contratar de maneira que atendam as demandas diárias e respeitem as restrições legais? Este valor depende das características do problema, tais como, o número máximo e mínimo de dias de trabalho e os dias de descanso. Vários trabalhos tem sido desenvolvidos para algumas configurações do problema.

Uma formulação do tipo *set covering*, semelhante àquela descrita anteriormente, também tem sido utilizada para minimizar o número total de empregados (Barthold, 1981). Cada restrição representa um dia da semana, cada variável de decisão (ou coluna da matriz) representa uma sequência de dias de trabalho e folgas e os coeficientes do lado direito representam o número mínimo de empregados para cada dia da semana. Este modelo, também, tem a função de identificar os períodos (blocos) de dias de folga, resolvendo um problema para o próximo estágio, a ser descrito na seção 2.5.2 sobre escala das folgas. Sua formulação é a seguinte:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \sum_{j=1}^n c_j x_j \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq d_i, \quad i = 1, \dots, 7 \\
 & x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

onde

$d_i$  é o número mínimo de empregados necessário no dia  $i$  para atender a variação da demanda diária;

$n$  é o número de turnos possíveis.

$a_{ij} = 1$  se o empregado trabalha no dia  $i$ , e 0 se o dia  $i$  é uma folga.

Um modelo semelhante a (2.2) foi utilizado por Bianco et al (1992) para estimar o número mínimo de condutores de ônibus em uma empresa de transporte de massa.

Vários trabalhos de pesquisa abordam este estágio. Diferentes fórmulas têm sido desenvolvidas para minimizar o número de empregados em função de várias premissas. Por exemplo, se o número de empregados necessários para qualquer dia é  $d_i$ , os empregados devem ter períodos de trabalho de no mínimo dois dias de folga por semana, e  $a$  finais de semana de folga em  $f$  semanas ( $1 < a < f$ ), Emmons (1985) mostraram que o número mínimo de empregados é dado por:

$$w = \max \{ \lceil \frac{\sum_{i=1}^7 d_i}{f-a} \rceil \} \quad (2.3)$$

onde

$\lceil x \rceil$  é o menor valor inteiro maior que  $x$ .

Bums e Carter (1985) generalizaram a situação acima. O objetivo foi minimizar o número  $w$  de empregados necessários para cobrir os 7 dias da semana, tal que as seguintes restrições sejam satisfeitas:

- (a) a demanda diária  $d_j$  ( $j=1, \dots, 7$ ), sendo  $d_7$  a demanda de sábado;
- (b) a cada empregado são dados no mínimo  $a$  finais de semana de folga, a cada  $f$  semanas;
- (c) cada empregado trabalha 5 dias em cada semana (domingo à sábado);
- (d) cada empregado não trabalha mais de 6 dias consecutivos.

Os autores formularam três limites inferiores, a saber:

$L_1$ : Em  $f$  semanas, cada empregado está disponível  $(f-a)$  finais de semana. Portanto,

$$[(f-a)w] \geq d, \text{ onde } d = \max \{d_i, d_7\}$$

$$\Rightarrow w \geq \lceil \frac{d}{f-a} \rceil$$

O número médio de empregados disponíveis em cada final de semana deve ser suficiente para satisfazer a demanda máxima do final de semana.

$L_2$ : Desde que cada empregado trabalhe 5 dias por semana, tem-se:

$$5w \geq \sum_{i=1}^7 d_i \Rightarrow w \geq \left\lceil \frac{1}{5} \sum_{i=1}^7 d_i \right\rceil$$

O número total de empregados deve ser suficiente para satisfazer a demanda total da semana.

$$Z_3: w \geq \max_i \{d_i\}, i = 1, 2, \dots, 7$$

O número de empregados deve ser suficiente para satisfazer a demanda máxima para qualquer dia.

Portanto, o número  $w$  de empregados necessário é o máximo entre  $L$ ,  $L_i$  e  $Z_3$ , ou seja,

$$w = \max \{Z_1, L_2, L_3\} \quad (2.4)$$

Nota-se que esses modelos são utilizados com base em algumas hipóteses, como por exemplo, turnos que iniciam e terminam no mesmo dia. Entretanto, para algumas empresas de transporte o motorista pode realizar viagens muito longas de forma que retome a base somente um ou dois dias depois. Nesse caso um turno de trabalho ultrapassa o período de um dia. É claro que durante este período o motorista tem seu período de repouso, porém, fora de sua residência. Para uma situação com esta característica os modelos matemáticos anteriores podem não funcionar, necessitando, portanto, de outras alternativas.

### 2.5.2 O Problema de Escala dos Dias de Folga.

Este é um estágio que consiste em gerar os períodos de folgas e sequenciá-los. Algumas vezes são tratados separadamente como sendo os estágios 3 e 4, identificados por Kamiyama (1982)

A formulação frequentemente utilizada para a identificação dos blocos de folgas tem sido o modelo *set covering*. Cada coluna  $j$  da matriz  $(a_{ij})$  corresponde a um período de folga permitido e o elemento  $a_{ij}=0$  denota que o dia  $i$  é um dia de folga naquele período. O número de colunas da matriz é igual ao número de períodos de folga legal possíveis.

Por exemplo, considere um modelo baseado em 7 dias de operação com as seguintes premissas:

(P1) Cada empregado trabalha 5 dias consecutivos por semana;

(P2) Cada empregado tem direito a 2 dias de folga consecutivos por semana.

Em vista da premissa PI, existe somente sete sequências (ou turnos) possíveis de trabalho (enumeração completa), isto é, sete colunas diferentes para a matriz (%), resultando no seguinte problema:

Minimizar (  $*1 + x_2 + *3 + JC_4 + x_5 + *6 + Xi$  )

$$\text{Sujeito à } \left| \begin{array}{ccccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} *1 \\ X2 \\ *3 \\ *4 \\ *5 \\ *6 \\ *7 \end{array} \right| \geq \left| \begin{array}{c} d_x \\ d_2 \\ d_5 \\ d^* \\ d\$ \\ de \\ di \end{array} \right|$$

onde

$Xj \geq 0$ , inteiro, representa o número de empregados para executar o turno $j$ ;

$di$  é o número de empregados necessário no dia  $i$ ,  $i=1, \dots, 7$ .

No problema de alocação é determinado o número total de empregados,  $w$ . Portanto, o número máximo de empregados de folga a cada dia é dado por:  $f_i = w - di$ . Desta forma, é possível construir um problema complementar ao anterior em função dos valores das folgas:

Maximizar (  $Xi + x_2 + *3 + X_4 + X_5 + x_6 + Xj$  )

$$\text{Sujeito à } \left| \begin{array}{ccccccc} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} *1 \\ x_2 \\ *3 \\ XA \\ x_5 \\ X( \\ x_7 \end{array} \right| \leq \left| \begin{array}{c} A \\ h \\ A \\ A \\ Ai \\ A \\ Ai \end{array} \right|$$

onde

$Xj \geq 0$ , inteiro, representa o número de empregados para cumprir a folga $j$ ;

$f_i$  é o número máximo de empregados de folga no dia  $i$ ,  $i=1, \dots, 7$ .

Os dois problemas anteriores são bem comportados e a solução pode ser obtida facilmente. Para situações reais as premissas indicadas são relaxadas e diversificadas, gerando, assim, várias colunas da matriz.

É importante notar que cada período de folga formado deve satisfazer todas as restrições impostas. O resultado desses problemas será o número de vezes (frequência) que cada tipo de período de folga for usado na escala final dos empregados.

O próximo passo será sequenciar esses períodos de folga encontrados. A maneira de resolver este problema vai depender do tipo de escala que se pretende realizar, escala cíclica (comum) ou escala individualizada. Para Khoong et al. (1994), uma escala de folgas cíclica é modelada como um processo de selecionar programações de folgas (períodos de trabalho com alguns dias de folga), seguindo um esquema de arranjá-los em um ciclo. Um ciclo candidato é gerado para cada programação de folgas como um ponto de partida no ciclo, e o melhor ciclo é retomado como a escala de folgas. A geração de cada ciclo envolve um algoritmo *branch-and-bound* que respeita as restrições de demanda, as preferências dos dias de folga e as restrições sobre a extensão do período de trabalho e folgas consecutivas. O resultado do algoritmo *branch-and-bound* é ainda passado para um processo de melhoria através da heurística 2-opt, pois o ciclo é tratado como um problema do *caixeiro viajante*. Esta abordagem também é utilizada por Balakrishman (1990).

Para o problema de escala das folgas individualizadas, Khoong et al. (1994) o resolve em duas etapas. O primeiro estágio associa as folgas de finais de semana através de um algoritmo guloso (*greedy*). No segundo estágio, as folgas da semana são associadas entre si através de um problema de transporte com restrições adicionais. O autor implementou um algoritmo heurístico que procura balancear os dias de folgas durante o período de planejamento.

### **2.5.3 O Problema de Escala dos Turnos**

Este estágio completa todo o processo de geração de escala de serviços. Neste momento são atribuídos os turnos de trabalho dentro dos períodos de trabalho. Este problema também pode ser resolvido sob dois enfoques, cíclico ou individualizado. Por exemplo, Khoong et al. (1994) resolvem o problema de escala cíclica dos turnos de trabalho usando primeiramente uma heurística para gerar uma escala inicial. O resultado é ainda melhorado por um processo iterativo utilizando uma variação da heurística 2-opt. A escala resultante, que pode ser muito

boa, é então usada como um limite superior inicial para um algoritmo *branch-and-bound* mais complicado, que visa uma solução ótima global.

Já o problema de escala individualizada dos turnos de trabalho é resolvido através de uma série de problemas de atribuição padrão, um para cada dia do período de planejamento. O algoritmo húngaro é usado para resolver sequencialmente os problemas de atribuição. Vários modelos baseados em problemas de atribuição podem ser encontrados na literatura sobre planejamento de escala para condutores de veículo, como por exemplo: Chiessi (1984), Carraresi e Gallo (1984b) e Bianco et al (1992).

#### **2.5.4 Comentários.**

Embora tenham sido identificados três estágios para resolver o problema, eles não são necessariamente realizados em sequência. Alguns autores resolvem o problema de maneira que os estágios interajam entre si. Balakrishnan (1990) salienta que é preferível realizar a escala de folgas e de serviços simultaneamente, pois um método sequencial que otimiza em estágios separados pode não otimizar globalmente o problema. Em algumas situações, resolver esses problemas simultaneamente, pode se tornar muito difícil se o número de restrições impostas sobre os períodos de trabalho, os períodos de folgas e o sequenciamento destes períodos for muito grande.

É bastante comum na literatura sobre planejamento de escala de serviço para condutores de veículo, a utilização de somente dois estágios (ou sub-problemas): o problema de alocação e o de escala de trabalho/folga (geralmente, semanal). O problema de alocação corresponde ao termo *crew scheduling* utilizado pela maioria da literatura inglesa, enquanto que o problema de escala semanal (ou mensal) de serviço corresponde ao termo *crew rostering*.

## **2.6 Escala de Serviços para Condutores de Veículos**

Uma característica básica que distingue o problema de escala de serviços para condutores de veículos em empresas de transporte em geral, do problema de escala de serviço em locais fixos é justamente a consideração da localização espacial dos empregados durante a execução de seu trabalho. Dado que a tarefa principal de um condutor de veículo é realizar viagens, decorre que

um condutor só pode iniciar e terminar sua viagem, ou ser substituído por outro condutor, em pontos específicos, tais como a garagem e/ou um terminal. Assim, um condutor não está disponível para ser alocado em qualquer intervalo de tempo como considerado na seção 2.5. Portanto a metodologia de dividir um dia de trabalho em  $m$  intervalos de tempo, não funciona para o problema de escala de condutores de veículos, pois os intervalos de tempo executados por um condutor dependem do trajeto a ser realizado, Estas idéias também se estendem para o caso de tripulação de avião e trem.

Ao invés da escala dos condutores ter de cobrir intervalos de trabalho, como considerado na seção 2.5, seu compromisso agora é cobrir toda a programação de viagens dos veículos, isto é, um conjunto de viagens. É claro que é possível construir um histograma de demanda para vários intervalos de tempo durante um dia, e para cada intervalo associar uma demanda  $d_i$ , que significa o número de veículos operando no intervalo de tempo  $i$ . Porém um turno de trabalho para um condutor não é uma sequência de intervalos, e sim, uma sequência de segmentos de viagem que poderá ou não ser executada em um único veículo, pois normalmente, as empresas limitam o número de troca de veículos durante o dia.

Como pode ser observado, a escala de condutores de veículos depende da escala dos veículos. A característica básica de um problema de escala de veículos é sequenciar as atividades dos veículos no espaço e no tempo. Este problema não será tratado neste trabalho. Uma boa revisão do estado da arte sobre roteirização e escala de veículos e condutores é apresentado por Bodin et al (1983) em uma publicação especial da revista *Computers & Operations Research*.

Note que, se a política de uma empresa de ônibus for de associar cada condutor a um único veículo, então a escala de serviço do condutor para um dia de trabalho será a mesma escala do veículo. Neste caso, é preferível que a escala de serviços de condutores e veículos seja feita de maneira integrada. Bodin et al (1983) sugerem que a escala de ônibus e condutores seja resolvida em um único problema, uma vez que o custo com condutores domina o custo de operação dos veículos. Mas que, na prática, estes problemas são resolvidos separadamente em função de suas complexidades.

A literatura divide o problema de planejamento de escala de serviços para condutores em empresas de transporte em duas partes: o “*crew scheduling*” (CS) e o “*crew rostering*” (CR).

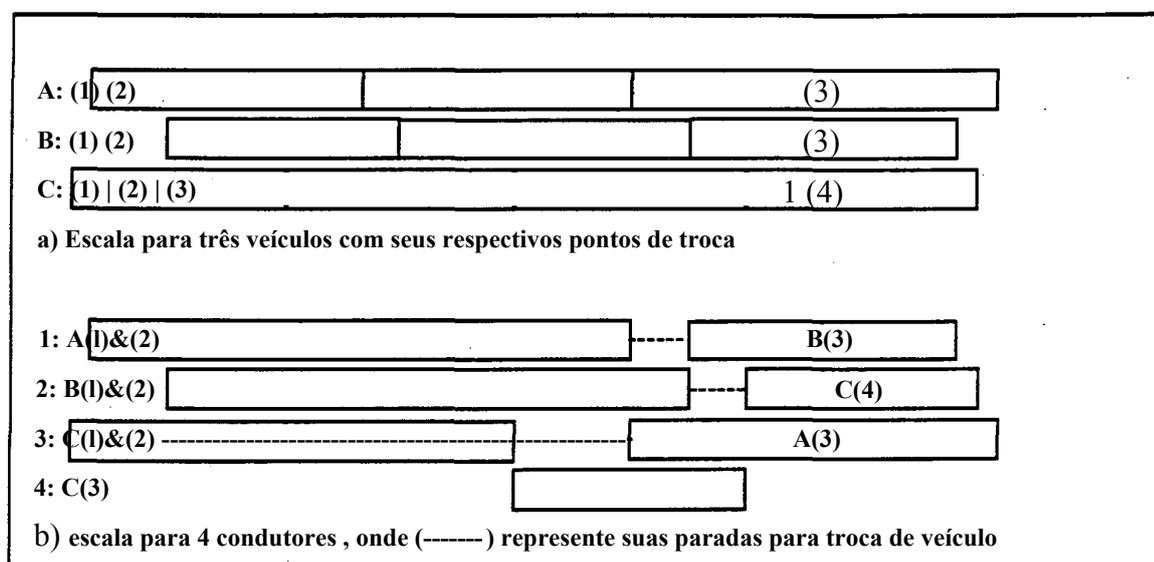
O primeiro problema, o *crew scheduling*, será denominado de problema de *alocação de condutores*, enquanto que o segundo, será denominado de *escala de serviço para condutores*. O problema de alocação pressupõe, a princípio, que esteja definido o conjunto de tarefas a ser executado por cada veículo da frota durante o curso de um dia, resultante da escala de veículos. O problema de alocação consiste, basicamente, em construir um conjunto de turnos de trabalho (viagens). Cada um é constituído, normalmente, por mais de um segmento (ou parte) de viagem de maneira que toda a programação de veículos seja coberta com um custo mínimo. Já o segundo problema, denominado de problema de escala de serviço, e que será abordado neste trabalho, pressupõe que todas as tarefas diárias (além das viagens) a serem cumpridas pelos condutores sejam conhecidas. O objetivo deste problema é associar cada tarefa diária a um condutor ao longo de um período de planejamento de uma semana ou um mês. Em alguns casos, procura-se construir seqüências de trabalho para cada condutor de forma que todas as tarefas diárias sejam cobertas por um número mínimo de condutores. Em outros casos, o quadro de condutores é definido e procura-se, então, construir seqüências de trabalho de forma que cada condutor receba uma carga balanceada de trabalho. Uma seqüência de trabalho é considerada legal desde que respeite todas as restrições impostas pela empresa, regulamentos da profissão e acordos sindicais.

## **2.6.1 O Problema de Alocação.**

### **2.6.1.1 O Problema de Alocação em Empresas de Ônibus**

Antes de prosseguir, convém estabelecer alguns conceitos e notações para facilitar o entendimento posterior. A princípio os conceitos são baseados no problema de alocação de condutores de ônibus de uma empresa de transporte de passageiros, e posteriormente, serão estendidos à tripulação de avião e de trem. Considere, então, o exemplo da Figura 2-3, que mostra a escala para 3 ônibus (A, B e C) e 4 condutores (1, 2, 3 e 4). Para cada veículo define-se um *bloco* que significa o itinerário de um veículo durante um dia de trabalho, iniciando e terminando em um determinado local, normalmente, na garagem. No decorrer de sua rota o veículo pode passar por pontos nos quais pode ocorrer troca de condutores. Estes pontos são denominados *pontos de troca* (ou substituição). Por exemplo, o bloco A possui 2 pontos de trocas. Estes pontos de troca estabelecem uma partição do bloco de cada veículo. Uma *etapa* (*d-trip*) é porção de um bloco determinado por dois pontos de trocas consecutivos. Um *segmento* (*piece*) de viagem é um período de tempo durante o qual o condutor trabalha

continuamente com o mesmo veículo. Cada segmento é constituído por sequências de etapas. Um segmento de viagem é restrito por uma duração mínima e máxima. Um *turno de trabalho* (ou corrida) consiste de um ou mais segmentos de viagem executado pelo mesmo condutor. Normalmente, o número de segmentos em um turno é limitado (2 à 4). No exemplo da Figura 2-3, foram construídos 4 turnos de trabalho com seus respectivos tempos de paradas para troca de veículo, exceto o turno 4.



**Figura 2-3.** Escala de veículos e condutores (Fonte: Bodin et al (1983))

Portanto, para resolver o problema de alocação é necessário, primeiramente (a) estabelecer os blocos, que especificam os planos de trabalho para os veículos durante um dia; (b) decompor o bloco em um conjunto de segmentos de viagens conforme os pontos de troca e, então, sequenciar os segmentos formando os turnos de trabalho. Um turno de trabalho para cada condutor é obtido agrupando um ou mais segmentos de viagens juntos. É claro que, a viabilidade da junção de um segmento com outro depende não somente do tempo final do primeiro segmento com relação ao tempo inicial do segundo, mas também da localização final do primeiro segmento com relação a localização inicial do segundo. Além das restrições de tempo e de espaço, um turno de trabalho é viável se restrições, tais como os regulamentos trabalhistas, as regras da empresa e acordos sindicais, forem respeitadas.

Note que, trata-se de um processo combinatorial. Sendo assim, em situações reais é possível gerar milhares de turnos viáveis. O objetivo é escolher o conjunto de turnos com o menor custo e que cubra todos os segmentos de viagens. Existem vários métodos para resolver o problema de alocação de condutores como descreve Bodin et al. (1983), tais como:

heurísticos, *matching*, *set covering*, *setpartitioning*, *Run cutting* e decomposição. Os modelos *set covering* e *set partitioning* têm sido amplamente utilizados para resolver esse tipo de problema.

### 2.6.1.2 O Problema de Alocação em Empresas Aéreas.

O problema de alocação para tripulação de avião também é chamado de problema de otimização das rotações (Chiessi, 1984), ou ainda, *pairing problem* ou *rotation problem*. A solução do problema se inicia dividindo cada vôo diário em *etapas* de vôo. Uma etapa corresponde a uma viagem entre duas cidades, ou seja, uma decolagem e uma aterrissagem. As etapas são unidas formando um *segmento* de vôo, ou uma sequência aberta. Um segmento de vôo corresponde a uma sequência de etapas sem nenhuma parada para repouso. O período de um segmento constitui uma *jornada* de trabalho que, normalmente, é limitada pela legislação do trabalho. A terceira e última parte consiste em produzir as *rotações*. Uma rotação, ou programação fechada é uma sequência de segmentos de vôos, começando e terminando na base domiciliar. A Figura 2-4 ilustra a relação hierárquica entre as etapas, as jornadas e as rotações.

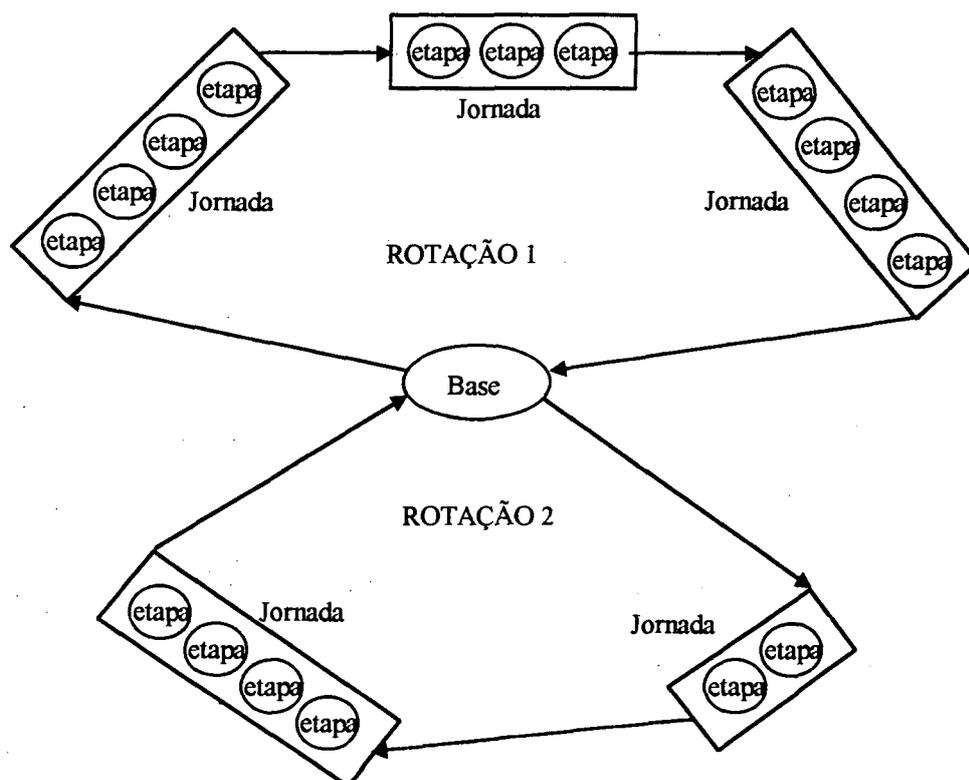


Figura 2-4. Estrutura hierárquica entre as etapas, as jornadas e as rotações. (Fonte: Bodin et al (1983)).

As rotações são geradas respeitando as restrições impostas. Trata-se de um processo combinatorial e muitas rotações podem ser produzidas em situações reais. Para cada rotação é associado um custo que, normalmente, está baseado no salário da tripulação. A solução final para o problema consiste em obter um conjunto de rotações disjuntas de maneira que cubra todas as etapas diárias de vôo com um custo mínimo. As técnicas de solução encontradas na literatura também tem sido, aproximadamente, as mesmas utilizadas para o problema de alocação de condutores de ônibus.

### **2.6.1.3 O Problemas de Alocação em Empresas Ferroviárias .**

Estudos de problemas de alocação são bastante raros na literatura para o caso de transporte ferroviário, também constatado por Kwan et al (1996). Kwan descreve a experiência com o problema de alocação em empresas de transporte ferroviário inglesas. O problema de alocação para condutores de trem é considerado similar, teoricamente, com o problema de alocação para condutores de ônibus. O problema foi resolvido com o sistema TRACSII que é uma versão modificada do TRAC (*Techniques for Running Automatic Crew scheduling*) desenvolvido especialmente para o problema de alocação de condutores de ônibus.

Ku e Wong (1996) apresentam um sistema de suporte à decisão que resolve o problema de alocação para uma empresa de transporte ferroviário de passageiros de Hong Kong. Os pontos de trocas de condutores são definidos nas estações. Os turnos de trabalho são constituídos de sequências de viagens entre estações, de maneira que, ao final do turno o condutor retome a sua estação domiciliar. São admitidas viagens *deadheading* na qual o condutor viaja como passageiro de uma estação para outra a fim de dar continuidade a seu turno de trabalho. A modelagem matemática não é apresentada pelo autor.

Caprara et al (1995b) apresenta um trabalho aplicado em empresa de transporte ferroviário italiana. Uma abordagem utilizando *set covering* foi dada ao problema. Cada coluna da matriz representa uma rotação cobrindo um conjunto de viagens. O artigo tem como enfoque principal um algoritmo heurístico desenvolvido para o problema *set covering*. O algoritmo ganhou o primeiro prêmio de uma competição promovida por uma empresa ferroviária italiana. O autor compara o desempenho de seu algoritmo com diversos outros mais recentes da literatura.

### 2.6.2 O Problema de Escala de Serviços.

O problema de escala de serviços para condutores de veículos (*rostering*) não tem recebido tanta atenção quanto o problema de alocação (*scheduling*) quando se trata de empresas de transporte. O problema de escala de serviço é pouco abordado na literatura, principalmente, pela literatura americana. Isto pode ser justificado pelo fato de várias empresas de transporte norte-americanas permitirem que cada tripulação escolha a escala que deseja executar, tendo maior preferência a tripulação com maior tempo de serviço. Isto é geralmente motivado pela necessidade de permitir que cada tripulação se torne familiarizada com as rotas particulares (Bianco et al, 1992; Carraresi, 1984). Porém, cada escala pode apresentar uma carga de trabalho bastante diferente e indesejável, causando assim um desequilíbrio na satisfação entre as tripulações, principalmente, se todos recebem o mesmo salário. Segundo Bianco et al (1992), na maioria das empresas de transporte européias estas desigualdades não podem ser aceitas se cada motorista recebe o mesmo salário. Assim, é necessário construir escalas de trabalho de maneira que a carga de trabalho fique melhor distribuída entre as tripulações.

Segundo Ryan (1992), o método de solução do problema de escala usado pela maioria das empresas de transporte aéreo norte-americanas é chamado de '*Bidline System*'. As rotações produzidas como solução do problema de alocação são publicadas e cada tripulação, então, propõe a escala de trabalho de sua preferência. As propostas são aceitas em ordem decrescente conforme o tempo de serviço dentro do *ranking* de tripulações. O *Bidline System* pode resultar em considerável desequilíbrio dentro do *ranking* de tripulações, no qual muitas tripulações juniores serão raramente alocadas às suas escalas de trabalho preferidas. A maioria das empresas aéreas fora dos EUA (especialmente as empresas pequenas) tenta produzir escalas que satisfaçam alguma medida de equidade para assegurar que todas as tripulações de mesmo *ranking* sejam alocadas a escalas de trabalho com algumas similaridades.

Normalmente os problemas de escala semanal (ou mensal) de trabalho para condutores de veículos em empresas de transporte coletivo se assemelham ao problema de escala de serviço

para trabalhadores em locais fixos em alguns aspectos, tais como: todos os turnos<sup>1</sup> são realizados dentro do período de um dia, ou seja, começam e terminam no mesmo dia; e possuem o mesmo perfil de demanda de mão de obra durante os dias úteis da semana, normalmente, sofrendo variações apenas nos finais de semana e feriados. Porém, para algumas empresas de transporte existem viagens que ultrapassam a faixa de um dia de trabalho, ou seja, a duração da viagem é muito longa, fazendo com que o condutor retome à sua base domiciliar um ou dois dias depois. Esta é, também, uma das diferentes situações encontradas em problemas reais que conduz à utilização, também, de diferentes formas de modelar o problema e resolvê-lo. Por ser um problema combinatorial, tipicamente, de grande dimensão, é importante levar em consideração as particularidades do domínio do problema na hora de modelá-lo e resolvê-lo, a fim de diminuir o esforço computacional aplicado a ele.

O processo de modelagem de um problema de escala de trabalho leva em consideração as particularidades de cada domínio que vão desde:

- 1) a natureza dos turnos envolvidos, como por exemplo, os tipos de turnos diferentes (viagem com passageiros, transporte de carga, plantão, etc) e a duração dos turnos;
- 2) as restrições resultantes da legislação da profissão, dos acordos sindicais e das regras da empresa. Estas restrições estabelecem como os turnos poderão ser sequenciados, o número máximo de dias de trabalho consecutivos, etc;
- 3) a política da empresa com relação ao tipo de abordagem que será dada a escala de serviço (escala cíclica ou individualizada).

Como já foi discutido na seção 2.5 existem duas abordagens que podem ser dadas para um problema de escala de serviços, a cíclica e a individualizada. No caso de escala de serviço para empresas de transporte urbano de passageiros por ônibus, a escala individualizada tem sido amplamente utilizada, enquanto que as escalas cíclicas são raramente encontradas. Dentre as publicações sobre escala individualizada pode-se ressaltar os trabalhos de Carraresi (1984a; 1984b) e Bianco et al (1992).

---

<sup>1</sup> Para uma empresa de transporte os turnos representam, em sua grande maioria, viagens realizadas durante o dia.

### 2.6.2.1 Escala de serviços Individualizada.

Dentre os trabalhos existentes, pode-se destacar alguns considerados importantes e que foram aplicados a problemas reais. No presente serão apresentados, resumidamente, alguns deles.

A primeira etapa a ser executada neste processo é a identificação do número de empregados necessários. A sistemática utilizada para calcular este número desejado tem sido algumas variações dos modelos matemáticos apresentados em 2.5.1.1. Por exemplo, seja  $d_i$  o número de turnos no dia  $i$ ,  $i=1,2,\dots,7$ . Se cada condutor trabalha  $T$  dias por semana ( $T=5$  ou  $6$ ), então, o número de condutores é dado por:

$$w = \max \left\{ \max_i d_i, \left\lceil \frac{1}{T} \sum_{i=1}^7 d_i \right\rceil \right\} \quad (2.5)$$

onde  $w$  é o menor inteiro maior ou igual a  $x$ .

Observe que cada turno é bem definido, inicia e termina no mesmo dia, e cada condutor realiza no máximo 1 turno por dia. Dado que  $w \geq d_i$ ,  $i=1,\dots,7$ , então, pode-se concluir que  $f_i = (w - d_i)$  representa o número de condutores que estarão de folga no dia  $i$ .

Na próxima etapa procura-se construir uma sequência de dias de trabalho e folgas para cada empregado de maneira que cada um dos turnos diários seja executado por um empregado, a partir do histórico de trabalho de cada um. É claro que estas sequências devem respeitar as restrições impostas, como por exemplo, o número máximo de dias consecutivos de trabalho. A extensão destas sequências vai depender do horizonte de planejamento estabelecido pelo gerente. A forma mais comum, utilizada para resolver o problema de escala individualizada, tem sido a solução sucessiva de problemas de atribuição. Para que este processo fique mais claro, considere a seguinte definição de grafo multipartido dada a seguir.

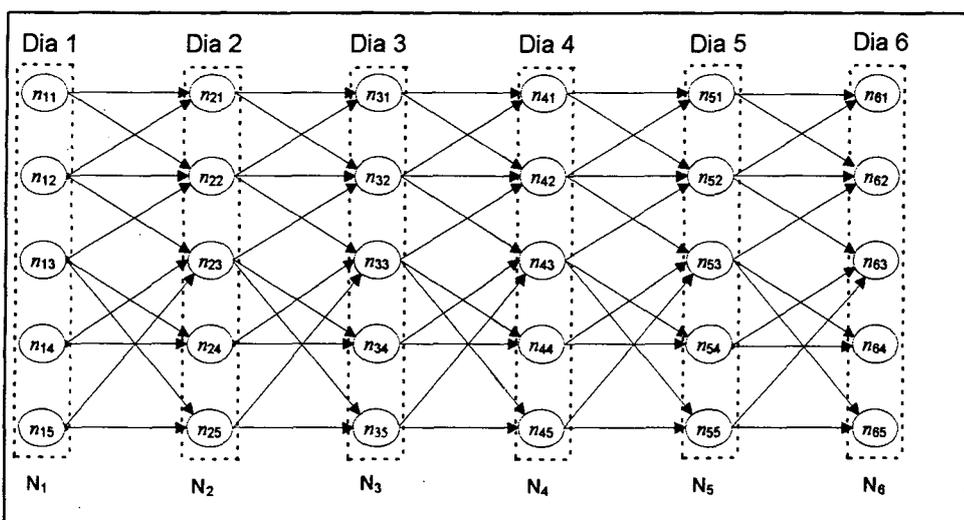
Considere um horizonte de planejamento de  $m$  dias. Para cada dia  $i$ ,  $i=1,\dots,m$ , associe um conjunto de atividades  $N_j = \{n_{i,1}, n_{i,2}, \dots, n_{i,d_i}, n_{i,f}\}$ , onde  $n_{i,j}$  é um turno (ou nó) de trabalho para  $j=1,\dots,d_i$  e  $n_{i,f}$  é uma folga (representado por um turno fictício) para  $j = (w-f)$ ,  $i=1,\dots,m$ . Um grafo multipartido é definido como  $G=(N,A)$ , onde  $N$  é um conjunto composto de  $m$  subconjuntos disjuntos de nós, isto é,

$$N = \bigcup_{i=1}^m N_i;$$

e  $A = \{A_1, \dots, A_m\}$ , onde  $A_k$  é o conjunto dos arcos que liga os nós de  $N_k$  à  $N_{k+1}$ ,  $k=1, \dots, m-1$ , ou seja,

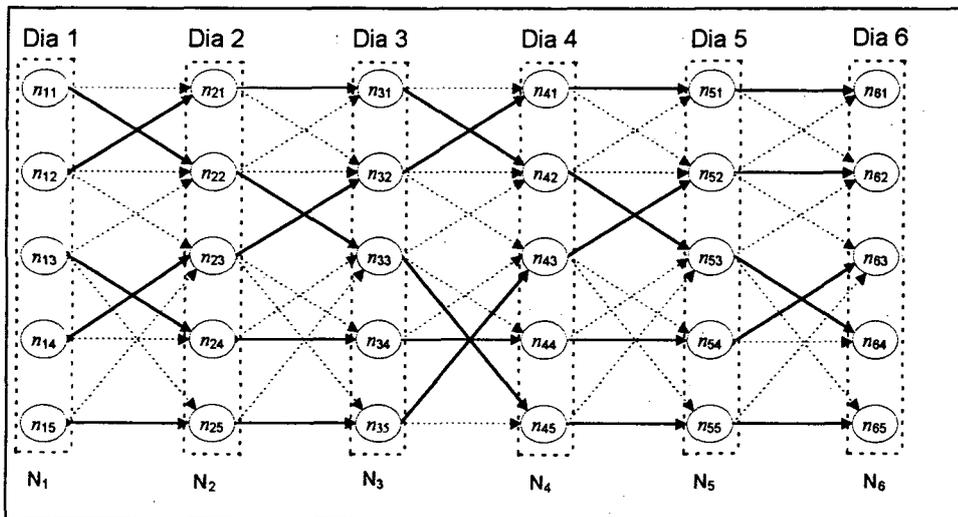
$$A_k = \{(a, b) \mid Va \in N_k \text{ e } Vb \in N_{k+1}\}. \text{ O valor de } k \text{ representa um nível no grafo } G.$$

Uma vez definido o grafo  $G$ , uma *solução viável* deste problema corresponde a um conjunto de  $w$  caminhos disjuntos entre os nós de  $N_1$  e  $N_m$ . A Figura 2-5 ilustra um grafo multipartido para um horizonte de planejamento de 6 dias e para 5 condutores. Os arcos representam os possíveis sequenciamentos entre dois turnos de trabalho. Cada caminho representa uma *escala* de trabalho que será atribuída a um condutor. Seja  $S_j = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  um conjunto ordenado de turnos de trabalho representando uma escala de trabalho, onde  $a_i \in N_i, \dots, a_m \in N_m$  e  $j=1, \dots, w$ .



**Figura 2-5.** Exemplo de um grafo multipartido  $G=(N,A)$  com  $N=N_1 \cup \dots \cup N_6$ .

Uma solução viável possível é apresentada na Figura 2-6, onde  $S_1 = \{n_{11}, n_{22}, n_{33}, n_{44}, n_{55}, n_{65}\}$ ,  $S_2 = \{n_{12}, n_{21}, n_{31}, n_{42}, n_{53}, n_{64}\}$ , e assim por diante. Observe que uma escala pode ser identificada em qualquer nível, por exemplo, no nível  $k=3$  a escala  $e_1$  pode ser identificada pelo turno (nó)  $n_{33}$ . Além disso, uma escala pode ser quebrada em duas *escalas parciais*  $S'_{kr} = \{n_{kr}\}$  e  $S''_{(k+i)j} = \{n_{(k+i)j}, \dots\}$  em qualquer nível  $k$ , sendo que  $(n_{kr}, n_{(k+i)j}) \in A_k$  por exemplo  $S_2 = S'_2 \cup S''_2$  para  $k=3$ , onde  $S'_2 = \{n_{31}, n_{21}, n_{12}\}$  e  $S''_2 = \{n_{42}, n_{53}, n_{64}\}$ .



**Figura 2-6.** Exemplo de uma solução viável para o grafo multipartido. Os nós de cada caminho correspondem à sequência de turnos que será executada por um condutor.

Para um determinado nível  $k$ ,  $k = 1, \dots, m-1$ , tem-se um subgrafo  $G = (N_k \cup N_{k+1}, A_k)$  que é denominado grafo bipartido. Para encontrar  $w$  caminhos disjuntos entre os nós de  $N_k$  e  $N_{k+1}$  é equivalente a resolver um problema de atribuição definido como:

$$\begin{aligned}
 \text{PA}^* = & \quad \text{Min} \quad \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w c_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \\
 & \quad \text{s. a.:} \quad \sum_{i=1}^w x_{ij}^k = 1 \quad \forall j = 1, \dots, w, \quad k = 1, \dots, m-1 \\
 & \quad \sum_{j=i}^w x_{ij}^k = 1 \quad \forall i = 1, \dots, w \\
 & \quad x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall i, j = 1, \dots, w
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

onde  $i$  representa o nó  $n_{ki}$  (turno  $i$  no dia  $k$ ), e respectivamente  $j$  no dia  $k+1$ . O valor  $c_{ij}^k$  é o custo de atribuir o turno  $j$  no dia  $k+1$ , dado o turno  $i$  no dia  $k$ . Este custo pode ter várias interpretações como será visto adiante. Se não existe um arco entre os nós  $i$  e  $j$ , isto é, se o turno  $j$  não pode ser atribuído no dia  $k+1$ , dado que o turno  $i$  foi atribuído no dia  $k$ , então,  $c_{ij}^k = \infty$ . Portanto, para encontrar  $w$  caminhos disjuntos no grafo é equivalente a resolver  $w$  problemas de atribuição, ou seja, o problema de geração de escala individualizada pode ser visto como um problema de atribuição multiníveis, a cada nível  $k$  um problema de atribuição é resolvido.

Variações do problema acima são encontradas na literatura, principalmente a forma como a matriz de custo ( $c_{ij}^k$ ) é calculada. Normalmente, o valor de  $c_{ij}^k$  procura refletir o passado e o

futuro da escala de trabalho de cada condutor. Por exemplo, se uma determinada escala (ou caminho) tiver recebido um número máximo de dias consecutivos de trabalho até o dia  $k$ , então, no dia  $k+1$  deverá ser atribuído uma folga, ou seja,  $c_{ij}^* = q_0$  se  $i$  foi o turno atribuído no dia  $k$  e  $j$  não for uma folga.

Chiessi (1984) apresenta um estudo de caso em uma empresa de transporte aéreo brasileira. O autor aborda os dois problemas: o problema de alocação e o problema de escala de trabalho. O problema de escala é modelado como um problema de atribuição multiníveis para um horizonte de planejamento de 30 dias. Ao final de 30 dias de trabalho cada condutor (ou tripulação) não deve ultrapassar o número total de 85 horas de bloco<sup>2</sup>. Em contrapartida, cada tripulação tem uma garantia (de recebimento) de 60 horas por mês. A fim de obter os limites diários de horas de blocos o autor supõe uma evolução linear conforme ilustra a Figura 2-7.

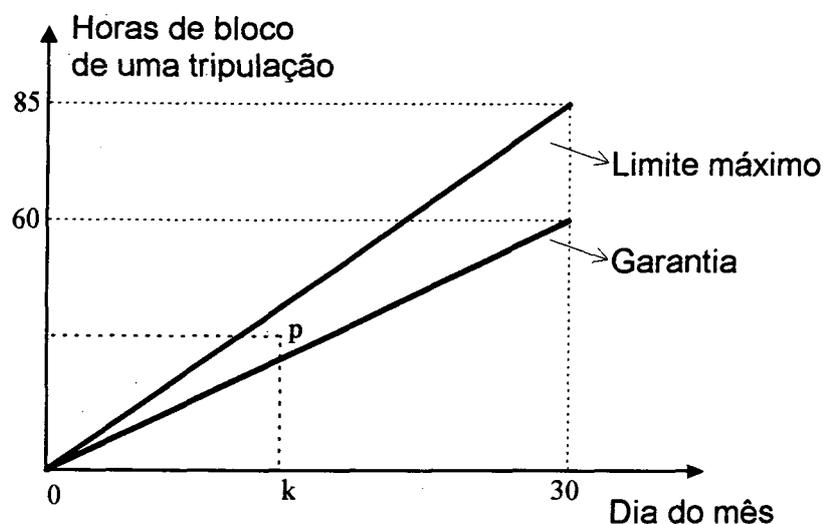


Figura 2-7. Evolução linear ao longo do mês da garantia e do limite máximo de horas por condutor (Fonte: Chiessi, (1984)).

O objetivo é conseguir uma escala de trabalho que minimize os desvios das horas de calço para cada condutor, em relação à garantia oferecida de 60 horas por mês. Assim, para cada nível  $k$  (ou dia) uma matriz de custos  $(c^*)_{ij}$  é calculada, cujos valores são penalizados pelos desvios entre o número mínimo de horas garantidas e o número máximo de horas de vôo permitidas para cada tripulação, ou seja,

<sup>2</sup> Tempo de bloco (ou tempo de calço) compreende o período entre o início do deslocamento da aeronave na origem de uma etapa de vôo até o seu estacionamento no destino.

$$c_l = \text{Máx} \{ (a \cdot \text{DHG} + b \cdot \text{DGL}), 0 \}$$

onde :

DHG = desvio dos estados abaixo da reta de horas da garantia,

DHL = desvio dos estados acima da reta de horas limite,

$a, b$  = coeficientes das penalidades.

A escala mensal é obtida resolvendo sequencialmente 30 problemas de atribuição. Antes de resolver os problemas de atribuição são feitas as pré-atribuições dos dias de folgas. O método húngaro é utilizado para resolver cada problema. Nesse trabalho, não se procurou estabelecer um balanceamento da carga de trabalho entre as tripulações.

Hagberg (1985) apresenta um modelo para geração de escala para motoristas de táxi. O modelo é formulado como um procedimento iterativo. A cada passo um problema de atribuição é gerado e resolvido. No primeiro passo, uma solução inicial é construída. Os passos seguintes procuram melhorar a solução inicial, iterativamente. Uma vez estabelecido o horizonte de planejamento de  $m$  dias e um quadro de  $w$  condutores, então, o número médio de folgas noturnas e o tempo médio de horas de trabalho para cada escala particular podem ser facilmente calculados. É em função destes valores que a matriz de custo é calculada:

$$c_{ij}^* = U (\text{NF}_y - \text{NF}_m)^2 + L_2 (\text{HT}_y - \text{HT}_m)^2 + U \sum_{k \in A_j} (\text{HI}_k^* - \text{HI}_m)^2$$

onde:

$\text{NF}_y$  = número de noites de folga resultante para a escala se o turno  $j$  for associado com o turno  $i$ ;

$\text{NF}_m$  = número médio de noites de folga para uma escala,

$\text{HT}_y$  = horas de trabalho acumuladas para a escala se o turno  $j$  for sequenciado com o turno  $i$ ,

$\text{HT}_m$  = número médio de horas de trabalho para uma escala,

$\text{HI}_k^y$  = hora de início do turno  $j$  no dia  $k$ ,

$\text{HI}_m^i$  = hora inicial média para a escala que contém o turno  $i$  no  $\lambda$ -ésimo nível.

$k_j$  - conjunto dos turnos pertencentes à escala que contém o turno  $i$  no  $\lambda$ -ésimo nível.

$L_1, L_2, L_j$  = pesos.

O autor não apresentou resultados computacionais para o modelo proposto, nem mesmo os valores dos pesos  $L$ ,  $LLS$ .

Mayerle (1996) também apresenta uma variação das metodologias acima citadas, aplicada para uma empresa de transporte rodoviário urbano de passageiros. Trata-se de um método iterativo, sendo que em cada iteração uma sequência de problemas de atribuição é resolvido. O ciclo de melhoramento é repetido até que em duas iterações consecutivas a redução no valor da função deixa de ser significativa. O autor adota uma abordagem multi-critério para o cálculo da matriz de custos ( $c_{ij}$ ). Os  $C_{ij}$  são calculados a partir de uma ponderação entre as horas normais e as horas-extras trabalhadas durante a semana por cada condutor. Normalmente, os condutores recebem um salário maior pelas horas-extras de trabalho. Então, o autor preocupou-se em desenvolver um modelo matemático que possibilitasse uma distribuição mais equitativa das horas de trabalho e do salário recebido. A expressão da função de custo é dada por:

$$c_{ij} = \left[ \max \left\{ \frac{HE_i HT_j}{k FE_y HE_j FT_y HT_i} \right\} \right]^2 + P_{FS} \cdot \max \{ NDT_{ij} - 1, 0 \}$$

onde

$$FE_y = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq y \leq 0,5 \\ \left( \frac{\gamma}{1-\gamma} \right)^{\frac{1}{4}} & \text{se } 0,5 < y < 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

$$FT_y = \begin{cases} \left( \frac{1-y}{\gamma} \right)^{\frac{1}{4}} & \text{se } 0 < y \leq 0,5 \\ 1 & \text{se } 0,5 < y \leq 1 \end{cases}$$

sendo que,

$HE$  = quantidade média de horas-extras alocadas por condutor;

$HT$  = quantidade média de horas normais trabalhadas por condutor;

$P_{FS}$  = penalidade aplicada sobre a não alocação de folgas semanais previstas na legislação;  
normalmente esta penalidade recebe um alto valor;

$NDT_{ij}$  = número de dias de trabalho consecutivos entre a sequência que termina em  $i$  e a sequência que inicia em  $j$ ;

$k$  = número máximo permitido de dias de trabalhos consecutivos.

O parâmetro de ajuste  $y$  e  $(0,1)$  é utilizado para determinar a maior ou menor ênfase em cada critério.

Um problema de escala para condutores de ônibus é abordado por Carraresi e Gallo (1984b). Dado o número de  $w$  condutores, o conjunto de turnos que se repetem todos os dias e um horizonte de planejamento de  $m$  dias, cada turno recebe um peso  $p_{ij}$  ( $i=1, \dots, m, j=1, \dots, w$ ) igual ao tempo de duração do turno  $i$  no dia  $k$ . O objetivo é construir  $w$  seqüências individuais de turnos de  $m$  dias, um turno para cada dia (é claro que alguns destes turnos são folgas), de maneira que a carga de trabalho (soma dos pesos) fique igualmente distribuída entre os condutores. O problema é formulado como um problema de atribuição multinível com gargalo (MBA - *Multi-level Bottleneck Assignment*) dado a seguir:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } z \\
 \text{s.a.: } & \sum_{i=1}^w x_{ij} = 1; & j = 1, \dots, w, k = 1, \dots, m-1; \\
 & \sum_{j=1}^w x_{ij} = i; & i = 1, \dots, w, k = 1, \dots, m-1; \\
 & s_j^1 \leq \hat{s}_j & j = 1, \dots, w; \\
 & s_j^k = p_{kj} + \sum_{i=1}^w s_i^{k-1} x_{ij}^{k-1}; & j = 1, \dots, w, k = 1, \dots, m, \\
 & s_j^m \leq z & j = 1, \dots, w; \\
 & x_{ij} \in \{0,1\} & i, j = 1, \dots, w; k = 1, \dots, m-1
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Carraresi e Gallo (1984b) mostram que a complexidade deste problema é NP-completo. O objetivo corresponde a minimização da carga máxima de trabalho associada para uma escala.

Seja  $(X; z)$  a notação de uma solução viável, onde

$$X = (x^1, x^2, \dots, x^{m-1}) \text{ e } x^k = (x_{ij}^k)$$

definem-se os vetores  $v^k$  e  $v^k = (v_{ij}^k)$

$$\begin{cases} s_j = P y_j & j = h, \dots, W \\ s_j = P Q + H s_j \sim T^X; j = 1, \dots, w; k = 2, \dots, m; \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} v_j^{k+1} = \frac{1}{m} & j = 1, \dots, W \\ v_{iP(k+1)ij}^k + \sum_{i=1}^H v_i^{k+1} x_i^{k+1} & i = 1, \dots, w; k = m-2, \dots, 1; \end{cases} \quad (2.10)$$

Portanto  $z = \max = \{s_j : j=1, \dots, w\} = \{v_i^1 : i=1, \dots, M\}$ :

Definição: Uma solução viável  $(X; z)$  de (2.8) é uma *solução estável* se, para  $k=1, 2, \dots, (m-1)$ ,  $(x^k, z)$  for uma solução ótima para o seguinte problema de atribuição com gargalo:

PAG\*(A):

Min  $z$

$$\begin{aligned} \text{sa.: } & \sum_{i=1}^w 2X_i = 1; & j = 1, \dots, w; \\ & \sum_{j=1}^w 2X_j = i; & j = 1, \dots, w; & (2.11) \\ & z \geq s_j + 2 \sum_{j=i}^w x_j^{k+1}; & j = 1, \dots, w; \\ & x_j \in (0, i) & j = 1, \dots, w; \end{aligned}$$

Esta definição estabelece que qualquer solução ótima para MBA é uma solução estável.

Os autores descrevem um algoritmo heurístico para resolver o problema MBA. O algoritmo possui duas fases: na primeira é construída uma solução inicial  $(X', z')$  resolvendo  $(m-1)$  problemas de atribuição com gargalo; a segunda fase consiste em melhorar a solução resolvendo uma sequência de problemas do tipo PAG\*(X) até que uma solução estável seja encontrada. Um novo algoritmo primário para a solução do problema de atribuição com gargalo é apresentado.

Também, Bianco et al (1992), direcionaram seu trabalho para o problema de escala de condutores de ônibus em empresas de transporte de massa. Os turnos de trabalhos são diários,

isto é, iniciam e terminam no mesmo dia. A solução para o problema consiste em descobrir uma combinação de custo mínimo de escalas de tipos diferentes. Cada tipo de escala é identificado pelo conjunto ordenado dos dias de trabalho, dado que o horizonte de planejamento é de 7 dias e cada condutor pode trabalhar no máximo 5 dias consecutivos. O autor utiliza um modelo matemático semelhante à equação (2.2), que é um modelo *set covering* generalizado, para estimar o número mínimo de condutores necessários e também para fornecer um limite inferior ao algoritmo desenvolvido. Uma formulação matemática é dada ao problema, da qual é derivado um algoritmo heurístico iterativo que procura distribuir a carga de trabalho entre os condutores. O algoritmo faz uso de um limite inferior obtido do modelo matemático original. A cada iteração um problema de atribuição multinível com gargalo (MBA) é resolvido. O autor propõe um novo algoritmo heurístico para a solução do problema MBA, que é comparado com o algoritmo de Carraresi e Gallo (1984b). O algoritmo sugerido por Bianco et al (1992) possui uma complexidade de  $O(m^2w^AM)$ , onde  $M$  é o número de iterações, enquanto que o algoritmo proposto por Carraresi e Gallo (1984b) possui uma complexidade  $O(mw^AM)$ . Entretanto, Bianco et al (1992) dizem que a qualidade das soluções produzidas por seu algoritmo justifica o seu uso.

Uma formulação baseada em *setpartitioning* generalizado é apresentado por Ryan (1992) com aplicação ao problema de escala em empresas de transporte aéreo da Nova Zelândia. As tripulações são divididas em grupos de mesmo *ranking* de acordo com o tempo de serviço de cada uma. O modelo procura produzir escalas com carga de trabalho balanceada entre as tripulações do mesmo grupo. Para cada tripulação é gerado um conjunto de escalas possíveis do qual é escolhido exatamente uma. O processo de geração das escalas (colunas da matriz) é executado por enumeração direta, levando em consideração a sobrecarga de atividades executadas em escalas passadas por cada tripulação. Existem mais de 30 regras e condições que uma escala viável deve satisfazer. Segundo o autor, do ponto de vista das tripulações, uma preferência particular é que as viagens de mesmo tipo (frequentemente relacionado ao destino) deveriam ser espaçadas por um número suficiente de dias. Dada a frequência com que cada viagem ocorre no período de planejamento da escala e o número de tripulações necessárias, a separação ideal ou esperada entre as viagens daquele tipo pode ser facilmente calculada. Assim, uma medida de qualidade da escala no ponto de vista das tripulações é dada pela soma dos dias violados por cada viagem na escala (isto é, aqueles turnos que foram alocados antes do intervalo ideal de separação). O modelo é resolvido com as rotinas denominadas ZIP, desenvolvidas pelo autor.

### **2.S.2.2 Escala Cíclica de Trabalho**

A abordagem cíclica consiste em construir uma sequência cíclica com todos os turnos de trabalho de tal maneira que assegure a ocorrência de dias de folga em intervalos regulares de tempo. Cada trabalhador vai rodando através de cada um dos turnos de trabalho da sequência de tal forma que após ter completado o ciclo, todos os trabalhadores terão, pelo menos teoricamente, executado a mesma quantidade de trabalho. A ausência de algum trabalhador, ou a introdução de novas atividades, causam rupturas nesta escala, cabendo, então, ao gerente corrigir tais distorções.

São poucos os trabalhos que utilizam esta abordagem para condutores de veículos, tal como Jachnik (1981), que descreve um sistema computacional desenvolvido para uma empresa de ônibus italiana que utiliza técnicas heurísticas para produzir escalas cíclicas. O sistema mantém uma base de informações que são atualizadas constantemente. Para cada dia o sistema fornece quais os condutores que estão disponíveis para trabalhar e quais atividades que devem ser feitas. O sistema produz escalas sempre oito dias à frente. A escala pode ser alterada sete dias depois se alguma falha ocorreu na programação, a fim de corrigir as distorções da carga de trabalho entre os condutores. As heurísticas desenvolvidas pelo autor exploram as particularidades do problema real, tomando muito difícil estendê-las para outras situações.

Recentemente, Caprara et al (1995a) apresentaram um trabalho para resolver o problema de escala em uma empresa ferroviária italiana. Este trabalho foi o vencedor de uma competição entre grupos de pesquisadores italianos para resolver o problema. O modelo proposto procura produzir escala cíclica de no máximo 30 dias. Caso o ciclo ultrapasse este limite, uma outra escala é produzida, também, com esta limitação. Para cada escala de 30 dias um grupo de 30 condutores é selecionado. Uma escala é dividida em programações de 6 dias. Cada programação é constituída de cinco dias consecutivos de trabalho e uma folga, no sexto dia. A mesma escala de trabalho produzida é utilizada por um período de um ano. A Figura 2-8 ilustra uma escala com 16 turnos de trabalho em uma escala de 30 dias.

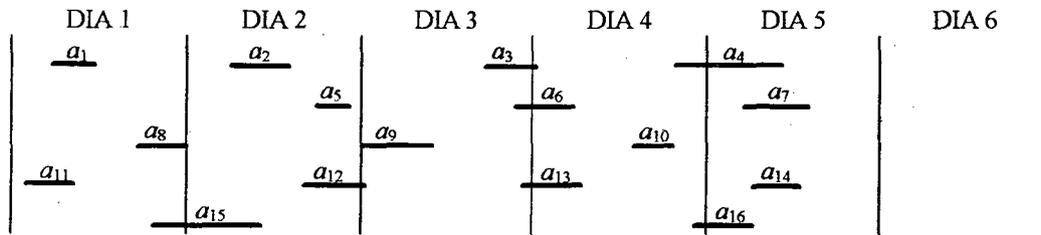


Figura 2-8. Exemplo de uma escala (Fonte: Caprara et al. (1995a).)

O objetivo principal foi descobrir um conjunto de escalas viáveis de no máximo 30 dias, cobrindo todas as atividades diárias e minimizando o número total de programações de 6 dias na escala. O número de condutores necessários para todos os dias é igual a 6 vezes o número total de programações. Assim, a minimização do número de programações implica na minimização do número global de condutores necessários.

A formulação dada ao problema baseia-se na teoria dos grafos como descrito a seguir. Dado um multigrafo direcionado completo  $G=(V \cup L)$ , onde  $V = \{1, \dots, n\}$  é o conjunto dos vértices (ou turnos),  $A$  é o conjunto de arcos, e  $L$  é um conjunto de laços (*loops*). Cada vértice é associado com uma atividade. Um arco do vértice  $i$  para o vértice  $j$  representa o sequenciamento dos pares de atividades  $i$  e  $j$  dentro da escala, enquanto que cada laço incidente com o vértice  $i$  representa um dia fora de escala (ocioso, sem trabalho) entre o fim da atividade  $i$  e o início da subsequente atividade na escala. Mais especificamente, os arcos do conjunto  $A$  contém arcos de três diferentes tipos que é particionado em três subconjuntos,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ , sendo os arcos de  $A_1$  chamados de *arcos diretos*, enquanto que os arcos pertencentes a  $A_2$  (respectivamente,  $A_3$ ) são chamados de *arcos de folgas simples* (respectivamente, *arcos de folgas duplas*). Os arcos de folgas simples (respectivamente, folgas duplas) correspondem a um período de folga de um dia (respectivamente, folgas de dois dias). Uma das restrições do problema em particular é que o número de folgas duplas deve ser no mínimo igual a 40% do número total de dias de folga. Este percentual é representado por  $p$ . Para cada par de vértices  $i, j \in V$  um arco  $(i, j) \in A$  são calculados três custos distintos:  $c_{ij}$  se  $(i, j) \in A_1$ ,  $c_{ij}^*$  se  $(i, j) \in A_2$  e  $c_{ij}^{**}$  se  $(i, j) \in A_3$ . O valor de  $c_{ij}^*$  é igual ao tempo mínimo em minutos entre o início da atividade  $i$  e o início da atividade  $j$  quando elas são sequenciadas diretamente. Similarmente,  $c_{ij}^{**} = c_{ij}^* + 1440$  (um dia = 24 horas = 1440 min) e  $c_{ij} = c_{ij}^* + 2 \cdot 1440$ . Também, define-se  $c_{ii} = c_{ij}^* = \infty$  e  $c_{ii}^{**} = (6 \cdot 1440)$  (para programações com apenas um turno). O conjunto de laços  $L$  é particionado em  $n+1$  subconjuntos,  $Z_0, L_1, \dots, L_n$ , onde  $n$  é um limite superior sobre o número

de dias fora de escala entre dois turnos (exemplo,  $cr = 2$ ). Para cada vértice  $i \in V$  e para  $t=0, 1, \dots, o$ , cada laço  $(i, i)$  e  $L_t$ , possui um custo  $d^i = (i, i+1)$ , representando uma folga de  $t$  dias entre  $i$  e o subsequente turno na escala.

Um *caminho de laços* é um caminho de  $G$  da forma  $P = \{(v_0, v_1), (v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_i, v_i), (v_i, v_{i+1})\}$ , isto é, um caminho de arcos ligados por uma série de laços, um para cada vértice do caminho, exceto para o último. Um *ciclo de laços* (ou *circuito*) é um caminho fechado de laços. A Figura 2-9 ilustra um ciclo de laços correspondente a escala da Figura 2-8. Cada arco  $(i, j) \in A_t$  ( $t=1, 2, 3$ ) e cada laço  $(i, i) \in L_t$  ( $t=0, \dots, a$ ) pertencente ao caminho fechado de laços é identificado pela letra  $i$ . Observe que o turno  $a_5$  é seguido por um período de folga simples, enquanto o turno 15 é seguido por um dia fora de escala por questões operacionais.

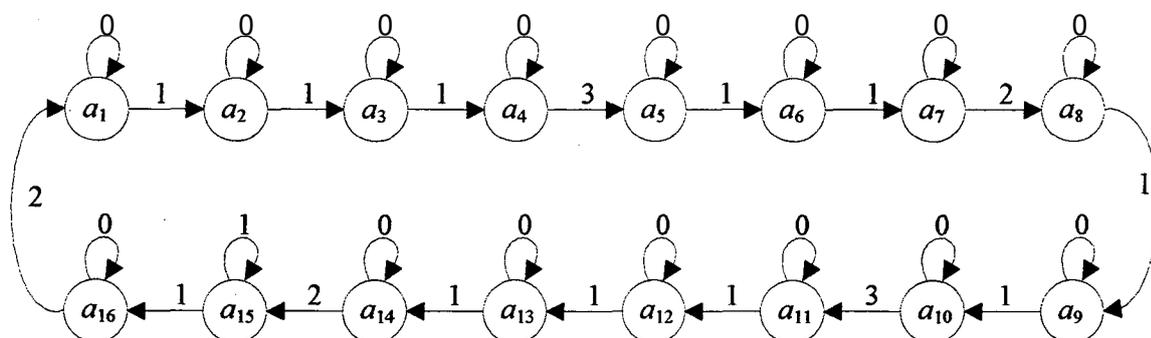


Figura 2-9. Um caminho de laços correspondendo a um escala viável (Fonte: Caprara et al. (1995a))

A solução do problema consiste de um conjunto de ciclos disjuntos de custo mínimo obtido do grafo  $G$  tal que todos os vértices sejam cobertos por exatamente um ciclo.

Esta formulação baseada na teoria dos grafos levou a formulação de um problema de programação linear inteira  $\{0, 1\}$ . A estrutura do modelo matemático é fortemente ligada às restrições operacionais do problema de escala particular. Em função da complexidade do modelo matemático, devido ao grande número de variáveis e aos tipos de restrições, o autor utilizou relaxação lagrangeana a fim de obter um limite inferior para a solução. O modelo resultante é dado a seguir:

LRP( $\hat{A}, A_2$ ):

$$\begin{aligned} \min \quad & \lambda_1 w + \lambda_2 z + \sum_{t=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}^{-t} x_{ij}^t \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^3 x_{ij}^t = 1, \quad j = 1, \dots, n \\ & \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^3 x_{ij}^t = 1, \quad i = 1, \dots, n \\ & w \geq \frac{\lambda_1 w + \lambda_2 z + \sum_{t=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}^{-t} x_{ij}^t}{a} \\ & z \geq P w \\ & x_{ij}^t \in \{0, 1\} \quad w, z > 0 \text{ inteiros} \end{aligned} \quad [2.12]$$

sendo que,  $x_{ij}^t$  é igual a 1 se o arco  $(ij)$  e  $A_t$  pertence a solução ótima, e zero caso contrário.

Os parâmetros  $\hat{A}_i$  e  $X_2$  são os multiplicadores de Lagrange. A variável  $w$  representa o número total de folgas (simples ou duplas) na solução, e a variável  $z$  representa o número de folgas duplas na solução. Para qualquer  $ij = 1, \dots, n$  os valores

$$c_{ij}^{-1} := c_{ij}^1, \quad c_{ij}^{-2} := c_{ij}^2 \hat{A}_i, \text{ e}$$

$Cy^3 := Cy - X_2$  são denominados *custos Lagrangeanos*.

Seja  $v(\text{LRP}(\hat{A}_i, X_2))$  o valor da solução ótima do problema  $\text{LRP}(X_i, \hat{A}_2)$ . Os autores mostraram que  $v(\text{LRP}(X_i, \hat{A}_2))$  pode ser calculado através da proposição abaixo.

**Proposição 1.** Para um dado valor do par de multiplicadores  $\hat{A}_i$  e  $\hat{A}_2 \geq 0$ , uma solução ótima para  $\text{LRP}(X_i, X_2)$  pode ser calculada por:

- i) resolvendo o problema de atribuição (AP) sobre a matriz de custo definida por  $y_{ij} := \min\{c_{ij}^1, c_{ij}^2 \hat{A}_i, Cy^3\}$  para  $ij = 1, \dots, n$ , obtém-se a valor da solução  $v(\text{AP})$ ;
- ii) determinando o valor mínimo de  $w$  tal que

$$aw \geq hv + A \cdot fPw + v(\text{AP}), \quad w \geq 0 \text{ inteiro}; \quad (2.13)$$

- iii) definindo  $z := fPw$

Resumindo todo o modelo apresentado acima, o algoritmo desenvolvido pelos autores trabalha em cima de duas informações: o problema de atribuição AP e o limite inferior Lagrangeano

$LB$ . O valor de  $LB$  é calculado como  $LB := \max \{v(\text{LRP}(1440,1440)), v(\text{LRP}(1440, 0))\}$ . Define-se o limite inferior global  $LB^*$  como sendo o máximo entre os  $LB$  Resolvendo o problema de atribuição AP se obtém a matriz de custos reduzidos ( $c_{ij}$ ) resultante das operações entre linhas e colunas. Os valores  $c_{ij}$  representam um limite inferior sobre o incremento da função objetivo de AP se o arco  $(ij)$  e  $A_i$  for colocado na solução.

Um esboço do algoritmo é dado a seguir:

INÍCIO: selecione a tarefa inicial para a escala, digamos  $i_0$ , a qual será a primeira tarefa a ser executada em uma programação, isto é, logo após uma folga. Uma vez que a tarefa inicial foi selecionada, a sequência de iterações é executadas como segue:

- 1) a melhor tarefa a ser sequenciada após a última na escala corrente é escolhida;
- 2) o limite inferior Lagrangeano  $LB$  é parametricamente atualizado;
- 3) a possibilidade de fechar a escala é considerada.

O procedimento é repetido até que nenhuma escala melhor que a corrente pode ser construída, e parando sempre a escala atinja a duração máxima de 30 dias. Se ainda restaram algumas tarefas, então uma nova escala é construída.

A escolha da tarefa inicial  $i_0$  consiste em selecionar a tarefa  $i$  que possui o melhor valor de uma pontuação que leva em consideração o número de arcos com custo reduzido iguais a zero que são incidentes com o vértice  $i$ .

A escolha da tarefa  $j$  a ser sequenciada após a tarefa corrente  $i$  é feita como descrito a seguir. Para cada candidato  $h$  é considerado o sequenciamento de  $h$  após  $i$  através de três possíveis movimentos: movimento direto  $u_{ij}$ , movimento com folga simples  $u_{if}$ , e o movimento com folga dupla  $u_{ij}^*$ , correspondendo ao arco  $(i,j)$  pertencente  $iA_1, A_2, e A_3$  respectivamente. Para cada movimento  $u_{ij}^*$  ( $\xi=1,2,3$ ) é associado uma pontuação  $x^*$  que leva em consideração o incremento  $Q_{ij}^*$  sobre o valor do limite inferior global  $LB^*$  quando o arco  $(i,j)$  e  $A_i$  é colocado na solução.

Estas foram as informações centrais do algoritmo apresentado por Caprara et al (1995a). Porém, o autores não deixam claro como muitas operações são efetuadas pelo algoritmo nem mesmo como calcular alguns dos parâmetros utilizados.

Neste trabalho de Caprara et al (1995a), não existe a preocupação de construir escalas de trabalho equitativa, levando em consideração o histórico de cada tripulação. Além do mais, a mesma escala é utilizada pelos condutores durante o ano todo.

## **2.7 Comentários Gerais.**

Dentre as publicações citadas acima, pode-se notar várias diferenças que vão desde a concepção do problema, dos objetivos, dos modelos matemáticos até às técnicas de solução. Várias características mudam de um problema para outro. Cada autor desenvolve um modelo matemático que leva em consideração as particularidades de seu problema, e consequentemente, seus algoritmos heurísticos também exploram estas particularidades. Por isto, fica muito difícil, para não dizer impossível, desenvolver uma metodologia geral que se aplique a todos os problemas de escala de trabalho de condutores em empresas de transporte (aéreo, ferroviário e rodoviário). Mesmo que a metodologia seja direcionada para um certo domínio qualquer, como por exemplo, o transporte aéreo, provavelmente necessite de ajustes de uma empresa para outra. Embora não seja possível imaginar todas as situações possíveis, convém salientar algumas características que influenciam na escolha de uma sistemática para produzir escalas de trabalho, sendo elas:

- a modalidade - se a aplicação está sendo feita em uma empresa de transporte aéreo, rodoviário ou ferroviário.
- a base das atividades - se as atividades se repetem todos os dias da semana ou o ciclo se repete a cada semana, isto é, uma base diária ou semanal, respectivamente.
- as extensões das atividades - se as atividades iniciam e terminam no mesmo dia ou algumas se estendem para o dia seguinte.
- os tipos de atividades envolvidas - se as atividades diárias são todas semelhantes ou existem atividades bem distintas das demais, as quais os condutores estão sujeitos a executá-las. Por exemplo, ficar de plantão na garagem para cobrir uma eventual falha na programação da escala.
- os salários dos condutores - cada condutor recebe um salário único, ou é diferenciado em função de sua escala de trabalho.

- o tipo de escala - refere-se a abordagem do processo de produção da escala, ou seja, cíclica ou individualizada. Algumas empresas tem preferência, talvez por tradição, em adotar um determinado tipo de escala.

Algumas vantagens e desvantagens de utilizar a abordagem cíclica ou individualizada já foram apontadas anteriormente neste capítulo. Porém, é necessário salientar mais alguns pontos que podem influenciar na escolha da abordagem. A escolha do tipo de abordagem não é tão trivial, deve-se levar em consideração algumas características referentes a situação real do problema e ao modelo a ser utilizado. Os modelos pesquisados para a geração de escala individualizada partem da premissa de que todos os turnos de trabalho iniciam e terminam dentro do período de um dia e cada indivíduo realiza um único turno por dia. Estes modelos necessitam, previamente, de um cálculo do número mínimo de condutores que será considerado. Este número pode ser obtido através das expressões matemáticas apresentadas na seção 2.5.1.1. Por outro lado, nos modelos para geração de escala cíclica podem ser considerados turnos de trabalho com duração maior que um dia (é o caso de viagens muito longa) e cada indivíduo pode até realizar partes de dois turnos de trabalho num único dia, caso o primeiro termine e o segundo inicie no mesmo dia. A possibilidade de ocorrer este tipo de sequenciamento de turnos inviabiliza a utilização dos modelos apresentados para a abordagem individualizada. Além do mais, através da abordagem cíclica o número mínimo de condutores é igual à extensão do ciclo obtido pelo modelo, ou seja, o número de condutores é obtido depois que a escala é construída, uma situação que não ocorre com a abordagem individualizada.

## CAPÍTULO 3

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE ANÁLISE DA PREFERÊNCIA E SOBRE ERGONOMIA DO TRABALHO

#### 3.1 Introdução

Normalmente os modelos propostos para a construção de escala de trabalho não utilizam as preferências dos trabalhadores. Muitas vezes, a solução encontrada pelos modelos permite que seja feita alterações nas escalas sem produzir acréscimos no custo operacional. Pois, uma vez definida uma estratégia relacionada ao dimensionamento da força de trabalho, a empresa passa a ter um contingente fixo de funcionários. Assim, o custo mensal com salários (excluindo as horas extras), obrigações trabalhistas, etc, passa a ser fixo.

Devido às oscilações na demanda de serviço e devido também a folga que se dá na definição do contingente de trabalhadores, haverá na maioria das ocasiões em que se faz a programação das escalas, graus de liberdade adicionais que permitem uma melhor satisfação dos anseios dos empregados. Em outras palavras, estes graus de liberdade possibilitam alterações nas escalas no sentido de introduzir as preferências do trabalhador, ou seja, fazer as alterações de acordo com os interesses do empregado sem produzir nenhum acréscimo ou muito pouco no custo da solução. Estas alterações introduzidas nas escalas vão ao encontro dos interesses dos trabalhadores, uma vez que buscam uma maior satisfação com relação a escala de trabalho de cada um. Entende-se que um empregado satisfeito trabalha com maior atenção, levando a um maior rendimento, redução de acidentes, etc. Tais resultados refletem positivamente tanto para a empresa como para os próprios trabalhadores.

Não foi encontrado na literatura pesquisada nenhum trabalho em empresa de transporte que utilizasse as preferências dos condutores para definir sua escala de trabalho. São poucos, também, em outras áreas. Dois trabalhos podem ser citados: o de Warner (1976) e o de Lau (1992). Ambos resolvem o problema de escala de trabalho para enfermeiras de um hospital. A realidade do problema é bem diferente com relação ao contexto de condutores de veículos. Os

tumos de trabalho são bem definidos: turnos da manhã, turnos da tarde e noite. Os autores desenvolvem modelos matemáticos baseados em programação inteira  $\{0, 1\}$ . As funções objetivo procuram incorporar penalidades do tipo  $C_m/$  se um determinado turno  $i$  é ou não preferido pelo empregado  $j$  no dia  $n$ . Para Lau (1992)  $C_{ni,j}$  é uma variável binária  $\{0, 1\}$ .

Como objetivo deste trabalho, pretende-se desenvolver uma metodologia para construção de escala mensal de trabalho para condutores, buscando um equilíbrio da carga de trabalho entre eles. A medida de carga de trabalho pode ser relacionada com a preferência do condutor, ou seja, o próprio empregado indica (indiretamente) os pesos atribuídos aos vários atributos que ocasionam maior ou menor esforço de trabalho. Esta é uma posição sob o ponto de vista do empregado. Na realidade, o mesmo processo poderá ser utilizado para medir as preferências sob o ponto de vista da empresa, ou melhor, de acordo com a visão de profissionais ligados a higiene do trabalho. Uma mescla das duas visões - empregado e empresa- poderia assim fornecer uma medida mais adequada para quantificar a carga de trabalho de cada empregado.

No presente trabalho será utilizada uma abordagem baseada em técnica de preferência declarada (TPD). Através de TPD pretende-se ajustar uma função matemática denominada *função utilidade*. Esta função será utilizada para quantificar o nível de carga de trabalho de cada condutor. Desta forma é possível comparar numericamente a distribuição da carga de trabalho baseado na preferência coletiva dos condutores. Para um melhor entendimento do assunto, será apresentado neste capítulo uma fundamentação teórica sobre as técnicas de preferência declarada.

Neste capítulo, também, serão tratados alguns tópicos relacionados a critérios ergonômicos que podem ser aplicados no processo de construção de escalas de trabalho. Estes critérios ergonômicos têm o objetivo de eliminar alguns efeitos considerados negativos numa escala de trabalho, pois, nem sempre a preferência do condutor é a melhor opção para a sua saúde e para o seu convívio social.

## **3.2 Técnicas de Preferência Declarada**

### **3.2.1 Introdução**

Modelar a estrutura decisória dos indivíduos quando defrontados com um conjunto de alternativas não é uma tarefa muito simples. A literatura tem apresentado algumas técnicas que estimam o comportamento decisório dos indivíduos através de modelos matemáticos. Dentre as técnicas em uso tem-se as técnicas de preferência revelada (PR) e as técnicas de preferência declarada (PD).

### **3.2.2 Conceitos**

Segundo Kroes e Sheldon (1988), o termo técnicas de preferência declarada refere-se a uma família de técnicas, as quais utilizam respostas individuais a respeito da preferência dos entrevistados sobre um conjunto de opções para estimar uma função utilidade. As opções são tipicamente descrições de situações ou contextos construídos por pesquisadores.

Para Green and Srinivasan (1978) *apud* Kroes e Sheldon (1988), o termo é definido como sendo qualquer método decomposicional que estima a estrutura de preferência de um indivíduo, dado a sua avaliação global de um conjunto de alternativas que são pré-especificadas em termos dos níveis de diferentes atributos.

A técnica de preferência declarada é baseada em entrevistas nas quais apresentam-se ao entrevistado um conjunto de cenários (alternativas) hipotéticos, para que seja escolhida qual a situação que eles preferem. Os dados coletados são processados por modelos estatísticos que ajustam os parâmetros de forma a definir uma função utilidade.

### **3.2.3 Preferência Revelada X Preferência Declarada**

Historicamente, as técnicas de preferência revelada são anteriores às técnicas de preferência declarada. As técnicas de PR são elaboradas através de informações selecionadas de diferentes indivíduos num determinado ponto no tempo que conduzem a situações reais observadas. Em cada uma destas seleções os indivíduos revelam efetivamente suas preferências, podendo, posteriormente, aferir o comportamento dos mesmos ao longo do tempo.

As técnicas de PD, por outro lado, fundamentam-se em entrevistas mediante as quais é apresentado ao entrevistado um número de situações hipotéticas (alternativas) que se aproximem o máximo possível da realidade. O entrevistado, mediante um leque de alternativas, registra suas preferências. A partir das informações, pode-se estimar o comportamento do indivíduo diante das diversas alternativas possíveis.

Uma vantagem da técnica de PD sobre a técnica de PR é o fornecimento de um número significativamente maior de informações sobre o conjunto de alternativas avaliadas para cada entrevistado. Isto acontece em razão das várias relações que o entrevistado faz entre os atributos para realizar sua escala. Por outro lado, a técnica de PR fornece apenas uma informação específica.

Em particular, uma vantagem relevante das técnicas de PD é a possibilidade de fornecer dados para modelagem com base em alternativas que ainda não existem.

Várias experiências desenvolvidas comprovam que os dados e as metodologias de PD e PR podem ser empregadas de forma complementar, ressaltando-se as potencialidades de ambas. Se por um lado PD fornece um poderoso instrumento pela introdução de alternativas hipotéticas, através de PR estes dados podem ser comparados com uma situação real.

### **3.2.4 Conceito de Função Utilidade**

Para representar a atratividade de uma alternativa em comparação a outras, adota-se o conceito de utilidade, oriundo da Teoria do Consumidor. A utilidade representa a satisfação ou benefício que um indivíduo percebe quando consome seus recursos em bens ou serviços.

Esta utilidade é quantificada por meio de expressões matemáticas denominadas de *função utilidade*; A função utilidade serve para expressar a hipótese do pesquisador sobre a maneira com a qual os indivíduos combinam parte da utilidade dentro de uma avaliação total ou utilidade total. Esta função utilidade exprime matematicamente as preferências do entrevistado.

O objetivo da aplicação dos estudos de PD é decompor as preferências advindas dos entrevistados em pequenas utilidades para cada atributo. Com isto, pode-se estabelecer o efeito relativo de cada atributo na função utilidade total. As variáveis da função utilidade podem ser contínuas ou discretas.

Assume-se, normalmente, que os indivíduos seguem um modelo linear aditivo para a função utilidade. Assim pode-se definir uma expressão matemática:

$$u_n = \sum_{k=1}^K \beta_k x_{in,k} \quad (3.1)$$

onde

$U_{in}$  = utilidade da alternativa  $i$  para o indivíduo  $n$ ;

$x_{in,k}$  = valor do atributo  $k$  para a alternativa  $i$ ;

$\beta_k$  = coeficiente do modelo para o atributo  $k$ .

$K$  = quantidade de atributos das alternativas.

Os coeficientes podem ser utilizados para variados propósitos, assim como:

1. determinar a importância relativa dos atributos;
2. determinar valores monetários dos atributos (quando tais atributos e custos tenham sido incluídos no experimento);
3. especificar a função utilidade para modelos de predição;
4. determinar valores de tempo (quando ambos, os atributos de tempo e custo são incluídos no experimento).

Esse tipo de função utilidade é denominada de *compensatória* porque o aumento ( ou diminuição) do nível de um atributo pode ser compensado diretamente pela diminuição ( ou aumento) de um outro atributo. Há situações reais em que o efeito compensatório não condiz com a realidade. Nesses casos a função acima não é adequada.

### 3.2.5 Características da Técnica de Preferência Declarada

Um dos principais objetivos de experimentos de preferência declarada é construir um conjunto de alternativas hipotéticas, porém realistas. É necessário que as alternativas conservem características realísticas para que possam ser imaginadas pelos entrevistados.

As principais características da técnica de preferência declarada são:

- a) cada entrevistado é submetido a uma série de escolhas. Este conjunto de alternativas é construído de maneira que se considere os principais atributos que influenciam no problema de escolha do problema em estudo;
- b) cada alternativa é representada por um conjunto de atributos que identificam o produto ou serviço. O pesquisador deve incluir no experimento aqueles atributos que mais identificam o produto ou serviço analisado;
- c) os valores ou níveis dos atributos em cada alternativa são especificados pelo pesquisador e são apresentados ao entrevistado na forma de opções. O pesquisador deve considerar o maior número possível de níveis, que lhe permita distinguir até quando os indivíduos estariam dispostos a trocar uma opção pela outra. Contudo, a quantidade de níveis não deve ser muito numerosa, pois isto tomaria muito difícil projetar o experimento;
- d) o conjunto de alternativas é especificado, baseando-se num projeto experimental, no qual assegura-se que a variação de um atributo é estatisticamente independente dos demais;
- e) os indivíduos informam as suas preferências com relação às alternativas colocando-as em ordem de preferência (*ranking*), submetendo-as a uma escala de avaliação (*rating*) ou escolhendo a opção preferida do conjunto de alternativas disponíveis (*choice*). A seleção por um dos três métodos dependerá de uma série de análises discutidas posteriormente.

### **3.2.6 Métodos de Pesquisa**

Para desenvolver um estudo com técnicas de preferência declarada devem ser consideradas algumas etapas como:

1. o método de entrevista;
2. a seleção da amostra;
3. a forma e a complexidade do experimento;
4. a medição da escolha;
5. a análise dos dados.

### 3.2.6.1 O método de Entrevista

- Face-a-face: as entrevistas são realizadas junto ao indivíduo em seu local de trabalho, em sua residência, ou em um lugar qualquer. A vantagem deste tipo de pesquisa é que o entrevistador pode explicar pessoalmente os objetivos do trabalho e administrar a aplicação da pesquisa. Um outra vantagem é a alta taxa de segurança no retomo das respostas. As desvantagens deste método são a necessidade de entrevistadores experientes e o alto custo da pesquisa.
- Questionário: os questionários auto-explicativos são enviados pelo correio, fax, internet, etc. ao entrevistado, sendo aguardado o retomo das respostas. Este método tem como vantagens um custo reduzido em sua aplicação e a cobertura de um percentual maior da amostra. Por outro lado, as questões devem ser mais simplificadas; o entrevistador perde um pouco o controle de qualidade das respostas e, ainda ocorre em geral uma baixa taxa de retomo dos questionários.
- Híbrido: neste método o material de estímulo é enviado aos entrevistados (correio, fax, etc.) e, posteriormente, as entrevistas são realizadas por telefone.

### 3.2.6.2 A seleção da Amostra

Um ponto importante a considerar é a seleção da amostra (composição e tamanho). Pode ser do tipo exaustivo, abrangendo toda a população ou pode-se definir um estrato para a aplicação do experimento. Quando o último caso é utilizado, deve-se fazer correções para que as decisões das pessoas daquele estrato não sejam superestimadas em detrimento de todo o grupo.

A seleção da amostra pode ser feita de diversas maneiras. Porém, devem ser considerados alguns pontos importantes na escolha de uma amostra, tais como:

- a amostra deve ser aleatória ou escolhida a partir de um grupo que esteja diretamente envolvido no processo;
- fazer com que o entrevistado consiga vivenciar a presente situação para que a pesquisa seja o menos artificial possível. ^

### 3.2.6.3 A Forma e a Complexidade do Experimento

Inicialmente, devem ser tomadas decisões com respeito a quais atributos e quantos níveis de cada atributo devem ser considerados. Quanto maior o número de atributos e de níveis, melhor a avaliação das diferentes respostas. Entretanto, maior será a complexidade da tarefa dos entrevistados podendo tomar-se até inviável.

O objetivo no projeto de um experimento é definir a combinação dos níveis de todos os atributos incluídos no experimento, de tal maneira que eles não sejam completamente correlacionados entre as alternativas. O número total de alternativas deve ser definido em função do número de fatores e do número de níveis dos fatores. Combinando todos os níveis dos atributos é possível gerar todas as alternativas possíveis, resultando num *experimento fatorial completo*.

Quando um projeto fatorial completo gera muitas alternativas o número pode ser reduzido, adotando um *experimento fatorial fracional*, tal que somente uma seleção de todas as alternativas possíveis seja apresentada para o entrevistado. Se, ainda assim, o número de alternativas for muito grande, pode-se dividir em conjuntos menores.

Na busca de respostas realistas dos entrevistados é importante apresentar os atributos de forma similar ao que eles estão familiarizados. Deve-se, ainda, dar considerável atenção à qualidade gráfica do material.

### 3.2.6.4 A Medição da Escolha

Os entrevistados podem ser solicitados a responder (ou registrar suas preferências) de três formas diferentes:

1. Avaliação (ou *rating*): as respostas são dadas para cada alternativa. As respostas podem ser interpretadas como uma mensuração da utilidade de uma alternativa. Normalmente a avaliação é representada por uma preferência relativa entre duas alternativas numa escala semântica de desejabilidade ou probabilidade de escolha.

2. Ordenação (ou *ranking*); um número de alternativas é simultaneamente apresentado aos entrevistados. O objetivo é colocar estas alternativas em ordem de preferência;
3. Escolha (ou *choice*): várias opções são apresentadas ao entrevistado, sendo que ele escolhe a preferida.

A utilização de dados do tipo ordenação é uma prática comum entre os analistas que defendem o ponto de vista de que os indivíduos são mais capazes de ordenar alternativas do que, através de uma tarefa de avaliação, conceder graus de preferência.

A seleção da abordagem a ser utilizada está diretamente relacionada com o método de análise de dados que será empregado

### **3.2.6.S A Análise dos Dados**

Os métodos de análise de dados obtidos por preferência declarada vêm evoluindo. Paralelamente, as técnicas de estimação têm melhorado substancialmente. As técnicas analíticas mais utilizadas são:

- Análise Monotônica de Variância: pode ser aplicada para experimentos do tipo ordenação das alternativas;
- Regressão múltipla: que pode ser aplicada em experimentos do tipo avaliação. Como resultado final, obtém-se a importância relativa de cada atributo;
- Modelo Logit Multinomial: é a forma mais comum de modelos de escolha discreta e pode ser utilizado para estimar modelos de escolha a partir de dados de preferência declarada. Esse modelo pode ser aplicado a qualquer tipo de mensuração de preferência como classificação, ordenação e escolha. Detalhes do modelo são dados na seção 3.2.8. O método de estimação normalmente utilizado baseia-se no princípio estatístico de maximização da função verossimilhança.

### **3.2.7 Utilidade Aleatória**

A equação 3.1 dada para a função utilidade é uma forma simplificada para modelar a utilidade, pois os indivíduos podem exibir inconsistência em sua conduta ou considerar fatores que não foram percebidos pelo pesquisador. Surge, então, o conceito de utilidade aleatória que

completa a equação anterior incluindo um erro relativo a elementos que não foram observados. Desta forma, define-se a função utilidade como uma soma de componentes observáveis e não observáveis:

$$U_{in} = V_{in} + s_{in} \quad (3.2)$$

onde

$U_{i,n}$  = utilidade aleatória da alternativa  $i$  para o indivíduo  $n$ ;

$V_{i,n}$  = parcela determinística da alternativa  $i$  para o indivíduo  $n$ ;

$s_{in}$  = parcela aleatória da alternativa  $i$ .

Manski (1973) *apud* Ben-Akiva (1985) identificou quatro fontes de aleatoriedades das utilidades:

1. os atributos não observados;
2. as variações de gostos não observadas;
3. os erros de medidas e informações imperfeitas; e
4. as variáveis instrumentais.

A Teoria da Utilidade Aleatória foi primeiramente proposta por Thurstone (1927) *apud* Louviere (1994) como uma maneira de modelar os comportamentos dominantes num contexto de comparação par a par. Essencialmente, a teoria diz que os consumidores tentam escolher as alternativas baseados nos atributos maior importância, tais como renda e tempo. Entretanto, sabe-se que os consumidores nem sempre adquirem aquilo que mais lhe agrada. Pode-se explicar estas flutuações no comportamento através de uma componente aleatória na função utilidade.

Assume-se que os indivíduos selecionam a alternativa com a mais alta utilidade. Entretanto, as utilidades são tratadas como variáveis aleatórias. Define-se  $C_n$  o conjunto de alternativas apresentadas ao indivíduo  $n$ . Desta forma, a probabilidade de escolha da alternativa  $i$  é igual a probabilidade da utilidade da alternativa  $i$  ser maior ou igual a utilidade de todas as outras alternativas no conjunto de escolha  $C_n$ . Isto pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} P(i/C_n) &= P[U_{in} \geq U_{jn} \quad \forall j \in C_n] = P[V_{in} + \varepsilon_{in} > V_{jn} + \varepsilon_{jn}, \quad \forall j \in C_n] \\ &= P[\varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in} < V_{in} - V_{jn}, \quad \forall j \in C_n] \end{aligned} \quad (3.3)$$

A parcela determinística da utilidade de uma alternativa é definida como uma função do conjunto de atributos (ou variáveis) da alternativa. A tarefa do pesquisador é identificar todas as variáveis e outras possíveis influências na hora da escolha. Uma vez especificadas as variáveis, deve-se identificar como estas variáveis se combinam para influenciar na decisão. A regra de combinação será a expressão de relacionamento entre as variáveis e o comportamento de escolha. A regra mais comumente utilizado entre os pesquisadores tem sido uma função linear aditiva, expressa da seguinte forma:

$$V_{in} = \beta_1 X_{in1} + \beta_2 X_{in2} + \dots + \beta_k X_{ink} \quad (3.4)$$

onde

$X_{in} = [X_{in1}, X_{in2}, \dots, X_{ink}]$  é o vetor dos atributos da alternativa  $i$ ,

$\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k]$  é um vetor de  $k$  parâmetros desconhecidos a serem calibrados.

A equação acima indica que o objetivo da análise é estimar os parâmetros  $\beta$ 's associados com os atributos que explicam hipoteticamente o comportamento do indivíduo. Para isso é necessário conhecer a distribuição de probabilidade da parcela aleatória ou da diferença das parcelas. Uma variedade de modelos de probabilidades de escolha discreta pode ser formulada dependendo da distribuição assumida. Por exemplo, quando assume-se uma distribuição normal, produz-se um modelo PROBIT; assumindo uma distribuição de Gumbel, resulta-se no Modelo Logit Multinomial (Louviere, 1994).

### 3.2.8 Modelo Logit Multinomial

Admitindo-se que a parcela aleatória é regida por uma distribuição de Gumbel, chega-se ao modelo Logit Multinomial dado pela expressão:

$$P_{i/n} = \frac{\exp(V_{in})}{\sum_{j \in C_n} \exp(V_{jn})} = \frac{\exp(\beta_i X_{in})}{\sum_{j \in C_n} \exp(\beta_j X_{jn})} \quad (35)$$

onde

$P_{i/n} = P(i/C_n)$  = a probabilidade da alternativa  $i$  ser escolhida pelo indivíduo  $n$  de um conjunto  $C_n$ .

O modelo Logit Multinomial é aplicado aos casos com número de alternativas maior que dois. Quando o número de alternativas é igual a dois, tem-se o modelo Logit Binomial, que é um caso particular do primeiro.

Uma propriedade chave dos modelos estocásticos, que é o caso do Logit Multinomial, é a Independência das Alternativas Irrelevantes (IIA). Na prática, em uma amostra de 100 consumidores, onde 80 escolhem a marca A e 20 escolhem a marca B, espera-se a mesma desigualdade de escolha (isto é,  $80/20=4$ ) se os mesmos escolhessem entre as marcas A, B e C (por exemplo: 60%, 15% e 25%).

As técnicas para a calibração dos parâmetros do modelo podem ser:

- Mínimos quadrados;
- Linearização Aproximada;
- Máxima Verossimilhança.

A técnica frequentemente utilizada nos estudos de preferência declarada tem sido a máxima verossimilhança.

### 3.2.9 Ajuste Através de Máxima Verossimilhança

É um método de estimativa que se baseia na escolha dos parâmetros  $P$ , os quais, para uma variável discreta, maximiza a probabilidade de se obter o evento particular analisado ou a densidade de probabilidade no ponto considerado.

Uma vez definido a função densidade de probabilidade  $f(x, P)$  e o conjunto de valores  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , a função de máxima verossimilhança é dada por:

$$L(\beta) = \prod_{n=1}^N f(x_n, \beta) \quad (3.6)$$

onde  $N$  é o número de observações.

O estimador de máxima verossimilhança é o valor de  $P$  que maximiza a função  $L(p)$ .

### 3.2.10 Modelo Logit Explodido

O modelo logit explodido é utilizado quando o método de pesquisa de preferência declarada envolve o ordenamento de alternativas em um conjunto de seleções. Supondo que o conjunto de escolha  $C_n$ , possui um número de  $J$  alternativas, então, o modelo explode a sequência de um indivíduo em  $J-1$  sequências como se fossem escolhas feitas por diferentes entrevistados.

Para explodir a informação contida nos dados ordenados com  $J$  alternativas é necessário, primeiramente, considerar as ordens de escolha. Se as probabilidades de escolha seguem o mesmo modelo logit, a probabilidade de observar uma ordem de classificação para a alternativa 1 ser preferida a 2, a alternativa 2 a 3, e assim por diante, é dado pelo produto de  $J-1$  funções do modelo logit multinomial:

$$P_n(1,2,\dots,J) = \prod_{j=1}^{J-1} \frac{\exp(\beta x'_{in})}{\sum_{j=i} \exp(\beta x'_{ij})} \quad (3.7)$$

Se foram feitas  $N$  observações de dados ordenados, a função verossimilhança para um modelo logit é dada por:

$$L^*(\beta) = \prod_{n=1}^N \prod_{i=1}^{J-1} \frac{\exp(\beta x'_{in})}{\sum_{j=i} \exp(\beta x'_{ij})} \quad (3.8)$$

Tendo em vista que a função exponencial é monotonamente crescente, o ponto que maximiza  $L^*$  também maximiza  $\ln(L^*)$ . O logaritmo da função verossimilhança a ser maximizada é dado pela expressão:

$$L(P) = \ln(L^*(\beta)) = \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{n=1}^N \left[ -\ln \sum_{j=i}^J P^*_{ij} \right] \quad (3.9)$$

Este é um modelo logit multinomial estimado com dados de escolha expandido de ordenação de alternativas. Tal modelo é referido como modelo logit explodido porque a função log-verossimilhança é um somatório das log-verossimilhança do modelo logit multinomial de todas as decomposições dos dados expandidos.

O ordenamento deve ser construído em ordem decrescente de preferência para cada entrevistado. Falhas nesse sentido podem gerar ruídos e mesmo invalidar os resultados do modelo.

### 3.2.11 Aplicações de TPD

A técnica de preferência declarada foi originalmente desenvolvida em pesquisa de *marketing* no início de 1970, tomando-se mais usada desde 1978. Na área de transportes tais métodos receberam uma expressiva utilização. Na década de 80 essa atenção tomou-se mais visível com o crescente número de artigos em jornais e revistas especializadas na área.

As informações provenientes de pesquisas de preferência declarada podem ser utilizadas, dentre outros, para:

1. desenvolvimento de novos produtos;
2. análise de investimento em infra-estrutura;
3. estimar elasticidades;
4. planejamento de *marketing*,
5. estimar demanda/ *market share*.

Em nível de Brasil, vários são os estudos que já foram desenvolvidos com auxílio de técnica de preferência declarada (Freitas, 1995). Dentre eles pode-se destacar:

1. estudo sobre as modalidades de transporte público;
2. desenvolvimento de uma *busway*;
3. comparação dos sistemas de ônibus e VLT (veículo leve sobre trilho);
4. sistema de média e alta capacidade para transporte público;
5. implantação de parâmetros condicionantes à implementação dos planos e projetos de ciclovias;
6. análise da demanda por serviços ferroviários e a relação com a qualidade de serviços prestados.
7. o valor do conforto nos serviços de transporte público urbano;
8. demanda de viagens a shopping centers;
9. o valor da 'marca' no transporte aéreo;
10. planejamento de rede escolar (Bastos, 1994);
11. avaliação de hotéis segundo o ponto de vista dos turistas (Efrón, 1994);

12. modelagem comportamental de decisores no setor imobiliário (Freitas, 1995);
13. análise do nível de serviço logístico de empresas exportadoras contêinerizadas (Vieira, 1996)
14. divisão de mercado no transporte intermunicipal de passageiros (Carvalho, 1993).

Em se tratando de avaliação de escalas de trabalho de empregados, nenhum tipo de trabalho utilizando TPD, ou técnica semelhante, foi encontrado na literatura. Assim, esta proposta trabalho aborda um tipo diferente de aplicação utilizando técnica de preferência declarada.

### 3.3 Recomendações Ergonômicas para Construção de Escala de Trabalho

Se um trabalhador realiza uma escala de trabalho de acordo com suas preferências provavelmente ficará mais satisfeito. Porém, não se pode concluir que a preferência de um condutor seja a melhor opção para a sua saúde física e psicológica e para o seu relacionamento social. Vários estudos realizados por pesquisadores da área de fisiologia, de psicologia e da área social apontam um conjunto de recomendações para a construção de escala de trabalho

As empresas que operam em regime de trabalho por turnos têm sido objeto de estudo de diversos pesquisadores preocupados com a vida dos trabalhadores destes sistemas. Devido ao stress do trabalho e aos aspectos sociais dos diferentes tipos de trabalho oriundos dessas empresas, os pesquisadores traçaram algumas recomendações que limitam certas atividades durante a execução da escala de trabalho. Estas recomendações serão resumidamente apresentadas nesta seção.

Schwarzenau et al. (1986) apresentam um importante trabalho que reúne estudos de diversas áreas como fisiologia, psicologia e da área social estudando o comportamento dos trabalhadores que operam em regimes de trabalho por turno. A partir de suas pesquisas foram elaboradas algumas recomendações com base nos seguintes dados: no número de turnos noturnos consecutivos, na hora de início e término dos turnos, na duração dos turnos, no número de dias consecutivos de trabalho, na distribuição dos dias de folga, e na regularidade da escala de trabalho. As recomendações ergonômicas para a construção de escala de trabalho são derivadas a partir das seguintes observações:

- desajuste circadiano fisiológico<sup>1</sup>,
- problemas com o bem-estar (por exemplo, sono, fadiga, e falta de apetite),
- problemas de saúde (por exemplo, desordens gastrointestinal e psicossomático),
- problemas pessoais e sociais,
- baixo desempenho e acidentes.

---

<sup>1</sup> o ritmo circadiano fisiológico está relacionado a vários fenômenos que ocorrem no organismo humano (como também nos animais), tais como, a temperatura do corpo e a frequência cardíaca, que são utilizados como parâmetros de mensuração da adaptação do homem com seu ambiente. Por exemplo, o ritmo da hora de dormir e acordar é um dos ritmos circadianos mais fácil de ser notado.

Schwarzenau et al. (1986) e Knauth e Rutenfranz (1982) sugerem algumas recomendações práticas para a construção de escalas de trabalho, sendo elas apresentadas resumidamente a seguir:

### **1. Uma escala de trabalho deve ter poucos turnos noturnos consecutivos.**

Os efeitos causados pelo trabalho noturno parece ter sido o aspecto mais estudado pelos pesquisadores.

A adaptação das funções fisiológicas para o trabalho noturno, mesmo após um longo período de turnos noturnos parece ser parcialmente, mas nunca completamente alcançado. Porém, após a última noite de trabalho o ajuste para o ritmo circadiano normal necessita de vários dias se o período precedente de trabalho noturno for longo (sete noites ou mais). Entretanto, quando somente algumas noites são trabalhadas (uma ou duas noites), menos distúrbios das funções fisiológicas circadianas são observadas.

Os distúrbios do sono são um outro aspecto importante que consiste numa redução e numa mudança na qualidade do sono. O sono durante o dia está sujeito a várias perturbações como ruídos de crianças e tráfego de veículos. Após um longo período de trabalho noturno o indivíduo terá, provavelmente, um acúmulo de déficit de sono.

A vida social dos indivíduos que trabalham longos períodos de turnos noturnos não é boa. O contato social com os amigos (que trabalham durante o dia) e com os familiares é limitado.

Alguns estudos concluem que a probabilidade de ocorrer acidentes aumenta após o primeiro turno de trabalho noturno.

### **2. Número de dias consecutivos de trabalho deve ser limitado.**

Os estudos apontam que o acúmulo de fadiga é maior depois de muitos turnos consecutivos. Alguns problemas podem surgir para pessoas mais velhas quando submetidas a períodos com muitos dias de trabalho estressantes, por exemplo, 14 dias de trabalho sucessivos. A prática mais comum é estabelecer 5 dias sucessivos de trabalho seguidos de dois dias de folgas. Recomenda-se evitar períodos de trabalho que excedam a uma semana.

### **3. Incluir alguns finais de semana com, no mínimo, dois dias consecutivos de folga.**

Esta é uma recomendação para sistemas contínuos ( que operam 7 dias por semana).

A distribuição dos dias de folga em turnos e os finais de semana são de particular importância social. Este aspecto é importante para que os trabalhadores de sistemas contínuos participem de atividades de finais de semana com seus amigos e familiares.

Para facilitar os contatos sociais dos trabalhadores de sistemas por turno com seus amigos e familiares, conclui-se que deveria existir alguns finais de semana livres de no mínimo 2 dias consecutivos.

### **4. Sequenciar os turnos em uma dada direção de rotação.**

Por exemplo, uma sequência de turnos da forma (noite, tarde, manhã, ...) é denominada rotação para trás e a sequência (manhã, tarde, noite, ...) é denominada de rotação para frente, ou, diz-se que ocorre uma progressividade entre turnos. A rotação para frente (ou progressividade) é preferível.

Estas são algumas recomendações que podem ser aplicadas num sistema computacional de construção de escala de trabalho a fim de reduzir os efeitos negativos sobre os trabalhadores.

## **3.4 Considerações Gerais**

Para a efetiva aplicação do modelo de geração e de distribuição de escalas proposto neste trabalho faz-se necessário a implementação de um sistema computacional. No processo de distribuição das escalas de trabalho entre os condutores, pretende-se utilizar uma função utilidade (coletiva) ajustada de acordo com as preferências dos condutores. Uma vez que o sistema considere uma função utilidade que não incorpora pontos de vista de profissionais da área de ergonomia do trabalho, então, as recomendação ergonômicas podem atuar dentro do sistema como regras que penalizam as programações que possuem sequências de trabalho não recomendadas. As penalidades ocorrem durante o processo de geração das programações, ou

seja, a aquelas programações cujas sequências de trabalho ultrapassam os limites estabelecidos pelas recomendações são eliminadas. É importante salientar que as recomendações ergonômicas completam o conjunto de restrições já estabelecidas pelas empresas, pela legislação da profissão e pelos acordos sindicais.

Ao invés de trabalhar com uma única função utilidade para todo o grupo de condutores, pode se desejar uma função utilidade para cada indivíduo. Trabalhar com funções utilidade individuais pode ser a forma mais adequada, pois cada indivíduo pode perfeitamente possuir preferências diferentes dos demais. Porém, a obtenção de funções individuais implica num aumento considerável no trabalho do pesquisador e dos entrevistados. Pois, será necessário um número muito maior informações de cada um dos entrevistados. Além disso, na obtenção de uma função utilidade coletiva pode ser utilizada apenas uma amostra da população de trabalhadores, enquanto que, para a obtenção de funções individuais será necessário utilizar toda a população. Se não bastasse isto, a adoção de funções individuais reforça a necessidade de também utilizar as preferências do ponto de vista de profissionais da área de ergonomia. A adoção de funções utilidades individuais combinadas com uma função utilidade ergonômica pode fornecer uma medida de utilidade balanceada, pois, pode ocorrer que alguns indivíduos prefiram escalas de trabalho muito ruins do ponto de vista ergonômico e assim suas utilidades seriam modificadas pelas utilidades ergonômicas.

## CAPÍTULO 4

### 4. PROPOSTA DA TESE.

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma metodologia para a solução do problema de geração de escala mensal de trabalho para um grupo de condutores de uma empresa de transporte ferroviário de carga. Uma descrição mais detalhada do problema é dada a seguir, assim como os modelos matemáticos e os algoritmos utilizados para a obtenção da solução.

O processo para a obtenção da solução do problema foi dividido em duas partes: construção da escala cíclica e distribuição das escalas entre os condutores. Esta divisão é natural devido a abordagem cíclica adotada. Para resolver o problema de construção de escalas cíclicas serão apresentadas duas propostas, sendo a primeira baseada num problema de programação inteira (*set covering*) e a segunda, num algoritmo heurístico que utiliza os custos reduzidos de um problema de atribuição. O problema de distribuição das escalas tem como objetivo alocar cada condutor a uma escala de trabalho para os próximos 30 dias. A alocação é feita levando em consideração o nível de satisfação do histórico de trabalho de dada um, e também, o nível de satisfação da escala futura. A atribuição é feita de tal maneira que o nível de satisfação total de cada empregado fique distribuída o mais equitativamente possível ao longo do tempo. Para obter a solução deste problema foi proposto um algoritmo baseado na heurística 2-opt, sendo que a cada iteração é resolvido um problema de atribuição com gargalo.

Como medida de satisfação é utilizada uma função utilidade ajustada por meios de técnicas de preferência declarada. O processo de elaboração dos cartões para o levantamento estatístico e ajuste da função utilidade é apresentado no capítulo 5.

## 4.1 O Problema.

O presente trabalho apresenta um modelo de geração de escala voltado para a aplicação em uma empresa de transporte ferroviário de carga. Extensões deste modelo poderão ser feitas para outras situações cujas características do problema se assemelhem ao apresentado aqui.

As características do problema proposto neste trabalho são dadas a seguir. É dado um conjunto de diferentes atividades que se repetem todos os dias da semana. Todas estas atividades iniciam num mesmo local (base domiciliar, por exemplo, São Luiz, MA). Cada atividade é identificada pelo tipo, hora de início e duração. Os tipos podem ser, por exemplo, viagem com trem cargueiro (trem com carga diversa), viagem com carga de minério, manobra com o trem e prontidão. Considera-se “prontidão” o empregado que ficar nas dependências da empresa aguardando ordem para executar um serviço imprevisto ou para a substituição de outro empregado que faltar à escala programada.

Muitas atividades não iniciam e terminam num mesmo dia. Existem algumas atividades nas quais o condutor só retoma a seu ponto de partida (base domiciliar) em  $t_1$  ou até  $t_2$  dias depois. Isto ocorre em viagens muito longas, onde o condutor necessita repousar em uma base fora de seu domicílio. Dado que todos os dias  $n$  tarefas se repetem, o objetivo é construir uma escala cíclica contendo as  $n$  atividades com o menor número de dias possíveis. Em outras palavras, distribuir as  $n$  atividades sobre uma sequência cíclica de  $w$  dias, onde  $w$  é o número mínimo de dias possíveis. Uma escala, ou sequência cíclica, é viável desde que ela respeite as restrições impostas pela legislação do trabalho, pelos acordos sindicais e regras da empresa.

## 4.2 Restrições Legais

As restrições legais podem ser resumidamente apresentadas a seguir:

1. *Número de dias trabalhados*: normalmente são permitidos até 5 dias consecutivos de trabalho, podendo chegar a 6 dias ou, em caso esporádicos, 7 ou 8 dias;
2. *Número de atividades noturnas*: máximo de 2 atividades noturnas consecutivas, excepcionalmente 3. Além do mais, num período de 15 dias as horas noturnas de trabalho não devem exceder às horas diurnas.
3. *Descanso entre atividades*: entre duas atividades consecutivas devem ser dadas no mínimo 10 horas de descanso;

4. *Alocação da prontidão*: após uma 'prontidão' alocar 'fora de escala' ou 'folga', de forma a garantir  $\pm 40$  horas de intervalo até a próxima tarefa.
5. *Alocação das folgas*: alocar as folgas em 'diagonal', isto é, defasadas de forma a caírem em dias diferentes da semana. Essa prática permite uma distribuição mais equitativa das folgas em domingos e feriados entre os funcionários;

### 4.3 Propostas para a Construção de Escalas Cíclicas.

Considere um problema contendo um conjunto  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  de  $n$  atividades que se repetem todos os dias. Cada atividade  $a_i$ ,  $i=1, \dots, n$ , inicia num tempo  $t_i$  e termina num tempo  $T_i$  com duração  $D_i$ . Para cada atividade  $a_i$ , estabelece-se um atributo  $a_i$ , representando o tipo da atividade. Denomina-se de *programação*  $P_j$  um subconjunto ordenado de  $A$ ,  $P_j \subset A$ , representando uma sequência de atividades que podem ser executadas em  $k-1$  dias, sendo o  $k$ -ésimo dia uma folga, ou seja,  $|P_j| = k$ . Normalmente, considera-se  $k=6$ , excepcionalmente,  $k=7$ . Considere  $c_j = k$  o custo (duração) da programação  $j$ ,  $j=1, \dots, M$ , onde  $M$  é o número de programações possíveis obtidas através de permutações das atividades em  $k-1$  dias. Uma escala de serviço para um condutor consiste em um conjunto ordenado  $S$  de programações  $P_j$  de forma que cada atividade seja coberta uma única vez por alguma programação  $j$ , ou seja,

$$S = \{ \cup_j P_j \mid \bigcap_j P_j = \emptyset, \bigcup_j P_j = A, \bigcap_j P_j \neq \emptyset \}, \quad \bigcup_j P_j \subset A, \quad \bigcap_j P_j = \emptyset$$

O custo da escala é dada por  $z = \sum_{P_j \in S} c_j$ .

da escala representa o número de dias que um condutor gastará para executar a sequência de tarefas. Como já discutido na revisão bibliográfica,  $z$  também representa o número mínimo de condutores necessários para cobrir as atividades diárias. O objetivo é conseguir uma escala de custo mínimo (escala ótima) denotado por  $z^*$ .

Cada programação  $P_j$  pode ser conseguida permutando as tarefas em sequência, porém, só serão aceitas as programações viáveis, ou seja, aquelas que respeitarem as restrições impostas. Por exemplo, duas tarefas consecutivas  $i$  e  $j$  são legais se  $T_i + d \leq T_j$  onde,  $d$  é o intervalo de tempo mínimo para descanso entre tarefas.

A Figura 4-1 ilustra um exemplo de escala cíclica com  $n=21$  atividades dispostas em 42 dias, sendo as folgas denotadas por X. Considere  $P_1$  a programação que inicia com  $a_1$  e vai até a folga seguinte,  $P_2$  a programação que inicia com  $a_3$  e vai até a folga seguinte, e assim

sucessivamente até  $P_i$  que inicia em  $a_{24}$  e vai até a próxima folga. A partir deste exemplo de escala cíclica, pode-se concluir que serão necessários 42 condutores, pois, se no dia 1 o condutor 1 começa a executar a tarefa  $a_1$ , por convenção, no mesmo dia o condutor 2 começa a executar a tarefa  $a_2$ , o condutor 3 começa a tarefa  $a_3$ ,..., o condutor 6 ficará de folga, e assim sucessivamente, necessitando de 42 condutores. Note que para cada dia haverá 7 condutores de folga. Ora, se são 27 atividades diárias e apenas 7 condutores estão cumprindo folga num mesmo dia, o que estarão fazendo os 8 condutores restantes? É muito simples: eles estão cumprindo as atividades que iniciaram no dia anterior e que ainda não terminaram.

DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	X	$a_6$
$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	X	$a_{11}$	$a_{12}$
$a_{13}$	$a_{14}$	$a_{15}$	X	$a_{16}$	$a_{17}$	$a_{18}$
$a_{19}$	$a_{20}$	X	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$a_{24}$
$a_{25}$	X	$a_{26}$	$a_{27}$	$a_{28}$	$a_{29}$	$a_{30}$

Figura 4-1. Exemplo de uma escala cíclica de 42 dias

A partir do exemplo anterior, pode-se notar que uma escala cíclica pode ser dividida em programações disjuntas, separadas apenas pelo dia de folga. Esta observação é fundamental para o desenvolvimento de duas propostas para a solução do problema: a primeira baseia-se num modelo matemático denominado *set covering* e a segunda, refere-se a um algoritmo heurístico.

#### 4.3.1 O Modelo Matemático

Partindo da observação de que uma escala cíclica pode ser particionada em programações, o modelo *set covering* foi proposto, de maneira que cada coluna da matriz de coeficientes represente uma programação alternativa. Cada programação é codificada em um vetor de 0 e 1, e que cada linha da matriz represente uma atividade diária. Gera-se, então, uma grande quantidade de programações legais e resolve-se o problema *set covering* através de alguma técnica (heurística ou exata). O modelo possui a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } \sum_{j=1}^M C_j X_j \\ & \text{Sujeito a } \sum_{j=1}^M a_{ij} X_j = 1 \text{ para } i = 1, 2, \dots, n; \\ & X_j = 0 \text{ ou } 1 \text{ para } j = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (*1)$$

onde

$C_j$  = custo da programação  $j$ ;

$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a atividade } i \text{ faz parte da programação } j; \\ 0 & \text{caso contrário;} \end{cases}$

$X_j$  é a variável de decisão binária que diz se a programação  $j$  é ou não utilizada;

$M$  é o número de programações.

Cada coluna da matriz  $(a_{ij})$  representa uma programação viável. A restrição do modelo garante que cada atividade será coberta por alguma programação. Quando as restrições de desigualdade são substituídas por restrições de igualdade o modelo é denominado de *set partitioning*. Estes dois modelos têm sido amplamente utilizados para a solução do problema de alocação (*crew scheduling*). Ambos são problemas de otimização combinatória NP-completo. Existe uma grande quantidade de técnicas específicas para resolver estes tipos de problema, que vão desde métodos enumerativos que garantem a solução ótima, até técnicas heurísticas mais sofisticadas que garantem pelo menos uma solução próxima da ótima.

Em problemas práticos o modelo *set covering* é gerado para milhares de programações legais através de algum processo a ser definido (por exemplo: enumeração completa). Para os objetivos deste trabalho uma programação é considerada viável as restrições legais forem satisfeitas. Além disso, algumas recomendações também são estabelecidas a fim de melhorar a qualidade da escala, são elas:

1. critério de progressividade: a progressividade entre duas atividades consecutivas é observada se a hora de início da segunda ocorrer após 24 horas do início da primeira. Sempre que possível esse critério é obedecido. Este também é um critério ergonômico recomendado.
2. Intercalar viagem de trem de minério com manobra. Viagem de trem de minério é uma atividade mais difícil, enquanto que a manobra é realizada perto de seu domicílio.

3. Não atribuir 2 cargueiros na mesma programação. Como existem poucos trens cargueiros no conjunto de atividades diárias, então, sugere-se distribuí-los ao longo do tempo.

Como já foi dito anteriormente, estas restrições e recomendações podem variar em função das características do problema real. Somente a partir das definições acima pode-se dar início ao processo de geração das programações, e então, montar o modelo matemático.

O processo de geração das programações é feito de maneira enumerativa. Teoricamente seria necessário gerar todas as programações legais possíveis de 5 dias de trabalho. Porém, se forem consideradas todas as permutações possíveis, o esforço computacional requerido para este processo cresce excessivamente (pois o comportamento é não polinomial). Logo, uma alternativa para resolver os problemas reais é a utilização de heurísticas que reduzam o processo de geração das programações. As heurísticas devem explorar as características do problema, como por exemplo, explorar as restrições citadas anteriormente.

Para os exemplos deste trabalho foram utilizadas as seguintes heurísticas.

1. Gerar somente as programações legais com extensão de 5 dias de trabalho. Se for possível produzir uma escala de trabalho composta somente de programações com esta extensão, então, a escala resultante terá um comportamento semelhante ao da Figura 4-1. As folgas serão distribuídas na diagonal da tabela, ou seja, um mesmo condutor terá suas folgas em diferentes dias da semana. Este comportamento regular seria o ideal, sendo inclusive uma recomendação ergonômica, porém, isto nem sempre é alcançado.
2. Não sequenciar duas tarefas se o período de folga entre elas for muito longo. Por exemplo, se a primeira atividade iniciar às 18 horas e a segunda iniciar às 09 horas, ambas com duração de 6 horas, então, não será possível sequenciar nesta ordem se o período mínimo de descanso entre as duas atividades for, por exemplo, de 10 horas. De fato, a primeira atividade encerrará à 0 hora, portanto, a próxima atividade deverá iniciar após às 10 horas para que o empregado cumpra seu período mínimo de descanso. Assim, qualquer atividade que inicia antes das 10 horas só poderá ser executada em sequência se for atribuída para o dia seguinte, resultando, assim, num intervalo de descanso superior a 24 horas. Partindo do pressuposto que se deseja minimizar o tempo da escala total, a heurística impede que duas atividades sejam sequenciadas se o período entre elas for maior que um dia.
3. No máximo duas atividades noturnas poderão ser sequenciadas sucessivamente.

4. No máximo uma vez a regra de progressividade poderá ser violada dentro de uma programação.
5. Finalmente, esta heurística está relacionada com o problema de continuidade das atividades quando uma nova escala de trabalho for atribuída para cada condutor. No processo de geração das programações, somente serão aceitas as programações que puderem ser continuadas por algum condutor se elas forem truncadas em uma posição  $i$  qualquer, ( $1 \leq i < k$ ). Um melhor entendimento desta heurística pode ser visto na seção 4.4.

A partir das regras estabelecidas acima são produzidas as programações e o modelo matemático (*set covering*) é resolvido, resultando num conjunto de programação que cobre todas as atividades diárias. Então, uma escala cíclica é montada unindo as programações resultantes.

Devido às suas restrições de desigualdade, o modelo matemático *set covering* permite que uma atividade seja coberta mais de uma vez, ou seja, pode acontecer que alguma atividade participe de duas ou mais programações da solução final. Estas ocorrências são naturalmente muito pequenas. Na maioria dos casos reais isto não ocorre. Quando há este tipo de ocorrência na solução, diz-se que a solução possui *cobertura extra*. A ocorrência de coberturas extras devem ser eliminadas da solução.

### 4.3.2 O Algoritmo Heurístico

Este algoritmo também trabalha a idéia de particionar uma escala cíclica em programações disjuntas. Supondo que a escala cíclica é composta por  $s$  programações, o algoritmo procura construir  $s$  programações paralelamente. Para construir as programações são utilizadas as informações da matriz de custos reduzidos de um problema de atribuição. A formalização de como o número  $s$  de programações é estimado e como o algoritmo constrói as escalas são descritos a seguir.

Dado que o conjunto de  $n$  atividades é conhecido, então, uma matriz  $(c_{ij})$   $i, j = 1, \dots, n$  pode ser construída da seguinte forma: o valor de  $c_{ij}$  é igual ao tempo mínimo, em minutos, entre o

---

<sup>1</sup> A posição  $i$  de uma programação corresponde ao  $i$ -ésimo dia da mesma.

início da atividade  $i$  e o início da atividade  $j$ . Nos valores de  $c_{ij}$  já são embutidos as regras de sequenciamentos entre duas atividades consecutivas, como por exemplo, o tempo mínimo de descanso entre duas atividades. Para todo  $i$  define-se  $c_{ii} = \infty$ .

A partir da matriz  $(c_{ij})$  um problema de atribuição pode ser definido da forma:

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \text{s.a.: } \sum_{i=1}^n x_{ij} &= 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \\ \sum_{j=i}^n x_{ij} &\leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \\ x_{ij} &\in \{0, 1\} \quad \forall i, j = 1, \dots, n \end{aligned} \tag{4.2}$$

A variável de decisão  $x_{ij}$  é igual a 1 se o sequenciamento da atividade  $i$  para  $j$  está na solução, caso contrário  $x_{ij}$  é igual a zero. O problema acima pode ser resolvido, por exemplo, com o algoritmo de Carpaneto e Toth (1987) que se encontra no Anexo 2.

Após resolver o problema de atribuição se obtém a matriz de custos reduzidos:  $(r_{ij})$  resultante das operações entre linhas e colunas executadas pelo algoritmo<sup>3</sup>. O valor  $r_{ij}$  pode ser interpretado como sendo um limite inferior sobre o incremento no valor da função objetivo se o sequenciamento de  $i$  para  $j$  for colocado na solução. A matriz de custos reduzidos é extremamente importante para o processo de sequenciamento de atividades que será apresentado no algoritmo.

#### 4.3.2.1 Estimativa do Número de Programações na Escala Cíclica

A partir do valor da função objetivo  $z$  foi deduzida uma equação que fornece uma estimativa para o número de programação na escala cíclica. Supondo que cada condutor trabalhe  $a$  dias por programação, então, a expressão é dada por:

<sup>1</sup> A matriz de custos reduzidos  $(r_{ij})$  é obtida através de transformações sobre a matriz  $(c_{ij})$  executadas por algum algoritmo para a obtenção da solução ótima.

<sup>3</sup> Além do algoritmo de Carpaneto e Toth (1987) um outro algoritmo clássico em P.O. para resolver este tipo de problema tem sido o algoritmo Húngaro.

$$s \geq \left( \frac{1}{1440} \frac{z}{\alpha} \right) \quad (4.3)$$

A equação 4.3 fornece um limite inferior para o número de programações necessárias na escala cíclica. Normalmente se considera  $\alpha = 5$ .

Para executar o sequenciamento das atividades um conjunto de parâmetros pode ser estabelecido. Esses *parâmetros* servem para regular algumas regras de sequenciamento de atividades, tais como, o número de programações, a hora de início de cada programação, a duração mínima de descanso entre duas atividades, a taxa de progressividade que deve ser obedecida, o número de noites trabalhadas em sequência, etc.

#### 4.3.2.2 O Algoritmo

Define-se  $Q$  o conjunto das atividades de  $A$  que ainda não foram sequenciadas. Define-se,

também, um conjunto de  $s$  programações  $P_k, k=1, \dots, s$ , sendo que  $s = \left\lceil \frac{1}{14} \frac{z}{\alpha} \right\rceil$ . O algoritmo

utiliza duas funções,  $Fi(x)$  e  $Fs(x)$ . A função  $Fi(x)$  fornece a melhor *atividade inicial*  $a$ ,  $a \in Q$ , para ser atribuída à programação  $x$ . A função  $Fs(x)$  fornece a melhor atividade que pode ser sequenciada após a última atividade na programação  $x$ . Os detalhes dessas duas funções são apresentados após o algoritmo.

#### Passos do Algoritmo:

**Início:** Para  $k=1$  até  $s$  faça

$P_k = \emptyset$ ;

$Q := A$ ;

Para  $k=1$  até  $s$  faça (Selecionar a atividade Inicial)

$a := Fi(P_k, Q)$

**PI:** Para  $k=1$  até  $s$  faça {Selecionar a atividade seguinte}

$b := Fs(P_k, a)$ ,

Se  $b \neq \emptyset$  então

$P_k := P_k \cup \{b\}, Q := Q - \{b\}$ ,

**P2:** Se  $Q = \emptyset$  ou, se nenhuma atividade foi selecionada no passo anterior, então, PARE.

Senão, volte ao passo PI.

Caso reste algumas atividades que não chegaram a ser sequenciadas, há então duas alternativas: alterar alguns parâmetros (citados anteriormente) e repetir o algoritmo ou tomar a escala parcialmente construída e finalizar manualmente.

### **Escolha da Atividade Inicial - Função $F_i(x)$**

A escolha da atividade inicial  $a$  para cada programação considera os melhores valores de uma pontuação  $p(a)$ . A pontuação  $p(a)$  é calculada em função no número de custos reduzidos iguais a zeros, referentes às linhas e colunas da atividade  $a$ . Quanto maior o número de custos reduzidos zero na linha da atividade  $a$ , maior o número de atividades que podem ser sequenciadas após a atividade  $a$  sem causar grandes acréscimos na função objetivo  $z$ . Uma interpretação análoga pode ser feita para os custos reduzidos na coluna de  $a$ . Visto que a atividade  $a$  será a primeira atividade a ser executada na programação, será dada preferência às atividades com o menor número de custos reduzidos zeros na coluna de  $a$  e um grande número de custos reduzidos zeros na linha de  $a$ . Uma vez que a atividade inicial será seguida por outras atividades na mesma programação, deve-se penalizar as atividades que não têm custos reduzidos zeros em suas linhas. Ainda mais, as atividades que não respeitarem as regras estabelecidas (ajustadas pelos parâmetros), como por exemplo, a hora inicial da programação, também serão penalizadas.

### **Escolha da Atividade Seguinte - Função $F_s(x)$**

A escolha da atividade  $b$  que pode ser sequenciada logo após a última atividade  $i$ , na programação  $k$ , também segue alguns critérios semelhantes. Para cada candidato  $b$  que pode ser sequenciado após a atividade  $i$  na programação  $k$  recebe uma pontuação  $P(b)$ . Esta pontuação leva em consideração o incremento na função objetivo  $z$  se o sequenciamento da atividade  $b$  após a atividade  $i$  for imposta na solução. Alguns valores adicionais podem ser acrescentados às pontuações a fim de sequenciar as atividades consideradas 'mais críticas', isto é, aquelas atividades que possuem um pequeno número de custos reduzidos nas linhas e colunas, uma duração muito grande ou um atributo específico (atividade noturna). A atividade  $b$  com a menor pontuação será sequenciada após a atividade  $i$  na programação  $k$ . Caso nenhuma atividade seja selecionada então a função devolve uma atividade nula  $o$ .

O incremento na função objetivo pode ser calculado usando alguma técnica paramétrica, sem ter que resolver o problema de atribuição novamente. A técnica paramétrica consiste em

re-associar as linhas e colunas envolvidas na nova solução. Esta técnica oferece a vantagem de ser mais rápida, pois, sua complexidade é de  $O(n^2)$ , enquanto que um algoritmo primal-dual possui uma complexidade de  $O(n^3)$ .

#### 4.4 Proposta para a Distribuição das Escalas aos Condutores.

##### 4.4.1 Considerações Preliminares

Uma vez obtida a escala cíclica otimizada, o próximo passo é atribuir para cada um dos condutores a sua escala de trabalho para um horizonte de planejamento de 30 dias. Convém salientar que o planejamento é feito para o mês posterior. Porém, ele ocorre pelo menos uma semana antes de sua implantação. Caso ocorram alterações no conjunto de atividades diárias, então, o planejamento é antecipado.

O planejamento é realizado buscando uma distribuição da carga de trabalho entre os empregados. A carga de trabalho está associada à satisfação dos empregados que é quantificada por uma função utilidade obtida por técnicas de preferência declarada.

Seja  $U(P_j)$  a medida de utilidade da programação  $P_j$  pertencente a escala ótima  $tf$ , onde  $j=1, \dots, s$ , sendo  $s=|P|$  o número de programações que compõe a escala ótima. Se uma escala  $S'$  é composta por  $P_1, P_2$  e  $P_3$  (supondo  $s \geq 3$ ), então, a utilidade total será a soma das utilidades, ou seja,  $U(S') = U(P_1) + U(P_2) + U(P_3)$ .

Para o estudo de caso realizado, tipicamente uma escala cíclica  $tf$  leva mais de 30 dias para ser completada por um único condutor. Como o planejamento é feito para um horizonte de 30 dias, então, é necessário truncar a escala original em  $z$  escalas de 30 dias (lembrando que  $z=w$ , isto é, o número de condutores). Define-se  $S_l$  como sendo a  $l$ -ésima escala truncada,  $l=1, \dots, z$ . Assim, a partir do exemplo da Figura 4-1 pode-se concluir que :

$$S_1 = \{a_1, a_2, \dots, X, a_{11}\};$$

$$S_2 = \{a_2, a_3, \dots, a_{22}\};$$

$$S_3 = \{a_3, a_4, \dots, a_{33}\};$$

...

$$S_z = \{X, a_z, \dots, a_n, X\};$$

onde,  $a^i$  e  $\bar{a}^i$  denotam, respectivamente, a primeira e a segunda parte da atividade  $a$ , executadas em dois dias consecutivos. A notação  $\bar{a}^i$  também poderá aparecer se a atividade  $a$ , tomar três dias consecutivos.

Visto que, cada uma das escalas truncadas  $S_1, \dots, S_z$  são diferentes, conseqüentemente, o valor da utilidade de cada escala truncada poderá ser diferente das demais. Assim, assumindo que  $U(S_1) \cdot U(S_2) \cdot \dots \cdot U(S_z)$ , então, cada um dos condutores receberá uma escala de trabalho com níveis de satisfação diferentes.

Para que ao final do horizonte de planejamento seja possível alcançar um nível de satisfação equitativo entre os condutores é necessário, também, considerar o histórico de trabalho de cada condutor. Mesmo assumindo que no passado (30 dias antes do novo planejamento) o histórico de trabalho de cada condutor tenha sido planejado de maneira equitativa, ainda assim é necessário revê-lo. Isto porque a escala de trabalho que foi planejada está sujeita a alterações não controláveis, como por exemplo, a ausência de algum condutor no cumprimento de seu trabalho, alterações inesperadas no quadro de atividades, etc. Esses eventos causam distorções nos níveis de satisfação medidos no planejamento anterior. Essas distorções podem ser amenizadas atribuindo-lhes novas escalas de trabalho para o próximo período de planejamento.

É bastante intuitivo atribuir uma nova escala  $S_i$  com maior nível de satisfação para o condutor que possui um histórico de trabalho com menor nível de satisfação. Embora a idéia seja fácil de ser compreendida, na concretização envolve algumas complicações em virtude dos truncamentos realizados na escala passada e na nova escala que lhe será atribuída. Devido a estes truncamentos a maioria dos condutores tiveram, e ainda terão, uma programação truncada no final de sua escala planejada. A Figura 4-2 ilustra uma junção entre as escalas do planejamento passado, truncadas no 30º dia do mês, com o novo planejamento. Assuma que cada programação possui uma extensão de 6 dias, sendo uma folga no 6º dia. Assim, observe que o condutor 1 teve sua última programação truncada na posição 3, o condutor 2 na posição 4, o condutor 3 na posição 5 e o condutor 4 na posição 6.

Condutor	Histórico de Trabalho			Nova Escala de Trabalho		
	DIA 28	DIA 29	DIA 30	DIA 1	DIA 2	DIA 3
1	—	—	—	—	—	X
2	—	—	—	—	X	—
3	—	—	—	X	—	—
4	—	—	X	—	—	—

**Figura 4-2.** Exemplo de um problema de continuidade das atividades para 4 condutores.

Observe que os condutores 3 e 4 estão em situação privilegiada no sentido de que qualquer programação pode ser atribuída a partir do dia 1, no entanto, os condutores 1 e 2 estão numa situação mais complicada, pois as atividades que lhes serão atribuídas para o dia 1 terão que dar *continuidade* à programação que ambos vinham realizando. Esta continuidade refere-se à *junção* de duas programações truncadas, formando uma nova. Em outras palavras, se um condutor possui sua última programação truncada na  $i$ -ésima posição, então, a junção só poderá ocorrer com a posição  $i+1$  de alguma programação do início da nova escala truncada. Estas junções são permitidas somente se as restrições forem cumpridas, como por exemplo, o período mínimo de descanso entre duas atividades, o número máximo de atividades em sequência, etc.

O problema só terá solução se as junções forem resolvidas para todos os condutores. Isto pode ser conseguido por mais de uma maneira:

- 1) através de um remanejamento de pessoal, no qual é retirado o condutor que não pode dar sequência a nenhuma escala truncada e substituído por outro;
- 2) atribuindo um dia de fora de escala à escala cíclica de forma que o condutor com problema assuma a escala truncada que inicia neste dia. Esta decisão resulta num acréscimo no número de condutores necessários;
- 3) realizando modificações nos modelos de geração de escala, de forma que possa produzir outras escalas cíclicas que resolvam o problema de junções. Estas modificações são descritas abaixo.
- 4) por último, violando algumas restrições legais de forma que possa resolver o problema de junções. Embora esta não seja a decisão mais indicada, algumas vezes o gerente é obrigado a tomar esta decisão por falta de alternativas.

No caso do modelo *set covering* as modificações podem ser feitas atribuindo restrições adicionais ao modelo (3.1) de otimização da escala, garantindo que na escala ótima tenha pelo menos uma programação que resolva o problema de junção anterior. Se ocorrer novamente o problema de junção para outro condutor, então, mais uma nova restrição é adicionada. Isto é repetido até que não haja mais o problema de junção. A restrição adicional é da forma:

$$M \sum_{j=1}^{2X^*} x_{ij} \geq 1 \quad (4.4)$$

onde

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a programação } j \text{ pode ser unida com a última programação do condutor } i \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Esta restrição garante que a solução (escala cíclica) terá pelo menos uma programação que resolverá o problema de junção para o condutor  $i$ .

Já, para o caso do algoritmo heurístico, as modificações podem ser feitas, adicionando por exemplo, regras que só permitem sequenciar uma atividade após outra, se a escala truncada que inicia com esta atividade puder ser continuada por algum condutor.

Uma vez resolvido o problema das junções, o problema global ainda não está resolvido. Resta, ainda, fazer a distribuição equitativa das escalas. Antes de prosseguir é importante observar que as programações que compõem a escala cíclica podem ser sequenciadas de diversas maneiras sem alterar o número total de condutores necessários. Portanto, para cada sequência de programações, novas escalas truncadas serão produzidas. Partindo desta observação, de que é possível produzir diversas escalas truncadas com utilidades diferentes, surge a idéia de explorar esta propriedade que é dada a seguir.

#### 4.4.2 Modelo para a Distribuição das Escalas

Partindo de uma escala cíclica qualquer (obtida no estágio anterior), o objetivo é alocar as escalas truncadas aos condutores de maneira que a distribuição dos níveis de satisfação fique mais equitativa possível. Para cada condutor apenas um número reduzido de escalas truncadas poderá ser associado devido aos problemas de continuidade. No entanto, para muitos

condutores, talvez não exista mais de uma alternativa (escala truncada) para ser associada. Uma vez que o objetivo é encontrar uma distribuição equitativa das satisfações, então, o modelo de atribuição com gargalo pode ser utilizado para resolver este problema. O modelo é dado por:

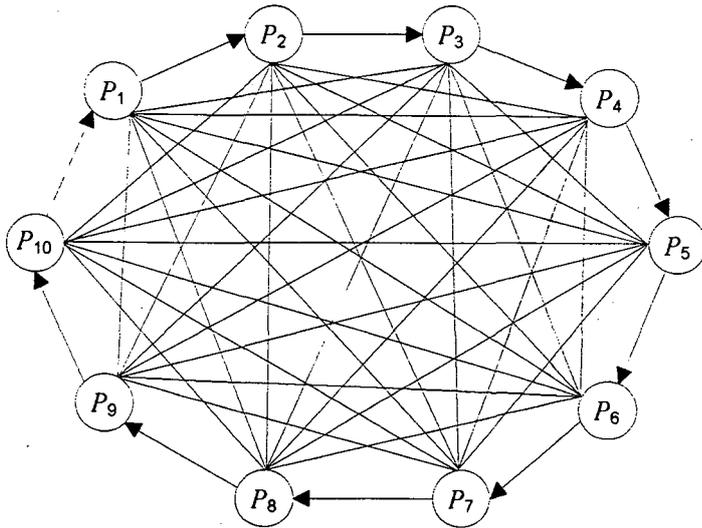
$$\begin{aligned}
 & \text{Min } y \\
 & \text{s.a.: } \sum_{i=1}^w 2^i = 1; \quad i = 1, \dots, w; \\
 & \quad \sum_{j=1}^w Z_{ij} * y_j = 1; \quad i = 1, \dots, w; \\
 & \quad x_{ij} c_{ij} \leq y \quad i, j = 1, \dots, w; \\
 & \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, \dots, w;
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

onde o  $c_{ij}$  deve ser um 'peso' atribuído se a escala  $j$  for atribuída ao condutor  $i$ . Desta forma define-se  $c_{ij} = (-1) * (U(i, j) + U(6))$  se o condutor  $i$  pode continuar com a escala truncada  $S_j$ ,  $c_{ij} = 0$  caso contrário. Considere  $H_i$ , a escala histórica do condutor  $i$ . A variável de decisão  $X_{ij}$  é igual a 1 se condutor  $i$  continuar sua escala de trabalho através da escala  $S_j$  e 0 caso contrário. Note que o valor de  $Cy$  é igual a utilidade da escala total do condutor  $i$  multiplicado por (-1). O valor negativo tem como objetivo dar um sentido contrário à utilidade. Isto significa que quanto menor a utilidade, maior será o peso  $c_{ij}$ . Desta forma, resolver o problema 4.5 significa minimizar o maior peso ou em outras palavras, significa maximizar a menor utilidade, ou ainda, maximizar a satisfação do condutor menos satisfeito.

Este é um modelo de atribuição com uma função objetivo do tipo min-max. Na literatura existem alguns algoritmos para resolver este problema. Neste trabalho foi utilizado o algoritmo apresentado por Carraresi e Galo (1984b) que se encontra no Anexo 3.

Note que o problema acima é resolvido partindo de uma escala cíclica otimizada. Mas como foi observado anteriormente, é possível obter outros ciclos com as mesmas programações (comutando as programações). Assim, este problema pode ser interpretado como um problema do caixeiro viajante cuja a função objetivo é dada pelo problema 4.5. A Figura 4-3 ilustra o exemplo de um grafo com 10 vértices, cada vértice representando uma programação. As arestas representam os possíveis sequenciamentos entre duas programações. O objetivo é

encontrar um ciclo passando por todas programações com custo mínimo. O custo de um ciclo é avaliado pelo valor de  $j$ ; do problema de atribuição 4.5.



**Figura 4-3.** Exemplo de um ciclo de programações.

A partir de um ciclo inicial de programações, que pode ser construído aleatoriamente, outros ciclos podem ser obtidos utilizando alguma heurística de melhoria, como por exemplo as heurísticas 2-opt e 3-opt. Ao contrário da maioria dos problemas do caixeiro viajante, neste caso os custos das arestas não são explícitos, porém, o impacto de uma alteração no ciclo pode ser avaliada. O custo de um ciclo pode ser avaliado através do valor ótimo da função objetivo do problema 4.5. Portanto, um ciclo de programações é considerado melhor que outro se o valor da função objetivo  $y$  for menor que o anterior. A heurística de melhoria é repetida até que a redução entre os valores da função objetivo de dois problemas consecutivos deixa de ser significativa. Neste trabalho foi implementado a heurística 2-opt (veja no Anexo 4).

A heurística 2-opt é aplicada com o objetivo de melhorar a distribuição da carga de trabalho entre os condutores. Porém, o primeiro ciclo de programações é construído aleatoriamente. Portanto, é bastante provável que através da heurística 2-opt se encontre um ciclo melhor. Desta forma, não faz muito sentido resolver o problema 4.5 para o primeiro ciclo, recomenda-se, então, resolver o problema de atribuição definido pela matriz  $(c,y)$ , pois trata-se de um modelo menos complexo que pode ser resolvido mais rapidamente.

#### **4.5 Medida de Satisfação da Escala de Trabalho**

Algumas das publicações apresentadas tem como objetivo equilibrar a carga de trabalho entre os condutores. Embora o conceito de ‘carga de trabalho’ possa ser entendido de maneiras diferentes, os autores o tem tratado de maneira bastante simplificada. Normalmente, a carga de trabalho tem sido medida em função do tempo de trabalho. Assim, a escala resultante apenas produz uma distribuição equitativa das horas trabalhadas. No presente trabalho, pretende-se utilizar um conceito de carga de trabalho que reflita alguma medida de satisfação (preferência) do trabalhador. A função utilidade obtida através da técnica de preferência declarada fornece esta medida. Assim, o tempo de trabalho será apenas um dos atributos a ser ponderado.

O objetivo deste trabalho é quantificar o nível de satisfação dos empregados com relação a sua escala de trabalho. O nível total de satisfação de uma escala de trabalho para um condutor é obtida pela soma dos níveis de satisfação de cada programação que compõe sua escala. Para quantificar a satisfação (preferência) do condutor com relação à sua escala de trabalho, faz-se necessário considerar vários fatores (atributos) que compõem a escala. A quantificação da satisfação ou preferência dos trabalhadores é feita por modelos matemáticos configurados através de uma função fundamentada no conceito de utilidade. A utilidade é dada por um valor numérico que só se torna significativo quando comparado com os respectivos valores das demais opções. Isto é, a utilidade (ou satisfação) atribuída a uma determinada alternativa ou escala de trabalho não pode ser avaliada através de um único valor e sim, pela confrontação de dois ou mais valores de alternativas diferentes.

Considerações mais detalhadas sobre a calibração da função utilidade são apresentadas no capítulo 5.

#### **4.6 Considerações Finais**

Na proposta metodológica apresentada neste capítulo podem ser apontadas vantagens e desvantagens. A primeira vista, o uso do modelo matemático *set covering* do problema de construção de escala pode ser apontado como uma desvantagem. O modelo requer que seja gerado um grande número de programações viáveis. Pelo fato de estar baseado em um processo enumerativo, o esforço computacional cresce excessivamente quando o número de atividades diárias aumenta. Toda vez que o conjunto de tarefas sofrer alterações será

necessário gerar e resolver o problema *set covering* novamente. Este é um processo penoso em função da dimensão do problema. Porém, este processo pode ser amenizado admitindo que as alterações no conjunto de atividades sejam pequenas a cada vez. Se apenas algumas atividades foram retiradas do conjunto, então, basta apenas eliminar as programações que contém estas atividades. Por outro lado, se apenas algumas atividades foram acrescentadas ao conjunto, então, basta gerar novas programações contendo, no mínimo, uma atividade nova. Desta forma, todas aquelas programações que não foram eliminadas serão somadas a estas novas programações. Tomando esta atitude, o esforço computacional pode ser reduzido. Note, então, que para o primeiro problema ser resolvido será necessário gerar um maior número de programações para cada uma das atividades. Entretanto, os procedimentos heurísticos podem reduzir significativamente o conjunto de programações legais.

A primeira idéia que surgiu para o problema de otimização das programações foi o uso do modelo *set partitioning*. A vantagem deste modelo com relação ao *set covering* está no fato de fornecer uma solução sem ocorrências de coberturas extras. Por outro lado, o modelo *set partitioning* exige um número muito maior de programações viáveis. Devido a natureza do modelo é necessário gerar programações de comprimentos diferentes, por exemplo  $k=4, 5$  e  $6$ . Além disso, o modelo *set partitioning* é mais difícil de ser resolvido devido às suas rígidas restrições de igualdade.

Com o uso do modelo *set covering* constatou-se um ganho considerável no tempo computacional. Em menos de um minuto foi possível resolver problemas com quase 4000 variáveis inteiras  $\{0, 1\}$  com o software Hyper Lindo (Schrage, 1991) em um PC 486 Dx4 100. Uma justificativa para este resultado é o fato de todas as programações terem um custo único  $(C_j - C_j, \forall i, j)$ .

Quanto ao algoritmo heurístico desenvolvido para a construção de escalas cíclicas, ele utiliza algumas idéias também implementadas no algoritmo de Caprara et al (1995a), como por exemplo, explorar aos custos reduzidos do problema de atribuição associado. Porém, pelo fato de dividir a escala cíclica em programações, isto traz algumas vantagens que podem justificar sua eficiência, como por exemplo:

- 1) apenas uma matriz de custos é utilizada, sendo a matriz de custos associada aos sequenciamentos diretos entre duas atividades consecutivas, enquanto as matrizes

resultantes de acréscimos de folgas (simples e duplas) não são necessárias. A justificativa de não utilizar as outras duas matrizes reside no fato de que, uma vez que uma programação é construída, o acréscimo de folgas é uma tarefa muito simples e não requer nenhum cálculo ou aplicação de regras durante o processo de construção. Esta característica traz uma sensível redução no tempo de processamento, pois existem muito menos valores numéricos para serem checados e pesquisados.

- 2) pelo fato das programações serem construídas paralelamente, isto contribui para a distribuição da carga de trabalho entre as programações, ao contrário do que ocorre no processo sequencial. Na forma sequencial facilmente pode acontecer que ao final da construção do ciclo sobrem atividades que não podem ser sequenciadas, gerando, assim, um desequilíbrio na distribuição das atividades ao longo do ciclo ou tendo que reconstruir outra escala.

Os modelos apresentados neste capítulo foram divididos em duas partes: construção e distribuição das escalas. Esta divisão também é utilizada pela empresa estudada e, também, por todas as empresas que utilizam a abordagem cíclica. Esta abordagem é uma cultura que está consolidada não somente entre os funcionários responsáveis pela geração e distribuição das escalas, mas também, entre o grupo de condutores. Portanto, apresentar uma proposta que fuja desta abordagem cíclica pode não ser bem aceita pelos empregados da empresa.

Na abordagem individualizada, como apresentada na revisão bibliográfica, a construção e distribuição das escalas são realizadas em conjunto. Esta abordagem tem a característica interessante que possibilita a construção de escalas conforme a necessidade ou interesse de cada condutor. Por outro lado, as características do problema em estudo não se enquadram entre as premissas feitas pela maioria dos modelos e algoritmos utilizados na abordagem individualizada. Por exemplo, os modelos que estimam o número de condutores necessários e os modelos de construção e distribuição das escalas não podem ser empregados. Para que a abordagem individualizada seja aplicada ao problema em estudo, será necessário pesquisar novos modelos e algoritmos.

## CAPÍTULO 5

### 5. APLICAÇÃO DA PREFERÊNCIA DECLARADA

No capítulo anterior foi proposto a utilização de uma função utilidade, ajustada por técnicas de Preferência Declarada (PD), para quantificar o nível de satisfação dos empregados com relação a sua escala de trabalho. Esta função será incorporada no modelo de distribuição das escalas a fim de obter uma satisfação mais equitativa entre os condutores.

Este capítulo pode ser entendido com sendo um complemento ao capítulo anterior. Nele pretende-se apresentar todas as etapas realizadas para a obtenção da função utilidade: a definição dos atributos e seus níveis, a elaboração das alternativas, realização das entrevistas, a calibração dos parâmetros e, finalmente, a obtenção da função utilidade.

A PD baseia-se em entrevistas, sob as quais, são apresentadas alternativas hipotéticas (ou conjunto de opções) aos entrevistados. Cada alternativa é uma combinação de níveis dos atributos. Um dos objetivos principais de uma aplicação de PD é a construção das alternativas (cenários ou opções) hipotéticas que serão utilizadas nas entrevistas. Cada alternativa é apresentada em forma de cartão, no qual é impresso a representação, de preferência gráfica, da mesma. Para a aplicação deste estudo cada alternativa significa uma escala de trabalho que o condutor possa realizar. Porém, uma escala pode ter duração variável. Para solucionar esta questão foi definido que cada alternativa seria uma escala de duração fixa, ou melhor, que cada opção seria uma programação com duração de 6 dias, sendo que no sexto dia é dado uma folga. A duração de 6 dias foi escolhida por representar um valor médio da duração das programações realizadas no caso real.

#### 5.1 Definição dos Atributos e Seus Níveis.

Nesta aplicação os produtos que se pretende avaliar são as escalas de trabalho. Desta forma é necessário identificar quais os fatores que causam a maior atratividade durante uma avaliação de preferências. Em outras palavras, significa definir os atributos que identificam o produto

(escala). Através de uma pesquisa, realizada com profissionais responsáveis diretamente com a tarefa de construção e distribuição das escalas, pôde-se identificar uma classificação de 5 atributos, conforme ilustrado na Figura 5-1.

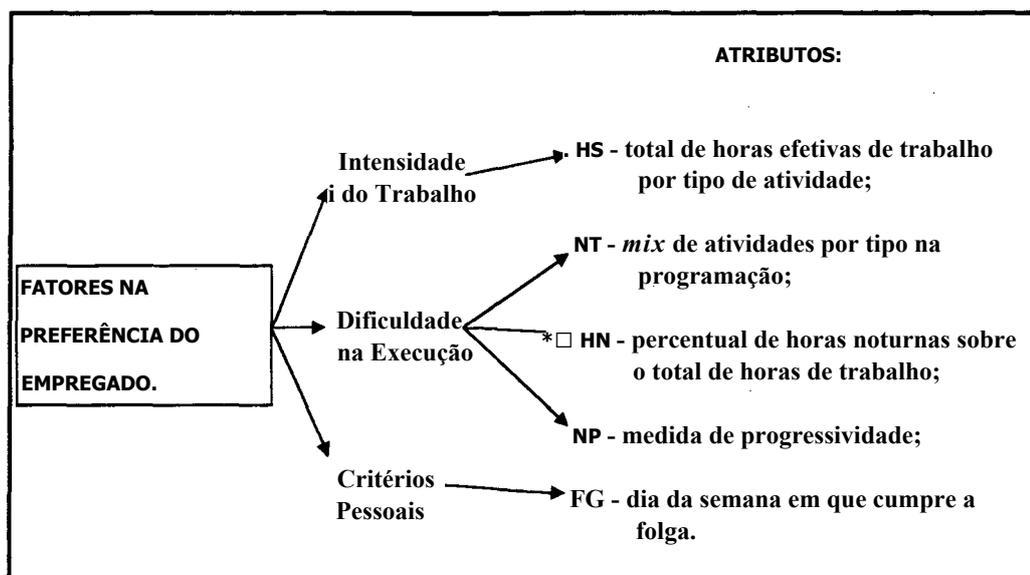


Figura 5-1. Classificação dos atributos.

Cada alternativa será formada por uma combinação dos níveis de cada atributo acima. Para projetar o experimento estatístico foram definidos os seguintes os níveis dos atributos:

a) Atributo NT: *mix* de atividades

Cada tipo de atividade apresenta uma preferência maior ou menor, tendo em vista o grau de dificuldade para sua execução. Na prática, as atividades não se apresentam isoladas em cada programação. Assim, é preciso selecionar situações que reflitam o *mix* de dificuldades variadas para, posteriormente, definir uma escala de preferência.

A dificuldade da execução do serviço, conforme levantamento na empresa, segue a seguinte ordem crescente de intensidade:

- 1) manobra: é a atividade menos cansativa porque é realizada no próprio local onde vive o trabalhador, envolve movimentos lentos e intermitentes e tem uma duração fixa de 6 horas;

2) prontidão: embora muitas vezes não se realize, resultando na dispensa do empregado, pode gerar a efetiva alocação do condutor a uma manobra ou à condução de um trem. Envolve, assim, expectativa e certa tensão.

3) trem de carga: trata-se de um trem leve, conduzindo material diverso de uso da ferrovia, não exigindo os cuidados e a atenção requeridos pelos trens de minério.

4) trem de minério: é a atividade mais pesada em razão da duração, extensão do trem, peso, tração tripla, etc.

Para efeito de mensuração comparativa da dificuldade de execução das tarefas, foi definida a seguinte escala progressiva:

nível 0: programação contendo só manobras;

nível 1: programação contendo uma prontidão, sendo o restante formado por manobras;

nível 2: duas prontidões, complementadas por manobras;

nível 3: condução de trem de carga, complementada por manobras;

nível 4: condução de trem de minério, mais prontidão, mais manobra;

nível 5: condução de um trem de minério, condução de um trem de carga e manobras;

nível 6: condução de dois trens de minério e mais manobras;

nível 7: condução de dois trens de minério, mais prontidão

Os *mix* de atividades que não coincidirem exatamente com os indicados acima serão posteriormente interpolados por inspeção, a partir de consulta direta com a empresa e com os empregados. Na calibração da função utilidade os *mix* indicados acima serão representados por uma variável *dummy* de forma a captar separadamente os pesos correspondentes a cada tipo de atividade. “A partir do ajuste estatístico, e considerando os valores obtidos para os pesos, será definida uma escala cardinal de preferência.

b) Atributo HS: horas efetivas de trabalho.

A duração média de uma tarefa, em horas efetivas de trabalho, não é uma variável independente na prática, estando intimamente correlacionada com os tipos de tarefas. Ou seja, a variação de HS está embutida nas variações do atributo anterior (NT).

No entanto, a variável HS é considerada importante nas avaliações ergonômicas, e por isso foi explicitada na função utilidade. Porém, tendo em vista que a correlação entre HS e NT é elevada (dedução lógica), o atributo HS não foi considerado independente na definição do experimento estatístico.

c) Atributo HN: percentual de horas noturnas sobre o total de horas trabalhadas são definidas em três níveis:

nível 0 : 0 à 33%

nível 1 : 33% à 66%;

nível 2 : 66% à 100%.

d) Atributo NP: número de vezes que a progressividade entre duas atividades é violada na programação. Foram também definidos 3 níveis:

nível 0 : 0 ou 1 ocorrência;

nível 1: 2 ocorrências;

nível 2: 3 ou 4 ocorrências (na prática nunca ocorre mais de 4).

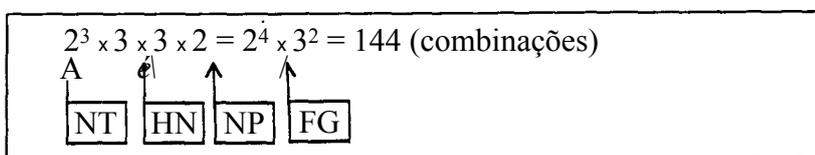
e) Atributo FG: dia da semana que o empregado cumpre sua folga. Foram definidos 2 níveis:

nível 0: folga no domingo ou feriado;

nível 1: folga em dia útil ou sábado.

## 5.2 Elaboração das Alternativas (Cartões)

Cada alternativa utilizada na pesquisa é definida como uma combinação de níveis dos atributos. As alternativas são geradas com auxílio da teoria de projetos de experimentos estatísticos. Conhecendo os atributos e seus níveis partiu-se para a construção de um projeto fatorial (isto é, combinações dos níveis dos atributos para todas as alternativas do experimento). A partir dos níveis dos atributos definidos anteriormente, chegou-se ao seguinte esquema fatorial:



**Figura 5-2.** Estrutura fatorial do experimento.

Partiu-se do fatorial completo  $2^4$  agrupando as combinações  $2^3$  para formar o esquema correspondente ao fator NT, sendo o elemento  $2^1$  restante representativo do fator FG.

Para os dois fatores restantes (HN e NP), de três níveis, adotou-se o esquema  $3^2$  proposto por Mc Lean e Anderson (1994), combinando-o com o anterior.

A estrutura fatorial para este experimento apresenta várias combinações. O experimento fatorial completo é do tipo  $2^4 3^2$  resultando em 144 combinações possíveis. Considerando um número elevado, utilizou-se o experimento fatorial fracional ( $2/3$ ) de acordo com Mc Lean e Anderson (1994). Como resultado, obteve-se um conjunto de 12 blocos de cartões, e cada bloco contendo 8 cartões diferentes, chegando a um total de 96 cartões diferentes. Para algumas aplicações o número de 8 cartões pode ser considerado muito grande, porém, nesta aplicação este número é aceitável, pois os cartões são ilustrações técnicas que os entrevistados (condutores e gerente) estão acostumados a analisar.

O número total de cartões é apresentado no Quadro 5-1. Cada cartão é uma combinação dos níveis dos 4 atributos, sendo o primeiro valor um nível do atributo NT, e em seguida os níveis dos atributos FG, HN e NP (nesta ordem).

**Quadro 5-1.** Delineamento do experimento

N <sup>o</sup> do cartão	Bloco A	Bloco B	Bloco C	Bloco D	Bloco E	Bloco F	Bloco G	Bloco H	Bloco I	Bloco J	Bloco K	Bloco L
1	0000	0021	0012	0010	0022	0001	5010	5022	5001	5020	5011	5022
2	4112	4100	4121	4101	4110	4122	6001	6010	6022	6022	6020	6011
3	1021	1012	1000	1021	1001	1010	7022	7001	7010	7011	7022	7020
4	2000	2021	2012	2010	2022	2001	0110	0122	0101	0120	0111	0102
5	5111	5100	5121	5101	5110	5122	4001	4010	4022	4002	4020	4011
6	3021	3012	3000	3022	3001	3010	1122	1101	1110	1111	1102	1120
7	6100	6121	6111	6110	6122	6101	2110	2122	2101	2120	2111	2102
8	7112	7100	7121	7101	7110	7122	3101	3110	3122	3102	3120	3111

Cada um dos cartões acima está codificado por meio dos níveis dos atributos. O próximo passo consiste em construir os cartões que serão apresentados aos entrevistados.

### 5.3 Construção dos Cartões

Cada cartão representa uma escala de trabalho (programação) de 6 dias, cuja configuração foi definida no estágio anterior. A construção de todos os cartões não é uma tarefa simples para ser realizada manualmente, pois trata-se de um processo combinatorial no qual um conjunto de regras de formação de escalas deve ser obedecido. Sendo assim, foi implementado um programa computacional para gerar os cartões. Milhares de cartões puderam ser gerados, sendo os melhores selecionados pelo pesquisador.

Os condutores recebem periodicamente (normalmente uma vez por mês) um relatório contendo sua escala de trabalho para o período de planejamento. Portanto, eles estão bastante familiarizados em visualizar, no papel, a sua escala de trabalho. Sendo assim, os cartões foram impressos no padrão no qual os condutores estão acostumados a visualizar suas escalas de trabalho. A figura abaixo ilustra esta forma de apresentação dos cartões. Os cartões utilizados na entrevista encontram-se no Anexo 1.

CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS					
DATA INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA	EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
00:00	TER		01		TREM DE MINÉRIO
22:00	QUA		02		MANOBRA
	QUI		92		CONTINUAÇÃO
10:00	SEX		05		TREM DE CARGA
	SAB		95		CONTINUAÇÃO
	DOM			50	FOLGA

**Figura 5-3.** Exemplo de um cartão. Nas colunas ‘TAREFA’ e ‘EX-TAR’ são colocados os códigos utilizados pela empresa para identificar a atividade realizada.

### 5.4 Realização das Entrevistas

Uma vez que se pretende medir o nível de satisfação dos empregados, é obvio que se necessita realizar entrevistas com os empregados. O presente estudo foi desenvolvido a partir de informações fornecidas pela empresa Vale do Rio Doce (São Luís, MA). Esta empresa passou os últimos tempos por transformações decorrentes do processo de privatização proposto pelo governo federal. Não foi possível, assim, o deslocamento do autor à São Luiz, MA, para a realização das entrevistas junto aos condutores. Desta forma, optou-se em realizar as

entrevistas com um profissional possuidor de grande experiência no processo de geração e de distribuição das escalas para os condutores na empresa em questão. Esse profissional conhece as preferências e está informado sobre as reclamações e preferências dos condutores. Embora as respostas fornecidas não possam ser consideradas finais sob o ponto de vista dos condutores, elas podem ser consideradas como sendo uma estimativa bastante próxima das verdadeiras preferências dos condutores. Esta estimativa não invalida a aplicação desta pesquisa, que visa primordialmente o desenvolvimento de uma metodologia. Uma estimativa mais realista das preferências dos condutores poderá ser realizada posteriormente, em pesquisas futuras.

Foi entregue ao entrevistado o conjunto de 12 blocos de cartões para que ele os ordenasse em ordem decrescente de preferência. O entrevistado realizou a ordenação de acordo com o seu conhecimento de preferência dos condutores, sendo as respostas utilizadas para calibração da função utilidade.

## 5.5 Calibração dos Parâmetros

Como na maioria das aplicações de PD, neste trabalho foi adotado o modelo de escolha Logit Multinomial, explorado nas suas diversas fases, representadas pelas sucessivas escolhas.

A fim de obter um coeficiente para cada tipo de atividade, o atributo NT foi representado por quatro variáveis:

T1: número de viagens de trem de minério presentes na alternativa;

T5: número de viagens de trem de carga presentes na alternativa;

T2: número de manobras na alternativa;

T3: número de prontidões na alternativa.

Desta forma, a expressão da função utilidade foi definida da seguinte maneira:

$$U = P_{ti} T1 + J_{3t5} T5 + P_{x2} T2 + J_{3_{T3}} T3 + P_{npNP} + P_{fgFG} + j_{3_{HS}} HS + O_{hn} HN$$

Nota-se que existem oito coeficientes que devem ser ajustados. A calibração dos coeficientes da função utilidade neste trabalho foi realizada através da maximização do logaritmo da função de verossimilhança. Para obter a solução foi utilizado o método de Newton. Foi implementado

um sistema computacional específico, em Borland Pascal. Assim, a partir dos dados das entrevistas uma primeira solução foi obtida. Analisando os resultados, verificou-se que o atributo NP não foi estatisticamente significativo. O atributo NP foi, então, eliminado. Uma nova solução foi encontrada para 7 parâmetros, conforme a tabela 5-1.

Analisando os resultados, verifica-se que o coeficiente PHN (horas noturnas) apresenta o menor valor da estatística t, mesmo assim, pode-se concluir que este coeficiente é diferente de zero com nível confiança de 99%. O parâmetro estatístico  $-2[L(0) - L(P)]$ , por sua vez, serve para testar a hipótese nula global, de que todos os coeficientes sejam simultaneamente iguais a zero. Esse parâmetro é distribuído assintoticamente segundo uma distribuição Qui-Quadrado, com 7 graus de liberdade (Ben-Akiva e Lerman; 1985). O valor resultante de 140.616 indica que se pode rejeitar a hipótese nula ao nível de confiança de 99%.

Tabela 5-1. Resultado da calibração dos coeficientes.

Coeficientes	Valor	Erro assintótico	Estatística t
PTI	-5.4235	0.2831	-19.16
pT5	-5.9182	0.3761	-15.74
PT2	-2.1471	0.1422	-15.10
PT3	-3.0419	0.2260	-13.46
PF <sub>G</sub>	7.7781	0.5927	13.12
PH <sub>S</sub>	-12.2412	2.7831	-4.40
PH <sub>N</sub>	-1.7855	0.5787	-3.09

Estatísticas	
Número de observações	672
Número de casos	2688
L(0)	-127.255
<b>L(P)</b>	-56.947
$-2[L(0) - L(3)]$	140.616
p <sup>2</sup>	0.551
$\frac{p^2}{p'}$ ■>	0.496

## 5.6 A Função Utilidade

A partir do resultado apresentado a função utilidade fica da seguinte forma:

$$U = P_{TI}T_1 + P_{T_5}T_5 + P_{T_2}T_2 + P_{T_3}T_3 + p_{FG}FG + P_{HS}HS + P_{HN}HN$$



O valor numérico fornecido pela função utilidade não tem significado por si só. Esse valor só se torna significativo quando comparado com os respectivos valores das demais alternativas (escalas). Conhecida a escala de trabalho de cada condutor, ela é dividida em programações (de acordo com as folgas), e então, a função utilidade é aplicada. A utilidade total de cada condutor é dada pela soma das utilidades de cada programação.

## **5.7 Considerações Finais**

A técnica de preferência declarada está fortemente consolidada pelo grande número de trabalhos publicados que podem ser encontrados na literatura. Portanto, a função utilidade obtida neste trabalho, fornece valores confiáveis para a aplicação desta experiência.

Diversas aplicações de PD na área de transporte são encontradas na literatura. Porém, não foi encontrado nenhum trabalho abordando a análise de preferência de condutores com relação a suas escalas de trabalho. Portanto, este aspecto tratado nesta pesquisa pode ser considerado uma contribuição importante.

Nesta aplicação, a entrevista foi realizada somente com um único profissional. Esta experiência não só mostrou a viabilidade desta abordagem como forneceu uma estimativa para a função utilidade real. Uma função utilidade mais realista e confiável estatisticamente, poderá ser obtida se aplicada ao conjunto de condutores da empresa, obtendo-se uma amostragem mais expressiva. Talvez, pode-se desejar construir uma função utilidade para cada condutor, partindo da hipótese que cada um deles tenha preferências diferentes. É claro que o custo da pesquisa seria muito mais alto neste caso. Seria necessário, então, confrontar os benefícios e os custos, e definir um enfoque satisfatório para a empresa e para os fins objetivados.

## CAPÍTULO 6

### 6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA PROPOSTA

O processo de planejamento de escala de trabalho para condutores de trem, conforme os estudos realizados na empresa, envolve várias atividades, tais como: a manutenção de um grande número de informações que devem ser consultadas e atualizadas, a realização de milhares de cálculos, a verificação de várias restrições legais e a emissão de relatórios. Além do mais, estas operações são realizadas periodicamente. Tudo isto reforça a necessidade de um sistema computacional que auxilie o gerente em seu planejamento.

A proposta metodológica apresentada no capítulo 4 e 5 foi implementada em dois sistemas computacionais (Figura 6-1) desenvolvidos para auxiliar no planejamento de escala de condutores de uma empresa ferroviária de carga. No primeiro sistema, denominado *PasLin* (Pascal + Lindo), foi implementado somente o modelo matemático (seção 4.2.1) para construção de escalas cíclicas. Já no segundo sistema, denominado *PlanEsc* (Planejamento + Escala), foi implementado o algoritmo heurístico (seção 4.2.2) para construção de escalas e o modelo de distribuição das escalas (seção 4.3). O sistema *PasLin* é um sistema simples sem uma interface amigável que foi desenvolvido apenas para testar o modelo para a geração de escalas cíclicas. Já, o sistema *PlanEsc* pode ser considerado um sistema mais completo com uma interface amigável, fornecendo bastante flexibilidade ao usuário.

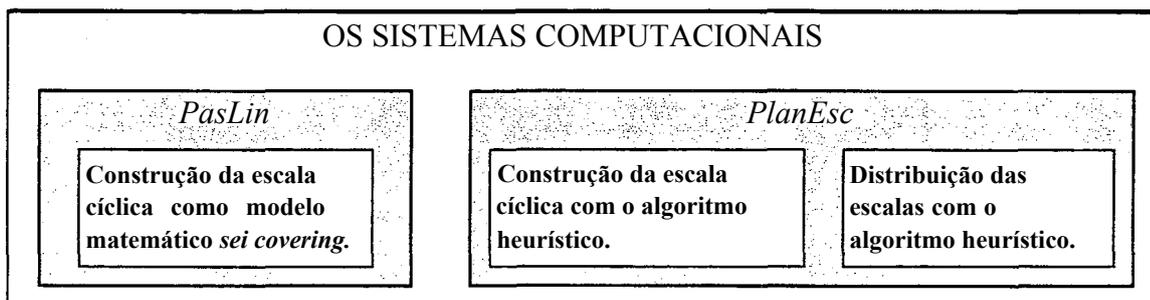


Figura 6-1. Comparação entre os dois sistemas computacionais.

## 6.1 O Sistema *PasLin*

O sistema *Paslin* possui um programa principal implementado em Turbo Pascal, o qual interage<sup>1</sup> com o software Hyper Lindo. O sistema *PasLin* toma como dados de entrada somente a lista de atividades fornecida pelo escalante (empresa). Como resultado o sistema fornece a escala cíclica otimizada. O sistema *PasLirt* se constitui de 5 partes:

1. Geração de todas as programações legais possíveis de 6 dias. As regras heurísticas foram utilizadas no sentido de eliminar algumas programações julgadas improváveis de participarem da solução ótima.
2. Redução do conjunto de programações. O software Hyper LINDO (Schrage, 1991) utilizado para resolver o problema *set covering* possui uma limitação de 4.000 variáveis inteiras. Desta forma, o conjunto de programações legais não pode ser superior a este valor. Se o conjunto gerado for superior a 4000 programações, é necessário utilizar algum procedimento que reduza este número. Como alternativa foi utilizado uma adaptação da regra heurística sugerida por Smith e Wren (1988) que consiste em selecionar um subconjunto das programações de forma que cada atividade seja coberta por um número mínimo N de programações (por exemplo N=250). Neste caso, o número N foi obtido por tentativas empíricas até que o conjunto selecionado fosse menor ou igual a 4000 programações. A idéia dessa regra é fazer com que cada atividade tenha um número mínimo de representatividade possível no novo conjunto selecionado.
3. Geração do modelo *set covering* a partir das programações reduzidas, que consiste em criar um arquivo texto (ASCII) com o modelo na sintaxe do Hyper LINDO.
4. Otimização das programações através do Hyper LINDO. O modelo montado anteriormente é resolvido e o resultado enviado para um arquivo tipo texto.

---

<sup>1</sup> A interação ocorre através de arquivos. O sistema em pascal gera o modelo matemático (*set covering*) em um arquivo. O modelo é resolvido pelo software Hyper Lindo (Schange, 1991) que devolve o resultado da otimização para um outro arquivo. O resultado é, então, carregado para o sistema em pascal que o traduz num escala cíclica otimizada. A interação não é automática, ela depende da intervenção do usuário.

5. Geração da escala. Um programa decodifica o resultado produzido na etapa 4 em uma escala cíclica. Caso haja cobertura extra, é corrigido manualmente.

Na etapa 2 pode ser acrescentada mais uma heurística, que consiste no seguinte: identificar as atividades que apresentam a maior frequência no conjunto total de programações legais e retirar todas as programações que as contém. Estas atividades são denominadas de *atividades reservas*. O fato de uma atividade reserva aparecer com maior frequência no conjunto significa que ela tem maior facilidade de ser sequenciada. Se todas as programações que possuem esta atividade forem retiradas do conjunto, um número significativo de redução será alcançado.

Caso ocorra alguma cobertura extra, as atividades reservas podem ser utilizadas para corrigir esta falha, senão, as atividades reservas podem ser utilizadas para incrementar a escala cíclica resultante. Estes incrementos produzirão algumas programações de 7 dias ao invés de 6 como foi proposto. Se forem utilizadas somente programações de 6 dias, então a escala cíclica resultante terá um custo múltiplo de 6 (supondo que não ocorra coberturas extras). Porém, este custo pode não ser realmente o melhor valor. Pode acontecer que a melhor escala possa ser alcançada com um valor não múltiplo de 6, logo os incrementos realizados com as atividades reservas resolvem esta diferença. A idéia é utilizar 1 ou 2 atividades reservas, podendo chegar a 3, por duas razões: as ocorrências de coberturas extras são pouquíssimas e os casos de programações com 7 dias devem ser evitados.

O fluxograma da Figura 6-2 fornece uma ilustração do processo de solução do problema de otimização de escala.

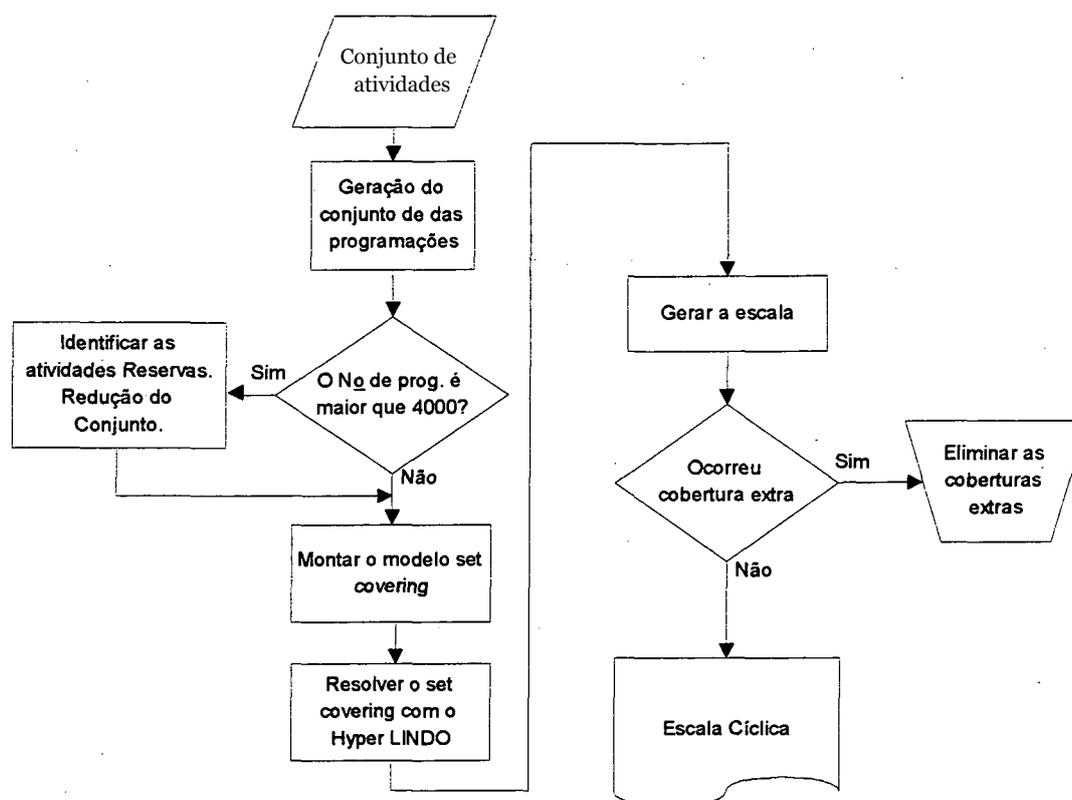


Figura 6-2. Fluxograma do sistema *PasLin*.

## 6.2 O Sistema *PlanEsc*

Este sistema, denominado de *PlanEsc 1.0*, é considerado um protótipo para um sistema mais robusto que pode ser aperfeiçoado posteriormente. O sistema foi implementado em Delphi 2.0 que fornece um bom suporte para desenvolvimento de interface gráfica e manipulação de banco de dados. Diferente do sistema *PasLin*, o *PlanEsc* apresenta as duas partes do processo de planejamento de escala: construção e distribuição das escalas. Dentro do que foi desenvolvido, serão apresentadas todas as características do sistema e suas potencialidades para o apoio no planejamento de escala.

### 6.2.1 Estrutura do Sistema Computacional

A estrutura do sistema computacional *PlanEsc* segue o modelo de planejamento de escala proposto neste trabalho, que se divide em duas etapas: i) a construção das escalas cíclicas e ii) a distribuição das escalas truncadas aos condutores. O sistema, também, permite a manutenção

de bases de dados e a emissão de relatórios. Uma visão geral da estrutura do sistema *PlanEsc* 1.0 é apresentada na Figura 6-3.

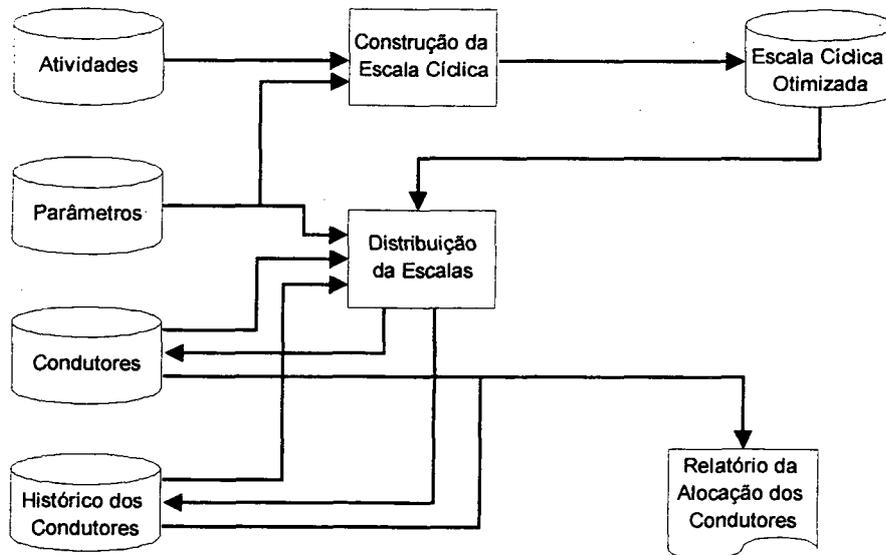


Figura 6-3. Visão geral do sistema.

O sistema utiliza quatro bases de dados importantes para o planejamento de escala dos condutores. Os dados referentes as atividades e os parâmetros<sup>2</sup> são armazenados em arquivos textos, enquanto que bases de dados com informações dos condutores e seus históricos foram criadas no padrão PARADOX 5.0 para Windows. Isto significa, que outros aplicativos podem ter acesso a estas bases de dados para leitura e alteração, possibilitando, assim, a interação do *PlanEsc* com outros softwares.

### 6.2.2 Janela Principal do *PlanEsc*

A janela principal do *PlanEsc*, apresentada na Figura 6-4, possui dois botões principais: *Construir* e *Distribuir*. Estes botões correspondem as duas etapas do processo de planejamento de escala: a construção e a distribuição das escalas ao condutores.

<sup>2</sup> Os parâmetros estão relacionados as restrições legais.

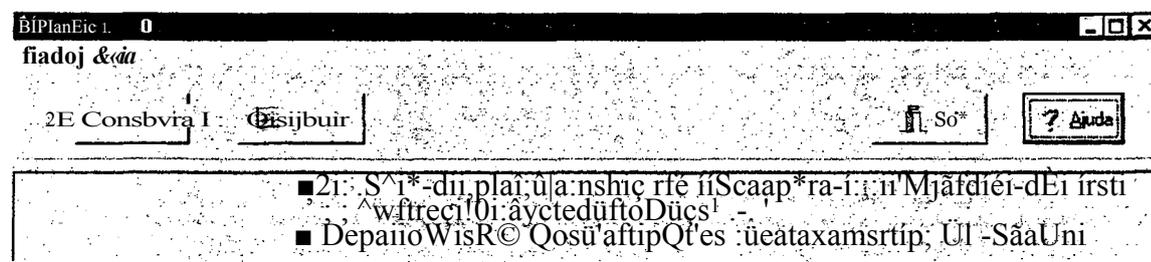


Figura 6-4. Visão da janela principal do *PlanEsc*

Através do menu principal o usuário também tem acesso a alguns dados utilizados pelo sistema. Por exemplo, os parâmetros da função utilidade, que é apresentado na Figura 6-5.

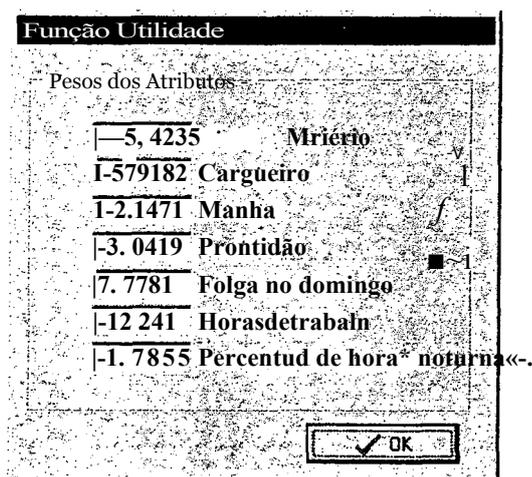


Figura 6-5. Janela com os parâmetros (pesos) utilizados pela função utilidade

### 6.2.3 Construção da Escala Cíclica

O botão *Construir* apresenta a janela da Figura 6-6 que permite o usuário construir uma escala cíclica a partir de um conjunto de atividades do dia. A partir desta janela o conjunto de atividades pode ser criado, consultado e alterado. Uma vez que o conjunto de atividade é estabelecido, o próximo passo consiste em ajustar os parâmetros e construir a escala cíclica. Para que a escala seja construída automaticamente basta pressionar o botão *GERAR*. A construção da escala segue o algoritmo heurístico (seção 4.2.2) apresentado no capítulo 4.

Et. Con\*Hic da Escala Cíclica

Tarefas

N. T.	REF	JUD	H	CÍO
1				00:30
2	1			.0530
1	1			0930
4	1			1330 ...
5	1			.1630
8	1			2030
7	5			.1630
8	?			.. 05 30 ..
3	1			..1230
10	2			12.10
11	2			.12.00
12	2			.. 12.-00.
13	2			12:00 ...
14	2			12:00
15	2			12:00
16	2			....12:00
17	2			00.00
18	2			00:00..
13	2			00:00 ....
20	2			0000 ...
21	2			00.00 ....
22	2			06)00....
23	2			06:00
24	2			0600
25	2			0600 ... j...
26	2			0600 ... j...
27	2			06.00....
28	2			0600
29	2			... 18.00 ...
30	2			18.00 ..
31	2			1800 ...
32	2			1800 .....
33	2			1800

Parâmetros

Pro'essividade entre atividades

10.00 Descanso inteir atividades (horas) s

JOSOO"jj Início da cada progwmacSo (horas)

Manter faza de escala após pronbdão

3 Noites trabalhadas em sequência

1 Duiação de uma proyapapão (dias)

F Número de programações na escala

Resultado ESiff PASSES 54

	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DU 7
Prof.]	02(06:00)01(00:30)02(18:00)03(05:30)XXXXX						
Pms 2	02(06 00)01(20:30)02(18:00)03(00:00)XXXXX						
Pm* 3	02(0600)02(18:00)03(0000)02(1200)XXXXX						
Prog. 4	02(0600)02(18:00)03(0000)02(12.00)XXXXX						
Pjog 5	02(0600)02(18:00)03(0000)02(1200)XXXXX						
Prog 6	02(0600)01(16:30)02(12:00)03(1230)02(12:00)XXXXX						
Pmg 7	02(0600)05(16:30)01(1330)02(12:00)XXXXX						
Proc 8	01(0930)02(18:00)03(12:00)04(00 00)02(12:00)XXXXX						
Prog 9	02(1200)02(18:00)03(12:00)04(0530)05(18:00)XXXXX						

Arquivo de Tarefas C:\Arquivos de Programas\Borland\Delphi 2 0\Escala\lanS5.ah

Figura 6-6. Janela que permite o usuário construir a escala cíclica.

Para a construção da escala, o sistema fornece um conjunto de 7 parâmetros que podem ser modificados pelo usuário a fim que a escala produzida seja mais 'compacta' possível. Uma escala compacta significa que as atividades são distribuídas dentro de um ciclo cujos os limites estabelecidos pelo gerente são cumpridos com pouca folga. Dependendo da época o conjunto de atividades pode variar em número, em tipos e em horários. A partir do conjunto de atividades, o gerente tem condições de criar escalas de trabalho mais, ou menos, compactadas. Por exemplo, se o conjunto for pequeno e poucas atividades longas, então, podem ser construídas escalas mais compactadas, enquanto que, se o conjunto for bem maior e com muitas atividades longas e noturnas, então, provavelmente, será necessário construir escalas menos compactada que a primeira. O gerente, através de seu conhecimento adquirido, pode estabelecer algumas estimativas dos parâmetros após realizar uma inspeção no conjunto de atividades. Se as estimativas para os parâmetros não forem suficientes para se obter uma solução, o gerente pode ainda realizar tentativas fazendo pequenos ajustes em alguns dos parâmetros. Se suas tentativas se esgotarem, o gerente pode tomar uma solução parcial, que achar melhor, e então, completar a construção manualmente.

O *box Prioridade de Sequenciamento* fornece uma combinação de heurísticas de podem ser selecionadas para o processo de construção automática. A seleção de alguma opção consiste em adicionar pesos no processo de sequenciamento segundo aquela opção. A opção '*Menos Favorecidos*' procura dar prioridade para aquelas atividades mais críticas, ou seja, aquelas que possuem o menor número de zeros na linha e coluna na matriz de custos reduzidos do problema de atribuição (veja o capítulo 4). Já, a opção *Atividades Extensas*, procura sempre que possível, sequenciar primeiro aquelas atividades de maior duração, como por exemplo: trem de minério e trem cargueiro.

É\* GunstruçãoodaEscolaCíclica, HEIE3

Tarefas

N.	TAREF	INÍCIO	J
1	ran	10030	
2	1	05:30	
3	1	0930	
4	1	1330	
5	1	1630	
6	1	20-30	
7	5	1630	
8	3	0530	
9	3	1230	
10	2	12.00	
11	2	12.00	
12	2	1200	
13	2	12.00	
14	2	12.00	
15	2	1200	
16	2	1200	
17	2	0000	
18	2	0000	
19	2	0000	
20	2	0000	
21	2	0000	
22	2	06.00	
23	2	0600	
24	2	0600	
25	2	0600	
26	2	0600	
27	2	0600	
28	2	0600	
29	2	1800	
30	2	1.800	
31	2	1800	
32	2	1800	
33	2	1800	

Parâmetros

Progressividade entró atividades

Descamo intel. atividades fhoias)

Início da cada programação (hoias)

Manter fora de escala < jpos prontidão

Notes tiabhdadas em: seqüência

Duição de uma programação [dias]

Número de programações na escala

Imprimir Tela Fechar

GEHARIM Sabatini

Prioridade de Sequenciamento

Menos Favorecidos

r Abvtdades Extensas

VisualizacSo das Progirações

Paleta Sequênciaaj !

Resultado

Passes: 54

DU 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DU 7
02 (06:00)	01 (0030)	02(1800)	60	03(0530)	XXXXXX	02 (06:00)
01 (20:30)	90	90	02(00.00)	XXXXXX	02(06:00)	02 (18:00)
60	02(0000)	02(1200)	XXXXXX	02(0600)	02(18:00)	60
02 (00:00)	02 (1200)	XXXXXX	02 (06:00)	02(1800)	60	02 (00:00)
02 (12:00)	XXXXXX	02(0600)	01 (1630)	90	03(12:30)	02 (12:00)
XXXXXX	02 (0600)	05(1630)	90	01(1330)	90	XXXXXX
01 (09:30)	90	60	02 (0000)	02 (1200)	XXXXXX	02 (12:00)
02 (18:00)	02 (1200)	01(0530)	90	XXXXXX		

ArqUivodeTarefas.CISArqtivos de FtogramasVBorfandVDelphi 2.(KE\*cakA)an95.ab

Figura 6-7. Janela com a escala visualizada na forma sequencial.

No *box Resultado* é apresentada a escala cíclica resultante. Ela pode ser visualizada de duas formas: paralela e sequencial. Na forma paralela (vista na Figura 6-6) as programações são arranjadas paralelamente, cada programação em uma linha da tabela. Cada coluna ocupada pela programação representa um dia. Na forma sequencial (Figura 6-7) as programações são

arranjadas em uma tabela de 7 colunas, na qual cada programação é imediatamente seguida por outra após o seu término.

## 6.2.4 Distribuição das Escalas

Com o botão *Distribuir*, da janela principal, se tem acesso à janela que permite realizar a distribuição das escalas de trabalho aos condutores (veja Figura 6-8). A janela apresenta um guia com 3 pastas: *Condutores*, *Escala Cíclica* e *Distribuição*.

Sistema de Distribuição da Escala

Condutores | Escala Cíclica | Distribuição

Banco de Dados

65 Registros 54 Disponíveis

Gódi	Nome do Conductor	Nase	Cat	Actn	DtP	V
1	Adaiton Silva Soates	01/02/45			1.94	SIM
42	Alvaro J. N. Undoso	07/05/56			2.3633	SIM
39	André Caiona F. Rho	23/02/41			2.2633	SIM
14	Antônio Alves Pereira	01/02/42			2.3143	SIM
20	Antonio Jose S. da Silva	07/08/45			2.4786	SIM
2	Antonio Lopes Rosado	06/04/53			3.1929	SIM
60	Antônio Luc de Lima	15/04/48			31042	NÃO
44	Benedito Macedo Lima	19/10/46			2	72 H

Estadística do Conductor

Tipos de Abvidades

Tipo	Descrição
1	Viagem Minêno
2	Manobra
3	Prontidão
5	Viagem Cargueiro
9	Help
50	Folga
60	Fora de Escala
90	Continuação

Cód	90	Tipo	Início	Semana	Data
44	90		00:00:00	Quinta	01/05/97
44	2		1200:00	Sexta	02/05/97
44	2		18:00:00	Sábado	03/05/97
44	2		12:00:00	Domingo	04/05/97
44	50		00:00:00	Segunda	05/05/97
44	3		1230:00	Teiça	06/05/97
44	60		00:00:00	Quarta	07/05/97
44	2		1200:00	Quinta	08/05/97
44	2		23:00:00	Sexta	09/05/97
44	2		18:00:00	Sábado	10/05/97
44	50		00:00:00	Domingo	11/05/97
44	1		16:30:00	Segunda	12/05/97
44	90		00:00:00	Terça	13/05/97

Figura 6-8. Janela para a distribuição das escalas.

A pasta *Condutores* (Figura 6-8) apresenta as informações sobre o quadro de condutores e seus respectivos históricos de trabalho. Estas informações são mantidas sob forma de base de dados relacionais. Sobre esta base de dados são permitidos consultar, alterar, inserir e apagar os registros. Além destas operações, o sistema também permite gerar relatórios sobre estas informações.

Na pasta *Escala Cíclica* (Figura 6-9) é estabelecida a escala cíclica que será atribuída aos condutores para o próximo período de planejamento. Alguns parâmetros podem ser especificados e também, a data na qual inicia o próximo planejamento e o horizonte deste planejamento. Uma vez que estes parâmetros são definidos, as escalas truncadas podem ser automaticamente geradas e avaliadas. A avaliação das escalas truncadas consiste na aplicação da função utilidade. Através esta pasta o usuário pode visualizar todas as escalas truncadas e seus respectivos valores de utilidade.

The screenshot shows a software window titled "Escala Cíclica" with a menu bar including "Arquivo", "Janela", "Esc", and "Passes: 54". The main area is divided into several sections:

- Parâmetros para junções:** Includes options for "Progressividade entre atividades", "Manter fora de escala após prontidão", "Descanso entre atividades (horas)", "Início da cada programação (horas)", and "Noites tratadas em sequência".
- Período de planejamento:** Shows "Início (Dia/Mês/Ano)" set to "101/06/37" and "Horizonte (Dias)" set to "30".
- Escala Truncada:** A table with columns for "DIA 1" through "DIA 7" showing time slots and activity durations. Below this is a summary row: "Escala Truncada", "Número" (23440), "Utilidade" (j 2 3440), and "AIS".
- Legend:** A row of days from "Domingo" to "Sabado" with checkboxes.

The table below represents the data shown in the "Escala Truncada" section:

DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7
02(06:00) 01(00:30) 02(18:00) 60			03(05:30) >000<		02(06:00)	
01(20:30):90	90		02(00:00):XW<		02(06:00) 02(18:00)	
60	02(00:00) 02(12:00) XXXXX		02(06:00) 02(18:00) 60			
02(00:00) 02(12:00) >>5<			02(06:00) 02(18:00) 60		02(00:00)	
02(12:00) >000<	02(06:00) 01(16:30) 90		03(12:30) 02(12:00)			
XXXXXX	02(06:00) 05(16:30) 90		01(13:30) 90		>&&S<	
01(09:30):90	60		02(00:00) 02(12:00) >000<		02(12:00)	
02(18:00) 02(12:00)	01(05:30) 90		>000<			

Figura 6-9. Pasta que permite especificar a escala para o próximo período de planejamento.

O box *Parâmetro para junções* apresenta uma lista de parâmetros que são decorrentes da escala selecionada. Estes parâmetros só têm efeito para os casos de junções entre o histórico e a escala futura. Caso o gerente se defronte com o problemas de atribuir as escalas truncadas, ele tem, então, a opção de relaxar estes parâmetros e fazer novas tentativas.

Finalmente, a pasta *Distribuição* (Figura 6-10) permite realizar a distribuição das escalas truncadas aos condutores. Segundo o modelo apresentado no capítulo 4, a distribuição das escalas é feita procurando maximizar o menor nível de satisfação entre os condutores, obtendo assim, uma distribuição mais equitativa possível das satisfações. Uma outra característica do sistema é que ele, também, permite que as escalas truncadas sejam atribuídas manualmente.

**Estatísticas sobre a Distribuição da Carga**

Situação Atual	Mínimo	Máximo	Variancia
Situação Atual	1,940	3,283	2,130
Solução Inicial	3,109	5,537	8,660
Melhoramento 1	3,962	4,766	1,120
Melhoramento 2	3,997	4,921	0,839
Melhoramento 3	4,019	4,833	0,759

\*\*\* SOLUÇÃO FINAL \*\*\*

**Solução (Apontamentos)**

Conductor	Escala	Carga Acumulada
1	8	4.0639
42	19	4.1947
39	47	4.1443
14	32	4.0580
20	40	4.0342
2	44	4.7551
44	26	4.0771
56	39	4.8331
18	13	4.2411
35	36	4.0646
21	29	4.2472
26	38	4.3708
30	43	4.1853
22	46	4.0526
36	31	4.0798
52	4	4.1736
7	14	4.4719
51	3	4.1522
34	22	4.0740
25	27	4.0753
10	30	4.1359
45	51	4.0365
4	12	4.0551
8	10	4.1377
54	7	4.1142
40	6	4.1007
5	18	4.0392
27	22	4.1560

**Figura 6-10.** Pasta onde é realizada a distribuição das escalas truncadas aos condutores.

Durante o processo de distribuição automática, o usuário pode acompanhar os resultados estatísticos sobre a distribuição da carga de trabalho no box *Estatística sobre a Distribuição*. Este box apresenta o resultado de cada iteração da distribuição. O valor mínimo representa o a utilidade do condutor menos satisfeito e o valor máximo a utilidade do condutor mais satisfeito. A variância demonstra o quanto os valores de utilidade variam em torno da média. A primeira linha deste box apresenta a situação atual dos condutores com relação a seus históricos de trabalho. A solução inicial é obtida resolvendo o problema de atribuição. Posteriormente, o método 2-Opt, juntamente com o problema de atribuição com gargalo, é

aplicado até entre duas iterações sucessivas não ocorra nenhum melhoramento na solução. A cada iteração o algoritmo tenta maximizar a menor utilidade (ou satisfação).

Nesta janela pode-se, também, visualizar os apontamentos feitos pelo sistema como sugestão para a atribuição das escalas truncadas. Se o gerente aceitar os apontamentos, então, as atribuições podem ser efetivadas.

### **6.3 Considerações Finais**

Como pode ser notado, o sistema *PlanEsc* por si só não realiza o planejamento automaticamente, ele depende bastante da interação com o gerente. A utilização do conhecimento do gerente é muito importante para o funcionamento do sistema e a realização do planejamento. Desta forma, para facilitar a interação com usuário toma-se indispensável o desenvolvimento de uma boa interface para o sistema. A interface não só pode auxiliar o gerente da empresa, como, também, foi fundamental para a avaliação, verificação e validação dos modelos propostos.

## CAPÍTULO 7

### 7. RESULTADOS

O objetivo deste capítulo, consiste em avaliar os algoritmos de planejamento de escala implementados no sistema computacional *PlanEsc* e o sistema *PasLin*. Serão realizadas algumas considerações sobre os resultados obtidos a partir de dados reais da CVRD.

Como mencionado na revisão bibliográfica, existem poucos trabalhos sobre a alocação de condutores utilizando a abordagem cíclica. Dentre os trabalhos encontrados na literatura, nenhum dispunha de dados que pudessem ser testados e comparados com os resultados dos modelos propostos neste trabalho. Apenas o trabalho de Caprara et al (1995) menciona alguns resultados sobre construção de escalas cíclicas, porém, seus resultados fazem menção apenas ao tempo de processamento em função da dimensão do problema.

Para a análise dos resultados, alguns aspectos podem ser considerados, tais como: o tempo de processamento, a qualidade da solução e a interface do sistema.

Visto que o planejamento se dá em duas etapas: construção e distribuição das escalas, os resultados serão analisados segundo esta divisão.

#### 7.1 Construção da Escala Cíclica

Algumas escalas cíclicas construídas pelo sistema *PlanEsc* podem ser vistas no Anexo 5. Estas mesmas escalas foram submetidas ao sistema *PasLin*. Todas as escalas cíclicas resultantes dos sistemas tiveram um ciclo de duração menor ou igual as escalas realizadas manualmente pela empresa. A minimização destas durações não é o mais importante. Os sistemas simplesmente mostraram que são capazes de construir escalas cíclicas racionalizadas.

Embora, às vezes, o sistema forneça algumas escalas cíclicas menores que as obtidas manualmente, isto não significa, necessariamente, que se fará uma redução de mão de obra,

pois, o gerente pode fazer alterações na escala de forma que aumente o número de condutores necessários. Esta alteração pode ser feita, por exemplo, introduzindo dias fora da escala.

Quanto ao tempo de processamento computacional, os resultados foram bastante satisfatórios. Uma vez que os parâmetros são estabelecidos o sistema *PlanEsc* forneceu cada uma das escalas cíclica em aproximadamente 1 (um) segundo em um PC 486. Esta é uma redução drástica se comparada com as escalas produzidas manualmente que podem requer até mais de um dia de trabalho. Já pelo sistema *PasLin* o tempo de processamento ficou ligeiramente maior. Os mesmos problemas foram resolvidos com uma duração de 20 à 30 minutos. A maior parte do tempo foi gasto na geração das programações. As soluções dos problemas *set covering* foram alcançadas em aproximadamente 1 minuto com o Hyper Lindo.

Caprara et al (1995a) apresentam alguns resultados, em termos de tempo de processamento para construir escalas cíclicas. Os autores utilizam um algoritmo desenvolvido por eles mesmos. Embora a lista de atividades não seja fornecida, os tempos de processamento publicados podem ser utilizados como medidas comparativas aos resultados obtidos com o *PlanEsc*. Caprara et al (1995a) resolveram dois problemas, um contendo vinte e uma atividades e o outro trinta e três atividades em 8 e 17 segundos, respectivamente, utilizando um PC Pentium 90 Mhz, enquanto que, problemas destas dimensões foram resolvidos em aproximadamente um segundo pelo *PlanEsc* em um PC 486 Dx4 100 Mhz.

Quanto a qualidade das escalas, observa-se que nas escalas cíclicas realizadas manualmente, às vezes, algumas restrições legais não são cumpridas. Estas violações podem ocorrer propositalmente a fim de forçar a ‘compactação’ da lista de atividades e atingir uma escala cíclica de duração mínima. Esta situação pode ocorrer, por exemplo, quando se tem um grande número de atividades para um número reduzido de condutores. Por outro lado, a violação de algumas restrições pode não ter origem proposital. Uma vez que o processo de construção da escala cíclica é essencialmente combinatorial, no qual está envolvido um conjunto de regras que devem ser cumpridas, a falha humana pode, naturalmente, ocorrer. Já, na construção das escalas via sistema computacional, todas as restrições legais são cumpridas. Além do mais, em uma escala pode ocorrer as ‘falsas folgas’. Uma falsa folga ocorre quando a primeira atividade, após uma folga, inicia muito cedo no dia seguinte. Pode ocorrer, por exemplo, que a primeira atividade inicie às 00:00 hora do dia seguinte à folga. No sistema *PlanEsc* foi introduzido um parâmetro a fim de reduzir as falsas folgas. O sistema *PlanEsc* demonstrou ser bem mais

flexível que o sistema PasLin no que se refere ao processo de otimização da escala cíclica. Porém, a qualidade das soluções obtidas entre os dois sistemas não foram comparadas formalmente.

## 7.2 Distribuição das Escalas Truncadas.

Dos poucos trabalhos encontrados na literatura utilizando a abordagem cíclica, nenhum deles faz menção de como as escalas são atribuídas aos empregados, ou sobre a distribuição das escalas segundo uma medida de carga de trabalho. Uma justificativa para que a segunda questão não seja considerada, reside no fato de que, se a escala cíclica é empregada, então, automaticamente todos receberão a mesma carga de trabalho após terem completado o ciclo. Teoricamente esta conclusão é verdadeira, porém, em casos práticos sabe-se que isto dificilmente ocorre, até porque, as escalas estão suscetíveis a alterações não previstas. Estas alterações provavelmente resultarão em desequilíbrio na distribuição da carga de trabalho.

Portanto, além do modelo proposto, o emprego de uma função utilidade como forma de medir o nível de satisfação dos empregados em relação a sua escala de trabalho, também é um aspecto inovador não encontrado na literatura. Desta forma, não existem dados na literatura que pudessem ser utilizados como medida comparativa aos resultados obtidos com o sistema *PlanEsc*.

O processo de distribuição das escalas é uma tarefa complexa. Através do processo manual o escalante necessita realizar pelo menos três tarefas antes de começar a distribuir as escalas truncadas, sendo elas:

1. levantamento de várias estatísticas sobre o histórico de trabalho de cada condutor;
2. verificar quais as escalas truncadas que cada condutor pode dar continuidade;
3. levantamento de várias estatísticas sobre cada escala truncada que pode ser atribuída.

As estatísticas calculadas servem como parâmetros para que o escalante realize a distribuição das cargas de trabalho. De certa forma, a função utilidade empregada no sistema computacional realiza uma ponderação destes parâmetros fornecendo rapidamente uma medida de carga de trabalho. Enquanto que o escalante encontra uma grande dificuldade em realizar

uma ponderação dos parâmetros em uma única medida. Portanto, a função utilidade tem o papel fundamental dentro deste processo de distribuição das escalas truncadas.

A técnica de preferência declara está fortemente consolidada. O grande número de trabalhos científicos e aplicações da TPD reforçam a confiabilidade nesta técnica. Desta forma, a função utilidade obtida fornece valores confiáveis para esta aplicação.

A fim de avaliar o modelo de distribuição de escalas, será apresentado a seguir alguns resultados alcançados com o sistema a partir de escalas reais. Na Figura 7-1 observa-se alguns cálculos estatísticos antes e depois da distribuição das escalas aos condutores. A cada linha são apresentados valores referentes a uma distribuição das escalas. A primeira linha representa a situação atual, antes de fazer as atribuições para o próximo planejamento. A variância serve como um indicador de quanto a distribuição das cargas de trabalho variam em torno da média. Na primeira linha da Figura 7-1 observa-se uma variância de 2.13 referente à atual situação (histórico) de como está distribuída a carga de trabalho. Na primeira distribuição das escalas (escala futura) se obtém uma variância de 8.66, bem maior que a atual. Em seguida são feitas tentativas de melhorias aplicando-se a método 2-Opt. A cada melhoramento novas atribuições são feitas. Após três melhoramentos atinge-se uma variância de 0.76, uma redução significativa se comparada com a solução inicial.

Estatísticas sobre a Distribuição da Carga			
Iteração	Mirwmo	Máximo	Variância
Situação Atual	1,940	3,283	2,130
Solução Inicial	3,109	5,537	8,660
Melhoramento 1	3,962	4,766	1,120
Melhoramento 2	3,997	4,921	0,839
Melhoramento 3	4,019	4,833	0,759
* * * SOLUÇÃO FINAL * * *			

**Figura 7-1.** Indicadores da distribuição da carga de trabalho calculados pelo *PlanEsc*

Durante o processo de melhoramento o algoritmo tenta maximizar a menor utilidade entre os condutores. O menor valor é apresentado na coluna *Mínimo* e o maior valor na coluna *Máximo*. Os valores apresentados nas colunas *Máximo* e *Variância* são consequências do processo de maximização da menor satisfação. Observa-se que, automaticamente, a maior utilidade e a variância tendem a diminuir, enquanto que o menor valor de utilidade aumenta.

Para o exemplo apresentado acima, a solução foi alcançada em aproximadamente um minuto em um PC 486 Dx4 100. Em outros exemplos executados pelo sistema a solução final foi obtida entre 3 à 5 melhoramentos com o 2-Opt.

### **7.3 Considerações Finais**

A interface do sistema *PlanEsc* fornece, sem dúvida, grande flexibilidade ao gerente, no que se refere a construção, visualização e correção das escalas. Através da interface o gerente tem condições de visualizar o quadro com a escala de duas formas diferentes. Esta flexibilidade não é encontrada se for realizada no papel, ou seja, manualmente. Além do mais, é muito fácil, também, visualizar as escalas truncadas com suas respectivas utilidades.

Os resultados mostraram que o sistema *PlanEsc* é capaz de equalizar a distribuição das escalas de trabalho aos condutores segundo a função utilidade ajustada. Porém, para confirmar se realmente o sistema está produzindo escalas mais satisfatórias do que pelo processo manual, seria necessário acompanhar por um longo prazo as opiniões dos condutores antes e depois da implantação do sistema.

## CAPÍTULO 8

### 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

#### 8.1 Conclusões

A proposta fundamental deste trabalho não é desenvolver um modelo matemático que supere todos os modelos já existentes, até porque toma-se difícil fazer comparações com outros modelos da literatura uma vez que eles foram desenvolvidos para um domínio particular. Antes porém, objetiva desenvolver um modelo que resolva eficientemente o problema com suas características particulares, e também, possibilite a utilização das preferências dos condutores, a fim de obter uma distribuição mais equitativa possível dos níveis de satisfação. Portanto, os modelos e algoritmos utilizados neste trabalho mostraram ser bastante eficientes.

A abordagem cíclica proposta para a geração de escalas de trabalho parece ser a mais adequada para o problema em questão. A justificativa é baseada nas características do problema estudado. Pelo fato de existir turnos de trabalho que ultrapassam o limite de um dia e havendo a possibilidade de um condutor realizar partes de dois turnos distintos num mesmo dia, inviabiliza a utilização dos modelos apresentados para geração de escala individualizada. Pois, os modelos para geração de escala individualizada partem da premissa de que cada indivíduo realizará um único turno de trabalho a cada dia. Além do mais, antes de produzir a escala individualizada é necessário calcular o número mínimo de condutores que será utilizado. Os modelos matemáticos utilizados para este fim não se ajustam ao problema em questão. No entanto, através da abordagem cíclica o número mínimo de condutores é obtido automaticamente, ou seja, é igual ao número de dias do ciclo.

Em comparação à prática corrente de construção de escala cíclica, o modelo matemático baseado no *set covering* mostrou-se eficiente na obtenção dos resultados, no sentido de que podem ser produzidas escalas de melhor qualidade em menor espaço de tempo, porém o tempo computacional requerido pode ser considerado bastante alto. Já, o algoritmo heurístico

mostrou ser muito mais eficiente, tanto em tempo de processamento como na flexibilidade oferecida pelo sistema computacional. A flexibilidade encontrada no sistema consiste na possibilidade de gerar várias escalas diferentes, na facilidade de visualizar e de alterar a escala, e na rapidez da solução.

No processo de distribuição das escalas de trabalho foi proposto um modelo baseado no problema do caixeiro viajante. Este é um problema combinatorial NP-completo. Porém, nas aplicações práticas desta pesquisa normalmente é considerado um número máximo de 15 programações (ou nós). Problemas deste porte são considerados relativamente pequenos. Nos problemas testados as soluções finais foram alcançadas entre 3 à 5 iterações da heurística 2-opt. O maior tempo de processamento foi gasto nas soluções dos problemas de atribuição com gargalo, pois a cada iteração do 2-opt, dezenas destes problemas são resolvidos. Para atingir a solução final mais de 100 problemas de atribuição com gargalo podem ser resolvidos, mesmo assim, o tempo de processamento foi bastante satisfatório.

Não foram encontrados dados de pesquisa sobre distribuição de escalas, segundo as preferências dos condutores para que pudessem ser comparados aos dados obtidos com o sistema. Mas, confiando que a função utilidade ajustada pela PD possa dar uma estimativa muito próxima das preferências dos condutores, assim o sistema mostrou que é possível produzir escalas de trabalho mais equitativas e, portanto, equalizar o nível de satisfação dos condutores.

A adoção de técnicas de preferência declarada é um importante aspecto a ser salientado neste trabalho. Através de PD foi possível ajustar uma função utilidade que possibilita quantificar o nível de satisfação de cada condutor, com relação a sua escala de trabalho, através da ponderação de alguns fatores encontrados na escala. Uma única função utilidade foi ajustada e utilizada para todo o grupo de condutores. Uma vez que esta técnica mostrou-se capaz para solucionar o problema de equalização das satisfações, um próximo passo que poderia ser dado seria o de ajustar uma função utilidade para cada condutor, respeitando as diferentes preferências.

Para resolver o problema de planejamento de escala é necessário trabalhar com grande volume de informações. O desenvolvimento de um sistema computacional com uma interface amigável foi extremamente importante para a avaliação e validação dos modelos propostos. A

interface do sistema deixa bastante flexível a execução das escalas no que se refere a correções, atualizações, visualizações, etc. O sistema não só auxiliou no desenvolvimento desta pesquisa, como também, fornece o protótipo de um software que possa auxiliar o gerente da empresa no planejamento das escalas. Os benefícios do sistema podem ser atribuídos tanto para os empregados quanto para a empresa.

## 8.2 Recomendações

Embora se tenha atingido os objetivos propostos, este trabalho ainda permite que sejam realizadas novas pesquisas no futuro. Estas pesquisas podem ser conduzidas para várias direções com o objetivo de complementar as mesmas já realizadas.

Em termos de modelos matemáticos e algoritmos podem ser feitas algumas melhorias com o objetivo de aumentar suas eficiências e melhorar as qualidades das soluções. Por exemplo, na geração das programações utilizadas no modelo matemático *set covering* podem ser implementadas algumas idéias utilizadas no algoritmo heurístico, reduzindo o tempo de processamento.

Para o algoritmo heurístico de construção de escalas ainda pode ser aplicadas algumas técnicas de refinamento da solução. A idéia consiste em realizar mudanças em alguns parâmetros e re-arranjar a solução parcial. O refinamento seria aplicado em situações de difícil solução a fim de reduzir a necessidade de ser completada manualmente.

Neste trabalho, a PD foi aplicada somente à um único profissional. Esta experiência mostrou a viabilidade desta metodologia. Porém, pelo menos mais duas aplicações ainda podem ser realizadas. Uma delas consiste em aplicar o experimento de PD ao grupo de condutores a fim de melhorar a confiabilidade da função utilidade já obtida. Uma outra aplicação consiste em ajustar uma função utilidade para cada condutor ou grupos de condutores. Esta pesquisa certamente terá um custo bem mais elevado, necessitando confrontar os benefícios e os custos, e definir um enfoque satisfatório entre a empresa e os empregados.

**BIBLIOGRAFIA**

- AL-SULTAN, K. S., HUSSAIN, M. F. e NIZAMI, J. S. (1996). A Genetic Algorithm for the Set Covering Problem. **Journal of The Operational Research Society**, 47, pp. 702-709.
- ANBIL, R., GELMAN, E., PATTY, B., e TANGA, R. (1991). Recent Advances in Crew Pairing Optimization at American Airlines. **Interfaces**, 21, pp. 62-74.
- ARABEYRE, J. P., FEARNLEY, J., STEIGER, F. C., e TEATHER, W. (1969) The Airline Crew Scheduling Problem: A Survey. **Transportation Science**, 3, pp. 140-163.
- ASHFORD, R. W. e DANIEL, R. C. (1992). Some Lessons in Solving Practical Integer Programs. **Journal Operational Research**, 43(5), pp. 425-433.
- AYKIN, T. (1996). Optimal Shift Scheduling with Multiple Break Windows. **Management Science**, 42(4), pp. 591-602.
- BAKER, E., BODIN, L. D., FINNEGAN, W. F. e PONDER, R. J. (1979). Efficient Heuristic Solutions to an Airline Crew Scheduling Problem. **AIIE Transactions**, 11(2), pp. 79-85.
- BAKER, E. E FISHER, M. et al. (1981). Computational Results for Very Large Air Crew Scheduling Problems. **OMEGA**, 9(6), pp. 613-618.
- BAKER, K. R., CRABILL, T. B. e MAGAZINE, M. J. (1973). An Optimal Procedure for Allocating Manpower with Cyclic Requirements. **AIIE Transactions**, 5(2), pp. 119-126
- BAKER, K. R. (1974a) Scheduling a Full-Time Workforce to Meet Cyclic Staffing Requirements. **Management Science**, 20(12), pp. 1561-1568.
- BAKER, K. R. (1974b). Scheduling Full-Time and Part-Time Staff to Meet Cyclic Requirements. **Operational Research Quarterly**, 25(1), pp. 65-76.

- BAKER, K. R. (1976). Workforce Allocation in Cyclical Scheduling Problems: A Survey. **Operational Research Quarterly**, 27(1), pp. 155-167.
- BAKER, K. R. e MAGAZINE, M. T. (1977). Workforce Scheduling with Cyclic Demands and Days-off Constraints. **Management Science**, 24, pp. 161-167.
- BALAS, E. e PADBERG, M. (1972). On the Set-Covering Problem. **Operations Research**, 20, pp. 1153-1161.
- BALAS, E. e PADBERG, M., (1975). On the Set-Covering Problem: II. An Algorithm for Set Partitioning. **Operations Research**, 23(1), pp. 74-90.
- BALAKRISHNAN, N. e WONG, R. T. (1990). A Network Model for Rotating Workforce Scheduling Problem. **Networks**, 20, pp. 25-32
- BALL, M. e ROBERTS, A. (1985). A Graph Partitioning Approach to Airline Crew Scheduling. **Transportation Science**, 19(2), pp. 107-125.
- BARTHOLDI, J. J., ORLIN, J. e RATLINFF, H. D. (1980). Cyclic Scheduling Via Integer Programs with Circular Ones. **Operations Research**, 25(5), pp. 1074-1085.
- BARTHOLDI, J. J. (1981). A Guaranteed-Accuracy Round-off Algorithm for Cyclic Scheduling and Set Covering. **Operations Research**, 29(3), 501-510.
- BARUTT, J. e HULL, THERESA (1990). Airline Crew Scheduling: Supercomputers and Algorithms. **SIAM News**, 23(6), pp. 19-22.
- BASTOS, Lia C. (1994). **Planejamento de Rede Escolar: Uma Abordagem Utilizando Preferência Declarada**. Tese de Doutorado da UFSC.
- BEASLEY, J. E. (1987). An Algorithm for Set Covering Problem. **European Journal of Operational Research**, 31, pp. 85-93 .

- BEASLEY, J. E. (1990). A Lagrangian Heuristic for Set-Covering Problems. **Naval Research Logistics**, 37, pp. 151-164.
- BEASLEY, J. E., e JORNSTEN, K. (1992). Enhancing an Algorithm for Set Covering Problems. **European Journal of Operational Research**, 58, pp. 293-300.
- BEASLEY, J. E. e CHU, P. C. (1994). A Genetic Algorithm for the Set Covering Problem. **Technical Report**, The Management School Imperial College, pp. 1-16. London, England.
- BECHTOLD, S. E., BRUSCO, M. J. e SHOWALTER, M. J. (1991). A Comparative Evaluation of Labor Tour Scheduling Methods. **Decision Sciences**, 22, pp. 683-699.
- BECHTOLD, S. E. e JACOBS, L. W. (1996). The Equivalence of General Set-Covering and Implicit Integer Programming Formulations of Shift Scheduling. **Naval Research Logistics**, 43, pp. 233- 149.
- BEN-AKIVA, M. e LERMAN, S. R. (1985). **Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand**. The Mit Press, Cambridge, Massachusetts.
- BIANCO, L., BELLI, M., MINGOZZI, A., RICCIARDELLI, S. e SPADONI, M. (1992). A Heuristic Procedure for the Crew Rostering Problem. **European Journal of Operational Research**, 58(2), pp. 272-283.
- BODIN, L., GOLDEN, B., ASSAD, A. e BALL, M. (1983). Routing and Scheduling of Vehicles and Crews. **Computers and Operations Research**, 10(2), 127-128, pp. 144-147.
- BRUSCO, M. J. e JACOBS, L. W. (1993) A Simulated Annealing Approach to Cyclic Staff-Scheduling Problem. **Naval Research Logistics**, 40, pp. 69-85.
- BURNS, R. N. e CARTER, M. W. (1985) Work Force Size and Single Shift Schedules with Variable Demands. **Management Science**, 31(5), pp. 599- 607..

- BURNS, R. N. e KOOP, G. J. (1987). A Modular Approach to Optimal Multiple-shift Manpower Scheduling. **Operations Research**, 35(1), pp. 100-110.
- CAPRARA, A., FISCHETTI, M., TOTH, P. e VIGO, D. (1995a). Models and Algorithms for the Crew Rostering Problem. **Technical Report**, DEIS, University of Bologna, Italy, pp. 1-25.
- CAPRARA, A., FISCHETTI, M. e TOTH, P. (1995b). A Heuristic Algorithm for the Set Covering Problem. **Technical Report**, DEIS, University of Bologna, Italy, pp. 1-24.
- CARPANETO G. e TOTH P. (1987). Primal-Dual Algorithms for the Assignment Problem. **Discrete Applied Mathematics**, 18, pp. 137-153 .
- CARRARESI, P. e GALLO, G. (1982). Relaxation Approaches to Large Scale Bus Driver Scheduling Problems. **Transportation Research**, 16B(5), pp. 383-397.
- CARRARESI, P. e GALLO, G. (1984a). Network Models for Vehicle and Crew Scheduling. **European Journal of Operational Research**, 16, pp. 139-151.
- CARRARESI, P. e GALLO, G. (1984b). A Multi-level Bottleneck Assignment Approach to the Bus Drivers' Rostering Problem. **European Journal of Operational Research**, 16, pp. 163-173.
- CARVALHO, M. C. M. (1993). **Transporte Rodoviário de Passageiros: Um Modelo de Divisão de Mercado**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFSC.
- CERIA, S., NOBELI, P e SASSANO, A. (1995). Un Algoritmo Euristico per la Determinazione dei Tumi dei Personale Ferroviário. **Ricerca Operativa**, 75, pp. 33-47.
- CHIESSI, L. S. (1984). **Otimização do Planejamento da Escala de Vôo de Tripulantes**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- CHRISTOFIDES, NICOS, e KORMAN, S. (1975). A Computational Survey of Methods for the Set Covering Problem. **Management Science**, 21(5), pp. 591-599.
- CHU, P. C., e BEASLEY, J. E. (1995). A Genetic Algorithm for the Set Partitioning Problem. **Technical Report**, The Management School Imperial College, pp. 1-16. London, England.
- CHVATAL, V. (1979). A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem. **Mathematics and Operational Research**, 4(3), pp. 233-235.
- DERIGS U. e SIMMERMANN U. (1978). An Augmenting Path Method for Solving Linear Bottleneck Assignment Problems. **Computing**, 19, pp. 285-295.
- DESROCHERS, M. e SOUMIS F. (1989). A Column Generation Approach to the Urban Transit Crew Scheduling Problem. **Transportation Science**. 23, pp. 1-13.
- DONGARRA, J. J. (1992). Performance of Various Computers using Standard Linear Equations Software. **Computer Architecture News**. 20, pp. 22-44.
- DOBSON, G. e LEDERER, PHILLIP J. (1993). Airline Scheduling and Routing in a Hub-and-Spoke System. **Transportation Science**, 27 (3), pp. 281-297.
- EASTON, F. F. e ROSSIN, D. F. (1991) Sufficient Working Subsets for the Tour Scheduling Problem. **Management Science**, 37(11), pp. 1441-1451.
- EL-DARZI, E. e MITRA, G. (1990). Set Covering and Set Partitioning: A Collection of Test Problems. **OMEGA**, 18(2), pp. 195-201.
- EFRÓN, A. J. (1995). **Indústria Hoteleira em Balneário Camboriú: Uma Visão Através de Modelos de Preferência Declarada**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFSC.

- EMMONS, H.(1985). Work-Force Scheduling with Cyclic Requirement and Constraint on Days of, Weekends Off, and Work Strech. **HE Transactions**, 17(1), pp. 8-16.
- EMMONS, H. e BURNS, R. N. (1991). Off-Day Scheduling with Hierarchical Worker Categories. **Operations Research**, 39(3), pp. 484-495.
- ETCHEBERRY, Javier, (1973). The Set-Covering Problem: A New Implicit Enumeration Algorithm. **Operations Research**, 25 (5), pp. 760-772.
- ETSCHMAIER, M. M. e MATHAISEL, D. F. X. (1985). Airline Scheduling: An Overview. **Transportation Science**, 19(2), pp. 127-139.
- FICHETTI, M., MARTELLO, S., e TOTH, P. (1987). The Fixed Job Schedule Problem with Spread-Time Constraints. **Operations Research**, 35(6), pp. 849-858.
- FISHER, M. L. (1981). The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems. **Management Science**, 27(1), pp. 1-18.
- FISHER, M. L. e KEDIA, P., (1990). Optimal Solution of Set Covering/Partitioning Problems Using Dual Heuristics. **Management Science**, 36(6), pp. 674-688.
- FREITAS, A. A. F. (1995). **Modelagem Comportamental dos Decisores através de Técnicas de Preferência Declarada: Uma Aplicação no Setor Imobiliário**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFSC.
- GARFINKEL, R. S. e NEMHAUSER, G. L. (1969). The Set-Partitioning Problem: Set Covering with Equality Constraints. **Operation. Research**,. 17, pp. 848-856.
- GEOFFRION A. M. e MARSTEN, R. E. (1972). Integer Programming Algorithms: A Framework and State-of-the-art Survey. **Management Science**, 18(9), pp. 465-491.
- GERSHKOFF, I. (1989). Optimizing Flight Crew Schedules. **Interfaces**, 19(4), pp. 29-43

- GLOVER, F. e McMILLAN, C. (1986). The General Employee Scheduling Problem: An Integration of MS and AI. **Computers & Operations Research**, 13(5) pp. 563-673.
- GONÇALVES, N. M. (1995). **Economia de Escala numa Linha de Ônibus Urbano: o Enfoque Micro-Analítico**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFSC.
- GRAVES, G. W., McBRIDE, R. D., GERSHKOFF, I., ANDERSON, D. e MAHIDHARA, D. (1993). Flight Crew Scheduling. **Management Science**, 39(6), pp. 736-745.
- JACHNIK, J. K. (1981). Attendance and Rostering Systems, in Wren, A. (ed.) **Computer Scheduling of Public Transport**, North Holland, Amsterdam.
- JARRAH, A. I., BARD, J. F. e SELVA, A. H. (1994). Solving Large-scale Tour Scheduling Problem. **Management Science**, 40(9), pp. 1124-1144.
- HAGBERG, B. (1985). An Assignment Approach to the Rostering Problem: An Application to Taxi Vehicles. In Rousseau, J. M. (ed.) **Computer Scheduling of Public Transport 2**, North-Holland, pp. 313-318.
- HARCHE, F. e THOMPSON, G. L. (1994). The Column Subtraction Algorithm: An Exact Method for Solving Weighted Set Covering, Packing and Partitioning Problems. **Computers & Operations Research**, 21(6), pp. 689-705.
- HENDERSON, W. B. e BERRY, W. L. (1976). Heuristic Methods for Telephone Operator Shift Scheduling: An Experimental Analysis. **Management Science**, 22(12), pp. 1372-1380.
- HENSHER, D. A. (1994). Stated Preference Analysis of Travel Choices: The State of Practice. **Transportation**, 21, pp. 107-133.
- HOFFMAN, Karla L. e PADBERG, Manfred, (1993). Solving Airline Crew Scheduling Problems by Branch-and-Cut. **Management Science**, 39(6), pp. 657-682.

- KEITH, E. G. (1979). Operator Scheduling. **AHE Transactions**, 11, pp. 37-41.
- KHOONG, C. M. (1993). A Simple But Effective Heuristic for Workshift Assignment. **OMEGA**, 21(3), pp. 393-395.
- KHOONG, C. M., LAU, A. C. e CHEW, L. W. (1994). Automated Manpower Rostering: Techniques and Experience. **International Transactions in Operational Research**, 1(3), pp. 353-361.
- KNAUTH, P., ROHMERT, W. e RUTENFRANZ, J. (1979). Systematic Selection of Shift Plans for Continuous Production with the aid of Work-physiological Criteria. **Applied Ergonomics**, 10(1), pp. 9-15.
- KNAUTH, P. e RUTENFRANZ, J. (1982). Development of Criteria for the Design of Shiftwork Systems. **Journal of Human Ergology**, 11, Sup., pp. 337-367.
- KROES, E. P. e SHELDON, R. (1988). Stated Preference Methods: An Introduction. **Journal of Transport Economics and Policy**, 22(1), pp. 11-25.
- KWAN, A. S. K. KWAN, R. S. K. PARKER, M. E. e WREN, A. (1996). Producing Train Driver Shifts by Computer. **Technical Report**, School of Commuter Studies, University of Leeds, England.
- KU, YUEN-WAH e WONG, J. (1996). A Practical Framework Approach to Train Crew Scheduling. **Technical Report**, Information Technology Institute National Computer Board, Singapore.
- LAU, H. C. (1992). Preference-Based Scheduling via Constraint Satisfaction. In Phua et al (eds.) Optimization Techniques and Applications, **Proceeding ICOTA'92**, Word Scientific.

- LAU, Hoong Chuin (1993). Manpower Shift Assignment Algorithms and Complexity (Part I). **Technical Report**, Computer Science Department, Tokyo Institute of Technology, Japan, pp. 1-11.
- LAU, Hoong Chuin (1994a). Manpower Shift Assignment Algorithms and Complexity (Part II). **Technical Report**, Computer Science Department, Tokyo Institute of Technology, Japan, pp. 1-17.
- LAU, Hoong Chuin (1994b). On The Complexity of Manpower Shift Assignment. **Technical Report**, Computer Science Department, Tokyo Institute of Technology, Japan, pp. 25-32.
- LAU, Hoong Chuin (1994c). Manpower Scheduling with Shift Change Constraints. **Technical Report**, Computer Science Department, Tokyo Institute of Technology, Japan, pp. 1-18.
- LAU, Hoong Chuin (1994d). Manpower Shift Scheduling with Monotonic Constraints. **Technical Report of IEICE**, Computer Science Department, Tokyo Institute of Technology, Japan, pp. 11-20
- LAU, Hoong Chuin (1996). On the Complexity of Manpower Shift Scheduling. **Computers & Operations Research**, 23 (1), pp. 93-102.
- LAVOIE, S., MINOUX, M., e ODIER, E. (1988). A New Approach for Crew Pairing Problems by Column Generation with an Application To Air Transportation. **European Journal of Operational Research**, 35, pp. 45-58.
- LENSTRA, J. K. e RINNOOY KAN, A. H. G. (1981). Complexity of Vehicle Routing and Scheduling. **Networks**, 11, pp. 221-227.
- LEVINE, D. (1994). **A Parallel Genetic Algorithm for Set Partitioning Problem**. Tese de Phd. Illinois Institute of Technology, Argonne, Illinois, USA.
- LIAO, Ching-Jong. A. (1994). New Node Selection Strategy in the Branch-and-Bound Procedure. **Computers & Operations Research**, 21(10), pp. 1095-1101.

- LORENA, L. A. e LOPES, F. B. (1994). A Surrogate Heuristic for Set Covering Problems. **European Journal of Operational Research**, 79, pp. 138-150.
- LOUVLIERE, J. J. (1988). Conjoint Analysis Modeling of Stated Preferences. **Journal of Transport Economics and Policy**, 22 (1), pp. 93-119.
- LOUVIERE, J. J. (1994). Conjoint Analysis. In Daguzei, R. P. (ed.): **Advanced Methods of Marketing Research**. Blackwell Publishes, Cambridge, USA.
- Me LEAN, R. e ANDERSON, V. L. (1984). **Applied Factorial and Fractional Designs**. Marcel Dekker Inc, New York.
- MARTELLO, S., e TOTH, P. (1986), A Heuristic Approach to the Bus Driver Scheduling Problem **European Journal of Operational Research**, 24, pp. 106-117.
- MARSTEN, Roy, E. (1974). An Algorithm for Large Set Partitioning Problems. *Management Science*, 20(5), pp. 774-787.
- MARSTEN, ROY E. E MULLER, M. R., e KILLION C. L. (1979). Crew Planning at Flying Tiger: A Successful Application of Integer Programming. **Management Science**, 25(12), pp. 1175-1183.
- MARSTEN, Roy E. e SHEPARDSON, Fred, (1981). Exact Solution of Crew Scheduling Problems Using the Set Partitioning Model: Recent Successful Applications. **Networks**, 11, pp. 165-177.
- MAYERLE, S. F. (1996). **Um Sistema de Apoio à Decisão para o Planejamento Operacional de Empresas de Transporte Rodoviário Urbano de Passageiros**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFSC.
- MILLER, H. E. (1976) Nurses Scheduling Using Mathematical Programming. **Operations Research**, 24(5), pp. 857-870.

- MONTGOMERY, D. C. (1991). **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, New York.
- NICOLETTI, B. (1975). Automatic Crew Rostering. **Transportation Science**, 9, pp. 33- 43
- NOVAES, A. G. (1986). **Sistemas de Transportes: Análise de Demanda**. Vol.I. São Paulo
- PIERCE, J. F. e LASKY, J. S. (1973). Improved Combinatorial Programming Algorithms for a Class of All-Zero-One Integer Programming Problems. **Management Science**, 19(5), pp. 528-543.
- POLIAC, M. O., LEE, W. V., SLAGE, J. R., and WICK, M. R. (1987). A Crew Scheduling Problem. **Proc. First IEEE Int. Conf. Neural Network**. San Diego, Calif. Vol. IV, pp. 779-786.
- RUBIN, J. (1973). A Technique for the Solution of Massive Set Covering Problems, with Applications to Airline Crew Scheduling. **Transportation Science**, 7, pp. 34-48.
- RUTENFRANZ, J., KNAUT, P. e COLQUHOUN, W. P. (1976). Hours of Work e Shiftwork. **Ergonomics**, 19, pp. 331-340.
- RYAN, D. M. e FALKNER, J. C. (1988). On the Integer Properties of Scheduling Set Partitioning Models. **European Journal of Operational Research**, 35, pp. 442-456.
- RYAN, D. M. (1992). The Solution of Massive Generalized Set Partitioning Problems in Aircrew Rostering. **Journal of Operational Research Society**, 43(5), pp. 459-467.
- SCHRANGE, L. (1991). **User's Manual for Linear, Integer, and Quadratic Programming with LINDO**. Release 5.3 boyd & fraser publishing company. Danvers, Massachusetts, USA.
- SEGAL, M. (1974). The Operator-Scheduling: A Network-Flow Approach. **Operations Research**, 22, pp. 808-823.

- SCHWARZENAU, P., et al. (1986). Algorithms for The Computerized Construction of Shift Systems which Meet Ergonomic Criteria. **Applied Ergonomics**, 17(3), 169-176.
- SHEPARSON, F. e MARSTEN, R. E. (1980). A Lagrangean Relaxation Algorithm for the Two Duty Period Scheduling Problem. **Management Science**, 26, 274-281.
- SMITH, B. M. e WREN, A. (1988). A Bus Scheduling System Using a Set Covering Formulation. **Transp. Research**, 22A(2), 97-108.
- SPITZER, Murray, (1987). Crew Scheduling with a Personal Computer. **Airline Executive**, 11(10), 24-27.
- SYSLO, M. M., DEO, N. e KOWLDC J. S. (1983). **Discrete Optimization Algorithms with Pascal Programs**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- THOMPSON, G. M. (1996). A Simulated-Annealing Heuristic for Shift Scheduling Using Non-Continuously Available Employees. **Computers & Operations Research**, 23(3), 275-288.
- TIEN, J. e KAMIYAMA, A. (1982). On Manpower Scheduling Algorithms. **SIAM Review**, 24, 275-287.
- VASKO, Francis J., e WILSON, George R. (1984). An Efficient Heuristic for Large Set Covering Problems. **Naval Research Logistics Quarterly**, 31, 163-171.
- VASKO, Francis, J. (1988). Solving Large Set Covering Problems on a Personal Computer. **Computers & Operations Research**, 15, 115-121.
- VIEIRA, H. F. (1996). **Uma Visão Empresarial do Processo de Exportação de Produtos Containerizados Catarinenses: Análise do Nível de Serviço Logístico**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. UFSC.

WARNER, D. M. (1976). Scheduling Nursing Personnel According to Nursing Preference: A Mathematical Programming Approach. **Operations Research**, 24(5), pp. 842-856.

WREN, A. e WREN, David O. (1995). A Genetic Algorithm for Public Transport Driver Scheduling. **Computers & Operations Research** , 22(1), 101-110.

WREN, A. (ed.) (1981). **Computer Scheduling of Public Transport**. North Holland, Amsterdam.

## ANEXO 1 . Cartões Utilizados na Preferência Declarada

(Apenas os 2 primeiros blocos de cartões)

---



---

### CARTÃO A D

#### CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS

DATA	INÍCIO SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
04:00	QUA		02	MANOBRA
06:00	QUI		02	MANOBRA
08:00	SEX		02	MANOBRA
10:00	SAB		02	MANOBRA
12:00	DOM		02	MANOBRA
	SEG			50 FOLGA

---



---

### CARTÃO A I

#### CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS

DATA	INÍCIO SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
08:00	TER		01	VIAGEM MINÉRIO
	QUA		91	CONTINUAÇÃO VIAGEM
06:00	QUI		02	MANOBRA
02:00	SEX		02	MANOBRA
00:00	SAB		02	MANOBRA
	DOM		50	FOLGA

---



---

### CARTÃO A S

#### CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS

DATA	INÍCIO SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
00:00	QUA		02	MANOBRA
02:00	QUI		02	MANOBRA
20:00	SEX		02	MANOBRA
18:00	SAB		03	PRONTIDÃO
14:00	DOM		02	MANOBRA
	SEG		50	FOLGA

---



---

---



---

**CARTÃO A C**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
06:00	DOM		02	MANOBRA
08:00	SEG		02	MANOBRA
10:00	TER		02	MANOBRA
12:00	QUA		03	PRONTIDÃO
12:00	QUI		03	PRONTIDÃO
	SEX		50	FOLGA

---



---

**CARTÃO A O**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
06:00	TER		01	VIAGEM MINÉRIO
	QUA		91	CONTINUAÇÃO VIAGEM
04:00	QUI		05	VIAGEM CARGUEIRO
	SEX		95	CONTINUAÇÃO VIAGEM
02:00	SAB		02	MANOBRA
	DOM		50	FOLGA

---



---

**CARTÃO A V**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
00:00	QUI		05	VIAGEM CARGUEIRO
	SEX		95	CONTINUAÇÃO VIAGEM
04:00	SAB		02	MANOBRA
02:00	DOM		02	MANOBRA
00:00	SEG		02	MANOBRA
	TER		50	FOLGA

---



---

---



---

**CARTÃO A E**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
	08:00	TER		01	VIAGEM MINÉRIO
		QUA		91	CONTINUAÇÃO VIAGEM
	10:00	QUI		01	VIAGEM MINÉRIO
		SEX		91	CONTINUAÇÃO VIAGEM
	12:00	SAB		03	PRONTIDÃO
		DOM			50 FOLGA

---



---

**CARTÃO A R**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
	00:00	TER		01	VIAGEM MINÉRIO
	22:00	QUA		02	MANOBRA
		QUI		92	CONTINUAÇÃO VIAGEM
	10:00	SEX		01	VIAGEM MINÉRIO
		SAB		91	CONTINUAÇÃO VIAGEM
		DOM			50 FOLGA

---



---

**CARTÃO B D**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
	00:00	QUI		02	MANOBRA
	02:00	SEX		02	MANOBRA
	18:00	SAB		02	MANOBRA
	16:00	DOM		02	MANOBRA
	14:00	SEG		02	MANOBRA
		TER			50 FOLGA

---



---

**CARTÃO B I**

## CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA	EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
08:00	TER			01		VIAGEM MINÉRIO
	QUA			91		CONTINUAÇÃO VIAGEM
08:00	QUI			02		MANOBRA
10:00	SEX			02		MANOBRA
12:00	SAB			02		MANOBRA
	DOM					50 FOLGA

**CARTÃO B S**

## CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA	EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
10:00	SAB			02		MANOBRA
08:00	DOM			02		MANOBRA
06:00	SEG			02		MANOBRA
02:00	TER			02		MANOBRA
00:00	QUA			03		PRONTIDÃO
	QUI					50 FOLGA

**CARTÃO B C**

## CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA	EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
00:00	QUI			02		MANOBRA
02:00	SEX			02		MANOBRA
00:00	SAB			03		PRONTIDÃO
04:00	DOM			02		MANOBRA
00:00	SEG			03		PRONTIDÃO
	TER				50	FOLGA

---

---

**CARTÃO B O**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA	EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
	08:00	TER		01		VIAGEM MINÉRIO
		QUA		91		CONTINUAÇÃO VIAGEM
	08:00	QUI		05		VIAGEM CARGUEIRO
		SEX		95		CONTINUAÇÃO VIAGEM
	08:00	SAB		02		MANOBRA
		DOM			50	FOLGA

---

---

**CARTÃO B V**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA	EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
	08:00	QUA		05		VIAGEM CARGUEIRO
		QUI		95		CONTINUAÇÃO VIAGEM
	06:00	SEX		02		MANOBRA
	02:00	SAB		02		MANOBRA
	00:00	DOM		02		MANOBRA
		SEG			50	FOLGA

---

---

**CARTÃO B E**
**CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA	INÍCIO	SEMANA	OBS	TAREFA	EX-TAR	TÍTULO DA OCUPAÇÃO
	20:00	TER		01		VIAGEM MINÉRIO
		QUA		91		CONTINUAÇÃO VIAGEM
	16:00	QUI		01		VIAGEM MINÉRIO
		SEX		91		CONTINUAÇÃO VIAGEM
	12:00	SAB		03		PRONTIDÃO
		DOM			50	FOLGA

---

---

---

---

**CARTÃO B R****CRONOGRAMA DE OCUPAÇÃO DIÁRIA DE EQUIPAGEM DE TRENS**

DATA INÍCIO SEMANA OBS	TAREFA EX-TAR TÍTULO DA OCUPAÇÃO
08:00 TER	01 VIAGEM MINÉRIO
QUA	91 CONTINUAÇÃO VIAGEM
10:00 QUI	01 VIAGEM MINÉRIO
SEX	91 CONTINUAÇÃO VIAGEM
10:00 SAB	02 MANOBRA
DOM	50 FOLGA

---

---

## ANEXO 2. Algoritmo para o Problema de Atribuição

Algoritmo sugerido por Carpaneto e Toth (1987) para resolver o problema de atribuição. Trata-se de um algoritmo primal-dual que combina o método Húngaro e o método do Menor Ganho (Shortest Augmenting Path).

O algoritmo é dividido em dois procedimentos: CTC e IN1T.

### 1. Procedimento CTC

Define-se:

$n$  a dimensão do problema;

$a$  a matriz ( $n \times n$ ) que define o problema, de atribuição;

$u, v$  as variáveis do problema dual;

$C_j$  a linha precedendo a coluna  $j$  no ramo alternativo ( $j=1, \dots, n$ );

$f$  a coluna  $j$  atualmente associada à linha  $i$ , ( $i=1, \dots, n$ );

$f_{bj}$  a linha  $i$  atualmente associada à coluna  $j$ , isto é  $f=j$  ( $j=1, \dots, n$ )

$IC_q$  o índice no vetor (UC) da  $q$ -ésima coluna rotulada na iteração atual ( $q=1, \dots, s$ ; com  $s < n$ );

$m$  o número de linhas (colunas) atualmente associadas;

$K_j$  o custo do ramo alternativo chegando na coluna  $j$  ( $j=1, \dots, n$ );

#### Procedure CTC( $n, a, J$ )

begin

EMIT ( $n, a, f, m, u, v, J$ );

while  $m < n$  do begin

  if  $f_r = 0$  then begin

    for  $j := 1$  to  $n$  do begin

$c := r$ ;

$U C := j$ ;

$tc := a_{rj} - u_r - v_j$ ;

    end;

$w := n$ ;

    repeat

$d := \infty$ ;  $g := 0$ ;  $k := 1$ ; flag:=False;

      repeat

$I = UC$ ;

        if  $K_j \leq d$  then begin

          if  $T_{ij} < d$  then begin

$g := 0$ ;  $s := 0$ ;  $d = n_h$ ;

          end;

        if  $f_{bj} = 0$  then begin

$g := j$ ;

          if  $d = 0$  then flag:=True;

```

    end;
    j:=s+1; \C_s =k, :
  end;
  k:=k+1;
  until k>w or flag=True;
  if g=0 then begin
    for q:=s to 1 step -1 do begin
      k:=lC_q; b:=UC_k; UC*:=UC_w; UC_w:= b\
      w:=w-\; i'.-fbb,
      for k:=1 to w do begin
        j:= UC_j;
        if 7ij>d+a_j - U_i - V_j then begin
          ■K/=d+a_j - U_i - v/, c/=i,
        end;
      end;
    end;
  end;
  until g> 0;
  for k:=w+1 to n do begin
    j:=UC_k; v/=v_j + T_ij - d;
    i'.=fbj; u{.=ui - 7ij + d\
  end;
  u_r:=u_r + d\
  repeat
    i:=Cg;fbg=i, b~fi ;fi=g; g~b\
  until i=r;
  m:=m+l;
end;
r:=r+1;
end;
end;
end;

```

**Procedure INIT**( $n, a, f, m, u, v, fb$ );

**begin**

$m \leftarrow 0$ ;

**for**  $k:=1$  **to**  $n$  **do begin**

$f_k := 0$ ;  $Jb_k := 0$ ;  $u_k := 0$ ;

**end;**

**for**  $j:=1$  **to**  $n$  **do begin**

$v := ar_j$

**if**  $f_r = 0$  **then begin**

$m := m + 1$ ;  $fb := r$ ;  $f_r = j$ ;  $p_r = j + 1$ ;

**end;**

**end;**

**for**  $z:=1$  **to**  $n$  **do**

**if**  $f_r = 0$  **then begin**

**define-se**  $j: a_r, v_r = \min\{a^* - v_k \mid 1 < k < n\}$  ( em caso de empate, escolha o menor  $j$  tal que  $i \neq 0$ );

```

 $u_i := a_{ij} - V_j$ , flag:=False;
while  $f_i \neq 0$  and  $j < n$  do begin
  if  $a_{ij} - U_j - V_j = 0$  then begin
     $r := f_i > 0$ ,  $k := p_i$ ;
    while flag=False and  $k \leq n$  do
      if  $f_k = 0$  and  $a_{rk} - u_r - v_k = 0$  then
        flag:= True
      else
         $k := k + 1$ ;
     $p_k := k + 1$ ;
  end;
  if flag:= True then begin
     $f_i := 0$ ;  $f_r := k$ ;  $f_{b_k} := r$ ;
  end
  else
     $j := j + 1$ ;
end;
if  $f_{b_j} = 0$  then begin
   $m := m + 1$ ;  $f_j := j$ ;  $f_{b_j} := i$ ;  $p_i := j + 1$ ;
end;
end;
end;

```

### ANEXO 3. Algoritmo para o Problema de Atribuição com Gargalo

Algoritmo apresentado por de Carraresi e Gallo (1984b) para resolver o problema de atribuição com gargalo.

Denote por  $N_1$  e  $N_2$  os dois conjuntos de nós do grafo bi-partite associado ao problema de atribuição, sendo  $a_i$   $i \in N_1$ , e  $b_j$   $j \in N_2$ , os pesos dos nós, e  $A$  o conjunto de Arcos.

Assume-se que uma solução viável  $y$  é conhecida; para cada  $i \in N_1$ ,  $q(i)$  é o elemento de  $N_2$  tal que  $y_{i,q(i)} = 1$ , e para cada  $j \in N_2$ ,  $p(j)$  é o elemento de  $N_1$  para qual  $y^{p(j),j} = 1$ . Define-se o conjunto  $M = \{(ij) : y_{ij} = 0\}$ .

O algoritmo é descrito a seguir:

#### Procedure PBA

```

begin
  repeat
    with  $j \in N_2$  do label[ $j$ ] := 0; flag := 0;
    selecione  $r$  tal que
       $a_r + \hat{a}_r = \max \{a_i + b_{q(i)} : i \in N_1\}$ ;
     $Q := \{r\}$ ;
    repeat
      selecione  $u \in Q$ ;  $Q := Q - \{u\}$ ;  $A := a_r + b^{u,q(u)} - a_u$ ;
      with  $v \in (N_2 : b_j < A)$  do begin
        if  $(u,v) \in A$  and label[ $v$ ] = 0 then begin
          label[ $v$ ] :=  $A$ ;
          if  $v = q(r)$  then  $Q := \emptyset$ 
          else  $Q := Q \cup \{p[v]\}$ ;
        end;
      end;
    until  $Q = \emptyset$ ;
    if label[ $M$ ] = 0 then begin
      flag := 1;  $v = q[r]$ ;
      repeat
         $w := \text{label}[v]$ ;  $q[v] := w$ ;  $w := q[u]$ ,  $q[u] = v$ ;
         $v := w$ ;
      until  $v = q[r]$ ;
    end;
  until flag = 0;
end.
```

## ANEXO 4. A Heurística 2-OPT

A heurística 2-opt é uma das técnicas mais conhecida para se obter uma solução quase ótima para o problema do caixeiro viajante. Inicia-se com um ciclo Hamiltoniano  $H$  \ retira-se 2 arestas de  $H$ , assim produzindo 2 grafos desconectados. Os dois grafos são reconectados de tal maneira que produza outro ciclo  $H'$ . Assim  $H$  e  $H'$  diferem em exatamente 2 arestas. Calcula-se o custo  $w(H')$  do ciclo  $H'$ . Se  $w(H') < w(H)$ , o ciclo  $H$  é substituído por  $H'$  e repete-se o processo; caso contrário, um outro par de arestas é trocado. As mudanças continuam até nenhum melhoramento poder se feito trocando 2 arestas. A solução final que não pode ser melhorada mudando apenas 2 arestas é chamada de uma solução 2-opt.

Formalização:

Dado um ciclo inicial contendo o seguinte conjunto de arestas  $H = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  na ordem  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Define-se  $w(H)$  o custo associado ao ciclo  $H$ . Seja  $X = \{x_i, x_j\}$  um conjunto de 2 arestas de  $H$  é apagado e substituído por outro conjunto de arestas  $Y = \{y_p, y_q\}$ , obtendo-se um novo ciclo  $H' = (H - X) \cup Y$ . If  $w(H') < w(H)$  então  $H$  é substituído por  $H'$ .

Observe que:

- 1) as duas arestas  $x_i, x_j$  de  $X$  não podem ser adjacentes;
- 2) uma vez que  $X$  tenha sido escolhido, o conjunto  $Y$  é determinado.

Assim, é possível gerar  $\frac{n(n-3)}{2}$  ciclos  $H'$  a partir de um dado ciclo  $H$ .

Denota-se  $\hat{\Delta}$  como sendo o melhoramento

$$\hat{\Delta} = w(H) - w(H') = w(x_i) + w(x_j) - w(y_p) - w(y_q).$$

O algoritmo examina todos os ciclos  $H'$  a fim de obter um ciclo com o máximo valor de  $\hat{\Delta}$ . O valor máximo é denotado por  $\hat{\Delta}_{\max}$ .

A seguir é descrito o algoritmo deste método para alcançar uma solução aproximada 2-opt para o problema do caixeiro viajante através de sucessivas trocas de 2 arestas ( Syslo et al, 1983)

### Procedure 2-OPT

```

begin
  seja  $H = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  ciclo corrente;
  repeat
     $S_{max} := 0$ ;
    for  $i = 1$  to  $(n-2)$  do
      for  $j = i+1$  to  $n$  or  $(n-1)$  do { o último caso é somente quando  $i = 1$  }
        if  $(w(x_i) + w(x_j) - w(y_p) - w(y_q)) > \hat{\delta}_{max}$  then
          begin
             $\hat{\delta}_{max} := (w(x_i) + w(x_j) - w(y_p) - w(y_q))$ ;
            guarda  $i$  e  $j$ ;
          end;
        if  $\hat{\delta}_{max} > 0$  then  $H := H - \{x_i, x_j\} \cup \{y_p, y_q\}$ ;
      until  $\hat{\delta}_{max} = 0$ ;
  end;
```

ANEXO 5. Escalas Cíclicas Obtidas com o Sistema *PlanEsc*

**Construção da Escala Cíclica**

**Tarefas**

N.	TAREFA	INÍCIO
1	1	20:00
2	1	01:30
3	1	06:00
4	1	11:00
5	1	15:00
6	2	00:00
7	2	06:00
8	2	06:00
9	2	12:00
10	2	12:00
11	2	18:00
12	2	06:00
13	2	13:30
14	3	23:00
15	3	15:00
16	3	06:00
17	2	00:00
18	2	06:00
19	2	12:00
20	2	18:00
21	5	16:30

**Parâmetros**

Progressividade entre atividades: 
BAIXA
ALTA

Descanso inter-atividades (horas):

Início de cada programação (horas):

Manter fora de escala após priorização

Notas trabalhadas em sequência:

Duração de uma programação (dias):

Número de programações na escala:

**Visualização das Programações**

Paralela  Sequencial

**Resultado**

Passes: 42

DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7
02 (06:00)	01 (20:00)	90	90	02 (00:00)	XXXXXX	02 (06:00)
03 (23:00)	60	XXXXXX	02 (06:00)	03 (15:00)	60	XXXXXX
03 (06:00)	60	02 (00:00)	XXXXXX	02 (06:00)	05 (16:30)	90
XXXXXX	01 (06:00)	90	02 (18:00)	XXXXXX	01 (11:00)	90
60	01 (01:30)	90	XXXXXX	01 (15:00)	90	02 (18:00)
XXXXXX	02 (12:00)	02 (13:30)	XXXXXX	02 (12:00)	02 (12:00)	XXXXXX

Arquivo de Tarefas: C:\Arquivos de Programas\Borland\Oelphi 2.0\EscalaS\Junho92.atf

Figura 1. Escala Cíclica nº 1

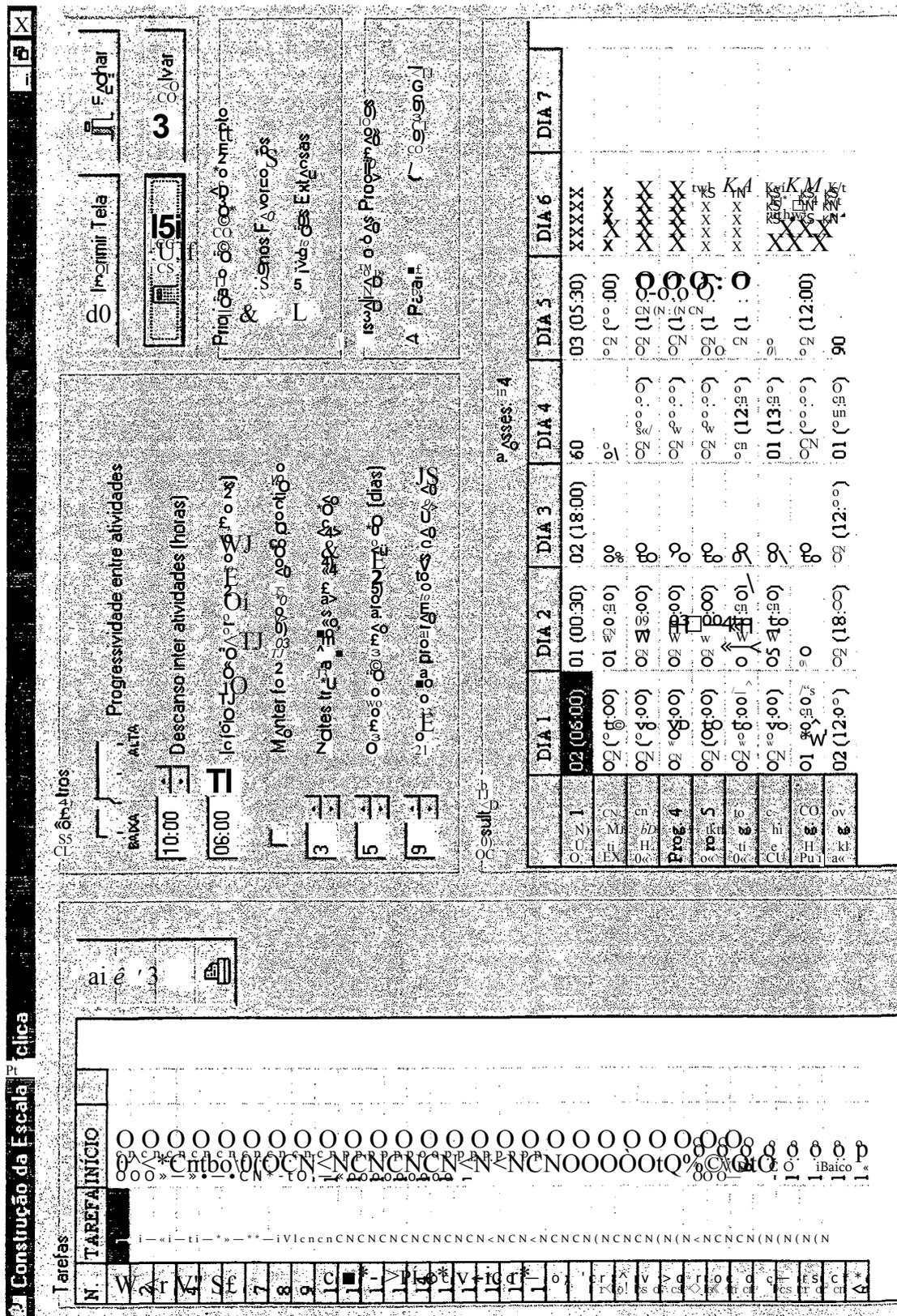


Figura 2. Escala Cíclica nº 2

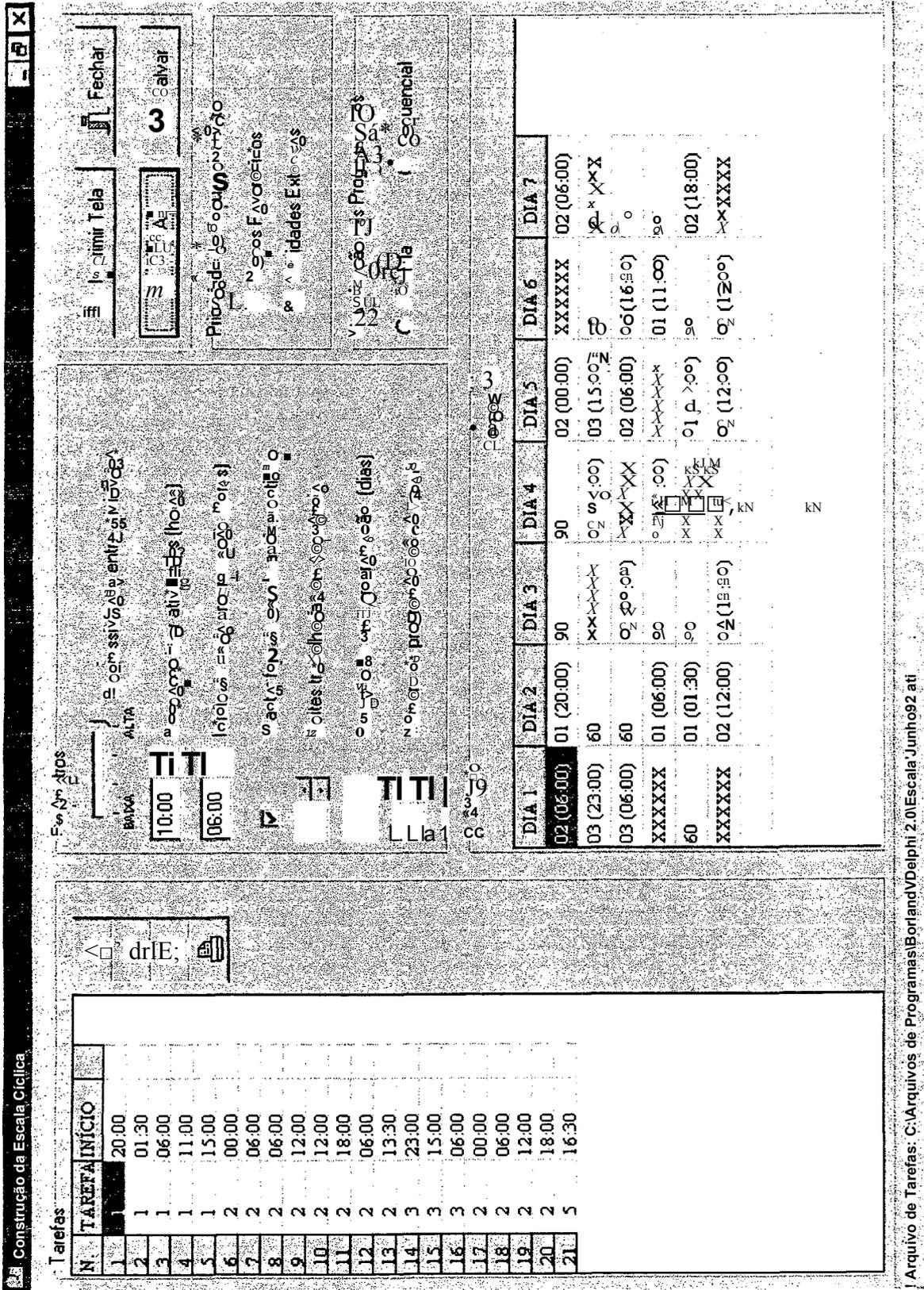


Figura 3. Escala Cíclica nº 3

