

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
PROGRAMA INTERDISCIPLINAR DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
APLICADA – PIPCA

Francisco José Martins

**UMA ABORDAGEM PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE
ROTAÇÕES DE TRIPULAÇÕES PARA EMPRESAS AÉREAS
UTILIZANDO BUSCA TABU E JANELAS DE TEMPO**

São Leopoldo, fevereiro de 2007.

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
PROGRAMA INTERDISCIPLINAR DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
APLICADA – PIPCA

Francisco José Martins

**UMA ABORDAGEM PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE
ROTAÇÕES DE TRIPULAÇÕES PARA EMPRESAS AÉREAS
UTILIZANDO BUSCA TABU E JANELAS DE TEMPO**

Dissertação de Mestrado submetida à avaliação
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Computação Aplicada

Prof. Dr. Arthur Tórgo Gómez
Orientador

São Leopoldo, fevereiro de 2007.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

M386a Martins, Francisco José
 Uma abordagem para a solução de problemas de rotação de
tripulações para empresas aéreas utilizando busca tabu e janelas de
tempo/ por Francisco José Martins. – 2007.
 168 f. : il. ; 30cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos,
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, 2007.

“Orientação: Prof. Dr. Arthur Tórgo Gómez, Ciências Exatas e
Tecnológicas”.

1. Algoritmo busca tabu. 2. Pesquisa operacional. 3. Empresa
aérea - Rotação de tripulante. I. Título.

CDU 004.421

Catálogo na Publicação:
Bibliotecária Eliete Mari Doncato Brasil - CRB 10/1184

Francisco José Martins

Uma Abordagem para a Solução de Problemas de Rotações de Tripulações para Empresas Aéreas Utilizando Busca Tabu e Janelas de Tempo

Monografia apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Computação Aplicada

Aprovado em março 2007.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. Arthur T. Gómez – Orientador

PIPCA – Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Professor Dr. João Carlos Furtado

PPGSPI – Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC

Professor Dr. José Vicente Canto dos Santos

PIPCA – Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

“Em momentos de crise, só a imaginação é mais importante que o conhecimento”.

(Albert Einstein)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a ela ...

O Amor da minha vida, de toda a minha vida ...

Prá ti, Cris.

Te amo !

AGRADECIMENTOS

Um trabalho de mestrado é caracterizado, geralmente, pela dificuldade e pela solidão na luta para solucionar os mais diversos problemas que se apresentam. Porém, este cenário é composto de diversas pessoas e entidades que se tornam importantes colaboradores. Assim, não posso me eximir de agradecer

... a Deus em primeiro lugar e sobre todas as coisas;

... ao Professor Arthur Tórgo Gómez, pela orientação e acima de tudo, pelo conhecimento adquirido;

... às entidades CEEE e FINEP projeto SBTVD pelo apoio financeiro;

... à VARIG S.A. por ter sido a grande referência para esse trabalho, além de ter representado a minha grande escola e a empresa na qual me abrigou por mais de 23 anos;

... ao Comandante Eduardo Letti, Representante da Diretoria de Operações de Vôo da Varig, em Porto Alegre, no ano de 2005, que me inspirou pela escolha do tema deste trabalho;

... aos meus ex-colegas de empresa, da Gerência de Escalas de Tripulantes, Luis Fernando Rocha, e da Gerência de Tecnologia da Informação, Roberto Pontes que me forneceram todos os dados e informações que foram fundamentais às etapas de experimentos, testes e validação;

... ao corpo docente e aos colegas do PIPCA que ampliaram e qualificaram, sobremaneira, o meu círculo de amizades;

... à querida e doce Juliana que, inúmeras vezes, foi tão compreensiva ao me emprestar o seu computador;

e a todos que, de alguma maneira, colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

As escalas de tripulações em companhias aéreas é um fator importante na logística de operações dessas empresas e um problema interessante para a aplicação de Pesquisa Operacional. Os custos com tripulantes no transporte aéreo são extremamente altos, superiores a 20% dos custos de operações das empresas. Diante desse contexto, este trabalho vem abordar o problema de rotações de tripulações em empresas aéreas. Uma rotação de tripulação – *crew pairings* – é uma seqüência de etapas ou segmentos de vôo que começam e terminam em uma base domiciliar de tripulantes. O objetivo deste planejamento é encontrar um subconjunto dessas rotações com custo mínimo e que cubra todas as etapas de vôo na programação da empresa atendendo as restrições inerentes ao problema. O trabalho desenvolveu uma solução para o problema com um modelo *set covering / set partitioning*, primeiramente, promovendo, uma solução inicial viável que foi aplicada, numa segunda etapa, a um processo de otimização utilizando a meta-heurística Busca Tabu e janelas de tempo. Os resultados revelaram valores satisfatórios, demonstrando soluções que, comparadas à solução real, promoveram índices de minimização superiores a 70%. A validação do modelo implementado foi feita mediante a comparação com o estudo de caso realizado na empresa Varig S.A..

Palavras-chave: Escalas de tripulantes, rotações, tripulações, empresas aéreas, Busca tabu, janelas de tempo.

ABSTRACT

The flight scheduling crews in airliners are an important factor in logistic of operations of a these companies and interesting problem for the application of Operational Research. The costs with crew members in the air transportation are extremely high, superior 20% of the costs of operations of the companies. So, this study presents an approach of the crew pairing problem in airlines. The objective of this planning is to find a subgroup of these pairings with minimum cost and that it covers all the flight legs in the programming of the airliners taking care of the inherent restrictions to the problem. The solution for the problem implemented a set covering/set partitioning model, first, promoting, a viable initial solution that was applied, in one second stage, to optimize process using the meta-heuristic Tabu Search and time windows. The results had disclosed values satisfactory, demonstrating solutions that, compared with the real solution, had promoted minimization indices superior 70%. The validation of the implemented model was made by means of the comparison with the study of case carried through in the company Varig S.A..

Keywords: Crew, pairing, flight, schedulling, airliner, Tabu Search, time windows

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE ABREVIATURAS	XVII
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS ANALISADOS.....	25
2.2 PROBLEMAS ABORDADOS E METODOLOGIAS EMPREGADAS.....	36
2.2.1 Métodos Exatos	36
2.2.1.1 Inteligência Artificial (IA).....	36
2.2.1.2 <i>Constraint Logic Programming</i> (CLP).....	36
2.2.1.3 Programação Dinâmica.....	37
2.2.1.4 Programação Matemática.....	37
2.2.1.5 Relaxação Lagrangeana.....	38
2.2.1.6 Geração de Colunas.....	39
2.2.1.7 <i>Branch and Bound</i>	39
2.2.1.8 <i>Branch and Price</i>	39
2.2.1.9 <i>Network Flow</i>	40
2.2.1.10 <i>Set Covering</i>	41
2.2.1.11 <i>Set Partitioning</i>	42
2.2.2 Métodos Heurísticos	44
2.2.2.1 Heurísticas Construtivas.....	45
2.2.2.2 Busca Local.....	45
2.2.2.3 <i>Simulated Annealing</i> (SA).....	45
2.2.2.4 Busca Tabu.....	45
2.2.2.5 <i>Greedy Random Adaptive Search Procedure</i> (GRASP).....	46
2.2.2.6 Algoritmos Genéticos.....	46
3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DAS TRIPULAÇÕES EM EMPRESAS AÉREAS ..	48
3.1 DEFINIÇÕES.....	50

3.2 ALGUNS ASPECTOS COM RELAÇÃO À TRIPULAÇÃO.....	51
3.2.1 Regras	53
3.2.2 Normas Norte-Americanas	53
3.2.3 Normas Brasileiras	53
3.3 CATEGORIAS DE PROBLEMAS.....	54
3.3.1 O Problema Diário	55
3.3.2 O Problema Semanal	55
3.3.3 O Problema Mensal	55
3.4 UM EXEMPLO DE ESCALA DE VÔO.....	56
3.5 ESTRUTURA DE CUSTOS.....	57
4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	60
4.1 TRATANDO O REPOSICIONAMENTO DE TRIPULANTE (<i>DEADHEAD</i>).....	61
4.2 FORMULAÇÃO DA ETAPA DE GERAÇÃO DAS ROTAÇÕES.....	63
4.3 FORMULAÇÃO DA ETAPA DE OTIMIZAÇÃO.....	65
5 META-HEURÍSTICA BUSCA TABU	70
5.1 O MÉTODO.....	70
5.2 MÓDULOS ADICIONAIS NA BUSCA TABU.....	72
5.2.1 Estratégias de Intensificação	73
5.2.1.1 Reinício da Busca Tabu com Soluções Elite.....	73
5.2.1.2 Frequência das Soluções Elite.....	73
5.2.1.3 Memória e Intensificação.....	73
5.2.2 Estratégias de Diversificação	74
5.2.2.1 Frequência das Soluções Não-Elite.....	74
5.2.2.2 Busca Tabu Reativa.....	74
5.2.2.3 Abordagens por Cadeias de Ejeção – <i>Ejection Chains</i>	75
5.2.3 Reconexão por Caminhos	75
5.2.4 Relaxação Adaptativa	79
6 TÉCNICAS UTILIZADAS	82

6.1 Definição.....	82
6.2 Relação entre Ações do Operador e Janelas de Tempo.....	83
6.3 Extraindo Informação da Janela de Tempo.....	84
6.4 Um Exemplo de Extração de Informação de Janela de Tempo.....	85
6.5 O Modelo <i>Blackboard</i> em Simulações Orientada a Objetos.....	86
6.6 O Modelo <i>Blackboard</i> e Janelas de Tempo.....	87
6.7 Possíveis Resultados da Janela de Tempo.....	89
6.8 Exemplo de Formulação Usando Janelas De Tempo.....	91
6.9 Exemplo de Modelo Utilizando Tripulante Extra.....	91
6.10 A Utilização de Janelas de Tempo e a Contribuição para este Trabalho.....	96
7 O MODELO PROPOSTO.....	97
7.1 O ENFOQUE DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVAS PARA A SUA ABORDAGEM.....	97
7.2 RESTRIÇÕES PARA A GERAÇÃO DAS JORNADAS DE UM DIA DE TRABALHO.....	98
7.3 RESTRIÇÕES PARA A GERAÇÃO DOS <i>PAIRINGS</i>	99
7.4 DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE CUSTOS.....	100
7.5 FORMULAÇÃO PARA A GERAÇÃO DAS JORNADAS DE SERVIÇO.....	100
7.6 APLICANDO JANELA DE TEMPO.....	100
7.7 O MODELO PROPOSTO.....	101
7.8 A ARQUITETURA DO MODELO.....	102
7.8.1 Módulo entrada de dados.....	104
7.8.2 Módulo gerador da solução inicial.....	105
7.8.2.1 Geração das jornadas de trabalho.....	105
7.8.2.2 Geração das Rotações.....	107
7.8.2.3 Função de Avaliação.....	110
7.8.2.4 Validação do modelo.....	111
7.8.3 Módulo de otimização.....	112

7.8.3.1 Parâmetros do algoritmo Busca Tabu.....	112
7.8.3.2 Geração de Vizinhança.....	113
7.8.3.3 Aplicação das janelas de tempo.....	116
7.8.4 Módulo saída de dados.....	117
8 VALIDAÇÃO E EXPERIMENTOS.....	119
8.1 PROCEDIMENTOS DE GERAÇÃO DA SOLUÇÃO REAL.....	119
8.2 PROCEDIMENTOS DE GERAÇÃO DA SOLUÇÃO INICIAL.....	120
8.3 PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO MODELO.....	122
8.4 MÓDULO DE OTIMIZAÇÃO.....	123
8.5 EXPERIMENTOS.....	124
8.6 SOLUÇÃO TENDENCIOSA E SOLUÇÃO NÃO-TENDENCIOSA.....	125
8.7 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE HORAS EXTRAS.....	127
8.8 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE HORAS EXCEDENTES.....	129
8.9 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE OCIOSIDADE.....	132
8.10 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO ENTRE JORNADAS.....	134
8.11 ANÁLISE DO BTMax E DO TAMANHO DA LISTA TABU	136
9 CONCLUSÕES.....	141
9.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E VALIDAÇÃO.....	142
9.2 CONTRIBUIÇÃO.....	146
9.3 TRABALHOS FUTUROS.....	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
ANEXO 1 - RELAÇÃO DOS TRECHOS DE VÔO CONSIDERADOS NOS EXPERIMENTOS.....	156
ANEXO 2 - SOLUÇÃO REAL DO PROBLEMA.....	161
ANEXO 3 - SOLUÇÃO INICIAL DO PROBLEMA.....	163
ANEXO 4 - SOLUÇÃO INICIAL COM OTIMIZAÇÃO.....	165
ANEXO 5 - SOLUÇÃO NÃO TENDENCIOSA.....	167

Lista de Figuras

Figura 1. Grafo $G = (N = \{i, j, k, l\}, E = \{(i, j), (j, i), (i, k), (j, k), (k, j), (k, l), (l, k)\})$	40
Figura 2. O Problema das Escalas de Vôo e os Cinco Estágios de Planejamento.....	49
Figura 3. Grafo de Trechos de Vôo.....	64
Figura 4. Grafo de Jornadas de Trabalho.....	65
Figura 5. Algoritmo Clássico de Busca Tabu.....	72
Figura 6. Algoritmo Clássico de Busca Tabu Reconexão por Caminhos.....	77
Figura 7. Procedimento Reconexão por Caminhos.....	78
Figura 8. Oscilação Estratégica.....	79
Figura 9. Exemplo de ATC.....	87
Figura 10. Possíveis Resultados da Janela de Tempo.....	90
Figura 11. A Arquitetura do Modelo.....	103
Figura 12. Modelagem de uma Etapa de Vôo.....	104
Figura 13. Modelagem de uma Jornada de Trabalho.....	107
Figura 14. Modelagem de uma Rotação.....	108
Figura 15. Representação da Solução do Problema.....	110
Figura 16. Algoritmo Busca Tabu Implementado.....	113
Figura 17. Movimento de Realocação de Jornada de Trabalho.....	114
Figura 18. Movimento de Troca de Jornada de Trabalho.....	114
Figura 19. Algoritmo para Execução dos Movimentos.....	116
Figura 20. Solução Real X Solução Inicial.....	122
Figura 21. Solução Real X Solução Inicial com Otimização.....	124
Figura 22. Solução Real X Solução Não Tendenciosa.....	127
Figura 23. Solução Real X Solução Não Tendenciosa X Solução Tendenciosa privilegiando α_1	129
Figura 24. Solução Real X Solução Não Tendenciosa X Solução Tendenciosa privilegiando α_2	131
Figura 25. Solução Real X Solução Não Tendenciosa X Solução Tendenciosa privilegiando α_3	133
Figura 26. Solução Real X Solução Não Tendenciosa X Solução Tendenciosa privilegiando α_4	135

Lista de Tabelas

Tabela 1. Escala de vôo.....	56
Tabela 2. Lista de <i>parings</i> válidos.....	57
Tabela 3. Valores típicos de custos.....	58
Tabela 4. Malha de vôos com base domiciliar na localidade A.....	64
Tabela 5. Resumo da notação utilizada na formulação.....	64
Tabela 6. Solução real.....	119
Tabela 7. Valores das variáveis na solução real.....	120
Tabela 8. Solução inicial.....	121
Tabela 9. Valores das variáveis na solução inicial.....	121
Tabela 10. Solução inicial com otimização.....	123
Tabela 11. Valores das variáveis na solução inicial.....	124
Tabela 12. Médias obtidas após os experimentos.....	125
Tabela 13. Valores dos pesos proporcionais.....	126
Tabela 14. Solução não tendenciosa.....	126
Tabela 15. Valores das variáveis na solução não tendenciosa.....	126
Tabela 16. Minimização do tempo total de horas extras.....	128
Tabela 17. Minimização do tempo total de horas excedentes de uma jornada de trabalho.....	130
Tabela 18. Minimização do tempo total de horas em ociosidade.....	132
Tabela 19. Minimização do tempo entre jornadas de trabalho.....	134
Tabela 20. Resumo dos resultados com uma solução tendenciosa.....	136
Tabela 21. Valores dos pesos proporcionais na solução não tendenciosa.....	137
Tabela 22. Valores dos pesos proporcionais nas soluções tendenciosas.....	137
Tabela 23. Valores definidos para os parâmetros do algoritmo Busca Tabu.....	137
Tabela 24. Resultados utilizando a solução não tendenciosa.....	137
Tabela 25. Resultados utilizando a solução tendenciosa privilegiando <i>HE</i>	138

Tabela 26. Resultados utilizando a solução tendenciosa privilegiando <i>HEex</i>	138
Tabela 27. Resultados utilizando a solução tendenciosa privilegiando <i>Oc</i>	139
Tabela 28. Resultados utilizando a solução tendenciosa privilegiando <i>TEJ</i>	139

Lista de Abreviaturas

AG	Algoritmos Genéticos
BT	Busca Tabu
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
CLP	<i>Constraint Logic Programming</i>
DN	Descanso Noturno
Eq	Equação
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
GRASP	<i>Greedy Random Adaptive Search Procedure</i>
HE	Hora Extra (variável de decisão da função de avaliação que mede a quantidade de tempo, em minutos, que excedem a duração normal de uma jornada de trabalho)
HEex	Horas Excedentes (variável de decisão da função de avaliação que mede a quantidade de tempo, em minutos, que excedem a duração máxima de uma jornada de trabalho)
IA	Inteligência Artificial
LP	<i>Linear Programming</i>
LR	Relaxação Lagrangeana
MDG	<i>Minimum Duty Guarantee</i>
MOGLS	<i>Multiple-Objective Genetic Local Search</i>
NP	<i>Non-Deterministic Polynomial-Time</i>
NSGA	<i>Nondominated Sorting Genetic Algorithm</i>
Oc	Ociosidade (variável de decisão da função de avaliação que mede a quantidade de tempo, em minutos, em que o tripulante está a serviço da empresa, porém não está trabalhando efetivamente)

PMA	<i>Pareto Memetic Algorithm</i>
PMDG	<i>Pairing Minimum Duty Guarantee</i>
PR	<i>Path Relinking</i>
RCPSP	<i>Resource Constrained Project Scheduling Problem with Generalized Precedence Relations</i>
RC	Reconexão por Caminhos
SA	<i>Simulated Annealing</i>
SAMD	<i>Steepest Ascent, Mildest Descent</i>
TAFB	<i>Time away from base</i>

TEJ Tempo Entre Jornadas (variável de decisão da função de avaliação que mede a quantidade de tempo, em minutos, que falta para a diferença entre o horário final da jornada em um dia e o horário inicial da mesma no dia subsequente alcançar 11 (onze) horas)

1 INTRODUÇÃO

O planejamento da força-de-trabalho de tripulações é uma das tarefas mais importantes e desafiantes executadas pela maioria das empresas aéreas. Os gastos decorrentes de escalas de tripulações encontram-se dentre os maiores custos e ultrapassam, anualmente, a casa dos milhões de dólares nas maiores companhias aéreas do mundo (Sohoni, 2005).

Conforme Pontes (Pontes, 2000), normalmente, os custos envolvendo tripulações chegam a atingir cerca de 20% do custo total de operações das companhias aéreas. Portanto, o gerenciamento eficiente deste problema é considerado da mais alta relevância econômica e o trabalho de otimização das escalas de vôo dos tripulantes pode vir a fornecer benefícios financeiros significativos às empresas aéreas, reduzindo, de forma direta, os custos com pernoites em hotel, refeições, diárias, encargos salariais, além de otimizar o número total de tripulantes para atender às necessidades no cumprimento de todos os vôos. De acordo com Kohl (Kohl, 2004), uma empresa aérea comercial tem sua receita financeira originada, essencialmente, da venda dos bilhetes de passagem e dentre os custos mais significativos destacam-se combustível, tripulações e despesas com o uso dos aviões, *leasing* e manutenção. Depois dos custos com o combustível, os custos com tripulações constituem a maior despesa de uma companhia aérea. Desta forma, a redução de uma pequena porcentagem nesses gastos, normalmente, representa economias de dezenas de milhões de dólares para uma grande transportadora aérea.

O trabalho aplicado à companhia Air New Zealand entre os anos de 1987 e 2000 proporcionou economia da ordem de US\$ 26,000,000 por ano, além de reduzir o número de pessoas envolvidas na confecção das escalas de tripulantes, de 27 para 15, mesmo a empresa tendo um aumento significativo no tamanho da sua frota de aviões e rotas atendidas (Butchers, 2001).

Assim, a maioria dos trabalhos publicados ressalta a importância das técnicas aplicadas às rotações de tripulações. Os melhores resultados são alcançados através de rotações produtivas capazes de minimizar os custos e promover uma melhor qualidade de vida e satisfação ao tripulante.

Os métodos mais comuns encontrados na literatura e aplicados nos sistemas de escalas de tripulantes das empresas aéreas comerciais são baseados no “princípio gera-e-otimiza” (Kohl, 2004). O problema principal de otimização, um problema tipo *set partitioning* é resolvido para selecionar exatamente uma escala para cada membro da tripulação à medida que as demandas de atividades são encontradas. A solução satisfaz restrições entre alguns tripulantes e o objetivo é otimizado. Caso não seja possível obter uma representação explícita de todas as possíveis escalas, o problema é sempre definido no subconjunto de todas as escalas possíveis. Na geração do subproblema, um grande número de escalas válidas é gerado. Isto pode ser feito pela enumeração baseada nas técnicas de *branch and bound*. Uma alternativa é resolver um problema de caminho mais curto restrito onde as restrições asseguram que somente escalas válidas são geradas e onde o objetivo da função é equivalente aos custos reduzidos da escala com relação à solução da relaxação contínua do problema principal definido nas escalas geradas anteriormente. A abordagem mais recente é conhecida como geração de séries de caminho mais curto restrito. Neste caso, o subproblema é resolvido demonstrando que é possível ser obtida a solução ótima para o problema principal sem explicitar a enumeração de todas as escalas possíveis.

As tripulações de uma empresa aérea, de um modo geral, são classificadas em duas categorias: tripulações regulares e tripulações de reserva. As tripulações regulares são usadas para cobrir as necessidades dos vôos e suas escalas de trabalhos mensais são otimizadas para maximizar tal cobertura. Entretanto, membros que compõem as tripulações de reserva são acionados toda vez que um tripulante regular não puder assumir um vôo (Sohoni, 2005).

Neste contexto, técnicas de pesquisa operacional, por possuírem um enorme potencial para gerar economia, vêm sendo aplicadas nessa área já há bastante tempo. A solução para este problema exige muito esforço por envolver um grande número de possíveis soluções. As principais restrições presentes estão relacionadas ao cumprimento da legislação trabalhista, normas operacionais vigentes nas empresas e acordos sindicais. O grande número de combinações inviabiliza uma resolução por enumeração de todas as possíveis soluções fazendo com que o problema torne-se intratável computacionalmente e, por isso classificado como NP-*Hard* (Santos, 2004).

A construção das escalas dos tripulantes de cabine de uma empresa aérea é uma tarefa difícil e, normalmente, é separada em duas partes: A primeira fase trata da elaboração da escala envolvendo os mais diversos aspectos da alocação da frota, rotação dos tripulantes e programação de horários – *crew pairings problem*. Já na segunda etapa, se estabelece uma tabela de vôos a serem cumpridos pelas tripulações para um dado período de tempo, normalmente um mês – *crew rostering problem*. Dos dois problemas o problema das rotações de tripulações é o mais estudado, porque é o que traz maiores economias diretas para as empresas. Já a distribuição de tarefas propriamente dita, está mais ligada à satisfação dos tripulantes do que propriamente com a economia de recursos financeiros.

Várias metodologias são utilizadas para tratar o problema da escala das tripulações. Normalmente são utilizadas técnicas heurísticas. Dentre elas, destacam-se as meta-heurísticas, Algoritmos Genéticos, *Simulated Annealing*, Busca Tabu, entre outras, capazes de prover mecanismos para se escapar de ótimos locais. Técnicas de geração de colunas também têm demonstrado atingir bons resultados (Mauri, 2004).

Diante desse panorama tão complexo, esta dissertação tem como objetivo demonstrar um estudo acerca do problema das rotações de tripulações voltadas a empresas aéreas, aplicando técnicas de janelas de tempo e utilizando a meta-heurística Busca Tabu para a fase de otimização do problema.

Para tanto, este trabalho está organizado da seguinte forma: o capítulo 2, a seguir, apresenta uma revisão detalhada de como o problema vem sendo tratado e descrito na literatura científica. O capítulo 3 descreve o problema das rotações de tripulações nos seus mais variados aspectos, demonstrando, principalmente, a geração das rotações das tripulações e a regulamentação trabalhista que impõe uma série de restrições ao problema. O capítulo 4 exibe um estudo acerca da formulação matemática e apresenta as etapas sobre as quais o problema deve ser abordado. O capítulo 5 traz um estudo aprofundado sobre os principais conceitos envolvendo janelas de tempo. Este capítulo apresenta um exemplo de extração de informação de janela de tempo e termina demonstrando o modelo *Blackboard* e um exemplo de abordagem onde os problemas das rotações de tripulações e alocação de frota são tratados de forma integrada. O

capítulo 6 aborda a metodologia Busca Tabu que foi utilizada na fase de otimização da solução do problema. O capítulo 7 exhibe o modelo através do qual esse trabalho trata o problema das rotações de tripulações. Além das restrições inerentes ao problema, a determinação da função de custos e a formulação para a geração das jornadas de trabalho, o capítulo aponta justificativas para a maneira sobre a qual é dado o enfoque ao problema. O capítulo 8 expõe, com detalhes, o método de solução utilizado neste trabalho. O capítulo 9 mostra os resultados computacionais com a descrição dos experimentos realizados e a validação. No capítulo 10 são apresentadas as conclusões finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é ressaltar o estudo acerca do problema das escalas de tripulações realizado através da análise de diversas publicações no meio científico. Primeiramente, é feita uma breve descrição dos trabalhos em questão, destacando aspectos relevantes que levaram os autores à solução dos problemas. Em seguida, o capítulo apresenta uma relação de metodologias empregadas nos respectivos trabalhos analisados.

A literatura científica possui numerosas contribuições de trabalhos envolvendo o problema das escalas de vôo e o problema da tabela de serviço mensal dos tripulantes discorrendo uma variedade de modelos e soluções para esses problemas. Dentre os primeiros trabalhos estudados, pode-se destacar (Daskin, 1989), (Feo, 1989), (Clarke, 1997), (Gopalan, 1998), (Talluri, 1998). Já a introdução de aspectos relativos à manutenção e à alocação de frota como fatores integrantes do problema tratado, pode ser visto em (Barnhart, 2003), (Clarke, 1996), (Rushmeier, 1997), (Barnhart, 1998a). Finalmente, outros estudos, abordando à integração de processos de planejamento combinando o problema de alocação da frota e o problema da rota da aeronave, podem ser encontrados em (Desaulniers, 1997) e (Barnhart, 1998b).

Para Gopalakrishnan (Gopalakrishnan, 2005), a elaboração de escalas de trabalho em operações de vôo divide-se, basicamente, em dois processos: a escala da frota de aeronaves e a escala de tripulantes para executar os vôos. O problema pode ser dividido em cinco estágios de planejamento segundo o autor:

1. Escala de Vôo (*Flight Scheduling*): neste estágio é construída uma tabela com a programação de horários de todos os vôos a serem realizados. O desenvolvimento dessa tabela é baseado nas demandas de mercado. Por exemplo, pode-se ter a programação de um vôo partindo da cidade de Porto Alegre com destino ao aeroporto de Guarulhos na cidade de São Paulo nas segundas-feiras, quartas-feiras e sábados às 07:00 horas da manhã.

2. Alocação da Frota (*Fleet Assignment*): são designados os aviões para executarem todas as etapas de vôos. O aproveitamento de uma etapa de vôo depende da demanda e do tamanho do avião a ser usado. O objetivo é maximizar o lucro sujeito às restrições da etapa a ser voada usando a frota disponível.
3. Rota da Aeronave (*Aircraft Routing*): o *aircraft routing problem* envolve a rota do avião tal que todas as restrições de manutenção sejam satisfeitas, todos os vôos a serem voados sejam cobertos e o aproveitamento seja maximizado.
4. Rotação de Tripulação (*Crew Pairings*): um *pairing* é uma seqüência de etapas ou segmentos de vôo que começam e terminam em uma base domiciliar de tripulantes tais que em uma seqüência a cidade de chegada de uma etapa de um vôo coincide com a cidade de partida da próxima etapa de vôo. Em inglês, essa seqüência também é conhecida como *trip* ou *rotation*. Para (Mercier, 2005), um *pairing* é uma seqüência de períodos de serviço separados por descansos noturnos. E um período de serviço é uma seqüência de etapas de vôo separadas por um período curto de descanso chamado *sits*. Cada rotação possui um custo associado. O objetivo deste estágio de planejamento é encontrar um subconjunto desses *pairings* com custo mínimo e que cubra todas as etapas de vôo na programação exatamente uma vez. Este planejamento está sujeito a um número muito grande de regras e restrições.
5. Escala Mensal (*Bidlines / Rosters*): neste estágio é desenhada uma tabela de vôo mensal que pode ser executada pela tripulação usando o conjunto ótimo de rotações geradas no estágio anterior. Esta escala mensal é chamada *roster* ou *bidline* porque os pilotos podem concorrer (em inglês: *bid*) pelas linhas geradas baseados nas suas senioridades e outras considerações. Este estágio determina o número exato de tripulantes de cabine que a empresa aérea irá precisar para atender a demanda mensal e está sujeito a inúmeras restrições. Pimentel (Pimentel, 2005) salienta que a escala mensal deve indicar, também, situações em que o tripulante está cumprindo folga, sobreaviso¹, reserva², treinamento, férias, etc.

¹ *Sobreaviso*: período no qual o tripulante deve estar à disposição da empresa para a realização de um vôo não planejado.

² *Reserva*: período no qual o tripulante deve permanecer no aeroporto para a eventual realização de um vôo.

Com o intuito de detalhar os trabalhos analisados, esta revisão exhibe a descrição de uma variedade de estudos publicados nos últimos anos e procura identificar os métodos utilizados na solução dos problemas apresentados.

2.1 DESCRIÇÃO DOS TRABALHOS ANALISADOS

Beasley (Beasley, 1996) considerou o programa de escala de tripulação como sendo formado por K tripulantes para cumprir N tarefas com tempos de partidas e chegadas fixos de tal forma que cada tripulação não exceda um limite no tempo que pode ser gasto para executar o trabalho. É utilizada Programação Linear Inteira, a qual é relaxada no modo lagrangeano para fornecer um limite inferior que é melhorado através de um subgradiente de otimização. Finalmente, é incorporado um procedimento de árvore de busca neste limite inferior para resolver o problema.

Andersson (Andersson, 1997) iniciou fazendo uma revisão literária do problema de escalonamento de tripulações e apresentou diferenças entre as companhias aéreas européias e americanas. O trabalho demonstrou o sistema de escalas de tripulação *Carmem* que produz escalas com o horizonte maior que uma semana otimizando iterativamente um dia com a permanência de rotações fixas. Uma característica especial desse sistema encontra-se na base de regras para rotações entre tripulantes que permite que uma regra seja inserida e possa ser usada para verificar se uma rotação é viável.

Housos (Housos, 1997) declarou ter obtido resultados significativos resolvendo o problema das escalas de tripulantes aplicando duas estratégias: (1) corrigindo a heurística aplicada aos vôos que deve ser voado pela mesma tripulação com base em regras conhecidas, a maioria envolvendo a rotação de aeronaves; (2) dividindo o problema geograficamente e no domínio tempo para criar subproblemas os quais são otimizados à medida que se mantém a sobra da solução fixada. O trabalho obteve bons resultados, segundo reportou a companhia aérea alemã Lufthansa.

Vance (Vance, 1997) apresentou um modelo baseado num intervalo no processo de decisão que o divide em dois estágios. O primeiro estágio seleciona um conjunto de períodos de trabalho que cobrem os vôos na escala. O segundo estágio determina as rotações de tripulantes usando aqueles períodos. É sugerida uma abordagem envolvendo decomposição para solução do modelo. A formulação apresentada fornece um limite de Programação Linear mais estreito em comparação com a formulação *set partitioning* convencional, embora mais difícil de resolver. Os resultados computacionais demonstrados foram baseados em testes fornecidos por uma grande empresa aérea.

Anbil (Anbil, 1998) começou por uma visão geral sobre o problema das escalas de vôo e esquematizou uma abordagem de geração de colunas resolvendo a formulação *set partitioning*. Ele descreveu alguns truques para o desenvolvimento de habilidades para resolver grandes problemas. Apresentou uma variante da relaxação lagrangeana, a que chamou de algoritmo de volume, para gerar colunas e, então, usar a solução dual para ir de encontro ao método *Simplex* dual.

Cao (Cao, 1998) formulou o problema de escalonamento como um problema de busca de “K” limites de tempo restrito a caminhos disjuntos que visitam todos os vértices numa rede. Um limite inferior é encontrado via programação dinâmica. Este limite inferior é aperfeiçoado através de relaxação lagrangeana baseado em procedimentos de penalidade e subgradientes de otimização. Os resultados computacionais são dados por um número de problemas gerados aleatoriamente envolvendo entre 50 e 500 tarefas.

Ioachim (Ioachim, 1999) descreveu um tipo de restrição relacionada com a sincronização da escala na formulação dos problemas de roteamento e utilização da frota de aeronaves. A abordagem é baseada na geração de colunas e decomposição de Dantzig-Wolfe. O resultado do problema principal consiste em restrições cobrindo os vôos como numa aplicação usual e restrições para sincronização da escala. O subproblema correspondente é um problema de caminho mais curto com janelas de tempo e custos lineares nas variáveis de tempo e ele é resolvido através de um algoritmo de programação dinâmica. O procedimento de geração de colunas é incorporado dentro de um esquema *branch and bound* para obter soluções inteiras. Um

esquema de ramificação dedicado foi desenvolvido neste trabalho onde as decisões de ramificação são impostas nas variáveis de tempo. Os experimentos computacionais foram conduzidos utilizando dados semanais de roteamento da frota e de escala vindos de uma empresa aérea européia. Os problemas de teste foram resolvidos por otimização dentro de um tempo extremamente curto para a solução do subproblema e, depois de algumas melhorias, um tempo de solução para o problema principal muito eficiente.

Weinert (Weinert, 1999) fez uma abordagem utilizando a meta-heurística *Simulated Annealing* para o problema da geração das rotações, um subproblema do *crew scheduling problem*. Nas instâncias de testes o algoritmo obteve um desempenho superior a outras diferentes estratégias gulosas em tempo bastante razoável. Essa eficiência foi atribuída ao uso de uma solução inicial refletindo características particulares do problema a ser tratado e armazenando mudanças de custos. A qualidade da solução foi conseguida através de termos de penalização para as restrições relaxadas tão menores quanto possível na combinação com a rotina de processamento proposto, a combinação de *Simulated Annealing* com um uma heurística de aprimoramento do problema específico local que opera em vizinhanças maiores e o uso de múltiplas execuções independentes.

Pontes (Pontes, 2000) desenvolveu um método para resolução do problema envolvendo pilotos e comissários de voo na empresa aérea Rio-Sul. É usada uma abordagem híbrida que combina procedimentos heurísticos com programação matemática em várias etapas do processo o que gerou boas escalas em tempo satisfatório.

Meehan (Meehan, 2000) expôs um trabalho realizado na Air New Zealand. Um modelo básico de otimização foi desenvolvido para alocar vôos e manutenção para os aviões em um determinado período de tempo. Foram incorporadas ao modelo janelas de tempo de partida para permitir flexibilidade dentro da escala de vôo. Foi utilizado critério de prioridade para reduzir o número de aviões na frota. O modelo, como um problema *set partitioning* generalizado, foi solucionado com abordagens de programação linear, relaxação e *branch and bound*.

Lagerholm (Lagerholm, 2000) apresentou um novo método explorado dentro de um *framework of Potts neural networks* resolvendo problemas de otimização com uma topologia não-trivial tendo como alvo o problema de escalas de vôo em companhias aéreas. O ingrediente chave para lidar com as complicações topológicas é um propagador definido em termos de neurônios *Potts*. A abordagem é testada em problemas gerados artificialmente com base em problemas reais. Um problema real típico é resolvido em minutos, depois do ajuste do tamanho do problema baseado na análise da estrutura de chegada e partida de um aeroporto real. O artigo apresenta, ainda, uma breve revisão literária para facilitar aos menos familiarizados com técnicas de *Potts Neurons* e *Mean Field (MF)*.

Montana (Montana, 2000) desenvolveu um sistema de produção de escalas utilizando um planejador dinâmico baseado em algoritmo genético para funcionar no mundo real. O projeto deste planejador foi motivado pelas necessidades de reação rápida do sistema. Para isto são usados operadores genéticos que asseguram que o algoritmo genético esteja sempre manipulando escalas válidas e praticáveis e que um cromossomo traduz uma única escala. Além disso, o planejador usa uma abordagem iterativa para busca. Usando uma pequena população que aumenta rápido, trabalha muitas vezes numa única execução para encontrar escalas que mudam muito rapidamente. Este projeto foi desenvolvido para ser usado nas tripulações que compõe diversos esquadrões da Força Aérea dos Estados Unidos da América.

Cordeau (Cordeau, 2001) retratou em seu trabalho que dado um conjunto formado por etapas de vôo a serem cumpridas por somente um tipo de avião, é resolvido, de forma simultânea, um problema de escalonamento de tripulação e um problema de rotas de aeronave de modo a determinar um conjunto de custos mínimos para a seleção de rotas a serem efetuadas pelos aviões e as rotações entre as tripulações. A solução prevê que cada etapa de vôo seja cumprida por um avião e uma tripulação e as restrições independentes são satisfeitas. Enquanto algumas restrições independentes como tempo máximo de vôo e requisitos de manutenção envolvem somente tripulantes e aviões, restrições dependentes obrigam respeitar tempos mínimos de troca entre tripulantes que dependem das conexões entre aviões. Para tratar restrições dependentes, é proposta uma abordagem baseada em decomposição *Benders*. A solução processa iterações entre um problema principal que resolve o problema da rota da aeronave e um subproblema que

resolve a rotação dos tripulantes. Em virtude de suas estruturas particulares, ambos os problemas são resolvidos através da geração de colunas. Uma heurística *branch-and-bound* é usada para computar soluções inteiras. No conjunto de instâncias de testes, baseados em dados reais de uma empresa aérea, a abordagem integrada produziu economias significantes nos custos em comparação com o processo de planejamento seqüencial, mais comumente usado na prática. A maior instância solucionada contém mais de 500 etapas de vôo em um período de três dias.

Klabjan (Klabjan, 2001) descreveu um método para solucionar problemas com escalas de tripulantes para grandes empresas aéreas usando programação inteira baseada em abordagens heurísticas para solucionar a formulação *set covering*. O método possui um número de elementos que é usado para ativar uma solução de alta qualidade: tarefas e um grande número de rotações são gerados heurísticamente usando uma heurística gulosa aleatória. O problema é simplificado heurísticamente eliminando colunas, depois de um número de iterações de gerações de rotações e a relaxação LP ser resolvida para obter custos reduzidos. São obtidas soluções inteiras pela variação de sucessivas regras de ramificação que podam a quantia de tempo entre um vôo e a próxima rotação. Os resultados para o problema das escalas de serviço diário e semanal são apresentados para problemas envolvendo entre 450 e 650 vôos.

Klabjan (Klabjan, 2002a) concentrou o desejo em produzir escalas de tripulantes com regularidade semanal. A maioria dos vôos é repetida ao longo de todos os dias da semana. Para esses vôos se procura gerar as mesmas rotações em cada dia até o ponto que seja possível. Os autores apresentam duas formulações: uma formulação exata baseada em variáveis de rotações as quais são muito grandes para serem influenciadas pela solução direta. A segunda formulação é uma aproximação multi-comodidade envolvendo variáveis para conexões entre vôos. Combinando esses dois métodos, os autores gerenciam boas soluções usando programação inteira baseada em heurística. Os resultados com dados superiores a 500 vôos são apresentados resolvidos em uma máquina *cluster* com 48 e 160 processadores.

Yan (Yan, 2002a) considerou vários tipos de aeronaves, tripulantes em múltiplas bases, diversas classes de tripulantes de cabine (comandante, primeiro-oficial, copiloto) e as regras que envolvem o trabalho na empresa aérea de Taiwan no desenvolvimento de oito modelos para resolver rotações individuais ótimas entre tripulantes. Esses modelos são formulados como

Programação Linear Inteira. Para melhorar a eficiência são utilizados algoritmos baseados na geração de colunas, além de algumas redes para ajudar a gerar rotações praticáveis. Os subproblemas formulados coincidem com problemas de caminho mais curto.

Tu (Tu, 2002) introduziu um modelo de rede para aumentar a eficiência e resolver o problema das escalas de voo na Taiwan Airlines. O modelo foi formulado como um problema de fluxo de rede puro e resolvido pelo método *Simplex* utilizando algoritmos de decomposição de fluxo para obter as rotações entre tripulações a partir das soluções inteiras ótimas. A avaliação da eficiência do modelo no mundo real utilizou testes na operação de vôos internacionais da empresa chinesa. O autor comenta que o modelo obteve êxito e se mostrou capaz de solucionar o problema. Contudo, em função das restrições particulares de cada empresa, (Tu, 2002) não acredita que o mesmo modelo seja capaz de ser aplicado em outras companhias com a mesma eficiência.

Klabjan (Klabjan, 2002b) também abordou o problema através da integração parcial do planejamento de escala incluindo o problema das rotas das aeronaves e o problema das escalas de serviço das tripulações. Mais especificamente, fornecem mais flexibilidade para a escala de tripulantes mantendo a praticidade das rotas dos aviões adicionando restrições de contagem de aeronaves para o problema das escalas de voo. Além disso, assumem que os horários de partidas dos vôos não são fixos, permitindo deslocar o horário de partida do voo enquanto ele esteja dentro de uma dada janela de tempo. O trabalho demonstra produzir soluções para o problema de escalonamento de tripulações com custos significativamente menores que os obtidos através do modelo tradicional.

Cesta (Cesta, 2002) sugeriu um procedimento baseado em restrições para resolver o problema das escalas de voo com relações precedentes generalizadas (ou RCPSP/max). O algoritmo conta com uma restrição de satisfação do problema resolvendo um procedimento de busca dentro do problema das escalas de voo a qual gera um conjunto de tempos de partidas consistentes através da remoção iterativa de conflitos de recursos que sejam contrários a solução viável temporária. A chave para a eficiência do procedimento de busca é sua estratégia heurística de seleção de conflitos. Um método de amostra de conflito induzido, voltado à seleção do

mínimo conflito, ajusta quais atividades com os melhores requisitos é introduzido e, acoplado com uma escolha heurística não-determinística, orienta a base do processo de resolução do conflito. Esta busca dentro do problema das escalas de vôo é, então, incorporada dentro de um *framework* de busca de amostras-iterativas maior para uma cobertura de espaço de busca ampliado e promove a otimização da solução. A eficácia do algoritmo heurístico completo é demonstrada empiricamente em grandes conjuntos de problemas RCPSP/max de tamanho real estudados anteriormente.

Yan (Yan, 2002b) apresentou um estudo de caso para o problema das escalas de vôo aplicado à China Airlines. A formulação *set partitioning* é resolvida usando um algoritmo *branch and price* e um método de caminho mais curto para gerar novas rotações. Os resultados numéricos refletem a operação internacional da companhia aérea chinesa.

Barnhart (Barnhart, 2003) revelou que o procedimento seqüencial de escalas pode ser muito simples, contudo ele pode gerar soluções significativamente piores do que aqueles obtidos pela integração dos problemas de rota e escala. No momento em que uma tripulação deve ser substituída, deve-se levar em conta alguns aspectos, como por exemplo, o tempo de conexão mínimo necessário entre duas sucessivas etapas de vôo cobertas por uma mesma tripulação e se a aeronave vai continuar sendo usada na segunda etapa. Para situações que envolvam tais características, as decisões envolvendo o problema de rota da aeronave geram um impacto no conjunto de possíveis rotações entre tripulações. Deste modo, um procedimento de planejamento seqüencial pode vir a gerar soluções sub-ótimas.

Abdelghany (Abdelghany, 2004) descreveu uma ferramenta de suporte a decisão que automatiza o restabelecimento das tripulações durante operações irregulares em grandes empresas aéreas. O sistema restabelece os problemas com tripulação de maneira pró-ativa antes mesmo da sua ocorrência. Ele também fornece larga flexibilidade ao reagir em diferentes cenários de operação, incluindo atrasos de vôo, uso de tripulação de reserva e sobre-aviso, troca e abstenção de tripulantes. O problema é formulado como uma Programação Linear Inteira e é resolvido usando uma abordagem de rotação na qual uma seqüência de problemas de otimização de tarefas é solucionada para restabelecer vôos em uma ordem cronológica das suas partidas. Em

cada problema de tarefa, o objetivo é restabelecer o maior número de vôos possíveis minimizando o custo total do sistema e os atrasos de vôos.

Freling (Freling, 2004) discutiu um sistema de suporte a decisão para planejamento de escalas de tripulantes para empresas aéreas e férreas. O sistema é considerado uma solução estado-da-arte ao tratar o problema de escalonamento de tripulações e o problema das escalas de serviço. Ambos problemas são formulados como modelos *set partitioning*. Os resultados computacionais contêm uma comparação interessante de soluções obtidas com a abordagem na qual o problema das escalas de vôo é realizado antes do problema das escalas de serviço das tripulações e uma abordagem na qual os dois problemas são solucionados de maneira integrada.

Qi (Qi, 2004) apresentou um estudo para a classe dos problemas de escala aplicado ao centro de treinamento da empresa Continental Airlines. Quando os aviadores são promovidos e passam a ter que pilotar um outro tipo de aeronave, eles precisam passar por um tipo de treinamento que dura cerca de oito semanas consecutivas. Durante este tempo, eles são removidos de suas escalas e isto impõe um custo significante para a empresa. O autor formulou o problema com o objetivo de minimizar o custo total desse tipo específico de problema. As soluções são obtidas com um algoritmo *branch-and-bound* e uma família de heurísticas baseadas na idéia de *rolling horizon*. Após uma série de experimentos computacionais, os resultados indicam que é possível ser encontrada uma solução próxima da ótima dentro de limites de tempo aceitáveis. Os algoritmos foram implementados e estão em uso na Continental Airlines.

Jaszkiewicz (Jaszkiewicz, 2004) comparou os métodos *Genetic Local Search*, *Simulated Annealing*, *Pareto Simulated Annealing*, *Nondominated Sorting Genetic Algorithm*, *Controlled Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm*, *Strenght Pareto Evolutionary Algorithm*, *Multiple Start Local Search with Random Weight Vectors*, e um novo método: *Pareto Memetic Algorithm*. Ele conclui que os melhores desempenhos são os dos métodos *Multiple-Objective Genetic Local Search* (MOGLS) e *Pareto Memetic Algorithm* (PMA), sendo as versões do *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) as que obtiveram os piores desempenhos.

Kis (Kis, 2004) fez uma revisão na literatura mais recente envolvendo *Project Scheduling* e apresenta três livros publicados em 2002 e 2003. O primeiro, (Demeulemeester, 2002), fornece uma ampla cobertura da metodologia desenvolvida de todos os tipos de *Project Scheduling* explorados nos últimos anos. O livro fornece o estado-da-arte de uma larga escala de resultados fundamentais alcançados pela comunidade de pesquisa. A seleção do conteúdo é bastante compreensível e o nível de detalhe é adequado para um *handbook*. O segundo, (Dorndorf, 2002), concentra-se em um novo assunto: um raciocínio baseado em restrição para resolver *Project Scheduling Problems*. O livro apresenta uma excelente introdução para a solução de problemas de projetos de escalas restritos a recursos difíceis por meio de técnicas de propagação de restrições. Os problemas estudados são determinísticos, não-preemptivos e modelos *multi-mode* com tempos de intervalos mínimo e máximo entre as atividades do projeto. O autor apresenta o estado-da-arte no que se refere a técnicas projetadas por ele mesmo e seus colegas as quais encontram-se entre os melhores métodos para estas classes de problemas hoje. E, finalmente, o terceiro, (Neumann, 2003), desenvolve um sólido *background* teórico para uma classe de problemas e apresenta exemplos da transferência de resultados teóricos para a prática descrevendo várias aplicações. O autor exhibe uma visão geral de progressos recentes na solução de projetos de escala determinísticos, não-preemptivos com janelas de tempo e recursos escassos. O livro é muito mais do que uma revisão, fornecendo conhecimento matemático profundo e estabelecendo relações entre teoria e algoritmos práticos sempre que possível.

Mercier (Mercier, 2005) pressupôs um nível adicional de integração entre o problema das escalas de vôo e o problema das rotas das aeronaves adicionando algumas decisões de escala de vôo para integrar ambos os problemas. Mais especificamente, foi permitido um leve desvio no horário de partida de cada etapa de vôo a partir da escala planejada. Obviamente, o mesmo horário de partida tem que ser escolhido para ambos os aviões e tripulações, o que complica o problema. Entretanto, uma abordagem integrada leva vantagem e adiciona flexibilidade à escala aumentando os tempos de partida que são escolhidos levando-se em conta os benefícios para ambas as rotas das aeronaves e rotações de tripulações. Isso não seria possível em um planejamento sequencial, pois uma modificação na escala de um determinado passo poderia causar conseqüências inesperadas no próximo passo. A metodologia combina decomposição *Benders*, geração de colunas e procedimentos de geração de restrições dinâmicas.

Bélangier (Bélangier, 2005) exibiu um modelo para o problema da utilização periódica da frota de uma empresa aérea usando janelas de tempo onde os tempos de partida são determinados. As janelas de tempo permitem uma redução importante no número de aeronaves aumentando os resultados sobre o lucro. O benefício antecipado depende da escala e da seleção dos tipos de aeronaves aproveitados. Além disso, espaços curtos de tempo entre vôos consecutivos servindo a mesma origem-destino são penalizados. É proposta uma formulação de fluxo de rede multi-comodidade inteira não-linear. O trabalho apresenta, também, novas estratégias *bround-and-bound* incorporadas a estratégias de soluções *bround-and-price*.

Guo (Guo, 2005) assumiu que os tripulantes estejam estacionados, de forma irregular entre suas bases. Suas disponibilidades mudam dinamicamente durante o planejamento do período devido a atividades pré-escaladas como o serviço, propriamente dito, treinamento em simulador, férias, dias de folga, etc. A proposta é uma abordagem integrada parcialmente baseada em dois componentes acoplados fortemente: o primeiro constrói grupos de rotações de tripulantes espaçados por descansos semanais onde as capacidades dos tripulantes nos diferentes domicílios e as disponibilidades dependentes do tempo são consideradas. O segundo componente re-arranja partes destes grupos de rotações dentro de escalas individuais para cada tripulante como, por exemplo, a mesma distribuição de tempo de vôo.

Caserta (Caserta, 2005) demonstrou um novo algoritmo cujo ponto principal é um esquema primal-dual dirigido ligando qualquer solução primal a um vetor dual possível que melhor reflete a qualidade da solução primal. Este novo mecanismo é usado para mesclar Busca Tabu, Primal Intensivo, Relaxação Lagrangeana, Dual Intensivo em um esquema para construir um algoritmo que, progressivamente, reduz o intervalo entre os limites superior e inferior. O algoritmo foi testado em problemas apresentados na literatura. Este artigo mostra que o algoritmo foi capaz de encontrar soluções ótimas para quatro dos seis problemas do mundo real propostos.

Carvalho (Carvalho, 2005) propôs a utilização de Algoritmos Genéticos no problema de alocação de tripulação, especificamente na fase de escolha do melhor conjunto de escalas para cobrir os vários trechos de viagem, uma versão multiobjetivo do *set covering problem*. Apresenta justificativa para se trabalhar com a versão multiobjetivo, dado o contexto do problema,

encontrando um conjunto de soluções eficientes, um apoio para decisão de um agente externo. Mostra as idéias incorporadas ao Algoritmo Genético Clássico, e os resultados comprovam as melhorias obtidas em termos da qualidade da solução e do número de pontos na solução pareto-ótima. Os resultados obtidos são também comparados com outras meta-heurísticas apresentadas em (Jaszkiewicz, 2004).

Zeghal (Zeghal, 2005) tratou o problema de alocação de frota que, atualmente, é decomposto em dois outros subproblemas: o problema das rotações de tripulações e o problema das escalas de serviços dos tripulantes; o primeiro onde um conjunto de rotações entre tripulações é construído com o mínimo custo e cobrindo todos os segmentos de vôos e o segundo que combina rotações, períodos de folga, férias, descanso, treinamento, etc de modo a formar a escala de trabalho individual de cada membro da tripulação. No artigo, (Zeghal, 2005) demonstrou uma nova abordagem para o problema dentro do contexto de pequenas e médias companhias aéreas. Neste estudo, ambos os problemas são resolvidos de maneira simultânea preservando suas restrições específicas e é mostrado como o problema pode ser formulado através da programação linear de grande escala com uma estrutura combinando diferentes tipos de restrições dentre as quais restrições de cobertura ou particionamento não-exclusivas como sugerido em outros artigos ao longo dessa revisão literária. (Zeghal, 2005) introduziu uma formulação para o problema onde é substituído um grande número de restrições de exclusão por outras restrições menos numerosas e mais importantes: restrições *clique*. Finalmente, é proposto um método heurístico baseado em estratégias de arredondamento incorporadas a um procedimento de árvore de busca parcial. Os dados para os testes foram fornecidos pela empresa TunisAir.

Gamache (Gamache, 2005) considerou escalas mensais preferenciais para o problema das escalas de vôo e apresentou uma nova metodologia baseada em um modelo gráfico colorido e um algoritmo de Busca Tabu para determinar se o problema contém no mínimo uma solução viável. A abordagem proposta, então, é combinada com um método heurístico de escalas seqüenciais que usa técnicas de geração de colunas e *branch-and-bound*.

2.2 PROBLEMAS ABORDADOS E METODOLOGIAS EMPREGADAS

O estudo realizado demonstra que, ao longo do tempo, vários foram os métodos empregados para tratar o problema de escalas de vôo e o problema da escala de serviço das tripulações. Assim, o objetivo desta seção visa identificar as técnicas empregadas nos trabalhos analisados e oferecer uma representação mais compreensível.

2.2.1 Métodos Exatos

2.2.1.1 Inteligência Artificial (IA)

Inteligência Artificial trata da simulação de certos processos associados à inteligência humana usando máquinas, especialmente sistemas de computadores. Esses processos incluem aprendizado, raciocínio e autocorreção. Os Sistemas Especialistas e a Lógica Fuzzy constituem aplicações particulares da IA. As redes neurais artificiais são modelos abstratos, baseados nos sistemas nervosos naturais, formados por unidades interconectadas, chamadas *neurônios*. Uma rede neural tem a capacidade de, dado um conjunto de dados de entrada com os correspondentes dados de saída, ajustar seus parâmetros para tornar-se capaz de aproximar o valor de uma determinada função. Em um problema de otimização, esta função tem como domínio o conjunto das possíveis instâncias do problema e como imagem o conjunto das soluções (no sentido original, ligado à otimalidade) dessas instâncias. As principais vantagens das redes neurais artificiais são a adaptação eficiente a alterações (de modelo ou de instâncias), a estrutura facilmente paralelizável e a possibilidade de utilização de hardware específico (Russell, 1995).

Referência: (Lagerholm, 2000).

2.2.1.2 *Constraint Logic Programming* (CLP)

A Programação Lógica com Restrição é uma tecnologia de programação dedicada à solução de problemas combinatoriais complexos. Os dados, retratando um problema, são descritos por variáveis de domínio. Cada variável possui um domínio associado representando o conjunto de seus valores potencialmente possíveis. A CLP fornece uma poderosa ferramenta na

busca de soluções viáveis tanto para o problema de escalas de vôo quanto para o problema das escalas de serviço para as tripulações em que regras complexas dificultam a modelagem do problema com equações matemáticas. A integração da CLP com a programação matemática tem sido uma tendência nos trabalhos recentes.

Referência: (Klabjan, 2001).

2.2.1.3 Programação Dinâmica

Programação Dinâmica é uma técnica muito útil para se trabalhar com uma seqüência de decisões interrelacionadas. Ela fornece um procedimento sistemático para determinar a combinação ótima das decisões. Ao contrário da Programação Linear, na programação dinâmica não existe uma formulação matemática padrão. Ao invés disso, a programação dinâmica é um tipo geral de abordagem para solução do problema e as equações particulares usadas devem ser desenvolvidas para tratar cada situação. Então, se faz necessário um certo grau de perspicácia e visão acerca da estrutura geral dos problemas de programação dinâmica para reconhecer quando e como um problema pode ser resolvido por programação dinâmica. Em muitas aplicações de geração de colunas, a Programação Dinâmica é uma outra meta-heurística usada para resolver o problema do caminho mais curto ou o problema do caminho mais curto restrito (Hillier, 2001).

Referências: (Cao, 1998), (Ioachim, 1999), (Mercier, 2005).

2.2.1.4 Programação Matemática

O termo programação matemática é usado, com freqüência, como sinônimo de otimização em que se procura minimizar ou maximizar um objetivo mediante um conjunto de restrições. Programação linear, programação inteira linear e muitos problemas de fluxo de rede são casos especiais de programação matemática e são tratados como métodos de solução individual.

Referências: (Pontes, 2000), (Beasley, 1996), (Vance, 1997), (Meehan, 2000), (Yan, 2002a), (Abdelghany, 2004), (Zeghal, 2005).

2.2.1.5 Relaxação Lagrangeana

Relaxação Lagrangeana é usada para encontrar bons limites para programações, tipicamente, inteira e linear inteira. Isto é executado pela relaxação (remoção) de algumas restrições e incorporando-as como funções de penalidade no objetivo. Os problemas relaxados são mais fáceis de resolver do que o problema original. E o melhor limite pode ser encontrado pela atualização iterativa dos coeficientes de penalidade do objetivo. Os métodos de relaxação lagrangeana constituem um exemplo mais geral de meta-heurísticas de relaxação. Seja λ um vetor de números não negativos – chamados *multiplicadores de Lagrange* – e P um problema de minimização, com função objetivo f , que possui entre suas restrições, um conjunto (na forma $Ax \leq b$) de inequações sem as quais a resolução de P seria simples. Neste caso, a relaxação lagrangeana de P é um problema Relaxação Linear, ou seja, possui o mesmo conjunto de restrições de P , exceto por $Ax \leq b$. A função objetivo de Relaxação Linear é g tal que $g(x) = f(x) + \lambda (Ax - b)$. Se o conjunto de restrições a serem removidas de P possui a forma $Ax = b$, a função g será definida como $g(x) = f(x) + \lambda_1 (Ax - b) + \lambda_2 (-Ax + b)$, sendo λ_1 e λ_2 vetores de multiplicadores de Lagrange (Guignard, 2002).

Referências: (Beasley, 1996), (Anbil, 1998), (Cao, 1998), (Weinert, 1999), (Meehan, 2000), (Klabjan, 2001), (Caserta, 2005).

2.2.1.6 Geração de Colunas

Geração de colunas é uma técnica computacional usada para resolver problemas de Programação Linear ou Programação Linear de grande escala. As formulações de geração de coluna, normalmente, têm fornecido relaxações de Programação Linear mais precisas do que outras formulações mais compactas para o mesmo problema. Esta precisão é usada para reduzir a sobrecarga computacional ao explorar a árvore *branch-and-bound* quando solucionando programas lineares inteiros. De acordo com Lorena (Lorena, 2003), a técnica de geração de colunas pode ser aplicada a problemas lineares de grandes dimensões, no caso de não se dispor de todas as colunas *a priori*, ou quando se pretende resolver um problema utilizando a decomposição de Dantzig-Wolfe, onde as colunas correspondem aos pontos extremos do conjunto convexo de soluções factíveis do problema. Neste caso, o algoritmo para resolução

alterna entre um subproblema e um problema mestre restrito. A partir de um conjunto inicial de colunas, resolve-se o problema mestre obtendo-se as variáveis duais que serão utilizadas pelo subproblema para determinar novas colunas a serem consideradas no problema mestre.

Referências: (Anbil, 1998), (Ioachim, 1999), (Cordeau, 2001), (Klabjan, 2001), (Yan, 2002a), (Mercier, 2005), (Gamache, 2005).

2.2.1.7 *Branch and Bound*

Os esquemas *branch-and-bound* são, normalmente, usados para resolver Programação Linear Inteira. *Branch-and-bound* é um método algorítmico genérico utilizado para encontrar soluções ótimas em vários problemas de otimização, tanto discretas quanto combinatoriais. Ele pertence à classe dos métodos de enumeração implícitos e foi proposto pela primeira vez por A. H. Land and A. G. Doig em 1960. A idéia geral pode ser descrita em termos de busca pelo valor mínimo de uma função $f(x)$ sobre um conjunto de valores possíveis do argumento x chamado região viável. Ambos f e x podem estar em um universo arbitrário. Um procedimento *branch-and-bound* requer duas ferramentas: a primeira é um caminho inteligente de cobertura da região viável determinando sub-regiões viáveis menores. Isto é chamado de *branching* (ou ramificação), desde que o procedimento seja repetido recursivamente para cada uma das sub-regiões e que todas as sub-regiões produzidas formam naturalmente uma estrutura de árvore, chamada árvore de busca. Seus nodos são as sub-regiões construídas. Uma outra ferramenta é o *bounding* (ou bloqueamento, limitação) que é um modo rápido que visa encontrar o limite superior e o limite inferior para a solução ótima dentro de uma sub-região viável.

Referências: (Ioachim, 1999), (Cordeau, 2001), (Meehan, 2000), (Yan, 2002b), (Qi, 2004), (Bélanger, 2005), (Gamache, 2005).

2.2.1.8 *Branch and Price*

O método *branch-and-price* utiliza a técnica de geração de colunas em cada nó de uma árvore de busca *branch-and-bound* para obtenção de novas variáveis não básicas para o problema. *Branch-and-price* é uma generalização da programação linear baseada em *branch-and-bound*, especialmente desenvolvida para tratar formulações de programação inteira que

tenham um número grande de variáveis. A idéia básica do *branch-and-price* é simples. Colunas são deixadas fora da relaxação LP devido ao grande número de colunas existentes para tratar de forma eficiente e a maioria delas são associadas a variáveis iguais a zero em uma possível solução ótima. Então, para verificar o quão ótima é a solução, um subproblema, chamado *pricing problem*, é resolvido para tentar identificar colunas com um custo reduzido eficaz. Se tais colunas são encontradas, a LP é re-otimizada. O bloqueamento (ou *branching*) ocorre quando nenhuma coluna eficaz é encontrada, mas a solução LP não satisfaz as condições de integralidade. *Branch-and-price* aplica geração de colunas em todos os nodos da árvore *branch-and-bound*.

Referências: (Yan, 2002b), (Bélanger, 2005).

2.2.1.9 Network Flow

Os problemas de otimização em redes representam uma grande classe dentre os problemas de otimização. Como característica fundamental tais problemas são definidos em grafos $G=(N,E)$ nos quais N representa o conjunto de nós e E , o conjunto de arestas, *i.e.*, pares de nós. Um grafo de pequeno tamanho está representado na figura 1. Neste caso, as arestas estão direcionadas e são denominados arcos. Este tipo de grafo é denominado *dígrafo*. Podemos observar a presença de quatro nós, $N=\{i,j,k,l\}$, e oito arcos, $E=\{(i,l),(l,i),(i,k),(k,i),(j,k),(k,j),(k,l),(l,k)\}$. No dígrafo $G=(N,E)$, os nós poderiam estar representando quatro cidades e os arcos, as principais rotas a seguir para se chegar nestas localidades.

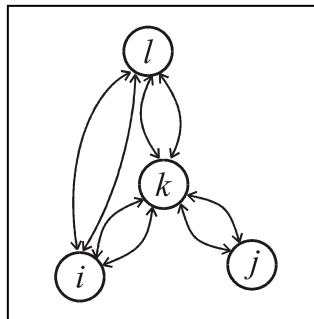


Figura 1. Grafo $G = (N = \{i,j,k,l\}, E = \{(i,l),(l,i),(i,k),(k,i),(j,k),(k,j),(k,l),(l,k)\})$.

Em alguns casos, o problema das escalas de vôo – *crew scheduling problem* – e o problema das escalas de serviço das tripulações – *crew rostering problem* – podem ser tratados como um modelo de rede e são usados métodos de fluxo de rede para resolver problemas completos ou subproblemas que aparecem nesta abordagem. Modelos de rede são usados para resolver subproblemas que surgem nos métodos de geração de colunas também.

Referências: (Cao, 1998), (Yan, 2002a), (Tu, 2002), (Bélanger, 2005).

2.2.1.10 *Set Covering*

Set Covering refere-se aos modelos nos quais o objetivo é cobrir a demanda de escalas com a equipe. Na maioria dos casos os modelos *set covering* são resolvidos usando métodos de programação inteira e geração de colunas. Os modelos *set covering* e *set partitioning* são largamente utilizados em problemas de escalas de pessoal, em particular para tratar o problema das escalas de vôo e o problema das escalas de serviço das tripulações.

O problema *Set Covering* é um problema de otimização combinatorial bem conhecido (Kinney, 2004). Dado uma matriz de incidência A , 0-1, com m linhas e n colunas, o problema é selecionar um subconjunto de colunas com peso mínimo garantindo que todas as linhas sejam cobertas. Formalmente, o *set covering* assume a seguinte forma:

$$(P1) \quad \text{Minimizar } z = \sum_{j=1}^n w_j x_j ; \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1; \quad i = 1, \dots, m ; \quad (2.2)$$

$$x_j \in \{0,1\}; \quad j = 1, \dots, n . \quad (2.3)$$

Se $a_{ij} = 1$, a coluna j cobre a linha i e w_j é o peso ou custo de j . Se a_j é selecionado para estar no subconjunto, x_j é ajustado para 1 e w_j é adicionado ao custo da solução. Quando $w_j = 1$ para todo j , o problema é dito *unicost*. A cardinalidade de qualquer solução P1, x , é o número $x_j = 1$ que, em caso *unicost*, é o valor da função objetivo Z . A relaxação da programação linear de P1

onde o x_j pode não ser um inteiro é denotada por P1 que tenha solução ótima x_{LP}^* e a função objetivo ótima Z_{LP}^* . A equação (2.1) representa a função objetivo a qual se quer minimizar, a equação (2.2) representa a restrição que garante que cada linha j deve ser coberta por uma coluna. A equação (2.3) garante que somente uma coluna é escolhida.

Referências: (Klabjan, 2001), (Carvalho, 2005).

2.2.1.11 Set Partitioning

Set Partitioning refere-se aos modelos que visam adaptar a demanda à equipe permitindo flexibilidade pelo uso de penalidades nas coberturas. O *set partitioning* é uma variação do *set covering* e os métodos de resolução são similares.

O modelo *set partitioning* básico aqui descrito e demonstrado por Gopalakrishnan (Gopalakrishnan, 2005), assume que todas as rotações viáveis já foram numeradas explicitamente e seus custos computados. Na realidade, este modelo não é capaz de gerar todas as rotações válidas, mas é aplicável desde que o número de rotações não seja muito grande. Um esquema de geração de colunas é, normalmente, empregado para geração implícita de rotações válidas. O problema das rotações de tripulações de busca de um conjunto de rotações com custo mínimo tal que cada etapa de vôo é coberta por exatamente uma rotação é apresentado a seguir:

$$\text{Min } \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad ; \quad (2.4)$$

sujeito a

$$P \cdot x = e \quad ; \quad (2.5)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad ; \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, n \quad ; \quad (2.6)$$

onde e é um vetor que possui m entradas iguais a 1. Cada linha da matriz P representa uma etapa de vôo e cada coluna representa uma rotação válida. O vetor de custo c é tal que c_j é o custo associado com a j -ésima coluna ou rotação. O vetor de decisão x é tal que x_j é uma variável 0-1 associada com a j -ésima rotação. Se a coluna j é selecionada, então $x_j = 1$ e zero, caso contrário.

A matriz P é construída da seguinte forma:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a etapa de vôo } i \text{ é coberta pela rotação } j, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Restrições adicionais no problema das escalas de vôo, chamadas de “restrições de base domiciliar de tripulação”, podem ser necessárias a qualquer tempo. Estas restrições, basicamente, restringem o número total de horas que o tripulante pode ficar fora de sua base domiciliar para estar dentro de limites específicos. Tais limitações atuam na alocação de tripulantes entre os vôos e tornam o problema das escalas de vôo mais difícil de ser resolvido. A equação (2.8) abaixo, representa as restrições de base domiciliar de tripulação podem ser modeladas como segue:

$$L_k \leq \sum_{j \in BASE_k} TAFB_j x_j \leq U_k; \quad (2.8)$$

Onde $BASE_k$ representa o conjunto de todas as rotações que iniciam na k -ésima base domiciliar de tripulação, tal que k varia sobre todas as estações base da tripulação. $TAFB_j$ é o tempo fora da base domiciliar para a rotação j . L_k e U_k são o limite inferior e o limite superior do tempo total fora da base domiciliar para todos os tripulantes baseados na k -ésima estação base domiciliar.

Considerando que o vetor custo c é dado por $c = [26 \ 20 \ 2 \ 26 \ 20 \ 26]$, a matriz P por

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

e o vetor decisão por $x \in \{0,1\}$ de dimensão 6.

O dual LP do *set partitioning problem* é

$$\text{Min } \pi^1 = \sum_i \pi_i; \quad (2.9)$$

sujeito a

$$\pi P \leq c. \quad (2.10)$$

Dado todas as rotações (*pairings*) e seus custos, uma solução viável inicial π^1 (2.10) para o problema dual pode ser obtida encontrando a razão mínima do custo da rotação e o número de etapas de vôo nesta rotação. Assim, pode ser usado

$$\pi_i^1 = \text{Min}_j \{ c_j / \# \text{ das etapas de vôo no } \textit{pairing} j \}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, m. \quad (2.11)$$

Desde que o custo de um *pairing* nunca é menor do que o valor do custo do tempo de vôo corrente de um *pairing*, pode-se utilizar os tempos de vôo das etapas de vôo para encontrar a melhor solução viável dual inicial. Assim, tem-se para a solução viável dual inicial π^2 (2.11):

$$\pi_i^2 = f \times (\text{tempo de vôo do vôo } i), \text{ para } i = 1, 2, \dots, m; \quad (2.11)$$

onde f é escolhido como o maior possível sujeito a π^2 sendo dual viável.

Referências: (Anbil, 1998), (Meehan, 2000), (Yan, 2002b), (Freling, 2004).

2.2.2 Métodos Heurísticos

2.2.2.1 Heurísticas Construtivas

Na prática, muitas vezes, é mais importante se obter uma solução viável por meio da sensibilidade rapidamente do que depender uma grande quantidade de esforço computacional para se atingir uma solução ótima ou próxima da ótima. Os algoritmos heurísticos fornecem meios para esta finalidade e costumam fornecer bons pontos de partida para atingir a melhor solução. Soluções manuais também são consideradas algoritmos heurísticos simples. Os métodos heurísticos, inicialmente, foram desenvolvidos e aplicados para problemas específicos, tais como o problema do Caixeiro Viajante, Empacotamento, Roteamento e Programação de Tarefas. Esta classe de heurísticas, denominadas construtivas, constituem métodos de busca que constroem uma solução a partir de regras baseadas nos dados do problema. Entretanto, constituem algoritmos específicos que podem requerer a análise de um especialista. Além disso, a eficácia da busca é de difícil demonstração analítica, de modo que a avaliação da heurística é realizada após a aplicação da mesma. É possível que o formulador, a princípio, demonstre matematicamente a eficiência da heurística, contudo, em boa parte dos casos, a caracterização do algoritmo de busca está fortemente baseada na experiência de um especialista (Veldhuizen, 2000).

Referências: (Housos, 1997), (Weinert, 1999), (Cordeau, 2001), (Klabjan, 2001), (Klabjan, 2002a), (Cesta, 2002), (Qi, 2004).

2.2.2.2 Busca Local

Os métodos de busca local ou busca em vizinhança são aqueles utilizados para melhorar uma solução viável, por exemplo, obtida através de uma heurística construtiva. Esses métodos são mais genéricos e podem ajudar na solução de uma variedade de problemas sem a necessidade de uma compreensão mais profunda acerca do mesmo. Basicamente, esses métodos procuram mapear as redondezas de uma solução viável, através de um critério estocástico ou combinatório. A avaliação segue a avaliação de dominância de Pareto. O desafio destes métodos é proporcionar soluções equidistantes nos conjuntos heurísticos H finais (Arroyo, 2002).

Referências: (Beasley, 1996), (Cao, 1998), (Montana, 2000), (Cesta, 2002), (Zeghal, 2005).

2.2.2.3 *Simulated Annealing* (SA)

Simulated Annealing (SA) é um algoritmo meta-heurístico que busca soluções ótimas globais. A idéia surge pela analogia aos processos de minimização de energia que ocorrem no lento resfriamento físico dos metais. Em altas temperaturas, o algoritmo aceita a pior solução com uma certa probabilidade como meios de escapar de soluções ótimas locais. A medida que a temperatura diminui, esta probabilidade converge para zero. Em cada nível de temperatura são aplicadas buscas locais.

Referências: (Weinert, 1999), (Jaszkiewicz, 2004).

2.2.2.4 Busca Tabu

Busca Tabu é um algoritmo meta-heurístico muito eficiente que possui a habilidade de guiar o processo de busca de métodos iterativos de melhoria. Neste contexto, Busca Tabu fornece meios de explorar o espaço de soluções além dos pontos em que a heurística que ela está guiando (um procedimento de busca local, por exemplo) encontraria ótimos locais. O processo no qual a meta-heurística busca transcender a otimalidade local se baseia em uma função de avaliação, que

escolhe, a cada iteração, o movimento com maior valor de avaliação na vizinhança da solução corrente, em termos de valor de função objetivo e restrições tabus (Glover, 1998).

Referências: (Caserta, 2005), (Gamache, 2005).

2.2.2.5 *Greedy Random Adaptive Search Procedure* (GRASP)

Existem alguns tipos de meta-heurísticas que iniciam com uma heurística construtiva gulosa simples que é aleatória e usada repetidamente em ordem para pesquisar a melhor solução. *Greedy Random Adaptive Search Procedure* (GRASP) é, provavelmente, a mais conhecida meta-heurística nessa categoria de operação. Ela é um processo iterativo em que cada iteração consiste de duas fases: primeiro, uma solução viável é produzida pela fase de construção aleatória e a segunda, em uma fase de busca local, uma solução ótima é procurada na vizinhança da solução construída. O GRASP combina as características de heurísticas de construção e de melhoramento. A estratégia deste método é acelerar o procedimento de busca local, através da construção de soluções próximas, ou ainda, vizinhas a ótimos locais razoáveis e eventualmente ao ótimo global. A fase de construção melhora, portanto o desempenho médio da fase de melhoria, sendo o GRASP por este motivo mais rápido e eficiente que os métodos de multi-partida (busca local com soluções iniciais construídas de forma totalmente aleatória). O método trabalha por amostragem em um espaço de soluções reduzido, sendo cada uma das iterações e suas respectivas soluções totalmente independentes entre si. Esta característica diferencia o método de outras meta-heurísticas como o *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos, onde a cada iteração utiliza-se informação dos passos anteriores para melhorar a solução corrente. Esta independência entre iterações torna o GRASP uma heurística naturalmente paralela (Morelli, 1999).

Referências: (Weinert, 1999), (Klabjan, 2001).

2.2.2.6 Algoritmos Genéticos

O Algoritmo Genético é uma meta-heurística especial na qual seu comportamento deriva a partir da metáfora de alguns mecanismos evolucionários encontrados na natureza. O procedimento envolve a criação, com uma representação que combina dados, de uma população de indivíduos representando as soluções viáveis. A população é atualizada continuamente pela

geração de novos membros da população a partir dos indivíduos existentes e removendo os membros mais fracos usando funções de aptidão. Depois de muitas iterações, o melhor indivíduo na população será, potencialmente, o ótimo, ou próximo do ótimo, solução para o problema.

Referências: (Montana, 2000), (Carvalho, 2005).

Esta revisão procurou fazer uma análise de diversos trabalhos relacionados ao problema de escalas de tripulações (*crew scheduling problem*) e ao problema das escalas de serviço dos tripulantes (*crew rostering problem*) publicados no meio científico e, largamente, referenciados. Foi feita uma pesquisa acerca dos métodos de solução utilizados onde se destacam os estudos (Ioachim, 1999), (Meehan, 2000), (Klabjan, 2002b), (Neumann, 2003) e (Bélanger, 2005) por utilizarem metodologia envolvendo janelas de tempo, abordagem que vem coincidir com a proposta deste trabalho.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DAS TRIPULAÇÕES EM EMPRESAS AÉREAS

Neste capítulo é descrito o problema das rotações de tripulações em uma empresa aérea – *airline crew pairing problem* – começando com a definição de algumas particularidades que nortearão a compreensão do problema. O estudo classifica os diversos tipos de tripulação aérea e traz uma visão sobre a regulamentação que rege a profissão e contribui para a definição das restrições que compõem o problema. Ao final, a pesquisa apresenta as categorias do problema e a respectiva estrutura de custos envolvida.

De acordo com Gopalakrishnan (Gopalakrishnan, 2005), a elaboração de escalas de trabalho em operações de voo é dividida em dois processos: a escala da frota de aeronaves e a escala de tripulantes para executar os vôos. O planejamento para a solução do problema obedece a uma hierarquia envolvendo cinco estágios:

1. Escala de Voo (*Flight Scheduling*): neste estágio é construída uma tabela com a programação de horários de todos os vôos a serem voados;
2. Alocação da Frota (*Fleet Assignment*): neste estágio são designados os aviões para executarem todas as etapas de vôos;
3. Rota da Aeronave (*Aircraft Routing*): neste estágio são definidas as rotas a serem operadas;
4. Rotação de Tripulação (*Crew Pairings*): neste estágio são determinadas as viagens ou as rotações a que a tripulação deverá cumprir. Um *pairing* é uma seqüência de etapas ou segmentos de voo que começam e terminam em uma base domiciliar de tripulantes tais que, em uma seqüência, a cidade de chegada de uma etapa de um voo coincide com a cidade de partida da próxima etapa de voo. Uma rotação (*pairing*) é uma seqüência de jornadas de trabalho separadas por descansos noturnos (Mercier, 2005). Nesta fase, objetivo encontrar um subconjunto desses *pairings* com custo mínimo e que cubra todas

as etapas de vôo na programação exatamente uma vez. Este planejamento está sujeito a um número muito grande de regras e restrições.

5. Escala Mensal (*Bidlines / Rosters*): neste estágio é desenhada uma tabela de vôo mensal que pode ser executada pela tripulação usando o conjunto ótimo de rotações geradas no estágio anterior. Esta escala mensal é chamada *roster* ou *bidline* porque os pilotos podem concorrer (em inglês: *bid*) pelas linhas geradas baseados nas suas senioridades e outras considerações.

A figura 2 ilustra o problema das escalas de vôo e os cinco estágios de subproblemas que o compõe.

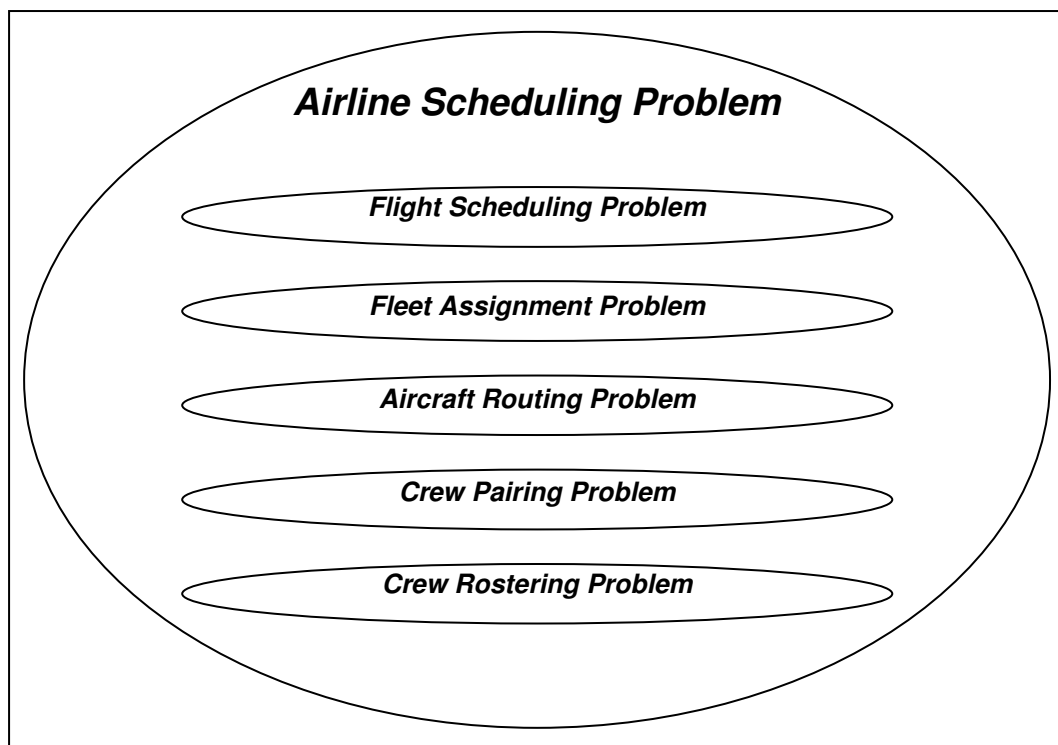


Figura 2. O Problema das Escalas de Vôo e os Cinco Estágios de Planejamento.

Assim, a proposta do problema das rotações de tripulações, tema deste trabalho, é gerar um conjunto de rotações de tripulações – *crew pairing* – de custo mínimo cobrindo todas as etapas de vôo. Em qualquer dessas etapas, é necessária uma tripulação de diferentes categorias. Algumas dessas categorias são: pilotos, primeiro-oficiais, comissários de vôo, etc. De acordo com Gopalakrishnan (Gopalakrishnan, 2005), a vantagem em se diferenciar as categorias de tripulação torna o tamanho do problema das escalas de vôo – *crew scheduling problem* – menor, uma vez que os pilotos, por exemplo, são profissionais qualificados para voar somente certos tipos de aviões e o problema pode ser visto como um conjunto de subproblemas para cada tipo de aeronave. Já o problema da escala dos comissários de vôo tende a ser maior porque estes profissionais costumam atender mais de um tipo de equipamento. Outro aspecto a se destacar é que pilotos e comissários de vôo obedecem a regras de trabalhos diferentes. Sendo assim, o problema das escalas de vôo, para essas duas categorias, pode ser tratado separadamente, embora haja similaridade entre a estrutura geral dos problemas.

3.1 DEFINIÇÕES

Para uma correta compreensão dos detalhes que compõem o problema das rotações de tripulações – *crew pairing problem* –, é importante que se tenha domínio de algumas definições:

- **Etapa de vôo** (*flight leg* ou *segment*): é um vôo simples sem escalas (*nonstop*);
- **Período de trabalho** (*duty period*): consiste de uma seqüência de etapas de vôo separadas por períodos curtos de descanso (*sits*). Neste intervalo estão incluídos os momentos de *brief* e *debrief* que ocorrem no início e no final de cada período de trabalho, respectivamente. Um *duty period* pode ser compreendido como um simples dia de trabalho intercalado por dois períodos de descanso noturno;
- **Rotação de tripulação** (*pairing*, *rotation* ou *trip*): um *pairing* pode ser visto como uma seqüência de períodos de trabalho intercalados por descansos noturnos. Cada *pairing* começa e termina na mesma base domiciliar de tripulantes. Em alguns casos, o tripulante pode voar como um passageiro em um *pairing*. Este tipo de ocorrência é

chamado *deadhead*. No Brasil, dizemos que o tripulante está voando na condição de “extra”;

- ***Deadheads***: tipicamente, usado para reposicionar um tripulante para uma cidade onde ele seja necessário para cobrir um vôo ou habilitar o tripulante para retornar a sua base domiciliar ao final de um *pairing*;
- ***Elapse***: é o tempo transcorrido de um período de trabalho incluindo os períodos de *brief* e *debrief*;
- **Tempo de vôo**: é o número total de horas do vôo corrente;
- **Tempo fora da base domiciliar** (*Time away from base - TAFB*): é o total do tempo transcorrido incluindo os descansos noturnos entre os períodos de trabalho em um *pairing*.

3.2 ALGUNS ASPECTOS COM RELAÇÃO À TRIPULAÇÃO

Campanhole (Campanhole, 2004) apresenta detalhes da regulamentação do profissional, habilitado pelo Ministério da Aeronáutica do Brasil, que exerce atividade a bordo de aeronave civil nacional, mediante contrato de trabalho. Este profissional é chamado de *aeronauta* e algumas das características dessa atividade serão utilizadas, principalmente, na elaboração das restrições do modelo proposto por este trabalho.

De acordo com Campanhole (Campanhole, 2004), Tripulação é o conjunto de tripulantes que exercem função a bordo de aeronave. Esta tripulação poderá ser considerada: mínima, simples, composta e de revezamento. Campanhole (Campanhole, 2004) classifica o tipo de tripulação como segue:

- **Tripulação mínima**: é a determinada na forma de certificação de tipo de aeronave e a constante do seu manual de operação, homologada, pelo órgão competente do

Ministério da Aeronáutica, sendo permitida sua utilização em vôos locais de instrução, de experiência, de vistoria e de traslado;

- **Tripulação simples:** é a constituída basicamente de uma tripulação mínima acrescida, quando for o caso, dos tripulantes necessários à realização do vôo;
- **Tripulação composta:** é a constituída basicamente de uma tripulação simples, acrescida de um piloto qualificado ao nível de piloto em comando, um mecânico de vôo, quando o equipamento assim o exigir, e o mínimo de 25% (vinte e cinco por cento) do número de comissários;
- **Tripulação de revezamento:** é a constituída basicamente de uma tripulação simples, acrescida de mais um piloto qualificado ao nível de piloto em comando, um co-piloto, um mecânico de vôo, quando o equipamento assim o exigir, e de 50% (cinquenta por cento) do número de comissários.

São considerados tripulantes:

- **Comandante:** piloto responsável pela operação e segurança da aeronave - exerce a autoridade que a legislação aeronáutica lhe atribui;
- **Co-Piloto:** piloto que auxilia o comandante na operação da aeronave;
- **Mecânico de Vôo:** auxiliar do comandante, encarregado da operação e controle de sistemas diversos conforme especificação dos manuais técnicos da aeronave;
- **Comissário:** é o auxiliar do comandante, encarregado do cumprimento das normas relativas à segurança e atendimento dos passageiros a bordo e da guarda de bagagens, documentos, valores e malas postais que lhe tenham sido confiados pelo comandante.

3.2.1 Regras

Para uma solução para o problema das rotações de tripulações ser considerada viável, as rotações – *pairings* – devem obedecer à regulamentação do FAA – *Federal Aviation Administration* –, os acordos sindicais das categorias dos trabalhadores e outras regras específicas de cada companhia aérea. Tais regras restritivas ajudam a reduzir o tamanho do problema, contudo podem tornar extremamente complexa a tarefa de determinar uma escala de tripulação ótima. Abaixo, são apresentadas algumas das regras seguidas pelas empresas que determinam a validade dos *pairings* referentes à jornada de trabalho:

3.2.2 Normas Norte-Americanas

- Dentro de um período de trabalho são previstos dois intervalos de descanso com limite mínimo de 45 minutos, e limite máximo de 4 horas, chamados *minsit* e *maxsit*, respectivamente, entre as etapas de vôo;
- O tempo transcorrido de um período de trabalho – *elapsed* – não deve exceder a 12 horas;
- O tempo máximo de trabalho durante um vôo, tipicamente, deve ser de 8 horas;
- *Pairings* válidos devem ser compostos de até um número máximo de períodos de trabalho chamados *maxduties*;
- Um *pairing* deve permitir um número mínimo de horas de descanso entre períodos de trabalho, chamados *minrest*. Este *minrest* pode precisar ser aumentado quando o tempo de vôo em um período de 24 horas exceder a 8 horas.

3.2.3 Normas Brasileiras

A jornada de trabalho de uma tripulação tem início a partir da apresentação no aeroporto em um período não inferior a 30 (trinta) minutos da hora prevista para o início do vôo e será considerada encerrada 30 (trinta) minutos após a parada final dos motores.

A duração da jornada de trabalho do aeronauta será de:

- 11 (onze) horas, se integrante de uma tripulação mínima ou simples;

- 14 (quatorze) horas, se integrante de uma tripulação composta;
- 20 (vinte) horas, se integrante de uma tripulação de revezamento.

Os limites de vôo e pousos permitidos para uma jornada serão os seguintes:

- 9 (nove) horas e 30 (trinta) minutos de vôo e 5 (cinco) pousos, na hipótese de integrante de tripulação mínima ou simples;
- 12 (doze) horas de vôo e 6 (seis) pousos, na hipótese de integrante de tripulação composta;
- 15 (quinze) horas de vôo e 4 (quatro) pousos na hipótese de integrante de tripulação de revezamento e
- 8 (oito) horas sem limite de pousos, na hipótese de integrante de tripulação de helicópteros.

O repouso terá a duração diretamente relacionada ao tempo da jornada anterior, observando-se os seguintes limites:

- 12 (doze) horas de repouso, após jornada de até 12 (doze) horas;
- 16 (dezesesseis) horas de repouso, após jornada de mais de 12 (doze) horas e até 15 (quinze) horas; 24 (vinte e quatro) horas de repouso, após jornada de mais de 15 (quinze) horas.

3.3 CATEGORIAS DE PROBLEMAS

Pode-se dividir o problema das rotações de tripulações em três categorias: o problema diário, o problema semanal e o problema completamente programado. Em cada um desses problemas, o propósito é encontrar um conjunto de rotações para uma dada categoria de tripulação e tipo de frota com custo mínimo que cubra todas as etapas de vôo. Abaixo segue a descrição de cada categoria iniciando pelo problema diário.

3.3.1 O Problema Diário

O problema diário considera que todos os vôos são executados em todos os dias da semana. Este tipo de problema assemelha-se mais às operações de vôo das empresas aéreas americanas. Tanto na Europa quanto na América do Sul, a escala de vôo não acontece assim de modo tão regular. A solução para o problema diário consiste de um conjunto de *pairings* tal que todos os vôos são cobertos em um único dia. A partir desta solução, é obtida uma versão programada para o horizonte de tempo necessário pela sua repetição depois do deslocamento da entrada do *pairing* por um dia. Isto assegura a cobertura de todos os vôos em todos os dias do horizonte de tempo.

3.3.2 O Problema Semanal

Assume-se que o problema semanal de escalas de vôo é aquele que a tabela de horários – *timetable* – se repete toda a semana. O problema semanal é, normalmente, resolvido através da solução prévia do problema diário. Na maioria das empresas norte-americanas a tarefa é, geralmente, modificar a solução diária para ajustar as exceções na escala semanal. Isto, freqüentemente, produz bons resultados. Já as companhias aéreas européias possuem muitas exceções semanais e ocorre que modificações na solução do problema diário pode resultar em uma solução muito distante da resolução ótima.

3.3.3 O Problema Mensal

Este problema é conhecido como *dated problem* e o seu horizonte de tempo é, habitualmente, um mês. Regularmente, para resolver este problema deve ser considerada a diferença entre semanas. Em função da ocorrência de feriados e mudanças na tabela de horários, a resolução deste problema não está tão-somente na extensão da solução encontrada para os problemas diário e semanal. Modificações na tabela de horários ocorrem devido a cancelamentos de vôos ou a introdução de novos vôos durante determinadas semanas em um mês. Segundo Gopalakrishnan (Gopalakrishnan, 2005), a tarefa de resolver o *dated problem* é mais desafiante do que solucionar os problemas diário e semanal juntos. Este problema pode sofrer fortes

influências da propriedade de regularidade dos problemas diário e semanal e isto pode resultar numa explosão no tamanho do problema. A tentativa de resolver o problema mensal usando a solução semanal pode resultar em soluções pobres.

3.4 UM EXEMPLO DE ESCALA DE VÔO

A tabela 1 exibe uma escala de vôo com seis vôos para serem voados durante todos os dias de um mês. Cada linha na escala de vôo corresponde a uma simples etapa de vôo. Em alguns casos ocorre que dois ou mais vôos combinados para serem voados pela mesma tripulação são mostrados como uma simples etapa de vôo. Cada etapa de vôo é identificada por um número, um local de origem e o horário de partida, um local de destino e o horário de chegada. Neste exemplo, assume-se que X é a única base domiciliar de tripulantes. Assim, todos os *pairings* válidos têm que partir e chegar em X. Assume-se, também, que o horário da base domiciliar de tripulantes é referência para todos os outros horários. Com o propósito de ilustrar esse exemplo, considera-se um *pairing* válido se ele satisfaz a três seguintes regras: (i) o tempo de duração do período de trabalho é, no máximo, 8 horas; (ii) pode haver, no máximo, dois períodos de trabalho em um *pairing*; (iii) o descanso noturno (DN) entre períodos de trabalho deve ser de, no mínimo, 9 horas. O tempo de vôo total de um *pairing* é definido como o somatório dos tempos de vôo de todas as etapas em um *pairing*. O tempo de vôo é determinado pela diferença entre o horário de chegada e o horário de partida da etapa. Um período de trabalho é definido através de um valor referente ao número de horas trabalhado para o dia de trabalho da tripulação. O custo do *pairing* neste exemplo é determinado pela diferença entre o tempo decorrido em que a tripulação está fora de sua base domiciliar e o tempo de vôo, ou seja, basicamente, é o número de horas em um *pairing* que a tripulação passa sem estar voando. Este custo é conhecido como *pay-and-credit*.

Tabela 1 - Escala de vôo

<i>Número da Etapa</i>	<i>Origem</i>	<i>Horário de Partida</i>	<i>Destino</i>	<i>Horário de Chegada</i>
1	X	07:00	Y	12:00
2	Y	14:00	X	19:00
3	X	06:00	Z	09:00
4	Z	11:00	X	15:00
5	Y	06:00	Z	09:00
6	Z	10:00	Y	12:00

A tabela 2 apresenta a lista de todos os *pairings* válidos nos dois dias tendo como origem a base domiciliar de tripulantes X. Há seis *pairings* válidos e para cada um existe um custo associado. O primeiro *pairing* válido na tabela 2 possui um custo de 26 porque o tempo em que a tripulação permaneceu fora da base domiciliar para este *pairing* é de 36 horas – das 07:00h do primeiro dia até às 19:00h do dia seguinte – e o tempo total voado é de 10 horas. Cada *pairing* será voado por uma tripulação, mas a solução para o problema de otimização não especifica qual tripulação assumirá estes *pairings* ou quantos tripulantes são necessários para repetir a escala em todos os dias do mês. Isto será determinado na fase de geração da escala mensal (*bidline* ou *roster*). No estágio de otimização do *pairing* da tripulação, o objetivo é encontrar uma partição das etapas de vôo usando um *pairing* válido que possua custo mínimo. O custo diário da operação das etapas de vôo na escala é igual ao custo diário da solução do *pairing* da tripulação.

Tabela 2 - Lista de *pairings* válidos

<i>Número do Pairing</i>	<i>Seqüência da Etapa de Vôo</i>	<i>Custo do Pairing</i>
1	1 ⇒ DN ⇒ 2	26
2	1 ⇒ DN ⇒ 5 ⇒ 4	20
3	3 ⇒ 4	2
4	3 ⇒ DN ⇒ 4	26
5	3 ⇒ 6 ⇒ DN ⇒ 5 ⇒ 4	20
6	3 ⇒ DN ⇒ 6 ⇒ 2	26

3.5 ESTRUTURA DE CUSTOS

A estrutura e os custos legais dos períodos de trabalho e das rotações são definidos pelo FAA e pelas regras dos acordos sindicais. Os salários das tripulações dominam de forma abrangente os custos com pessoal nas empresas aéreas. O modelo das rotações das tripulações considera somente o custo *pay-and-credit*, isto é, todos os custos adicionais como por exemplo o custo associado com a duração de tempo da tripulação fora de sua base domiciliar e os custos envolvendo o deslocamento de tripulantes-extras. Basicamente, é o custo que excede ao tempo de vôo. Além do custo com combustível, que é fixado para uma rotação válida, as causas principais do custo excedente de uma rotação são: (i) intervalos (*sit times*) longos e freqüentes dentro de um período de trabalho; (ii) períodos de descanso com longa duração; (iii) deslocamentos de tripulantes-extras. O custo de uma rotação é, tipicamente, computado usando a seguinte fórmula:

$$\text{Max} \{ \#duties \cdot \text{PMDG}, \text{TAFB Factor} \cdot \text{TAFB}, \text{Total Duty Cost} \}, \quad (3.1)$$

onde:

PMDG (Pairing Minimum Duty Guarantee ou garantia de um período de trabalho mínimo em uma rotação) é a garantia de número mínimo de horas a ser pago à tripulação por cada período de trabalho em uma rotação independente da duração do período de trabalho.

TAFB Factor é uma fração associada com o *TAFB (Time Away From Base* ou tempo em que a tripulação permanece fora de sua base domiciliar).

Total Duty Cost (ou custo total do período de trabalho) é a soma dos custos de todos os períodos de trabalho em uma rotação e é computado usando uma fórmula similar ao custo da rotação. O cálculo é dado por:

$$\text{DUTY COST} = \max \{ \text{MDG}, \text{Elapse Factor} \cdot \text{elapse}, \text{flying time} \}, \quad (3.2)$$

onde:

MDG (minimum duty guarantee) é a garantia de número mínimo de horas a ser pago à tripulação em um período de trabalho.

Elapse Factor é uma fração associada com o tempo transcorrido de um período de trabalho.

Gopalakrishnan (Gopalakrishnan, 2005) apresenta os valores exibidos na tabela 3 como sendo típicos para os fatores descritos acima:

Tabela 3 - Valores típicos de custos

PMDG = 5 horas	MDG = 3 horas	TAFB Factor = 2/7	Elapse Factor = 4/7
----------------	---------------	-------------------	---------------------

O total de horas de vôo em uma escala será um limite inferior no custo de uma dada escala. Rotações que possuam um alto TAFB relativo ao tempo total voado são consideradas

rotações caras, muito embora elas sejam necessárias para voar todas as etapas em uma escala de custo mínimo. O objetivo principal da otimização da rotação da tripulação é encontrar um conjunto de rotações que cubram todas as etapas de vôo exatamente uma vez e tenha custo tão próximo quanto possível do tempo total de vôo da escala.

4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A meta fundamental deste capítulo é mostrar, através das contribuições literárias adquiridas por ocasião da revisão bibliográfica, como vem sendo formulado o problema das rotações de tripulações. O estudo destaca os estudos de Pimentel (Pimentel, 2005) e Vance (Vance, 1997) por entender que os objetivos dos mesmos coincidem com o objetivo deste trabalho.

O problema das rotações de tripulações consiste em designar um determinado número de tripulações a um conjunto de vôos a serem realizados, minimizando-se o custo total de operações. Qualquer solução para o problema das rotações de tripulações deve satisfazer uma série de restrições e estas precisam ser levadas em consideração no modelo matemático. Todas as soluções para as rotações devem ser validadas, ou seja, é necessário que elas satisfaçam todas as regras impostas tanto pelo FAA quanto pela legislação dos governos locais e regulamentos específicos de cada companhia aérea. Normalmente, o problema das rotações de tripulações é resolvido em duas fases: primeiro, todas as rotações válidas são geradas e seus custos computados; depois, é escolhido um bom subconjunto de rotações para cobrir todas as etapas de vôo (Goldbarg, 2000).

Pimentel (Pimentel, 2005) destaca que a separação do problema das rotações de tripulações em duas etapas – geração das rotações e obtenção do conjunto de rotações de mínimo custo – simplifica bastante a formulação do problema, pois considera as restrições impostas às rotações apenas na primeira fase, eliminando-as da formulação matemática do problema de otimização a ser resolvido na segunda fase, o que o torna significativamente mais simples. Entretanto, ao mesmo tempo em que a separação facilita a modelagem do problema, ela cria outras dificuldades. Para que essa separação seja equivalente a resolver o problema de forma integrada, seria necessário gerar um conjunto contendo todas as rotações viáveis possíveis, o que nem sempre é viável para um problema real. Chu (Chu, 1997), utilizando uma heurística de contagem, estimou a ordem de grandeza entre 10^{12} e 10^{15} ao gerar um conjunto de rotações para uma malha diária de MD-80 da American Airlines contendo 1000 trechos de vôo. Portanto, ainda

que fosse possível gerar todas essas rotações em um curto espaço de tempo, o problema *set-partitioning / set-covering* a ser resolvido teria um porte acima do que é possível tratar atualmente.

De acordo com Vance (Vance, 1997), o problema das rotações de tripulações vem sendo formulado como um problema de particionamento da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{p \in P} C_p y_p \quad ; \quad (4.1)$$

sujeito a :

$$\sum_{p: i \in P} y_p = 1 \quad , \quad i \in F \quad ; \quad (4.2)$$

$$y_p \in \{0,1\} \quad , \quad p \in P \quad ; \quad (4.3)$$

onde F é o conjunto das etapas de vôo e P o conjunto de todas as configurações de atendimento consideradas. y_p é uma variável binária assumindo o valor igual a 1 se a configuração de tripulação $p \in P$ está na solução e zero, caso contrário. A coluna p possui uma entrada igual a 1 na linha i se o vôo i está atendido pela configuração p e c_p é o custo da configuração p . Para que se possa utilizar essa formulação se faz necessário gerar configurações viáveis para o problema (Goldbarg, 2000). A equação (4.1) é a função objetivo que procura minimizar o custo da rotação (*pairing*). A equação (4.2) especifica se o *pairing* p está na solução. A restrição (4.3) garante que somente uma tripulação fará parte do *pairing*.

4.1 TRATANDO O REPOSICIONAMENTO DE TRIPULANTE (*DEADHEAD*)

De acordo com Gopalakrishnan (Gopalakrishnan, 2005), pode ser usada uma formulação *set-covering* para tratar a necessidade de reposicionamento de tripulantes (*deadhead*). Em tal situação, uma ocorrência da linha representa uma etapa de vôo para um tripulante e as outras são tratadas como *deadheads*. Se as etapas de vôo regulares e o tripulante-extra tendem a ter custos diferentes, isto pode resultar em algumas distorções no custo da coluna para um *pairing* com *deadhead* porque o método de otimização não diferencia os tripulantes, levando a resolução do problema a uma solução sub-ótima (Bornemann, 1982).

Rubin (Rubin, 1973) e Anbil (Anbil, 1991) propõem modelos alternativos usando uma abordagem *set-partitioning*. Neste caso, podem ser descartadas as etapas de voo de alguns *pairings* e as etapas eliminadas são consideradas *deadheads* no *pairing*. O custo adicional ocorrido quando o tripulante voa como passageiro, seja usando a mesma empresa ou outra companhia aérea, pode ser fatorado dentro do custo do *pairing*. Normalmente, a ocorrência de *pairings* contendo *deadheads* deve ser verificada em todos os vôos possíveis antes da geração dos *pairings* válidos. Este procedimento, às vezes, não é feito porque ele pode causar uma explosão no tamanho do problema além de causar frações de *deadheads* na solução final do problema. Usualmente, consideram-se dados históricos e outras técnicas para selecionar uma fração pequena do conjunto de todos os vôos com *deadheads*. Quando são gerados os *pairings* válidos e seus custos computados eles já devem levar em conta a presença ou não dos *deadheads*.

A vantagem desta abordagem de tratamento dos *deadheads* é que ela não causa aumento no número de linhas no modelo *set-partitioning*. A desvantagem é que novas colunas que representam os *pairings* com *deadheads* devem ser incluídas no modelo e isso aumenta muito o tamanho do problema. Outro aspecto reside no fato de que gerar *pairing* válidos desta forma consome mais tempo do que considerar todos os vôos contendo *deadheads* e distingui-los a partir das etapas de voo da escala.

A abordagem apresentada por (Barnhart, 1998a) considera todas as possibilidades de *deadheads* e utiliza uma rede onde um arco representa uma etapa de voo. Todos os vôos que ou partem ou chegam em uma estação não na escala de voo são eliminados. Depois disso, para cada voo que pode ser usado como um *deadhead* é considerado um *pairing* que contém este voo e o custo apropriado. Se tal *pairing* não existir, a etapa de voo é eliminada do conjunto de possibilidades de *deadheads*. O processo de escolha pode se tornar eficiente calculando um *pairing* parcial com custo mínimo que inicia na base domiciliar de tripulantes e termina na estação de partida da etapa de voo com *deadhead*. Um outro *pairing* parcial com custo mínimo é calculado tomando como origem agora a estação de partida da etapa de voo com *deadhead* e terminando na base domiciliar de tripulantes. Combinando esses dois *pairings* parciais temos como resultado um único *pairing* com os custos dos dois considerados.

4.2 FORMULAÇÃO DA ETAPA DE GERAÇÃO DAS ROTAÇÕES

Na literatura analisada, observa-se que a maioria dos trabalhos utiliza modelagens em grafos para a fase de geração das rotações. Os dois tipos de grafos mais comumente adotados são:

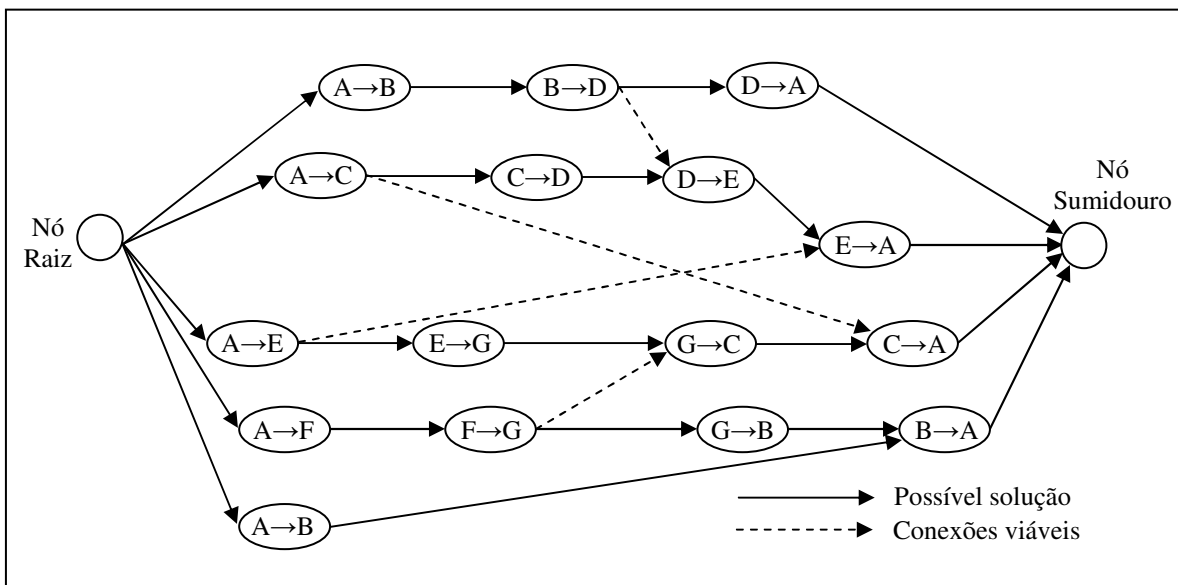
- **grafo de trechos de vôos** (*segment timeline network*): cada vôo é representado por um nó no grafo e os arcos conectam todos os pares de vôos entre os quais houver possibilidade de conexão;
- **grafo de jornadas de serviço** (*duty timeline network*): são conjuntos de trechos de vôos a serem realizados durante a jornada de trabalho dos tripulantes que devem obedecer a diversas restrições impostas pela regulamentação. A cada jornada de trabalho é associado um nó e os arcos conectam todos os pares de jornadas entre os quais existe possibilidade de conexão.

De acordo com Pimentel (Pimentel, 2005), toda jornada de trabalho corresponde a um caminho no grafo de trechos de vôos e toda rotação corresponde a um grafo de jornada de trabalhos ou rotações, em virtude das restrições impostas a estes últimos. No caso de jornadas de serviço, para que a modelagem não exclua nenhuma possibilidade de combinação entre os trechos de vôos, é necessário gerar todas as jornadas possíveis. Como as jornadas têm pequena duração e precisam satisfazer a diversas restrições, geralmente faz-se a enumeração completa das mesmas. O tamanho do grafo aumenta consideravelmente em relação ao primeiro caso. Para ilustrar as modelagens descritas, tabela 4 exhibe a seguinte malha de vôos:

Tabela 4 - Malha de vôos com base domiciliar na localidade A

<i>Número do Vôo</i>	<i>Dia</i>	<i>Origem</i>	<i>Horário de Partida</i>	<i>Destino</i>	<i>Horário de Chegada</i>
1	1	A	07:00	B	07:55
2	1	B	08:30	D	09:40
3	2	A	09:00	C	11:15
4	2	C	12:00	D	13:00
5	2	D	15:10	A	16:00
6	3	A	15:25	E	16:40
7	3	A	15:50	B	16:40
8	3	E	17:10	G	19:00
9	3	D	17:15	E	18:25
10	3	E	19:10	A	20:10
11	4	A	10:20	F	13:10
12	4	F	13:40	G	14:45
13	4	G	15:50	B	18:00
14	4	G	16:00	C	19:50
15	4	C	20:40	A	22:30
16	4	B	20:50	A	21:30

A figura 3 apresenta um grafo definido a partir dos trechos de vôo. Este tipo de grafo também pode ser utilizado para uma estratégia de solução integrada que funciona melhor para problemas de pequeno porte.

**Figura 3. Grafo de Trechos de Vôo.**

O grafo de jornadas de trabalho é apresentado na figura 4. Uma característica nesse grafo é que um mesmo trecho de vôo pode aparecer em mais de uma jornada de trabalho. Segundo Pimentel (Pimentel, 2005), neste caso, não se deve visitar todos os nós como no grafo de trechos de vôo. Outro aspecto relevante é a dificuldade que pode ser encontrada ao utilizar este tipo de grafo para malhas muito grandes, pois se forem enumeradas todas as jornadas de serviço viáveis, o número de arcos pode chegar à ordem de 10^{10} . Esta característica dificulta a aplicação de algoritmos como os de caminhos mínimos, usados nas abordagens por geração de colunas, onde os caminhos mínimos correspondem às rotações que apresentam menores custos reduzidos.

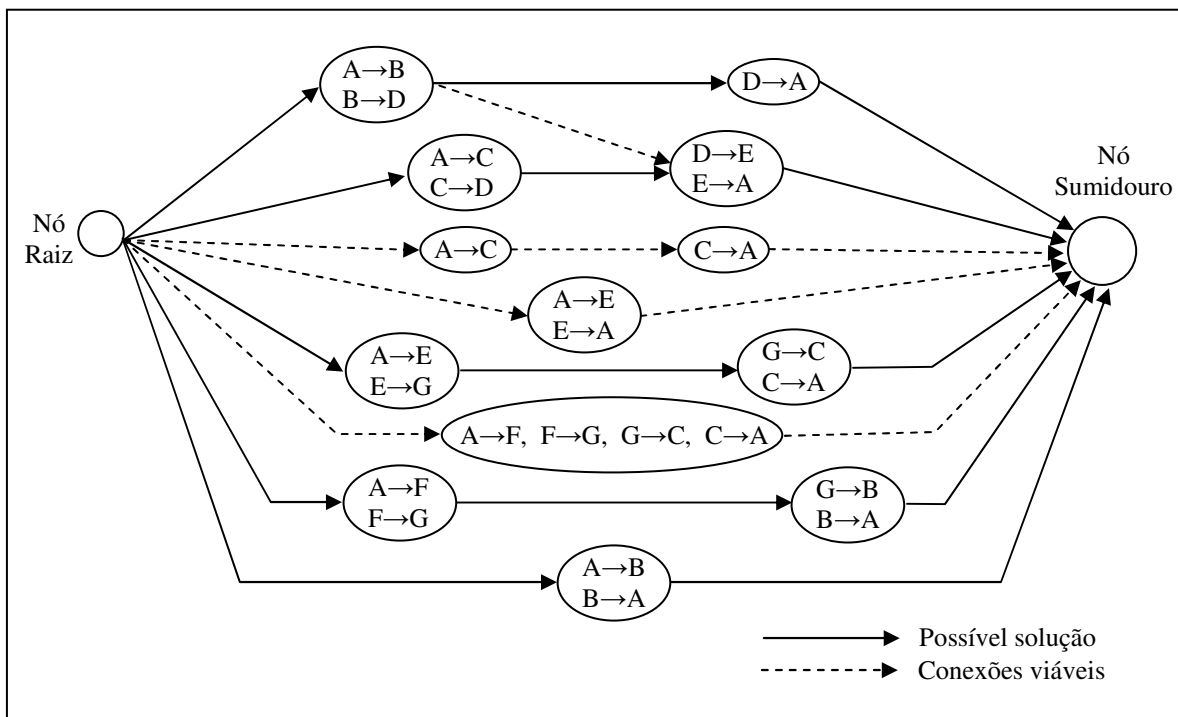


Figura 4. Grafo de Jornadas de Trabalho.

4.3 FORMULAÇÃO DA ETAPA DE OTIMIZAÇÃO

Conforme mencionado no início deste capítulo, os modelos mais utilizados na literatura utilizam o particionamento e o recobrimento de conjuntos, inclusive considerando o aspecto do *deadheading*, ou tripulante-extra. A aplicação deste último ao problema assume a seguinte forma:

Seja $T = \{t_j : j \in J\}$, $J = \{1, 2, \dots, n\}$, o conjunto de todas as rotações viáveis para o problema. Tais rotações apresentam custos $\{c_j : j \in J\}$ e devem cobrir o conjunto de trechos de vôo $F = \{f_i : i \in I\}$, $I = \{1, 2, \dots, m\}$. Os vôos cobertos por uma rotação $t_j \in T$ são denotados por $F_j = \{f_i : i \in I_j\}$, onde $I_j \subseteq I$ é o conjunto dos índices de vôo. Da mesma forma, as rotações que contêm o vôo $f_i \in T$, são denotadas por $T_i = \{t_j : j \in J_i\}$, onde $J_i \subseteq J$ é o conjunto dos índices destas rotações.

As rotações são originadas em um conjunto $B = \{b_k : k \in K\}$, $K = \{1, 2, \dots, r\}$, de bases. A base associada à rotação $t_j \in T$ é identificada por $b_k \in B$ e o tempo requerido para implementação desta rotação é denotado por h_k . Os tripulantes da base b_k devem trabalhar um número total de horas dentro do intervalo $(\delta_k^l, \delta_k^u]$ durante o horizonte de tempo considerado. O conjunto de rotações que tem por base b_k é denotado por $T^k = \{t_j : j \in J^k\}$, onde $J^k \subseteq J$ é o conjunto dos índices destas rotações.

Um modelo *set-covering* generalizado para o problema é definido a partir de um conjunto $\{x_j : j \in J\}$ de variáveis binárias 0-1 que controlam a inclusão ($x_j = 1$) ou não ($x_j = 0$) da rotação $t_j \in P$ em uma solução. O modelo é descrito por:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{j \in J} c_j x_j ; \quad (4.4)$$

Sujeito a :

$$\sum_{j \in J_i} x_j \geq 1, \quad i \in I; \quad (4.5)$$

$$\delta_k^l < \sum_{j \in J^k} h_{k_j} x_j \leq \delta_k^u, \quad k \in K; \quad (4.6)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad j \in J. \quad (4.7)$$

Cada linha do primeiro grupo de restrições representa um vôo operado pela empresa e deve fazer parte de pelo menos uma das rotações da solução (4.5). No caso de um vôo estar contido em mais de uma rotação, um dos tripulantes realizará o vôo e os demais serão transportados como passageiros, operação denominada *deadheading*. O segundo grupo de restrições (4.6) refere-se à disponibilidade de tripulantes nas diferentes bases domiciliares do

problema. O limite inferior adotado pode ser diferente de zero no caso em que a companhia deseje que não mais que um certo número de tripulantes em cada base seja designado a ficar de reserva, ou seja um volume mínimo deve ser atribuído. O limite superior representa o máximo de trabalho a ser atribuído a cada base em função da disponibilidade de tripulantes. A restrição (4.7) garante que somente um horário de partida é escolhido para toda a etapa de vôo no caminho j . O modelo (4.4) a (4.7) foi ajustado para melhor tratar a questão do tripulante-extra. Em (4.4) observa-se que $\sum_{j \in J_i} x_j - 1$, para um dado $i \in I$, indica a sobrecobertura do vôo f_i . Se tomarmos d_i como sendo o custo unitário de sobrecobertura deste vôo, a função objetivo abaixo parece ser suficientemente adequada para tratar os *deadheadings*:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{j \in J} c_j x_j + \sum_{i \in I} d_i \left(\sum_{j \in J_i} x_j - 1 \right) = \sum_{j \in J} (c_j + \sum_{i \in I_j} d_i) x_j - \sum_{i \in I} d_i. \quad (4.8)$$

Um modelo *set partitioning* generalizado para o problema é obtido substituindo-se (4.2) por uma restrição de igualdade:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{j \in J} c_j x_j ; \quad (4.9)$$

Sujeito a :

$$\sum_{j \in J_i} x_j = 1, \quad i \in I ; \quad (4.10)$$

$$\delta_k^l < \sum_{j \in J^k} h_{kj} x_j \leq \delta_k^u, \quad k \in K ; \quad (4.11)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad j \in J. \quad (4.12)$$

Observa-se na literatura que, para a determinação da função de custos, é adotada uma função linear aproximativa. Para uma melhor compreensão do modelo, tome-se como exemplo os vôos apresentados na tabela 4, considerando apenas três rotações viáveis a partir do grafo exibido na figura 2 e apenas uma base domiciliar associada ao problema (A). O modelo resultante seria como o descrito na figura 2 e teria a seguinte forma:

$$\text{Minimizar } z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 ; \quad (4.13)$$

Sujeito a:

$$(A \rightarrow B) \quad x_1 + x_2 \geq 1 ; \quad (4.14)$$

$$(B \rightarrow D) \quad x_1 + x_2 \geq 1 ; \quad (4.15)$$

$$(A \rightarrow C) \quad x_3 \geq 1 ; \quad (4.16)$$

$$(C \rightarrow D) \quad x_3 \geq 1 ; \quad (4.17)$$

$$(D \rightarrow E) \quad x_2 + x_3 \geq 1 ; \quad (4.18)$$

$$(E \rightarrow A) \quad x_2 + x_3 \geq 1 ; \quad (4.19)$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0 . \quad (4.20)$$

O custo de cada coluna depende mais fortemente dos intervalos entre os vôos do que diretamente dos mesmos, uma vez que os dias inativos e os pernoites em hotéis ou períodos de inatividade durante a jornada representam as parcelas de maior custo em uma rotação. A forma de remuneração da tripulação é outro aspecto relevante, pois costuma variar de acordo com os contratos de trabalho adotados pela empresa e a regulamentação vigente. Algumas companhias aéreas remuneram um mínimo garantido de horas por dia ou por mês; outras pagam em função do trabalho realizado, por quilometragem ou por horas voadas. Além disso, em decorrência da estratégia da empresa, a função objetivo do problema pode variar. Dois desafios fundamentais para a resolução do *crew pairing problem* utilizando um dos modelos apresentados seriam:

- encontrar um método para gerar um número não explosivamente grande de colunas e que, assim, contenha soluções de boa qualidade;
- conseguir obter soluções exatas – ou aproximadas, de boa qualidade – para as instâncias de recobrimento / particionamento generalizado resultante.

Segundo Pimentel (Pimentel, 2005), as maiores instâncias resolvidas com garantia de otimalidade para modelos de partição envolvem não mais de 5 milhões de rotações explicitamente geradas a partir de 100 vôos. Os problemas *set-partitioning* e *set-covering* são classificados como *NP-Hard* e para essa classe de problemas não se tem garantia de obtenção de soluções ótimas em tempo polinomial (Pimentel, 2005). Assim, os algoritmos desenvolvidos para tratar este tipo de problema baseiam-se, normalmente, em técnicas de enumeração implícita e

podem envolver uma combinação de técnicas heurísticas, relaxações lineares, relaxação lagrangeana, planos de cortes, etc.

Este capítulo apresentou a formulação do problema das rotações de tripulações como um problema de particionamento e destacou como alguns autores vêm tratando a particularidade do tripulante-extra (*deadheading*). O estudo exibiu a contribuição de Pimentel (Pimentel, 2005), que propõe a separação do problema das rotações de tripulações em duas etapas – geração das rotações e obtenção do conjunto de rotações de mínimo custo – , e apresenta os dois tipos de grafos mais comumente utilizados para as modelagens das respectivas etapas.

5 META-HEURÍSTICA BUSCA TABU

Um estudo mais aprofundado sobre a meta-heurística Busca Tabu é descrita neste capítulo. Como já foi mencionado no capítulo 2, Busca Tabu é um algoritmo muito eficiente que possui a habilidade de guiar o processo de busca de métodos iterativos de melhoria.

Busca Tabu teve origem a partir de uma solução para problemas de programação inteira proposta por Glover (Glover, 1998) com aplicação em problemas de otimização combinatória na área de Pesquisa Operacional. De forma independente, Hansen (Hansen, 1986) também propôs uma técnica semelhante que ele denominou de SAMD (*Steepest Ascent, Mildest Descent*), usada para resolver o problema da satisfabilidade. Contudo, Fred Glover é considerado o criador do algoritmo Busca Tabu (Viana, 1998).

5.1 O MÉTODO

Partindo de uma solução inicial s_0 , o método explora a cada iteração, um subconjunto V da vizinhança $N(s)$ da solução corrente s . Considerando o problema de minimização de uma função $f(\cdot)$, o membro s' de V com menor valor nessa região torna-se a nova solução corrente mesmo que s' seja pior que s , isto significa que $f(s') > f(s)$. Entretanto, a melhor solução gerada até o momento, s^* , é sempre armazenada.

O critério de escolha da nova solução é utilizado para tentar escapar de um mínimo local. Esta estratégia, no entanto, pode fazer com que o algoritmo torne-se repetitivo, ou seja, que retorne a uma solução já gerada anteriormente.

De forma a evitar que isto ocorra, existe um mecanismo chamado *memória de curto prazo* ou Lista Tabu que tem como objetivo tentar evitar movimentos que levem a regiões já visitadas do espaço de soluções, o que, usualmente, é alcançado pela proibição dos últimos movimentos realizados. Esses movimentos são armazenados nesta lista e permanecem proibidos (com *status* tabu), por um dado número de iterações, chamado *tabu tenure*. Assim, na exploração do conjunto V da vizinhança $N(s)$ da solução corrente s , ficam excluídos da busca os vizinhos s' que são

obtidos de s por movimentos m que constam na Lista Tabu . O uso da Lista Tabu pode ser muito restritivo para a busca no espaço de soluções, desta forma, para não desconsiderar soluções de alta qualidade, movimentos com *status* tabu podem ser aceitos se a nova solução produzida satisfaz um *critério de aspiração*. Este é um mecanismo que retira, sob certas circunstâncias, o *status* tabu de um movimento. Deste modo, para cada possível valor v da função objetivo existe um nível de aspiração $A(v)$: uma solução s' em V pode ser considerada se $f(s') \leq A(f(s))$, mesmo que o movimento m esteja na Lista Tabu . A função de aspiração A é tal que, para cada valor v da função objetivo, retorna outro valor $A(v)$, que representa o valor que o algoritmo aspira ao chegar de v . Um critério de aspiração geralmente utilizado é o *critério de aspiração por objetivo*. Por este critério, uma solução s' , ainda que seja gerada através de um movimento tabu, é aceita se $f(s')$ for melhor que $f(s^*)$ (no caso de minimização, $f(s') < f(s^*)$).

Dois regras são, normalmente, adotadas de forma a interromper o procedimento. Pela primeira, a execução é interrompida quando se atinge um certo número de iterações sem melhora no valor da melhor solução (*BTMax*). Pela segunda, quando o valor da melhor solução chega a um limite inferior conhecido (f_{min}), ou próximo dele. Esse segundo critério evita a execução desnecessária do algoritmo quando uma solução ótima é encontrada ou quando uma solução é julgada suficientemente boa.

A figura 5 apresenta o algoritmo clássico de Busca Tabu.

```

Procedimento Busca Tabu ( $f(\cdot)$ ,  $N(\cdot)$ ,  $A(\cdot)$ ,  $|V|$ ,  $f_{min}$ ,  $|T|$ ,  $BT_{Max}$ ,  $s$ )
1:  $s^* \leftarrow s$ ;           {Melhor solução obtida até então}
2:  $Iter \leftarrow 0$ ;         {Contador do número de iterações}
3:  $MelhorIter \leftarrow 0$ ;   {Iteração mais recente que forneceu  $s^*$ }
4:  $T \leftarrow \emptyset$ ;     {Lista Tabu}
5: Inicialize a função de aspiração  $A$ ;
6: enquanto Critério de Parada não satisfeito faça
7:    $Iter \leftarrow Iter + 1$ ;
8:   Seja  $s' \leftarrow s \oplus m$  o melhor elemento de  $V \subset N(s)$  tal que o movimento  $m$  não
   seja tabu ( $m \notin T$ ) ou  $f(s') < A(f(s))$ ;
9:   Atualize a lista tabu;
10:   $s' \leftarrow s$ 
11:   se  $f(s) < f(s^*)$  então
12:      $s^* \leftarrow s'$ ;
13:      $MelhorIter \leftarrow Iter$ ;
14:   fim se
15:   Atualize a função de aspiração  $A$ ;
16: fim enquanto
17:  $s \leftarrow s^*$ ;
18: Retorne  $s$ ;
fim Busca Tabu;

```

Figura 5. Algoritmo Clássico de Busca Tabu.

Os parâmetros principais do método de Busca Tabu são a cardinalidade $|T|$ da Lista Tabu, a função de aspiração A , a cardinalidade do conjunto $|V|$ de soluções vizinhas testadas em cada iteração, BT_{Max} que é o número de iterações sem melhora no valor da melhor solução e f_{min} , o valor mínimo conhecido da função f , informação essa que em alguns casos está disponível.

5.2 MÓDULOS ADICIONAIS NA BUSCA TABU

Alguns módulos têm sido incorporados à Busca Tabu com mais frequência e são descritos a seguir.

5.2.1 Estratégias de Intensificação

É comum em métodos de Busca Tabu a utilização de estratégias de intensificação que têm por objetivo efetuar buscas mais refinadas em determinadas regiões consideradas promissoras do espaço de soluções. Abaixo segue uma breve descrição de algumas das principais estratégias de intensificação descritas por (Glover, 1998).

5.2.1.1 Reinício da Busca Tabu com Soluções Elite

Nessa estratégia, é mantida armazenada uma lista das melhores soluções distintas encontradas até o momento pelo algoritmo (soluções elite) e estas são utilizadas como base para o processo de reinício do método de Busca Tabu. A lista de soluções elite, geralmente, apresenta um tamanho limitado de forma que se faz necessário um critério para a atualização da mesma.

5.2.1.2 Frequência das Soluções Elite

Nessa abordagem, as melhores soluções encontradas são investigadas para a determinação da frequência de determinados atributos. Usualmente, atribui-se um peso para a frequência de um atributo de acordo com a qualidade das soluções nas quais este foi encontrado. Estratégias como esta torna possível determinar qual o percentual de bons atributos das soluções elite encontradas que deve ser incluído na solução atualmente pesquisada. Também é possível determinar subconjuntos nos quais os atributos são mantidos juntos de forma a guiar o processo de busca para que não sejam feitas determinadas escolhas que deteriorem a qualidade da solução quando comparadas a outras escolhas.

5.2.1.3 Memória e Intensificação

Nessa estratégia, incorporam-se atributos das soluções elite e estimulam-se atributos destas soluções a fazerem parte da solução corrente. Nesse caso, são considerados livres no procedimento de busca local apenas os atributos não associados às soluções elite, permanecendo

os demais atributos fixos. Um critério de aspiração é capaz de fazer com que atributos fixos sejam considerados livres, dando a essa abordagem maior flexibilidade.

5.2.2 Estratégias de Diversificação

Métodos de Busca Tabu podem incluir, também, estratégias de diversificação. O objetivo dessas estratégias, que podem fazer uso de *memórias de longo prazo*, é redirecionar a pesquisa para regiões ainda não suficientemente exploradas do espaço de soluções. Apresenta-se, a seguir, uma breve descrição de algumas das principais estratégias de diversificação descritas por (Glover, 1998).

5.2.2.1 Frequência das Soluções Não-Elite

Nessa abordagem, mantém-se a informação da frequência de atributos de soluções não-elite. Com base nessa análise desestimula-se, através de penalidade, a incorporação de atributos que se apresentam frequentes nas soluções elite. Caso um atributo não tenha aparecido, ou raramente apresentou-se em soluções geradas anteriormente, estimula-se a incorporação do mesmo na solução corrente.

5.2.2.2 Busca Tabu Reativa

A Busca Tabu Reativa, proposta originalmente por Battiti & Tecchiolli (Battiti, 1992), tem por objetivo alcançar uma boa combinação entre intensificação e diversificação, propondo uma maneira alternativa para detectar ciclagem. A detecção de ciclos é feita verificando-se a repetição de determinados atributos de soluções os quais permitem diferenciá-las tanto quanto possível, ou seja, poucas soluções devem possuir os mesmos atributos. Para esse propósito, utiliza-se uma estrutura de *hashing* para a otimização da consulta. Nesse método, ciclos potenciais são detectados pela comparação da frequência de repetição com um dado número limiar estimado. Inicialmente, a Lista Tabu possui um tamanho, razoavelmente, pequeno (podendo ser igual a zero). Caso seja detectado um ciclo, o tamanho da lista é ajustado para o comprimento do mesmo. Em caso contrário, decrementa-se, exponencialmente, o tamanho da

Lista Tabu se o mesmo ultrapassar a um determinado valor. Um procedimento de diversificação é ativado caso o número de ciclos seja excessivamente grande.

5.2.2.3 Abordagens por Cadeias de Ejeção – *Ejection Chains*

Os métodos baseados em *ejection chains* constituem uma combinação implícita entre intensificação e diversificação (Cavique, 1999). Nestes procedimentos, avalia-se a vizinhança de uma solução por transformações sucessivas de uma estrutura que, normalmente, não representa uma solução completa ou factível, mas é utilizada como referência para a avaliação de soluções teste em cada passo da *ejection chain*. A transformação de uma estrutura em outra consiste em substituir alguns atributos da estrutura corrente por novos atributos, forçando outros a deixarem a mesma, o que define um *ejection move*. Cada transformação da estrutura define um nível da *ejection chain* na qual uma solução teste pode ser obtida por um movimento teste apropriado. Em cada nível n da cadeia (*chain*) existe um movimento composto produzido pelo efeito cumulativo de $n - 1$ *ejection moves* anteriores seguido pelo movimento teste no nível n . A pesquisa em vizinhança, normalmente, consiste em construir N níveis de uma *ejection chain* a partir da solução corrente, avaliando-se as soluções teste em cada nível. O nível l , no qual a melhor solução teste é encontrada, determina o movimento composto usado para transformar a solução corrente em outra solução.

5.2.3 Reconexão por Caminhos

A técnica de reconexão por caminhos (*Path Relinking*) foi proposta por Glover (Glover, 1996) como uma estratégia de intensificação, explorando trajetórias que conectavam soluções elite obtidas por Busca Tabu ou *Scatter Search* (Glover, 1998). A busca por soluções de melhor qualidade consiste em gerar e explorar caminhos no espaço de soluções partindo de uma ou mais soluções elite e levando a outras soluções elite. Para tal finalidade, selecionam-se movimentos que introduzem atributos das soluções guia na solução corrente. Deste modo, a reconexão por caminhos pode ser vista como uma estratégia que visa incorporar atributos de soluções de boa qualidade, favorecendo a seleção de movimentos que as contenham. A reconexão de caminhos pode ser aplicada segundo duas estratégias básicas:

- reconexão por caminhos aplicada como uma estratégia de pós-otimização entre todos os pares de solução elite;
- reconexão por caminhos aplicada como uma estratégia de intensificação a cada ótimo local obtido após a fase de busca local.

A aplicação da técnica de reconexão por caminhos como um procedimento de intensificação a cada ótimo local é mais eficaz do que empregá-la como um procedimento de pós-otimização segundo Rosseti (Rosseti, 2003). Neste caso, a reconexão por caminhos é aplicada a pares (s_1, s_2) de soluções, onde s_1 é a solução corrente obtida após o procedimento de busca local e s_2 é uma solução selecionada aleatoriamente de um conjunto formado por um número limitado, *TamConjElite*, de soluções elite encontradas durante a Busca Tabu. Este conjunto está, inicialmente, vazio. Cada solução obtida ao final de uma busca local é considerada como uma candidata a ser inserida no conjunto elite, se ela é melhor que a solução de pior qualidade deste conjunto e apresenta um percentual mínimo de diferença em relação a cada solução do conjunto elite (*PercDif*). Se o conjunto estiver vazio, a solução é, simplesmente, inserida no conjunto. Se o conjunto elite já possui *TamConjElite* soluções e a solução corrente é candidata a ser inserida neste conjunto, então esta substitui a solução de pior qualidade.

O algoritmo inicia computando a diferença simétrica $\Delta(s_1, s_2)$ entre s_1 e s_2 , resultando no conjunto de movimentos que deve ser aplicado a uma delas (solução inicial) para alcançar a outra (a solução guia). A partir da solução inicial, o melhor movimento ainda não executado $\Delta(s_1, s_2)$ é aplicado à solução corrente, até que a solução guia seja atingida. A melhor solução encontrada ao longo desta trajetória é considerada como candidata à inserção no conjunto elite e a melhor solução globalmente já encontrada é atualizada. Segundo Rosseti (Rosseti, 2003), diversas alternativas têm sido consideradas e combinadas em implementações recentes:

- não aplicar reconexão por caminhos a cada iteração, mas sim periodicamente, para não onerar o tempo final do algoritmo;
- explorar duas trajetórias potencialmente diferentes, usando s_1 como solução inicial e depois s_2 no mesmo papel (*forward, backward*);
- explorar apenas uma trajetória, usando s_1 ou s_2 como solução inicial; e

- não percorrer a trajetória completa de s_1 até s_2 , mas sim apenas parte dela (reconexão por caminhos truncada).

Para a escolha da alternativa mais apropriada deve-se ter um compromisso entre o tempo de processamento e a qualidade da solução. A figura 6 exhibe o pseudocódigo contendo os principais blocos do algoritmo de Busca Tabu com intensificação por reconexão por caminhos para um problema de minimização.

Procedimento *BTPR* ($f(\cdot)$, $N(\cdot)$, $A(\cdot)$, $|V|$, f_{min} , $|T|$, BT_{Max} , s , $IterAtivRC$, $IteracoesRC$)

```

1:  $s^* \leftarrow s$ ;
2:  $Iter \leftarrow 0$ ;
3:  $MelhorIter \leftarrow 0$ ;
4:  $T \leftarrow \emptyset$ ;
5:  $ConjuntoElite \leftarrow \emptyset$ ;
6:  $IterSemMelhora \leftarrow 0$ ;
7: Inicialize a função de aspiração  $A$ ;
8: enquanto Critério de Parada não satisfeito faça
9:    $Iter \leftarrow Iter + 1$ ;
10:  Seja  $s' \leftarrow s \oplus m$  o melhor elemento de  $V \subset N(s)$  tal que o movimento  $m$  não
    seja tabu ( $m \notin T$ ) ou  $f(s') < A(f(s))$ ;
11:  Atualize a lista tabu;
12:   $s \leftarrow s'$ ;
13:  se  $s$  deve pertencer ao conjunto de soluções elite então
14:    Inserir  $s$  no ConjuntoElite;
15:  fim se
16:  se ( $IterSemMelhora \bmod IterAtivRC < IteracoesRC$ ) and ( $Iter \geq IterAtivRC$ ) então
17:    Escolher aleatoriamente  $g \in ConjuntoElite$  com probabilidade uniforme;
18:    Atribuir a  $g'$  a melhor solução obtida aplicando reconexão por caminhos ao par  $(s, g)$ ;
19:     $s \leftarrow g'$ ;
20:  fim se
21:  se  $g'$  deve pertencer ao conjunto de soluções elite então
22:    Inserir  $g'$  no ConjuntoElite;
23:  fim se
24:  se  $f(s) < f(s^*)$  então
25:     $s^* \leftarrow s$ ;
26:     $MelhorIter \leftarrow Iter$ ;
27:     $IterSemMelhora \leftarrow 0$ ;
28:  senão
29:     $IterSemMelhora \leftarrow IterSemMelhora + 1$ ;
30:  fim se
31: fim enquanto
32:  $s \leftarrow s^*$ ;
33: Retorne  $s$ ;

```

Figura 6. Algoritmo Clássico de Busca Tabu Reconexão por Caminhos.

A figura 8 representa o pseudocódigo do procedimento de reconexão por caminhos para um problema de minimização. O algoritmo de reconexão por caminhos unidirecional inicia determinando o conjunto de movimentos $\Delta(s, g)$ que será aplicado a s (solução inicial) até chegar a g (solução guia) (linha 3). Cada iteração do procedimento de reconexão por caminhos unidirecional possui os quatro passos seguintes:

- aplicar à solução corrente \bar{g} o melhor movimento do conjunto de movimentos (linha 5), obtendo g'' ;
- excluir o melhor movimento do conjunto de movimentos ainda possível (linha 6);
- atualizar a solução corrente (linha 7); e
- testar se a solução corrente, \bar{g} , é melhor que a melhor solução, g' , encontrada ao longo da trajetória aplicada a s para chegar a g . Em caso afirmativo, atribui-se a g' a melhor solução dentre s e g (linha 2).

Quando a solução corrente chega a g , o algoritmo de reconexão por caminhos pára (linha 4) e retorna a solução g' (linha 12).

Procedimento Reconexão-Caminhos

```

1:  $\bar{g} \leftarrow s$ ;
2: Atribuir a  $g'$  a melhor solução entre  $s$  e  $g$ ;
3: Calcular o conjunto de movimentos possíveis  $\Delta(s, g)$ ;
4: enquanto  $|\Delta(s, g)| \neq 0$  faça
5:   Atribuir a  $g''$  a melhor solução obtida aplicando o melhor movimento de
       $\Delta(s, g)$  a  $\bar{g}$ ;
6:   Excluir de  $\Delta(s, g)$  este movimento;
7:    $\bar{g} \leftarrow g''$ ;
8:   se  $f(\bar{g}) < f(g')$  então
9:      $g' \leftarrow \bar{g}$ ;
10:  fim se
11: fim enquanto
12: Retorne  $g'$ ;

```

Figura 8. Procedimento Reconexão por Caminhos.

5.2.4 Relaxação Adaptativa

A Relaxação Adaptativa, também conhecida como Oscilação Estratégica, está intimamente ligada às origens da Busca Tabu (Glover, 1998). Esta técnica provê um meio de se alcançar uma combinação entre intensificação e diversificação. Ela consiste em orientar movimentos em relação a um nível crítico que pode ser identificado por um estágio de construção ou um intervalo escolhido de valores para uma função. Tal nível crítico (ou fronteira de oscilação) freqüentemente representa um ponto onde o método normalmente iria ser interrompido. Em vez de parar quando esta fronteira é alcançada, as regras para selecionar movimentos são modificadas para permitir que a região definida pelo nível crítico seja atravessada. Esta abordagem continua então até uma dada profundidade além da fronteira de oscilação e volta novamente. O limite da oscilação é novamente alcançado e atravessado, desta vez na direção oposta, e assim por diante. A figura 9, extraída do trabalho de Marinho (Marinho, 2004), ilustra esse processo.

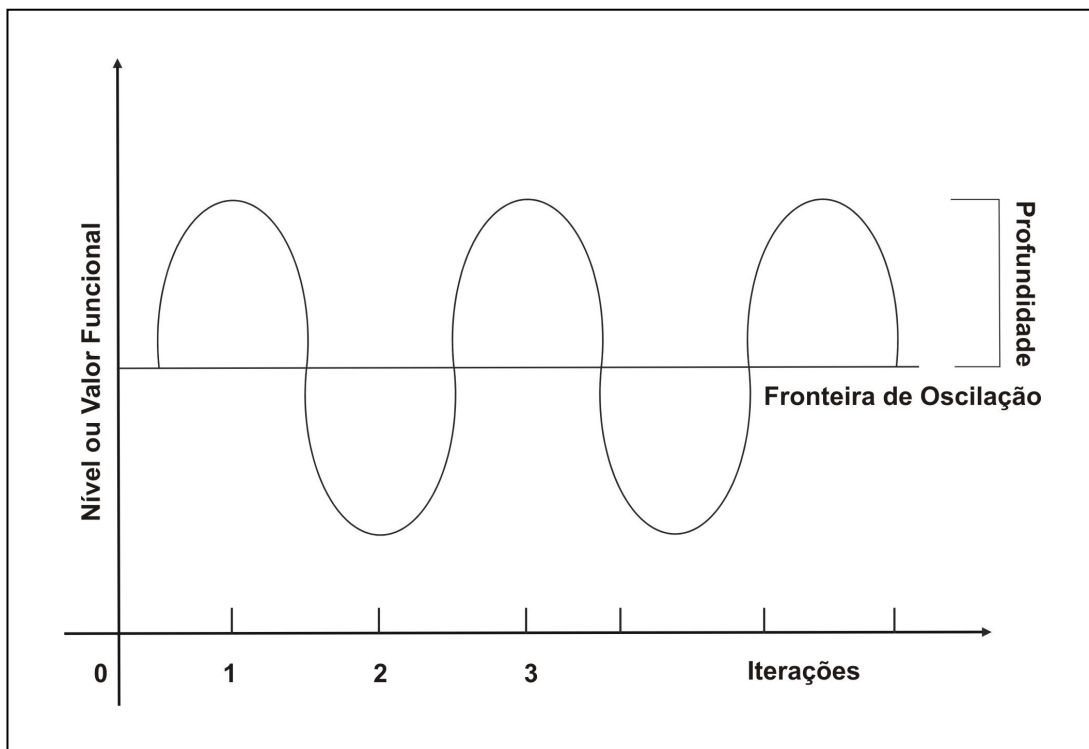


Figura 9. Oscilação Estratégica.

O processo de, repetidamente, abordar e atravessar o nível crítico, a partir de diferentes direções, cria um comportamento oscilatório, o qual dá o nome ao método. O controle sobre esse comportamento é estabelecido por meio da geração de avaliações e regras modificadas para os movimentos, dependendo da região navegada e da direção da busca. A possibilidade de percorrer uma trajetória já visitada é evitada por mecanismos tabu padrões, tais como aqueles estabelecidos pelas funções da memória de curto prazo.

Schaerf (Schaerf, 1996) demonstra um mecanismo de relaxação adaptativa onde os pesos, para cada fonte de inviabilidade da função de avaliação são ajustados dinamicamente. Para cada fonte de inviabilidade i o peso W_i é multiplicado por um fator α_i que varia de acordo com o seguinte esquema:

1. No início da busca $\alpha_i \leftarrow 1$.
2. A cada k movimentos:
 - se todas as k soluções visitadas são factíveis em relação à inviabilidade i então $\alpha_i \leftarrow \alpha_i / \gamma$;
 - se todas as k soluções visitadas são infactíveis em relação à inviabilidade i então $\alpha_i \leftarrow \alpha_i * \gamma$;
 - se algumas soluções são factíveis e algumas outras são infactíveis então α_i permanece inalterado.

O parâmetro γ é aleatoriamente selecionado, a cada vez, no intervalo [1.8, 2.2]. Schaerf (Schaerf, 1996) optou por randomizar tal valor para evitar que escolhas determinísticas pudessem guiar a busca.

Cada valor de α_i é limitado por duas constantes $\alpha_{i,min}$ e $\alpha_{i,max}$. Isso implica que, se α_i assumir um valor superior a $\alpha_{i,max}$, então ele recebe o valor $\alpha_{i,max}$. De modo semelhante, se α_i assumir um valor inferior a $\alpha_{i,min}$, ele recebe o valor $\alpha_{i,min}$. A limitação do valor de α_i tem como objetivo não perder o referencial de avaliação das soluções, fato que ocorreria após uma longa seqüência de soluções infactíveis ou factíveis, em decorrência de valores muito altos ou muito baixos, respectivamente, para esse parâmetro.

Este capítulo apresentou, de maneira detalhada, aspectos relativos à meta-heurística Busca Tabu. O estudo exibiu o algoritmo clássico e alguns módulos que vêm sendo adicionados ao método tornando-o, cada vez mais, uma ferramenta confiável e eficiente.

6 TÉCNICAS UTILIZADAS

O objetivo deste capítulo é apresentar um estudo acerca da aplicação de técnicas de solução para problemas de otimização considerando janelas de tempo. Esta abordagem é centrada na construção de medidas que habilitam uma relação funcional entre as restrições nas atividades do operador e a disponibilidade de tempo. No contexto do trabalho, a técnica visa criar estratégias de diversificação para a Busca Tabu com o intuito de aproximar mais o problema da realidade, criando novas oportunidades de conexões de vôo num dado intervalo de tempo e, assim, fornecendo maior flexibilidade na busca de novas soluções viáveis e de menor custo. A pesquisa começa introduzindo os principais conceitos desta abordagem que devem ser bem esclarecidos: situações, restrições e janelas de tempo.

6.1 Definição

Uma janela de tempo é uma construção que determina uma relação funcional entre uma situação requerida e um intervalo de tempo que especifica a disponibilidade para a ação. Uma janela de tempo não discrimina qual ação deve ser tomada. Simplesmente, ela mostra se existe uma ação que resultará na situação requerida. No curso das atividades do operador dentro de uma tarefa dinâmica, n janelas de tempo são denotadas como w_i para $i = 1$ até n . No início da interação do operador, todas as janelas de tempo são designadas como inativas e representadas pelo conjunto U_0 . Até a janela de tempo ser designada como aberta, ela permanece inativa. As janelas de tempo são definidas como abertas se a disponibilidade para a ação existe para uma situação requerida no ponto corrente no espaço-tempo. O conjunto de janelas de tempo abertas no tempo t é determinado como O_t . Quando uma situação requerida mais extensa não existe, a janela de tempo correspondente é definida como fechada. O conjunto de janelas de tempo fechadas no tempo t é determinado como C_t . Os elementos dos conjuntos U , O , e C são definidos para serem persistentes sobre o tempo e permanecerão assim (i.e., $U_{t+1} = U_t$, $O_{t+1} = O_t$ e $C_{t+1} = C_t$) a menos que designado ao contrário.

6.2 Relação entre Ações do Operador e Janelas de Tempo

Para completar a restrição especificada pelo contexto temporal, primeiro deve-se definir a ação do operador e a relação entre ação e janela de tempo. Uma ação do operador é definida aqui como uma 2-tupla que inclui uma ação detectável executada pelo operador em um ponto específico no tempo. No curso da interação do operador dentro de um ambiente de tarefas dinâmico, m ações são denotadas como b_j para $j = 1$ até m . A relação entre ação e janela de tempo pode ser descrita por duas funções indicadoras Booleanas, I_w^l , tal que, para $l = 1$, a função avalia se uma ação encontra a solução requerida especificada por uma janela de tempo e $l = 2$, a função avalia a relevância de uma ação em direção a uma janela de tempo.

Assim,

$$I_w^1(\mathbf{b}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \mathbf{b} \text{ encontra situação especificada em } w; \\ 0 & \text{se } \mathbf{b} \text{ não encontra situação;} \end{cases} \quad (6.1)$$

e

$$I_w^2(\mathbf{b}) = \begin{cases} 1 & \text{se } \mathbf{b} \text{ é relevante em direção a } w; \\ 0 & \text{se } \mathbf{b} \text{ não é relevante em direção a } w. \end{cases} \quad (6.2)$$

Seis predicados, $M_T^k(w_i, \mathbf{b}_j)$ para $k = 1$ até 6 são, agora construídos para caracterizar as relações fundamentais entre as janelas de tempo e as ações dos operadores sobre o um intervalo de tempo T . Em particular, o valor verdadeiro, $\| M^k(w_i, \mathbf{b}_j) \|_{T+, T-}$, de cada predicado é avaliado quanto a um intervalo que inicia quando a interação do operador na tarefa começa ($T+$) e termina quando a interação do operador termina ($T-$). Dado que b_j ocorre no tempo s , equações para avaliar os primeiros cinco predicados são listadas como segue:

- No instante de tempo em que ocorre a ação que resulta em uma solução requerida,

$M_T^1(w_i, \mathbf{b}_j)$, é formalmente definida como

$$\| M^1(w_i, \mathbf{b}_j) \|_{T+, T-} = 1 \text{ sse } \exists i \text{ tal que } (I_{w_i}^1(\mathbf{b}_j) = 1) \wedge (w_i \in O_s) . \quad (6.3)$$

- Uma ação anterior ao instante de tempo que resulta em uma solução requerida,

$M_T^2(w_i, \mathbf{b}_j)$, é definida como

$$\| M^2 (w_i, \mathbf{b}_j) \|_{T+,T-} = 1 \text{ sse } \exists i \text{ tal que } (I_{w_i}^1 (\mathbf{b}_j) = 1) \wedge (w_i \in U_s) . \quad (6.4)$$

- Uma ação posterior ao instante de tempo que resulta em uma solução requerida,

$M_T^3 (w_i, \mathbf{b}_j)$, é definida como

$$\| M^3 (w_i, \mathbf{b}_j) \|_{T+,T-} = 1 \text{ sse } \exists i \text{ tal que } (I_{w_i}^1 (\mathbf{b}_j) = 1) \wedge (w_i \in C_s) . \quad (6.5)$$

- Uma ação que é relevante em direção a uma situação requerida. Mas não resulta nela, $M_T^4 (w_i, \mathbf{b}_j)$, é definida como

$$\| M^4 (w_i, \mathbf{b}_j) \|_{T+,T-} = 1 \text{ sse } \exists i \text{ tal que } (I_{w_i}^1 (\mathbf{b}_j) = 0) \wedge (I_{w_i}^2 (\mathbf{b}_j) = 1) . \quad (6.6)$$

- Uma ação com nenhuma janela de tempo correspondente, $M_T^5 (w_i, \mathbf{b}_j)$, é definida como

$$\| M^5 (\mathbf{b}_j) \|_{T+,T-} = 1 \text{ sse } \forall i, (I_{w_i}^2 (\mathbf{b}_j) = 0) . \quad (6.7)$$

Em virtude do sexto predicado ser baseado em uma janela de tempo em vez de uma ação, a equação para avaliá-lo é definida separadamente como segue:

- Uma janela de tempo que foi atrasada, $M_T^6 (w_i)$, é definida como

$$\| M^6 (w_i) \|_{T+,T-} = 1 \text{ sse } \forall j, (I_{w_i}^2 (\mathbf{b}_j) = 0) . \quad (6.8)$$

Devido a sua confiança na lógica temporal, as equações de (6.1) a (6.5) demonstram uma descrição explícita das restrições. Especificamente, a estrutura de janela de tempo pode agora ser utilizada como uma relação de dependência entre uma ação e uma situação requerida que é também limitada pelo tempo.

6.3 Extrair Informação da Janela de Tempo

Para extrair informação de uma janela de tempo, primeiro deve-se tomar a decisão sob a vista do operador em seu contexto experimental e evitar descrições de mecanismos de decisão

analíticos. O foco da extração está, então, no uso de métodos de análises para descobrir mapeamentos entre as ações do operador e as situações requeridas para encontrar os objetivos do sistema.

Rothrock (Rothrock, 2001) estudou três técnicas que encontram critério para extrair informação de uma janela de tempo. Em virtude de cada uma das técnicas focar em fontes de informação pouco diferentes uma das outras, salienta-se a mais efetiva das abordagens que, segundo o autor, integra vantagens sobre as outras. Um método, de análise de tarefa cognitivo (Militello, 1998), é baseado na entrada de dados através da ação humana. A análise de tarefa cognitiva concentra-se na experiência prática do contexto operacional para extrair informação através de diagnósticos de avaliação para o sucesso da operação dentro do ambiente de tarefas. Os dois outros métodos consideram estudos empíricos e teóricos do ambiente no qual a tarefa é executada. A análise de trabalho cognitiva utiliza especialidade teórica e planejamento de análises dos sistemas dinâmicos para identificar distinções conceituais dentro de um domínio de trabalho que, mais tarde, pode ser usado como ferramentas de modelagem (Vicente, 1999). A análise ecológica da tarefa evidencia aspectos da análise do ambiente da tarefa para determinar regularidades empíricas no comportamento do ambiente Rothrock *apud* (Kirlik, 1995). A informação extraída da janela de tempo através de método integrado deve ser então:

- válida sob a perspectiva de um operador;
- consistente com sistemas dinâmicos; e
- verdadeira quanto à disponibilidade de ação dentro do ambiente de tarefas.

6.4 Um Exemplo de Extração de Informação de Janela de Tempo

Com a finalidade de manter-se fiel à área de atuação do presente trabalho, ou seja, a aviação, apresenta-se um exemplo voltado ao processo de extração de informação de janela de tempo no domínio do Controle de Tráfego Aéreo, ou *Air Traffic Control – ATC*.

Neste contexto, a análise de tarefa cognitiva é usada para determinar cursos de ação normais para o operador para atingir os objetivos estabelecidos. A análise do trabalho é usada

para certificar-se das restrições estáticas e cinemáticas no domínio do ATC que afetam a habilidade do operador para atingir os objetivos, como a abrangência da área coberta pelo radar, por exemplo. A análise de tarefa ecológica é utilizada para descobrir restrições no ambiente ATC, como a regulamentação apropriada, por exemplo, e regularidades empíricas para as quais um bom controlador deve estar sensível. Uma vez que a informação tenha sido extraída, o próximo passo na metodologia da pesquisa proposta é implementar a construção. O estudo que segue exibe uma arquitetura de simulação orientada a objeto que inclui uma geração de janela de tempo em um sistema de manutenção baseado no modelo de quadro negro, tratado aqui como *blackboard model*.

6.5 O Modelo *Blackboard* em Simulações Orientada a Objetos

O modelo *blackboard* foi desenvolvido por volta dos anos 70 como uma ferramenta dedicada à compreensão de discursos. Desde então, ele vem sendo implementado em muitas áreas do conhecimento com as mais diversas propostas. Vranes (Vranes, 1991) o utilizou como ferramenta no planejamento militar. Já Rubin (Rubin, 1988) usou o modelo como uma estrutura para construir uma associação de operadores na tarefa de controle de supervisão. Mais recentemente, Adeli (Adeli, 1995) desenvolveu um ambiente computacional integrado para resolver problemas complexos de engenharia.

Este modelo consiste de três componentes maiores conforme Nii (Nii, 1986):

- **Fontes de conhecimento:** é onde está contido o conhecimento necessário para resolver o problema;
- **Estrutura de dados:** é uma base de dados global na qual são mantidas soluções parciais e completas dos problemas; e
- **Controle:** é um modelo de raciocínio oportunista que orienta a solução do problema através da escolha e seleção das fontes de conhecimento apropriadas.

6.6 O Modelo *Blackboard* e Janelas de Tempo

Para ilustrar o uso do modelo *blackboard*, para abrir, manter e fechar janelas de tempo, considera-se o seguinte exemplo: Em uma simulação de tempo-real, um operador humano assume a função de um controlador de tráfego aéreo monitorando aviões entrando e deixando o espaço aéreo do País X conforme figura 9. O operador fornece instruções específicas para identificar todas as aeronaves desconhecidas entrando no espaço aéreo para estabelecer contato via rádio com todos os aviões que atingem o alcance do radar. Uma aeronave desconhecida, viajando ao longo da trajetória indicada pelo vetor direção, entra no espaço aéreo do País X no ponto A, entra e deixa o alcance para estabelecer contato via rádio no ponto B e deixa o espaço aéreo do País X no ponto C.

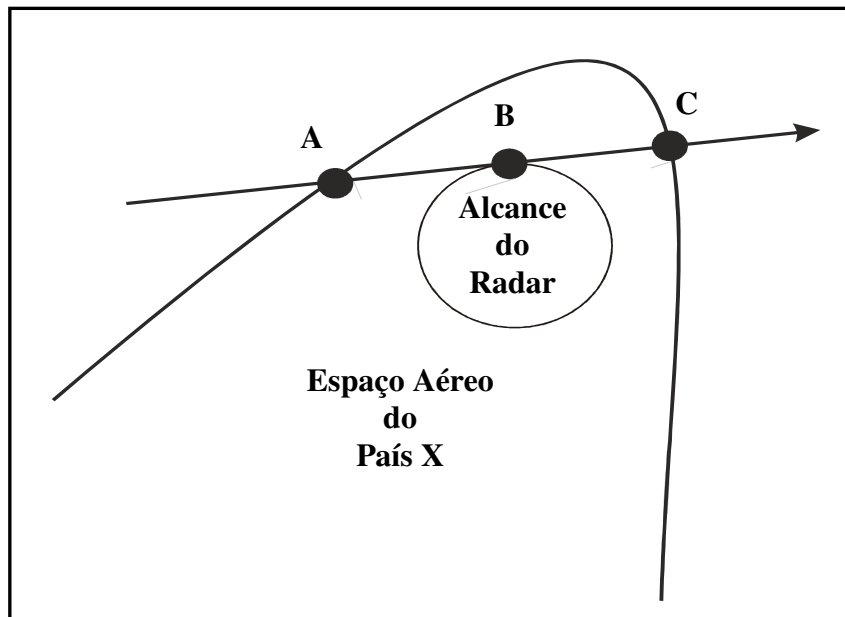


Figura 9. Exemplo de ATC.

No contexto de janelas de tempo, as fontes de conhecimento do modelo *blackboard* incluem operadores que agem no ambiente e entidades que produzem situações. Estas fontes contribuem não somente com ações e situações para o *blackboard*, mas também com informação temporal que define restrições dentro do ambiente no qual a tarefa é executada.

No exemplo, as fontes de conhecimento incluem o controlador de tráfego aéreo e a aeronave desconhecida. Além disso, o avião desconhecido também revela restrições que ditam ações esperadas do controlador de tráfego aéreo. No ponto A, a janela w_1 é designada como aberta tal qual $w_1 \in O_{t_a}$ com a especificação que a simulação de um avião corretamente identificado seja requerida. O tempo no qual o avião atinge o ponto A é designado com t_a . No ponto B, uma segunda janela de tempo, w_2 , é definida como aberta para especificar a situação de contato de rádio estabelecido no tempo t_b tal que $w_2 \in O_{t_b}$. Em virtude da trajetória da aeronave ser tangencial ao limite da curva da área de contato de rádio, o intervalo de tempo disponível para o controlador de tráfego aéreo estabelecer contato via rádio é instantâneo. Então, a janela w_2 é também definida como fechada no tempo t_b tal que $w_2 \in C_{t_b}$. No ponto C, o avião sai do espaço aéreo do País X e atua o fechamento da janela w_1 tal que $w_1 \in C_{t_c}$.

A estrutura de dado *blackboard* segura a informação da janela de tempo na forma de dado solução-estado computacional. Cada janela de tempo representa uma hierarquia meios-fins estrutural onde a situação requerida (fins) é ativada por uma ação esperada do operador (meios) (Vicente, 1999).

Embora a fonte de conhecimento forneça informação necessária para gerar e manter as janelas de tempo dentro da arquitetura *blackboard*, as atividades no *blackboard* são monitoradas e controladas pelo controle de *blackboard*. O controle usa raciocínio oportunista para aplicar modelos de raciocínio retrógrado (dedução a partir de soluções hipotéticas para explicar os dados observados) e avançado para manter a informação da janela de tempo. Raciocínio retrógrado é aplicado no ponto de uma situação requerida para determinar se a ação do operador esperada foi capturada, enquanto que raciocínio avançado inicia em uma ação do operador para determinar se o resultado da ação encontra alguma situação requerida.

Retornando ao exemplo do ATC, assume-se que o operador tome três ações. A primeira ação, b_1 , identifica incorretamente o avião no tempo t_1 , onde t_1 é anterior a t_a (i.e., $t_1 < t_a$). A segunda ação, b_2 , identifica corretamente a aeronave no tempo t_2 onde $t_a < t_2 < t_b$. A terceira ação, b_3 , alerta a patrulha de fronteira do País X no tempo t_3 onde $t_b < t_3 < t_c$.

Usando raciocínio retrógrado, o controle do *blackboard* examina todas as janelas de tempo para determinar se alguma foi encontrada aberta. No tempo t_a , o controle avalia b_1 à medida que aplicável a w_1 tal que $I_{w_1}^2(\mathbf{b}_1) = 1$, mas não resulta na situação requerida tal que $I_{w_1}^1(\mathbf{b}_1) = 0$. Assim, a equação 6.6 é satisfeita e a ação é considerada irrelevante. No tempo t_2 , o controle determina que b_2 é consistente com a ação do operador esperada especificada por w_1 tal que $I_{w_1}^1(\mathbf{b}_2) = 1$. Além disso, devido a $w_1 \in O_{t_2}$, o controle avalia w_1 e b_2 para satisfazer a equação 6.3 e verifica b_2 pontualmente, ação requerida.

Aplicando o raciocínio avançado, o controle examina todas as ações correntes para determinar se elas abrigam alguma situação requerida. No tempo t_3 , o controle determina que b_3 não é relevante em direção a qualquer janela de tempo tal que $\forall i, I_{w_i}^2(\mathbf{b}_3) = 0$. O controle não faz, de qualquer forma, uma determinação na ação neste ponto. Particularmente, ele procura resolução do *status* da ação verificando os resultados do raciocínio retrógrado para assegurar que a ação não está acontecendo muito cedo para uma janela de tempo mais tardia. Todavia, a terceira ação foi eventualmente determinada para ser irrelevante.

6.7 Possíveis Resultados da Janela de Tempo

A utilidade de uma janela de tempo não está somente em sua descrição temporal e funcional, mas também na riqueza de possíveis resultados. O espaço completo de possíveis resultados é representado pelas relações fundamentais entre as janelas de tempo e as ações do operador descritas nas equações de 6.3 a 6.8 e demonstradas na figura 10.

		Ambiente			
		Situação Requerida			Nenhuma Situação Requerida
Reação	Ação	Antecipada	Precisa	Atrasada	Eq 6.7 Alarme Falso
		Correta	Eq 6.5	Eq 6.3	
	Incorreta	Eq 6.6			
	Nenhuma Ação	Perda		Eq 6.8	Rejeição Correta

Figura 10. Possíveis Resultados da Janela de Tempo.

O ambiente é delineado em termos de situação requerida (janela de tempo existe) ou nenhuma situação é requerida (janela de tempo não existe). As equações de 6.3 a 6.7 representam ações que são relevantes para uma janela de tempo. As equações de 6.3 a 6.5 representam ações que resultam na situação requerida (ações corretas). A equação 6.6 representa ações que não encontram a situação requerida (ações incorretas) mesmo que elas sejam relevantes Rothrock (Rothrock, 2001).

Nas equações, a existência de uma situação requerida não causa impacto na performance do sistema. É a presença da ação do operador no contexto temporal que especifica se a performance é boa ou ruim. Uma ação antecipada incorreta (primeira ação do operador do ATC) é representada conforme a equação 6.6. Uma ação precisa no tempo (segunda ação do operador do ATC) é apresentada na equação 6.3. Uma ação que não corresponde a nenhuma situação requerida é categorizada de acordo com a equação 6.7. A inexistência de ação para uma situação requerida existente (não tentativa de estabelecer contato via rádio) é caracterizada como uma perda e é representada pela equação 6.8.

6.8 Exemplo de Formulação Usando Janelas de Tempo

O objetivo desta seção é ilustrar o presente estudo com um exemplo analisado durante a revisão bibliográfica. Para tanto, está sendo considerado o trabalho de Mercier (Mercier, 2005).

A formulação matemática em questão assume que o problema de alocação de frota – *fleet assignment problem* – já foi resolvido e que já é conhecido e determinado o tipo de aeronave para cada etapa de vôo a ser voada. Neste contexto, os problemas de rota a ser voada pela aeronave – *aircraft routing problem* –, de escala da tripulação – *crew scheduling problem* – e de horários dos vôos – *flight retiming problem* – são decompostos em um único problema para cada tipo de aeronave. Assim, dado um conjunto de etapas de vôo a ser voado pelo avião de um tipo específico, o problema é determinar uma escala modificada, um conjunto de custo-mínimo de rotas para a aeronave e as rotações para a tripulação tal que cada uma das etapas de vôo possam ser cobertas por um avião, uma tripulação e as restrições decorrentes sejam satisfeitas. A formulação considera o problema diário cujo estudo é freqüente na literatura acerca do *crew scheduling problem*.

6.9 Exemplo de Modelo Utilizando Tripulante Extra

Considere um conjunto L de etapas de vôo diárias voadas por um único tipo de aeronave. Cada etapa de vôo $i \in L$ é definida pelos pontos de origem e destino e os horários de partida e de chegada. Um número finito de possíveis mudanças no horário de partida original de uma etapa é usado para modelar a flexibilidade da escala. Seja U_i o conjunto de possíveis horários de partida da etapa $i \in L$. Por exemplo, se o horário de partida original da etapa i é 12h00, então $U_i = \{11h55, 12h00, 12h05\}$ poderia ser um conjunto de possíveis horários de partida para esta etapa.

Dado duas etapas de vôo $i, j \in L$, a conexão entre estas etapas é dita ser curta se ela é possível, mas a diferença entre o horário de partida da etapa j e o horário de chegada da etapa i é menor do que o mínimo tempo de intervalo (*sit time*) para os tripulantes. Neste caso as etapas podem ser cobertas, em seqüência, pelo mesmo tripulante somente se ambas as etapas são também cobertas pela mesma aeronave. Caso contrário, tempo disponível insuficiente para a

tripulação fazer a conexão. Seja S o conjunto de pares de etapas de vôo para as quais a conexão entre elas é curta para no mínimo uma possível combinação de horários de partida. Para cada $(i, j) \in S$, seja S_{ij} o conjunto de pares de horários de partida $p \in U_i$ e $q \in U_j$ para os quais a conexão entre a etapa i e a etapa j é curta.

O problema é modelado com uma formulação de caminho. Cada rota de aeronave deve respeitar um limite do total do número de dias separando duas visitas à estação de manutenção. Cada período de trabalho em uma rotação deve respeitar os limites do tempo de trabalho total, tempo de vôo total e número de pousos total. Além disso, o número de períodos de trabalho em uma rotação não deve exceder a um certo limite. Estas restrições de possibilidade de caminhos são modeladas através do uso de recursos e são tratadas diretamente por programação dinâmica em uma estrutura de geração de colunas. Os caminhos de aeronaves e tripulações são gerados com redes de espaço-tempo. Cada nodo destas redes corresponde ou a partida de um vôo, ou a sua chegada. As redes de aeronaves contêm dois tipos de arcos: arcos de vôo e arcos de conexão. Nas redes de tripulação, cada arco representa ou um vôo, ou um *deadhead*, ou uma possível conexão entre dois vôos, entre dois *deadhead*, ou entre um de cada. *Deadheads* permitem que o tripulante viaje como passageiro em certos vôos com a finalidade de reposicionar um tripulante em uma cidade diferente ou assegurar que o tripulante possa retornar a sua base domiciliar ao final de uma rotação. Assim, para cada etapa de vôo $i \in L$, $|U_i|$ cópias do arco do vôo correspondente são incluídos nas redes (um para cada possível escala) e a etapa de vôo cobrindo as restrições assegurará que somente uma delas é usada pela etapa.

Seja Ω^F o conjunto de possíveis caminhos de aeronaves e Ω^K o conjunto de possíveis caminhos de tripulações. Para todo caminho $\omega \in \Omega^F$ ou $\omega \in \Omega^K$, se define constantes binárias b_ω^i que assumem valor 1 se a etapa $i \in L$ pertence a este caminho e constantes binárias b_ω^{iu} que assumem valor 1 se a etapa $i \in L$ está determinada na escala $u \in U_i$ neste caminho. Seja também n_ω^{ijpq} igual a 1 se $i \in L$ com escala $p \in U_i$ e etapa $j \in L$ com escala $q \in U_j$ sendo executadas em seqüência no caminho ω . Seja também c_ω o custo de enviar uma unidade de fluxo adiante no caminho ω . Para todo o caminho de aeronave $\omega \in \Omega^F$, seja f_ω o número de aviões necessários para cobrir o caminho ω . O valor de f_ω pode ser maior do que um desde que os caminhos de

aeronave possam transpor mais do que um dia e toda etapa tenha que ser coberta diariamente. Para todo caminho de tripulação $\omega \in \Omega^K$, seja e_ω o número de períodos de trabalho no caminho. Uma variável binária x_ω é definida para todo caminho de tripulação ω e constantes binárias d_ω^{iu} assumem valor 1 se a etapa $i \in L$ com escala $u \in U_i$ é executada como um *deadhead* no caminho de tripulação ω . Finalmente, constantes ζ^F e ζ^D representam o número de aeronaves disponível e um limite do número de períodos de trabalho total em todas as rotações, respectivamente. O modelo proposto por Mercier (Mercier, 2005) integrando os problemas de rota a ser voada pela aeronave – *aircraft routing problem* – de escala da tripulação – *crew scheduling problem* – e de horários dos vôos – *flight retiming problem* – é expresso a seguir:

$$\text{Minimizar } \sum_{\omega \in \Omega^K} c_\omega x_\omega + \sum c_\omega \Theta_\omega ; \quad (6.9)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\omega \in \Omega^F} b_\omega^i \Theta_\omega = 1, \quad (i \in L) ; \quad (6.10)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^F} f_\omega \Theta_\omega \leq \zeta^F ; \quad (6.11)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} b_\omega^i x_\omega = 1, \quad (i \in L) ; \quad (6.12)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} c_\omega x_\omega \leq \zeta^D ; \quad (6.13)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} d_\omega^{iu} x_\omega - \sum_{\omega \in \Omega^K} b_\omega^{iu} x_\omega \leq 0, \quad (i \in L, u \in U_i) ; \quad (6.14)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} b_\omega^{iu} x_\omega - \sum_{\omega \in \Omega^F} b_\omega^{iu} \Theta_\omega = 0, \quad (i \in L, u \in U_i) ; \quad (6.15)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} n_\omega^{ijpq} x_\omega - \sum_{\omega \in \Omega^F} n_\omega^{ijpq} \Theta_\omega \leq 0, \quad ((i, j) \in S, (p, q) \in S_{ij}) ; \quad (6.16)$$

$$\Theta_{\omega} \in \{0,1\}, \quad (\omega \in \Omega^F); \quad (6.17)$$

$$x_{\omega} \in \{0,1\}; \quad (\omega \in \Omega^K). \quad (6.18)$$

A tabela 5, a seguir, fornece um resumo da notação utilizada nesta formulação.

Tabela 5 - Resumo da notação utilizada na formulação

Sumário de notação	
L	Conjunto de etapas de vôo.
U_i	Conjunto de possíveis horários de partida para a etapa de vôo i .
S	Conjunto de pares de etapas para as quais a conexão entre elas é curto para no mínimo uma combinação de escala.
S_{ij}	Conjunto de pares de horários de partida $p \in U_i$ e $q \in U_j$ para os quais a conexão entre a etapa i e a etapa j é curta.
Ω^F	Conjunto de caminhos de aeronaves viáveis.
Ω^K	Conjunto de caminhos de tripulações viáveis.
x_{ω}	Variável binária representando o fluxo no caminho da tripulação ω .
Θ_{ω}	Variável binária representando o fluxo no caminho da aeronave ω .
b_{ω}^i	Igual a 1 se a etapa i pertence ao caminho ω .
b_{ω}^{iu}	Igual a 1 se a etapa i com escala u pertence ao caminho ω .
c_{ω}	Custo de enviar uma unidade de fluxo adiante no caminho ω .
d_{ω}^{iu}	Igual a 1 se <i>deadhead</i> i com escala u pertence ao caminho ω .
e_{ω}	Número de períodos de trabalho no caminho da tripulação ω .
f_{ω}	Número de aviões necessários para cobrir o caminho da aeronave ω .
n_{ω}^{ij}	Igual a 1 se a etapa i e a etapa j são executadas em seqüência no caminho ω .
n_{ω}^{ijpq}	Igual a 1 se a etapa i com escala p e a etapa j com escala q são executadas em seqüência no caminho ω .
ζ^F	Número de aeronaves disponíveis.
ζ^D	Número total de períodos de trabalho permitido em todas as rotações de tripulação.

A função objetivo (6.9) minimiza a soma de todos os custos de escala de tripulantes e custos relacionados ao desenvolvimento das rotas das aeronaves. É usada uma função custo de tripulação aproximada incluindo custos com *deadheads* e custos de espera linear *piecewise*. Em

virtude de que cada etapa de vôo deva ser coberta por exatamente uma tripulação, uma porção grande do total de tripulantes é fixa. Portanto, os custos relevantes considerados nestes experimentos são aqueles que podem ser reduzidos por um melhor planejamento das rotações de tripulação. Sobre as variáveis de custos incorrem os custos relativos à duração das conexões, onde um dado excesso deve ser creditado como tempo de trabalho para as tripulações, mesmo que estas não estejam trabalhando nesse dado momento. Além disso, despesas com acomodações de tripulantes também são atribuídas às variáveis de custos quando o período de descanso entre sucessivos períodos de trabalho não ocorrem na base domiciliar da tripulação. Para o problema da rota da aeronave, algumas companhias aéreas levam em consideração valores que representam lucros obtidos pela disponibilidade do mesmo avião para um par de consecutivas etapas de vôo, tal que os passageiros voando de um ponto origem da primeira etapa para um ponto destino da segunda etapa não precisam trocar de aeronave. As restrições (6.10) e (6.12) exigem que cada uma das etapas seja coberta por exatamente um avião e uma tripulação, respectivamente. A restrição (6.11) impõe um limite no número de aeronaves disponíveis e a restrição (6.13) limita o número total de períodos de trabalho. Restringindo o número de períodos de trabalho, estes podem ter sua duração aumentada, tornando curtos períodos de trabalho pouco significativos para as despesas da empresa aérea. Nesta abordagem, não são incluídos na função de custo aproximado de tripulação, o pagamento mínimo por tempo de vôo aos tripulantes, mas, segundo Mercier (Mercier, 2005), a análise de sensibilidade em seu estudo demonstrou que ela é adequadamente substituída pela restrição (6.13). A restrição (6.15) assegura que a mesma escala é escolhida pela tripulação a serviço ou tripulação extra (*deadheading*). Da mesma forma, a restrição (6.15) garante que, para todas as etapas, a mesma escala é escolhida para a aeronave e a tripulação. Finalmente, a restrição (6.16) faz com que uma tripulação não mude de aeronave se, pela escala escolhida, o tempo de conexão é muito curto. Estes dois últimos grupos de restrições ((6.15) e (6.16)) unem os problemas de aeronave e os problemas de tripulação. As equações (6.17) e (6.18) estabelecem que os valores referentes ao fluxo no caminho da tripulação e os valores referentes ao fluxo no caminho da aeronave são representados por variáveis binárias, e, portanto, só podem assumir valores 0 ou 1.

6.10 A Utilização de Janelas de Tempo e a Contribuição para este Trabalho

Métodos baseados em Busca Tabu incluem estratégias de diversificação. O objetivo dessas estratégias, que tipicamente utilizam uma memória de longo prazo, é redirecionar a pesquisa para regiões ainda não suficientemente exploradas do espaço de soluções. Estas estratégias procuram, ao contrário das estratégias de intensificação, gerar soluções que têm atributos significativamente diferentes daqueles encontrados nas melhores soluções obtidas.

Assim, a idéia da aplicação da teoria de janelas de tempo, neste contexto, visa identificar, dentro desse espaço de soluções, trechos de vôos cujos intervalos de tempo (horário de partida, horário de chegada) venham a coincidir com horários de outros possíveis vôos, estabelecendo novas conexões e formando outros *pairings*. Desta forma, a técnica pretende aproximar mais o problema da realidade tendo no uso das janelas de tempo um recurso capaz de fornecer maior flexibilidade na busca de novas soluções viáveis e de menor custo.

Neste capítulo foram vistos os principais aspectos envolvendo o conceito de janelas de tempo. Foi destacada a relação entre as ações do operador e as janelas de tempo. O estudo preocupou-se em apresentar um exemplo de extração de informação de uma janela de tempo, o modelo *blackboard*. O capítulo encerra destacando a contribuição de Mercier (Mercier, 2005) como um exemplo de formulação para o *crew scheduling problem* usando janelas de tempo.

7 MODELO PROPOSTO

Este capítulo tem como objetivo apresentar o modelo sobre o qual este trabalho tratou o problema das rotações de tripulações. O estudo demonstra os principais aspectos do problema e as estratégias que serviram de guias para o sucesso da solução do mesmo.

7.1 O ENFOQUE DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVAS PARA A SUA ABORDAGEM

O enfoque dado à metodologia de solução do problema das rotações de tripulações para este trabalho foi motivado pelos aspectos observados na revisão bibliográfica e, principalmente, na vivência obtida na empresa aérea Varig S.A., bem como na troca de experiências com Roberto Pontes (Pontes, 2000) que desenvolveu estudo semelhante para a empresa Rio-Sul.

Embora tanto a metodologia quanto as técnicas utilizadas sejam capazes de tratar o problema das escalas de vôo como um todo, este modelo se propõe a tratar, exclusivamente, o problema das rotações, o *crew pairing problem*. Esta escolha foi influenciada pelo fato deste problema ser o mais comentado na literatura e ser o causador dos maiores impactos nos resultados econômicos das empresas. Por outro lado, esta preferência procura, também, manter a fidelidade do modelo com o mundo real, evitando distorções ao comparar os resultados a serem obtidos por experimentos com o planejamento da empresa em questão.

Com relação ao horizonte de planejamento, foi adotado o critério do problema diário por ser este o mais comentado na literatura e considerado como a etapa mais importante. Como referência para os dados de entrada, foi utilizado o planejamento da Varig na quarta-feira, dia 26 de abril de 2006, do qual foram selecionados 222 trechos de vôos, conectando 35 aeroportos distintos, sendo que 3 deles são bases domiciliares de tripulantes. Para cada base têm-se os seguintes números de tripulantes disponíveis: 65, 140, 142, totalizando 347 tripulantes, para os quais serão designadas as rotações construídas. A relação dos trechos de vôos considerados é apresentada no Anexo 1.

Em virtude da explosão combinatória significativa que o *crew pairing problem* apresenta, foram consideradas atribuições que envolviam tripulações simples, utilizadas na realização de vôos domésticos com equipamento Boeing 737 normalmente. O aspecto que motivou essa escolha reside no fato de que tripulações compostas e de revezamento, utilizadas em vôos internacionais, de longa distância, geralmente estão envolvidas em problemas que têm soluções de composição não muito trabalhosas, em virtude da pouca diversidade de combinações possíveis, o que torna a geração das rotações muito evidente e de fácil organização manual.

Sendo assim, o modelo proposto teve como objetivo resolver o problema das rotações de tripulações gerando rotações cuja qualidade e validade puderam ser verificadas através do cumprimento das restrições impostas pela regulamentação profissional do aeronauta, acordos sindicais e regras internas da empresa.

Assumiu-se que os problemas de escala de vôo (*flight scheduling problem*), alocação da frota (*fleet assignment problem*) e determinação das rotas para as aeronaves (*aircraft routing problem*) que antecedem o *crew pairing problem*, ora sendo tratado, já foram solucionados e consta no planejamento da Varig, referência para este trabalho. Adotou-se, também, o fato de que o modelo não prevê a utilização de tripulante-extra (*deadheading*) e considera três bases domiciliares: Rio de Janeiro (GIG), São Paulo (GRU) e Porto Alegre (POA), tal qual é a realidade da empresa em questão.

7.2 RESTRIÇÕES PARA A GERAÇÃO DAS JORNADAS DE UM DIA DE TRABALHO

A seguir são enumeradas as restrições para a geração das jornadas de um dia de trabalho (*duties*) para tripulações simples:

1. Nenhum tripulante poderá voar mais de 9 ½ horas durante uma jornada de trabalho;
2. O tempo total de trabalho em uma jornada não pode exceder a 11 horas (está previsto um tempo de 30 minutos para a apresentação para a jornada e um tempo

de corte de motores, de mesma duração, ao seu término, o que reduz a sua duração para 10 horas de trabalho efetivo);

3. O trabalho noturno não poderá exceder a 10 horas. Nos horários mistos, que abrangem períodos noturnos e diurnos, a hora de trabalho noturno será computada como de 52 minutos e 30 segundos;
4. Nenhum tripulante pode realizar mais do que 5 pousos em uma jornada;
5. Entre 2 vôos de uma mesma jornada não poderá haver um intervalo maior do que 4 horas;
6. Em uma jornada de trabalho a tripulação só pode trocar de aeronave 1 (uma) única vez;
7. Para trocar de aeronave, deve haver um tempo suficiente de 40 minutos entre os vôos, caracterizado o tempo necessário para a tripulação deslocar-se de uma aeronave para a outra;
8. Ainda para que haja troca de aeronaves, deverá haver no pouso da aeronave que chega e no pouso da aeronave que sai, um tempo de solo de no mínimo 30 minutos, para que se possam substituir as tripulações nas 2 aeronaves.

7.3 RESTRIÇÕES PARA A GERAÇÃO DAS ROTAÇÕES

Como já foi mencionado, uma rotação é formado pela combinação de uma ou várias jornadas de trabalho e foi considerado válido se cumprisse as seguintes restrições:

1. Entre duas jornadas de trabalho deve ser observado um intervalo mínimo de 12 horas para repouso;
2. Todo tripulante deve retornar à sua base em no máximo 3 dias, ficando assim, estabelecido o limite máximo de duração para uma rotação.

7.4 DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE CUSTOS

Foi adotado aqui o mesmo critério utilizado por Pimentel (Pimentel, 2005) e descrito no capítulo 4, ou seja, foi admitida uma função linear aproximativa. Sabe-se que o custo de cada coluna depende mais significativamente dos intervalos entre os vôos, uma vez que os pernoites em hotéis, períodos de inatividade durante a jornada de trabalho e dias inativos representam os maiores custos em uma rotaçãõ.

7.5 FORMULAÇÃO PARA A GERAÇÃO DAS JORNADAS DE SERVIÇO

Seja $D = \{d_s : s \in S\}$, $S = \{1, 2, \dots, q\}$, o conjunto de todas as possíveis jornadas de serviço viáveis do problema associadas a um conjunto $B = \{b_k : k \in K\}$, $K = \{1, 2, \dots, r\}$ de bases. A base associada à jornada de trabalho $d_s \in D$ é identificada por $b_{k_s} \in B$. O conjunto de jornadas de serviço associadas à base b_k é denotado por $d^k = \{d_s : s \in S^k\}$, onde $S^k \subseteq S$ é o conjunto dos índices destas jornadas de serviço.

Seja o conjunto dos dias contidos no horizonte de planejamento $H = \{h_u : u \in U\}$, $U = \{1, 2, \dots, v\}$. O conjunto de jornadas de serviço contidas no dia h_u é denotado por $d^u = \{d_s : s \in S^u\}$, onde $S^u \subseteq S$ é o conjunto dos índices destas jornadas.

Assim, $d^{ku} = \{d_s : s \in S^{ku}\}$, onde $S^{ku} = S^k \cap S^u$ é classificado segundo a posição das jornadas dentro do *pairing* e dará origem aos seguintes subconjuntos: dt^{ku} referente às jornadas de início do *pairing*, ou seja, que parte da base domiciliar; dm^{ku} relativo às jornadas no meio do *pairing*; dt^{ku} associado às jornadas de término, que retornam à base domiciliar; e df^{ku} formado pelas jornadas que partem e retornam à base domiciliar.

7.6 APLICANDO JANELA DE TEMPO

Considere um conjunto L de etapas de vôo diárias. Dado duas etapas de vôo $i, j \in L$, pode ser possível uma conexão entre estas duas etapas se a diferença entre o horário de partida da etapa j e o horário de chegada da etapa i é menor do que o mínimo tempo de intervalo para a troca de

tripulantes previsto na restrição (7) para a geração das jornadas de um dia de trabalho, no caso 40 minutos.

Seja $L = \{E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_k\}$, $L \subseteq E$, onde cada E_s , $1 \leq s \leq k$, é um subconjunto do conjunto de todas as etapas E , isto é, $E_s \subseteq E$, e todas as etapas em E_s sobrepondo-se no tempo. Existe um conjunto $\Psi = \{C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_w\}$, $\Psi \subseteq E$, onde cada C_r , $1 \leq r \leq w$, consiste de um conjunto de possíveis conexões de vôo que podem ocorrer entre D_{\min}^r e D_{\max}^r . Os limites D_{\min}^r e D_{\max}^r definem uma janela de tempo em que uma conexão pode ocorrer.

7.7 O MODELO PROPOSTO

Considere um conjunto L de etapas de vôo diárias voadas por um único tipo de tripulação (tripulação simples). Cada etapa de vôo $i \in L$ é definida pelos pontos de origem e destino e os horários de partida e de chegada. Seja S o conjunto de pares de etapas de vôo para as quais a conexão entre elas pode ocorrer. Para cada $(i, j) \in S$, seja S_{ij} o conjunto de pares de horários de partida $p \in U_i$ e $q \in U_j$ para os quais a conexão entre a etapa i e a etapa j é possível. O problema é modelado com uma formulação de caminho e cada etapa de vôo respeitará as restrições descritas no início do capítulo.

Seja Ω^K o conjunto de possíveis caminhos de tripulações. Para todo caminho $\omega \in \Omega^K$, se definem constantes binárias b_{ω}^i que assumem valor 1 se a etapa $i \in L$ pertence a este caminho e constantes binárias b_{ω}^{iu} que assumem valor 1 se a etapa $i \in L$ está determinada na escala $u \in U_i$ neste caminho. Seja também n_{ω}^{ijpq} igual a 1 se $i \in L$ com escala $p \in U_i$ e etapa $j \in L$ com escala $q \in U_j$ sendo executadas em seqüência no caminho ω . Seja também c_{ω} o custo de enviar uma unidade de fluxo adiante no caminho ω . Para todo caminho de tripulação $\omega \in \Omega^K$, seja e_{ω} o número de períodos de trabalho no caminho. Uma variável binária x_{ω} é definida para todo caminho de tripulação ω . Finalmente, a constante ζ^D representa o limite do número total de períodos de trabalho em todas as rotações. O modelo é expresso a seguir:

$$\text{Minimizar } \sum_{\omega \in \Omega^K} c_{\omega} x_{\omega} \ ; \quad (7.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} b_{\omega}^i x_{\omega} = 1, \quad (i \in L) \ ; \quad (7.2)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} e_{\omega} x_{\omega} \leq \zeta^D \ ; \quad (7.3)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} b_{\omega}^{iu} x_{\omega} \leq 0, \quad (i \in L, u \in U_i) \ ; \quad (7.4)$$

$$\sum_{\omega \in \Omega^K} n_{\omega}^{ijpq} x_{\omega} \leq 0, \quad ((i, j) \in S, (p, q) \in S_{ij}) \ ; \quad (7.5)$$

$$x_{\omega} \in \{0,1\} \ , \quad (\omega \in \Omega^K) \ . \quad (7.6)$$

A função objetivo (7.1) minimiza todos os custos de escala de tripulantes. A restrição (7.2) exige que cada uma das etapas de vôo seja coberta por exatamente uma tripulação. A restrição (7.3) determina um número total de períodos de trabalho permitido em todas as rotações de tripulação. A restrição (7.4) assegura que a mesma escala é escolhida pela tripulação a serviço. A restrição (7.5) faz com que a tripulação não mude de aeronave se não haja tempo suficiente para uma conexão. A restrição (7.6) garante que somente um horário de partida é escolhido para toda a etapa de vôo no caminho da tripulação ω .

7.8 A ARQUITETURA DO MODELO

O objetivo do aplicativo foi gerar um conjunto de rotações viáveis atendendo aos critérios apresentados nas seções 7.2 e 7.3. Basicamente, a arquitetura do modelo divide-se em quatro módulos: a entrada de dados, a geração da solução inicial, o processo de otimização e a saída de

dados. A arquitetura do modelo é demonstrada na figura 11 e a descrição de cada módulo se dá nos itens a seguir.

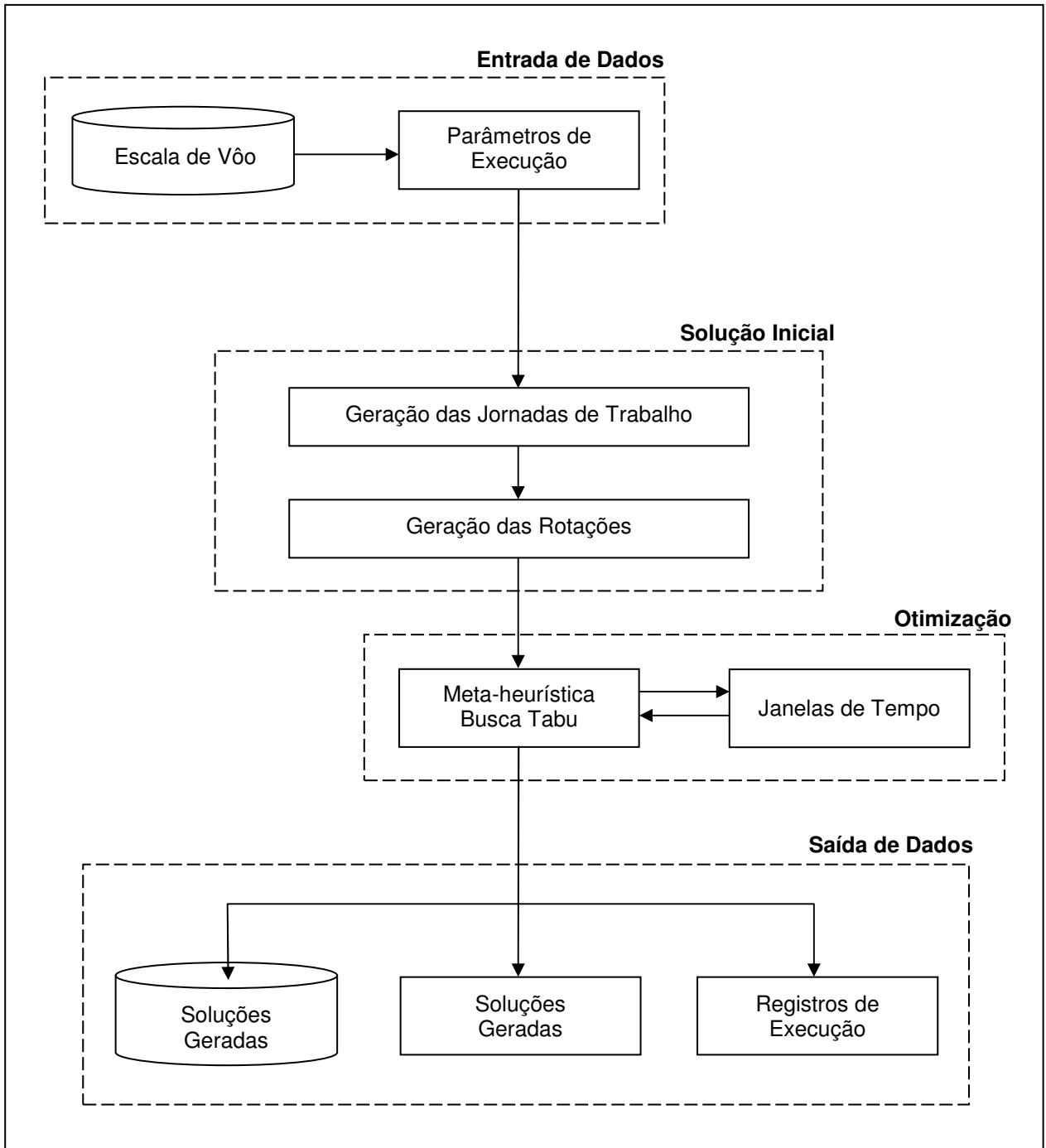


Figura 11. A Arquitetura do Modelo

7.8.1 Módulo entrada de dados

O primeiro módulo da arquitetura é responsável por obter os dados de entrada para o modelo. Este módulo está dividido em duas partes:

- **Escala de Vôo:** é uma tabela com a programação de horários de todas as etapas de vôo a serem voados no dia em questão. Os elementos básicos para a formação das rotações são as jornadas de trabalho que são formadas por estas etapas de vôos. As etapas de vôo agregam as seguintes informações: o número do trecho de vôo, que é um identificador único da etapa a ser realizada, o local de origem do vôo, o horário de partida, o horário de chegada, o local de destino do vôo e a duração do vôo em minutos. Neste modelo, optou-se por ler um arquivo do tipo planilha do Microsoft[®] Excel contendo todas as etapas de vôo, a partir do disco e armazená-lo numa estrutura de dados do tipo matriz. Cada linha desta matriz constitui uma etapa de vôo que é utilizada pelo gerador de jornadas de trabalho. A figura 12 apresenta a modelagem de uma etapa de vôo, bem como um exemplo de trecho de vôo realizado entre os aeroportos do Rio de Janeiro e Confins em Minas Gerais e no Anexo 1 pode ser visualizado a planilha utilizada nos experimentos realizados.

Nº da Etapa	Origem	Partida	Chegada	Destino	Duração
06	GIG	15h00min	16h00min	CNF	60

Figura 12. Modelagem de uma Etapa de Vôo.

- **Parâmetros de Execução:** constitui a interface da aplicação. Permite que sejam inseridos os parâmetros da Busca Tabu que servirão de calibragem para o processo de otimização: número máximo de iterações sem melhora no resultado (*BTMax*) e tamanho da Lista Tabu .

7.8.2 Módulo gerador da solução inicial

O processo de geração da solução inicial acontece em duas fases. A primeira fase combina as etapas de vôo de modo a formar jornadas de trabalho viáveis. A segunda fase do processo acomoda as jornadas de trabalho geradas em rotações.

7.8.2.1 Geração das jornadas de trabalho

A geração das jornadas de trabalho considera as etapas de vôo e gera um conjunto de todas as possíveis jornadas de trabalho por enumeração completa, ou seja, foram consideradas todas as combinações de etapas de vôo que resultassem em jornadas de trabalho viáveis. Tal procedimento também foi utilizado por Marinho (Marinho, 2004) e Pimentel (Pimentel, 2005).

Nessa primeira fase, são geradas todas as possíveis jornadas factíveis de trabalho, cada qual representando uma coluna de um modelo de particionamento de conjuntos. As colunas são geradas por meio de todas as combinações possíveis e factíveis entre as etapas de vôo. Nesse modelo, a cada etapa de vôo está associada uma linha, a qual deve ser coberta por uma única coluna. O objetivo é encontrar, a partir do conjunto total de colunas, o subconjunto de menor custo que cubra todas as linhas.

Para a formulação matemática do problema sejam:

- Dados de entrada:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a etapa de vôo } i = 1, \dots, m \text{ é coberta pela jornada } j = 1, \dots, n; \\ 0, & \text{em caso contrário.} \end{cases}$$

NE = Número máximo permitido de etapas de vôo;

c_j = Custo da jornada j ;

- Variáveis de decisão:

$x_j = 1$ se a jornada j for escolhida e 0 caso contrário.

A seguinte função deve ser minimizada:

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j ; \quad (7.1)$$

Sujeito a :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = 1 ; \quad \forall_i = 1, \dots, m \quad (7.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq NE ; \quad (7.3)$$

$$x_j \in \{0,1\} ; \quad \forall_j = 1, \dots, n \quad (7.4)$$

A restrição (7.2) especifica que cada etapa de vôo deve ser coberta por exatamente uma jornada. A restrição (7.3) indica que o número de etapas de vôo não pode superar o número máximo permitido de etapas de vôo numa jornada, controlando, assim, o número de pousos permitido por jornada. A restrição (7.4) determina que cada etapa de vôo pode ser escolhida uma única vez. O custo c_j da etapa de vôo j é o período de tempo referente ao tempo de vôo necessário para cumprir essa etapa.

Uma jornada de trabalho é, portanto, um conjunto de etapas de vôo. Para determinar o seu custo, contabiliza-se os seguintes parâmetros envolvendo o tempo em minutos:

- Horas Extras, que representa a quantidade de tempo, em minutos, que excedem a duração normal de uma jornada (570 minutos);
- Horas Excedentes, que representa a quantidade de tempo, em minutos, que excedem a duração máxima de uma jornada (660 minutos);
- Ociosidade, que representa a quantidade de tempo, em minutos, relativos à duração de uma jornada em que não há realização de viagens e o horizonte de

tempo analisado está fora dos períodos utilizados pela tripulação no cumprimento da legislação trabalhista;

- Tempo Entre Jornadas, que representa a quantidade de tempo, em minutos, que falta para a diferença entre o horário final da jornada em um dia e o horário inicial da mesma no dia subsequente alcançar 11 (onze) horas;

A figura 13 demonstra a modelagem de uma jornada de trabalho.

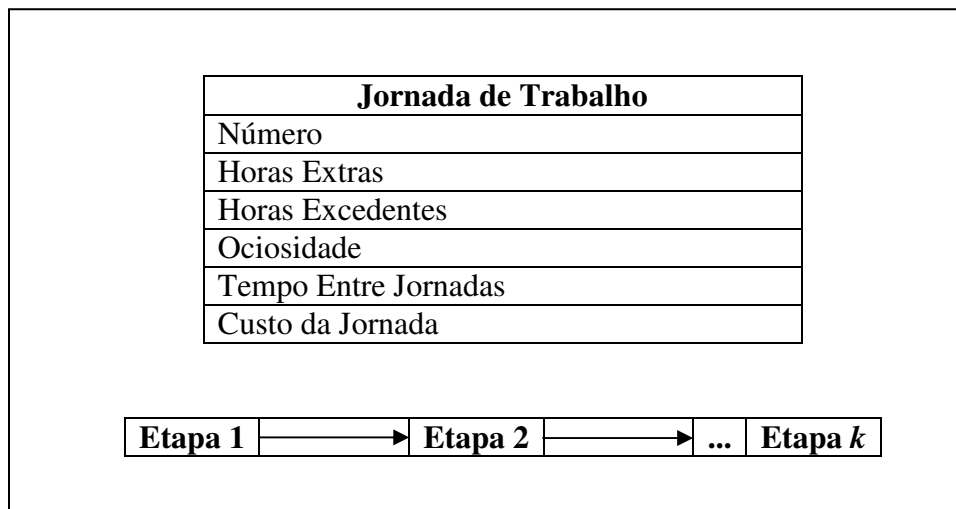


Figura 13. Modelagem de uma Jornada de Trabalho.

7.8.2.2 Geração das Rotações

Uma rotação é formada por uma série de jornadas de trabalho que atendem a característica de coincidir o local de origem da primeira etapa de vôo que formou a primeira jornada de trabalho com o local de destino da última etapa de vôo que constituiu a última jornada de trabalho. E mais, o respectivo local deve ser uma base domiciliar de tripulantes. O custo da rotação pode ser obtido pelo somatório dos custos das jornadas que formam a referida rotação e é dado em minutos. A figura 14 exhibe a modelagem de uma rotação.

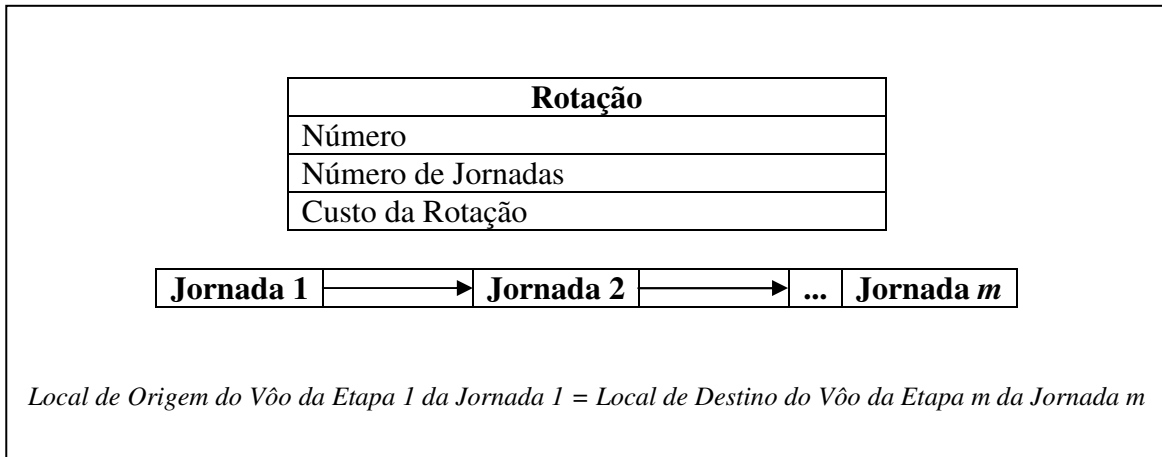


Figura 14. Modelagem de uma Rotação.

O algoritmo elaborado para a construção das rotações foi adaptado a partir do algoritmo desenvolvido por (Pimentel, 2005) e é descrito a seguir de acordo com a seguinte notação: F representa o conjunto de etapas de vôo a cobrir, $F_n \subset F$ é o conjunto de etapas de vôo em aberto em cada iteração n do algoritmo. Denota-se por t , a duração máxima, em dias, considerada para as rotações e por o_u o número de ordem do dia h_u na rotação, $o_u = 1, \dots, t$.

A partir dos conjuntos de jornadas de trabalhos gerados, utiliza-se o seguinte procedimento:

- Passo 0** (*Início do algoritmo*) Inicialize a iteração $n = 0$.
- Passo 1** (*Início das iterações*) Inicialize o índice da rotação $j_n = 0$, e faça $F_n = F$.
- Passo 2** (*Escolha do dia de início*) Selecione aleatoriamente um dia de início $u \in U$ e faça $o_u = 1$.
- Passo 3** (*Construção da lista de candidatos*) Se $o_u = 1$, ordene pelo custo todas as jornadas de trabalho $d_s \in (d_i^u \cup d_f^u)$. Se $1 < o_u < t$, ordene as rotações $d_s \in (d_m^{ku} \cup d_t^{ku})$, que mantenham a viabilidade da rotação. Se $o_u = t$, ordene as rotações $d_s \in (d_t^{ku})$, também verificando as condições de viabilidade.

- Denotou-se cd^u o conjunto ordenado resultante para os dois casos. Se $cd^u \neq 0$, vá para o Passo 5.
- Passo 4 (*Backtrackings*) Se $o_u = 1$, volte ao Passo 2, caso contrário faça $h_u = h_u - 1$, e vá para o Passo 6.
- Passo 5 (*Construção da lista restrita de candidatos*) É estabelecida a lista restrita $rcd^u \subset cd^u$, que contém um percentual p das jornadas em cd^u que apresentam os menores valores de custo.
- Passo 6 (*Escolha aleatória*) É escolhida aleatoriamente uma jornada de trabalho $d_s \in rcd^u$. Uma vez feita a escolha, se $o_u = 1$, faz-se $k = ks$ associando a rotação em construção à base b_{ks} .
- Passo 7 (*Teste de fechamento da rotação*) Se $d_s \in (di^{ku} \cup dm^{ku})$, a rotação ainda está em aberto, faça $h_u = h_u + 1$, $o_u = o_u + 1$ e vá para o Passo 3. Caso contrário, se $d_s \in (dt^{ku} \cup dj^{ku})$, a rotação já foi fechada, atualize o conjunto de etapas de vôo a cobrir: $F_n = F_n - F_j$ e envie ao processo mestre a rotação t_j .
- Passo 8 (*Teste de fechamento de uma solução viável*) Se $F_n \neq 0$, faça $j_n = j_n + 1$ e vá para o Passo 2, caso contrário, faça $n = n + 1$, se $n \leq MaxIt$, vá para o Passo 1.

O objetivo nesta fase do processo é obter uma solução viável sem a preocupação com a qualidade. A cobertura diária pôde ser atendida com ou sem relaxamento. Desta forma, já se obtém uma solução para o problema capaz de ser comparada com a solução real e submetida à validação. Esta mesma solução é considerada a solução inicial para o processo de otimização utilizando Busca Tabu.

Uma solução para o problema é formada por um conjunto de rotações que atendam a todas as etapas de vôo determinadas a serem realizadas no dia em questão. Estas etapas são distribuídas em Jornadas de Trabalho. O custo da solução é verificado através do somatório de todas as rotações que compõem a solução. A figura 15 demonstra a representação da solução do problema.

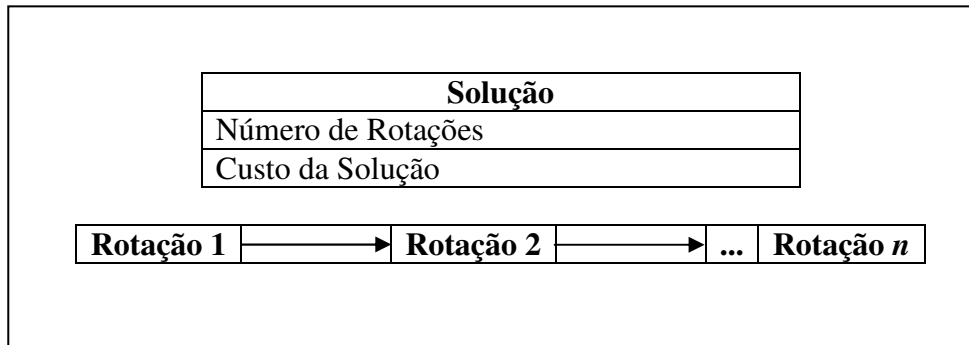


Figura 15. Representação da Solução do Problema.

7.8.2.3 Função de Avaliação

Os critérios de qualidade para avaliação de uma rotação podem variar muito dependendo da empresa e, sobretudo, das características da malha de vôos operada pela mesma. De uma forma geral, uma solução satisfatória deve apresentar um custo baixo para a empresa sem, no entanto, comprometer o nível de satisfação dos tripulantes (Pimentel, 2005).

Uma boa solução deve conter rotações de curta duração, pois além de minimizar os custos com pernoites fora da base, as rotações mais curtas facilitam o processo conseguinte de alocação efetiva de rotações aos tripulantes. Para o caso estudado foi dada preferência às rotações de até três dias.

Com relação à ocorrência de dias inativos, foi admitido o máximo de um dia de inatividade na rotação.

O custo da solução do problema é influenciado diretamente pelo custo individual de cada jornada de trabalho. Desta forma, foi admitido o custo de uma rotação como o somatório dos custos de cada jornada de trabalho e a função de avaliação considerada neste trabalho, a qual deve ser minimizada, é baseada nas seguintes variáveis de decisão:

- *HE*, que representa a quantidade de tempo, em minutos, que excedem a duração normal de uma jornada;

- *HEex*, que representa a quantidade de tempo, em minutos, que excedem a duração máxima de uma jornada;
- *Oc*, que representa a quantidade de tempo, em minutos, relativamente à duração de uma jornada em que não há realização de viagens e o horizonte de tempo analisado está fora dos períodos utilizados pela tripulação no cumprimento da legislação trabalhista;
- *TEJ*, que representa a quantidade de tempo, em minutos, que falta para a diferença entre o horário final da jornada em um dia e o horário inicial da mesma no dia subsequente alcançar 11 (onze) horas.

A importância da contribuição das variáveis de decisão na função objetivo pode ser gerenciada pela atribuição de pesos a cada uma delas. Portanto, uma solução s é avaliada com base na seguinte função f :

$$f(s) = \sum_{i=1}^n [(\alpha_1 \times HE_i) + (\alpha_2 \times HEex_i) + (\alpha_3 \times Oc_i) + (\alpha_4 \times TE_i)];$$

n é o número de jornadas;

α_i é o peso atribuído à variável de decisão com a finalidade de medir a sua importância;

7.8.2.4 Validação do modelo

A elaboração da revisão bibliográfica deste trabalho teve como objetivo estudar o mais amplamente possível o problema das rotações em tripulações de empresas aéreas. Contudo, apesar da contribuição dos trabalhos relacionados, não se encontrou nenhum, cuja etapa de testes e resultados, pudesse ser comparado de forma direta com as soluções geradas por este trabalho.

Assim, uma vez que já se tenha uma solução inicial, a metodologia utilizada para validar o modelo acontece mediante a sua comparação direta com a solução real encontrada no estudo de caso da empresa aérea Varig S.A. no dia 26 de abril de 2006. Para atestar ainda mais a fidelidade

do modelo, o mesmo é enviado à avaliação da equipe de profissionais da Gerência de Escala de Vôo da empresa em questão.

7.8.3 Módulo de otimização

Com a certeza de uma solução inicial viável e válida, o próximo passo é submeter esta solução ao algoritmo Busca Tabu com o intuito de se alcançar a solução ótima para o problema. Neste módulo, aplica-se a técnica das janelas de tempo, cuja finalidade é oferecer maior flexibilidade entre os intervalos de horários dos vôos, oportunizando novas conexões, promovendo um melhor aproveitamento dos vôos e, por consequência, gerando rotações de custo mínimo.

7.8.3.1 Parâmetros do algoritmo Busca Tabu

Inicialmente, o parâmetro *BTMax*, número máximo de iterações sem obter uma melhora na solução, do algoritmo implementado, é configurado com valor 100 e a Lista Tabu, que tem como objetivo tentar evitar movimentos que levem a regiões já visitadas do espaço de soluções, com o valor 15. A Lista Tabu implementada armazena os dois tipos de movimentos sugeridos: realocação e troca entre jornadas de trabalho. Para o modelo proposto, é considerado como critério de parada o número máximo de iterações (*BTMax*). Nesse modelo, não foi implementado o critério de Aspiração que teria a finalidade de explorar novas regiões do espaço de soluções. A figura 16 apresenta o algoritmo implementado, adaptado de (Marinho, 2004).


```

Procedimento BT ( $f(\cdot)$ ,  $N(\cdot)$ ,  $f_{(s)}$ ,  $|T|$ ,  $BT_{Max}$ ,  $s$ )
Seja  $s_0$  uma solução inicial.

Início
 $s^* \leftarrow s$  // Melhor solução obtida até então
 $Iter \leftarrow 0$  // Contador do número de iterações
 $MelhorIter \leftarrow 0$  // Iteração mais recente que forneceu  $s^*$ 
Seja  $BTmax$  o número máximo de iterações sem melhora em  $s^*$ 
 $T \leftarrow \emptyset$  // Esvazia a Lista Tabu
Enquanto ( $Iter - MelhorIter \leq BTmax$ ) faça
     $Iter \leftarrow Iter + 1$ 
    Seja  $s' \leftarrow s \oplus m$  o melhor elemento de  $N^{(R)}(s)$  tal que o movimento  $m$  não seja tabu
        ( $m \notin T$ )
     $T \leftarrow T - \{\text{movimento mais antigo}\} + \{\text{movimento que gerou } s'\}$ 
     $s \leftarrow s'$ 
    Se  $f(s) < f(s^*)$  então  $s^* \leftarrow s$ 
         $s^* \leftarrow s$ 
         $MelhorIter \leftarrow Iter$ 
    Fim se
    Seja  $s' \leftarrow s \oplus m$  o melhor elemento de  $N^{(T)}(s)$  tal que o movimento  $m$  não seja tabu
        ( $m \notin T$ )
     $T \leftarrow T - \{\text{movimento mais antigo}\} + \{\text{movimento que gerou } s'\}$ 
     $s \leftarrow s'$ 
    Se  $f(s) < f(s^*)$  então  $s^* \leftarrow s$ 
         $s^* \leftarrow s$ 
         $MelhorIter \leftarrow Iter$ 
    Fim se
Fim enquanto
Retorne  $s^*$ 
Fim BT

```

Figura 16. Algoritmo Busca Tabu Implementado

7.8.3.2 Geração de Vizinhança

Para definir a vizinhança $N(s)$ de uma dada solução s , foram desenvolvidos dois tipos de movimentos a partir da adaptação do trabalho de (Marinho, 2004). Tais movimentos visam

explorar o espaço de soluções. O primeiro caracteriza-se pela realocação de uma jornada de uma determinada rotação para outra rotação. O conjunto de todas as soluções s' geradas a partir de s através de movimentos de retirada e inserção define a vizinhança $N^{(R)}(s)$. A figura 17 ilustra esse movimento. Na figura, pode se observar um vizinho da solução s gerado pelo movimento de realocação da jornada “3” da rotação i para a rotação j .

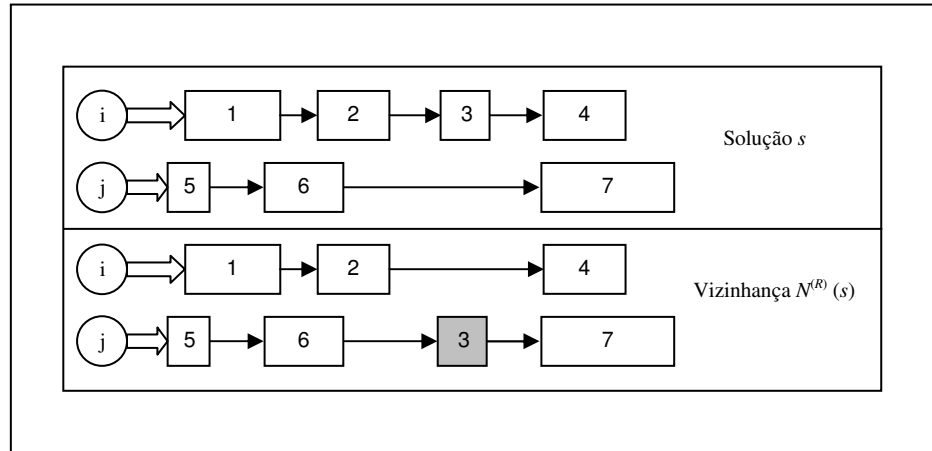


Figura 17. Movimento de Realocação de Jornada de Trabalho

O segundo movimento é caracterizado pela troca de jornadas entre duas rotações. O conjunto de todas as soluções s' geradas a partir de s através de movimentos de troca define a vizinhança $N^{(T)}(s)$. A figura 18 mostra a dinâmica desse movimento onde pode se ver um vizinho de s gerado pela troca das jornadas “4” e “7” entre as rotações i e j .

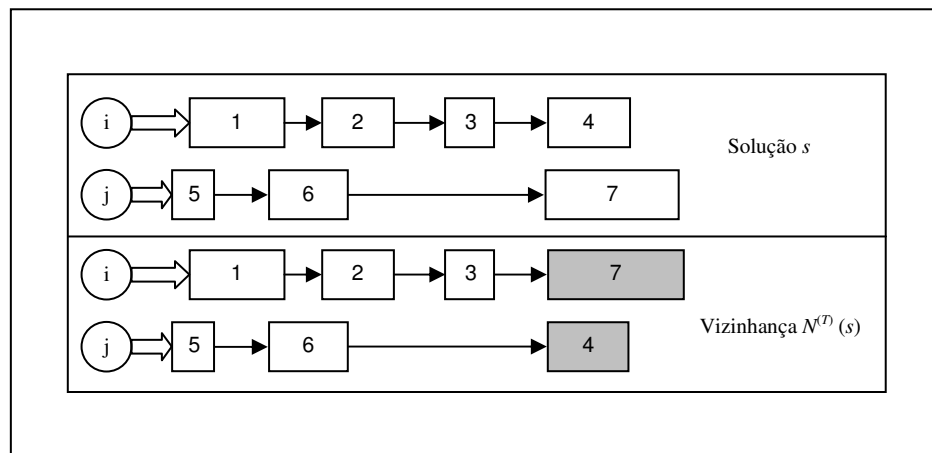


Figura 18. Movimento de Troca de Jornada de Trabalho

Uma solução s' é dita vizinha de s se for obtida desta a partir de um movimento de realocação de jornadas ou de troca de jornadas, isto é, $N(s) = N^{(R)}(s) \cup N^{(T)}(s)$.

Ao ser utilizada a técnica das janelas de tempo, o espaço de soluções sofre uma diversificação considerável, o que promove novas opções de jornadas de trabalho para compor as rotações. Isso se deve à flexibilidade nos horários de partida dos vôos que favorece o surgimento de novas possibilidades de conexões de vôos. A estratégia no uso desta técnica será melhor detalhada no item 7.8.3.3 a seguir.

Para computar a diferença $\Delta(s_1, s_2)$ entre as soluções inicial e corrente, é verificado se cada rotação da solução corrente está na solução inicial. Para tornar este passo mais otimizado, utiliza-se o seguinte esquema de comparação entre jornadas, segundo (Marinho, 2004):

1. Inicialmente, compara-se a função de avaliação de cada rotação envolvida. Se forem diferentes, conclui-se que as rotações são diferentes. Caso contrário passa-se para o passo seguinte;
2. Compara-se o número de jornadas de trabalho de cada rotação envolvida. Se forem diferentes, conclui-se que as rotações são diferentes. Caso contrário analisa-se o passo seguinte;
3. Comparam-se jornadas de trabalho por jornadas de trabalho de cada rotação envolvida. Se houver alguma jornada de trabalho diferente, conclui-se que as rotações são diferentes. Caso contrário, as rotações são iguais;

Após ser computada a diferença entre as soluções inicial e corrente, incorpora-se na solução inicial cada rotação presente na diferença. Com isso, deve-se fazer a consistência das jornadas de trabalho, eliminando-se as jornadas de trabalho redundantes. A figura 19 apresenta o algoritmo para execução dos movimentos.

```

Início
f(s)melhor ← maior valor possível // Melhor f(s) obtida até então
MelhorMov ← {} // Movimento mais recente que forneceu a menor f(s)

Para cada Rotação Rl
  Para cada dia Jornada Jl
    Se Jornada (Rl, Jl) <> Jornada (R2, J2) // Solução para uma Rotação
      Troca a Jornada (Rl, Jl) por Jornada (R2, J2)
      Se a nova Rotação é viável (J1 e J2 atendem as restrições impostas no modelo)
        Calcula a f(s) da nova Rotação
        Se f(s) < f(s) melhor
          f(s) melhor ← f(s)
          MelhorMov ← Mov
        Fim se
      Fim se
    Desfaz a troca
  Fim se
Fim para
Fim para
Retorna MelhorMov
Fim

```

Figura 19. Algoritmo para Execução dos Movimentos

O processo de otimização dirigido pelo algoritmo de Busca Tabu conta com a técnica das janelas de tempo, cujas configurações são descritas a seguir.

7.8.3.3 Aplicação das janelas de tempo

Durante a definição da vizinhança $N(s)$ de uma dada solução s , conforme descrito no item anterior, são aplicadas as técnicas de janelas de tempo, visando criar novas possibilidades de conexões de vôos, cujas jornadas de trabalho venham a construir rotações com custos ainda menores.

Antes da inserção definitiva de uma jornada de trabalho numa rotação são verificados o intervalo de tempo que separa a jornada de trabalho escolhida (horário de chegada) e alguma outra jornada de trabalho viável (horário de partida) dentro da vizinhança que poderia fazer surgir uma nova conexão de vôo com um custo inferior a da primeira. A cada nova escolha, através dessa técnica, o processo de Busca Tabu sofre uma perturbação o que faz surgir novas possibilidades de vôos.

Foram estipulados os seguintes limites para as janelas de tempo: $D'_{\min} = 40$ minutos, mínimo tempo de intervalo para a troca de tripulantes previsto na restrição (7) para a geração das jornadas de um dia de trabalho, e $D'_{\max} = 180$ minutos, tempo de espera considerado razoável, pois atende à restrição (5) para a geração das jornadas de um dia de trabalho (240 minutos).

7.8.4 Módulo saída de dados

Ao final do processo de otimização, o sistema gera os resultados e os armazena da seguinte maneira: (i) no disco rígido é gravado um arquivo do tipo planilha do Microsoft® Excel contendo todas as rotações que formaram a solução do problema com seus respectivos custos e o custo total da solução do problema; (ii) na interface do programa são mostradas rotações que formaram a solução do problema com seus respectivos custos e o custo total da solução do problema; (iii) na mesma interface também são exibidos os resultados referentes ao processo de otimização. Na tela, são exibidos o número de vezes que o algoritmo de Busca Tabu foi executado, o número de iterações realizadas e a melhor iteração da última execução da Busca Tabu, inserções e remoções da Lista Tabu, os movimentos viáveis realizados, o percentual de melhora obtido entre a função objetivo e a solução inicial, o valor de cada parcela que compõe a função objetivo. O programa oferece a possibilidade de serem gravados os dados exibidos na tela em um arquivo do tipo texto.

Este capítulo apresentou o modelo que foi implementado para tratar o problema das rotações de tripulações, baseando-se nos estudos realizados e demonstrados ao longo deste trabalho. Detalhou a arquitetura do modelo, apresentando a dinâmica do funcionamento dos

processos e as configurações dos parâmetros dos algoritmos na fase de otimização do problema. Destacou, ainda, os mais diversos aspectos do problema e propôs uma abordagem buscando aproximar-se da realidade da empresa aérea Varig S.A.

8 VALIDAÇÃO E EXPERIMENTOS

Este capítulo descreve os procedimentos utilizados para a geração da solução real e a geração da solução inicial, o processo de validação do modelo e os experimentos realizados com os seus respectivos resultados computacionais.

O modelo proposto foi implementado na linguagem Delphi 6 em ambiente Windows XP. Os experimentos foram executados em um computador Pentium IV, 1.6 GHz com 640 MB de RAM.

8.1 PROCEDIMENTOS DE GERAÇÃO DA SOLUÇÃO REAL

Com a finalidade de avaliar a qualidade das rotações obtidas com o modelo foi feita, inicialmente, uma extração de informações a partir do planejamento da operação da empresa Varig S.A., visando verificar quais os resultados encontrados pela empresa para solucionar o problema proposto.

Observou-se que para atender as 222 etapas de vôo consideradas foram geradas pela empresa 74 jornadas de trabalho distribuídas em 24 rotações conforme ilustra a tabela 6. Em média, foram agrupadas 3 etapas de vôo por jornada de trabalho. O custo total da solução atingiu 71479 minutos. A tabela 7 demonstra os valores encontrados através do somatório dos valores de cada variável ao longo das 74 jornadas de trabalho. Os detalhes do estudo realizado, exibindo a magnitude dos valores de cada variável e os seus respectivos valores de custos são apresentados no Anexo 2.

Tabela 6 – Solução real

Número de Rotações	Custo da Solução (em minutos)
24	$f(s) = 71479$

Tabela 7 – Valores das variáveis na solução real

Jornada	HE	HEex	Oc	TEJ	Custo
Total	11136	5318	47473	7552	71479

(valores em minutos)

Nestes primeiros resultados coletados, pode-se observar que o maior custo envolve a variável que representa a Ociosidade ($Oc = 47473$ minutos). Isso acontece em decorrência do somatório dos tempos em que o tripulante ficou esperando para assumir o próximo voo. Salienta-se, também, que, em alguns casos, esse tempo pode representar 1 dia inteiro de inatividade (1440 minutos). O segundo parâmetro com valor relevante é o que trata das horas-extras, a quantidade de tempo, em minutos, que excedem a duração normal de uma jornada ($HE = 11136$ minutos). Entende-se que o valor que envolve a variável que trata do tempo que excede o período máximo permitido para uma jornada de trabalho ($HEex = 5318$ minutos) tenha sido menor por força da legislação vigente que obriga a empresa o seu cumprimento sob pena de duras multas. Já o valor observado para a variável que manipula o tempo entre jornadas de trabalho ($TEJ = 7552$ minutos) recebe forte influência, não só dos órgãos fiscalizadores que cobram os atrasos dos voos, como também das políticas de concorrência de mercado.

8.2 PROCEDIMENTOS DE GERAÇÃO DA SOLUÇÃO INICIAL

A geração da solução inicial considerou as 222 etapas de voo e gerou um conjunto de todas as possíveis jornadas de trabalho por enumeração completa, ou seja, foram consideradas todas as combinações de etapas de voo que resultassem em jornadas de trabalho viáveis. Tal procedimento também foi utilizado por Marinho (Marinho, 2004) e Pimentel (Pimentel, 2005).

A tabela 8 demonstra o resultado obtido na geração da solução inicial. Nesta fase do trabalho, o objetivo foi gerar uma solução que servisse de partida para a fase de otimização utilizando Busca Tabu e janelas de tempo. Na tabela 9 é apresentado o valor do somatório dos valores das variáveis na geração das jornadas de trabalho e no Anexo 3 pode ser visto a evolução desse procedimento com maiores detalhes.

Tabela 8 – Solução inicial

Número de Rotações	Custo da Solução (em minutos)
25	$f(s) = 96644$

Tabela 9 – Valores das variáveis na solução inicial

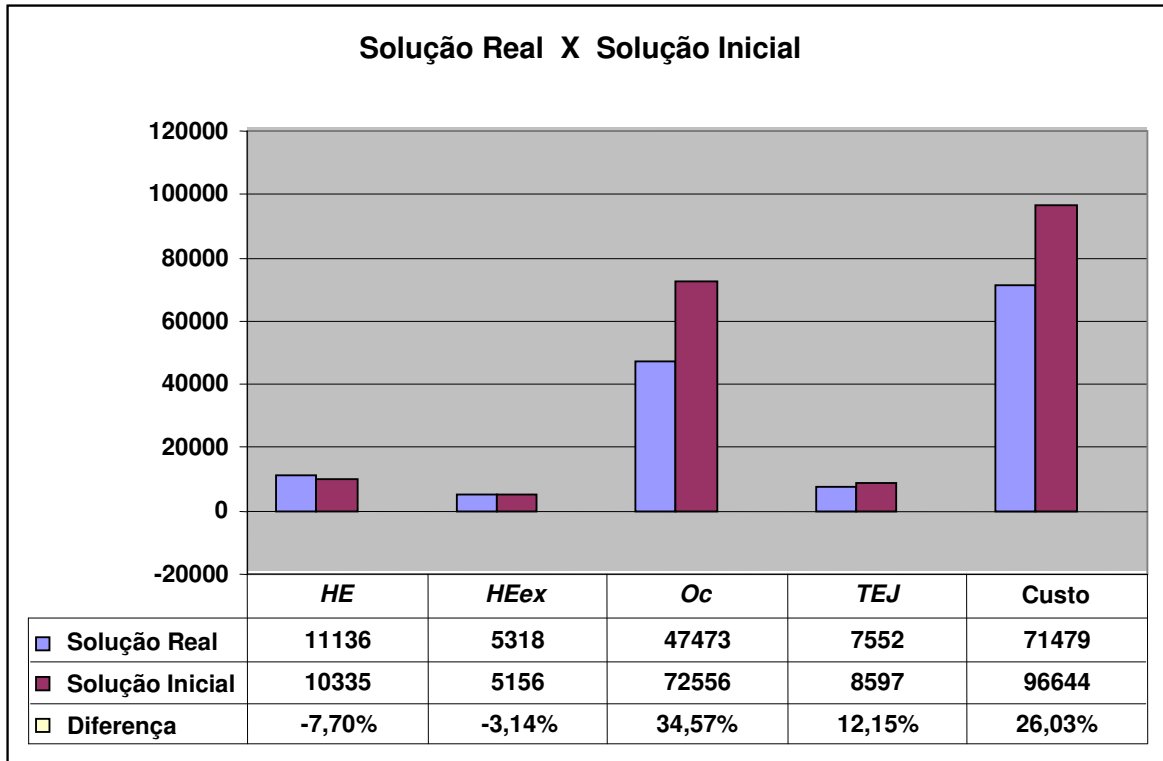
Jornada	HE	HEex	Oc	TEJ	Custo
Total	10335	5156	72556	8597	96644

(valores em minutos)

Os resultados verificados indicaram que a solução inicial gerada apresentava um custo 26,03 % maior que a solução real e que a variável *Ociosidade* ($Oc = 34,57\%$) e a variável *TempoEntreJornadas* ($TEJ = 12,15\%$) foram os parâmetros que contribuíram para esse acréscimo, tendo na primeira o maior significado. Já as variáveis *HorasExtras* ($HE = -7,70\%$) e *HorasExcedentes* ($HEex = -3,14\%$) demonstraram uma melhora pouco expressiva.

Outro detalhe observado foi que o algoritmo utilizou 25 rotações para solucionar o problema, uma rotação a mais do que a solução real. Contudo, a média de etapas de vôo utilizadas para formar uma jornada de trabalho não se alterou (3 etapas).

Embora a qualidade da solução inicial gerada tenha sido inferior à qualidade da solução real, ela teve grande importância nos demais experimentos realizados. A figura 20 exibe uma comparação entre as duas soluções e ilustra com detalhes os valores verificados para cada variável.



(valores em minutos)

Figura 20. Solução Real X Solução Inicial.

8.3 PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO MODELO

Uma vez conhecidas a solução real e a solução inicial, o próximo passo foi validar o modelo implementado com o modelo real, a partir do estudo de caso na empresa aérea Varig S.A.. Esse processo foi realizado em duas fases. Na primeira, foram comparados os dados obtidos com os dados da solução real. Observou-se que o modelo implementado apresentou resultados aceitáveis e atendeu às restrições impostas.

A segunda fase do processo de validação foi submeter os resultados obtidos ao conhecimento dos profissionais da Gerência de Escalas de Vôo da Varig S.A. e solicitar uma avaliação. As planilhas com os dados obtidos foram, então, verificados e os especialistas atestaram a fidelidade do modelo e a sua eficiência.

8.4 MÓDULO DE OTIMIZAÇÃO

A partir desta fase de testes foi introduzido o algoritmo de Busca Tabu utilizando a técnica de janelas de tempo com a finalidade de encontrar novas oportunidades de conexões de vôos e, por conseqüência, rotações de custos menores. Para este experimento foi configurado o $BTMax = 100$ e a Lista Tabu = 15. O critério de parada do algoritmo é o número de iterações sem melhora no valor da melhor solução (BTMax). Foram admitidas janelas de tempo com intervalo [40, 180], coincidindo com o horário de chegada de um determinado vôo e a possível decolagem de um outro.

Os resultados demonstram uma melhora significativa na solução inicial com um custo 57,61% menor que a solução real. Outro detalhe relevante verificado foi o fato de o algoritmo ter utilizado 3 rotações a menos (21) que a solução real (24) para determinar a solução do problema. Isso ocorreu em virtude do melhor aproveitamento das jornadas de trabalho na composição das rotações. A variável *Ociosidade (Oc)* teve seu valor bastante minimizado (72,64% em relação à solução inicial) porque, com a oportunidade de aproveitamento de outros vôos, conseguidos com as janelas de tempo, foi possível diminuir a ocorrência de dias inativos para os tripulantes em trânsito. A variável *TempoEntreJornadas (TEJ)* também sofreu influências pelo mesmo motivo (75,27% em relação à solução inicial). A análise da resolução verificou que, com relação à solução real, *HE* apresentou melhora de 51,25%; *HEex*, 45,67%; *Oc*, 58,18% e *TEJ*, 71,84%.

A tabela 10 demonstra o resultado obtido na geração da solução inicial com otimização, a tabela 11 exhibe os valores das variáveis de decisão e a figura 21 ilustra um quadro comparando a solução real com a solução inicial com otimização. O Anexo 4 apresenta os detalhes da evolução deste experimento.

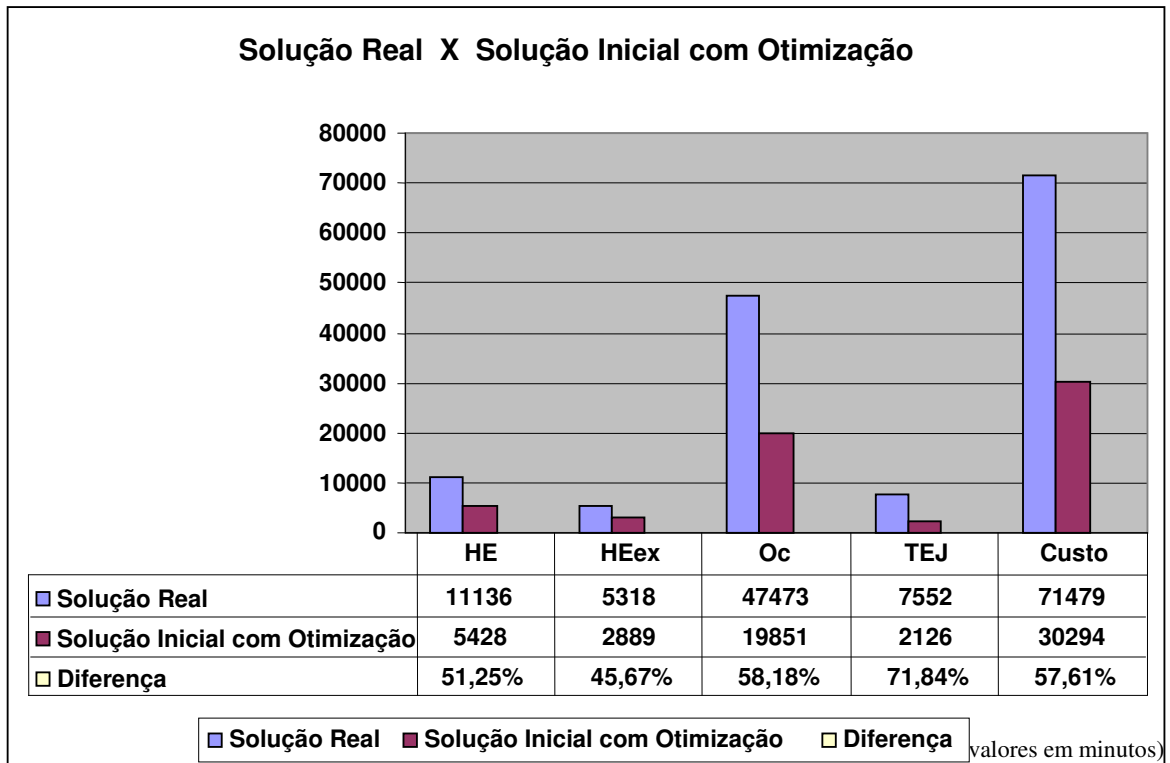
Tabela 10 – Solução inicial com otimização

Número de Rotações	Custo da Solução (em minutos)
21	$f(s) = 30294$

Tabela 11 – Valores das variáveis na solução inicial

Jornada	HE	HEex	Oc	TEJ	Custo
Total	5428	2889	19851	2126	30294

(valores em minutos)

**Figura 21.** Solução Real X Solução Inicial com Otimização.

8.5 EXPERIMENTOS

Os experimentos demonstrados a seguir tiveram o objetivo de medir o índice de minimização sobre o custo da solução do problema, avaliando o grau de influência de cada variável de decisão no processo de otimização. Foram realizados experimentos, também, visando verificar o comportamento do modelo frente à variação da magnitude dos valores atribuídos ao *BTMax* e a Lista Tabu .

8.6 SOLUÇÃO TENDENCIOSA E SOLUÇÃO NÃO-TENDENCIOSA

Nesta etapa do trabalho foram definidos pesos para cada variável de decisão com a intenção de avaliar o grau de influência de cada uma na função objetivo. Foram consideradas três soluções para os experimentos a partir desta fase de testes:

1. a solução tendenciosa;
2. a solução não tendenciosa (obtida através da solução inicial com otimização); e
3. a solução real.

A solução tendenciosa é aquela em que os pesos são escolhidos de forma a beneficiar uma determinada variável de decisão. Na solução não-tendenciosa, ao contrário, os pesos das variáveis de decisão são determinados sem que haja qualquer privilégio para qualquer variável da função de avaliação.

Assim, para cada peso, foram gerados valores aleatórios seguindo uma distribuição normal com intervalo [0, 100]. Foram realizados 100 experimentos utilizando a fase de otimização através do algoritmo Busca Tabu e da técnica de janelas de tempo. A tabela 12 apresenta as médias obtidas com esse experimento.

Tabela 12 – Médias obtidas após os experimentos

	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
Média	5536,56	3021,27	18043,64	1994,31
Desvio Padrão	110,73	144,45	1193,01	179,47

(valores em minutos)

A partir das médias encontradas através dos 100 experimentos, foi possível gerar uma solução não-tendenciosa utilizando a média da variável *Oc*. A proporção entre os pesos foi obtida através da divisão da média do valor da variável *Oc* pela média do valor das variáveis *HE*, *HEex* e *TEJ*. O valor de cada peso a ser multiplicado pela variável de decisão na função de avaliação é exibido na tabela 13.

Tabela 13 – Valores dos pesos proporcionais

α_1	α_2	α_3	α_4
3,25	5,97	1	9,04

Foram realizados mais 100 experimentos utilizando os valores proporcionais para as variáveis. Os resultados indicaram uma solução com custo igual a 19851 minutos representando um índice de minimização 72,22% melhor do que a solução real. Observou-se, também, que as variáveis apresentaram uma redução nos seus valores, contribuindo de forma mais intensa para a minimização do custo total da solução em comparação com a solução real. *HE* reduziu seu valor em 79,79%; *HEx* em 71,11%; *Oc* em 69,41% e *TEJ* em 72,22%. A tabela 14 demonstra o resultado para a solução não-tendenciosa com a utilização de 21 rotações. Já na tabela 15 são mostrados os valores de cada variável de decisão e suas magnitudes na solução do problema. A figura 22 ilustra a comparação entre a solução não tendenciosa e a solução real e o Anexo 5 traz os valores das variáveis durante a evolução do experimento com detalhes.

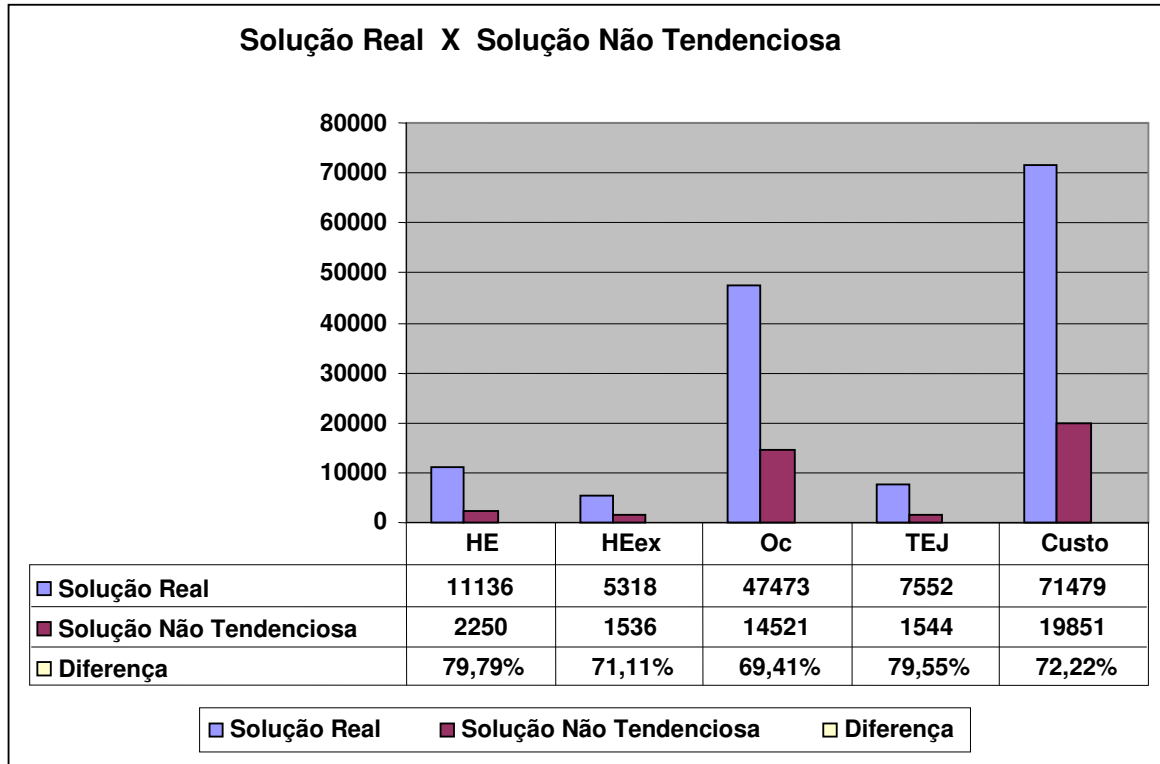
Tabela 14 – Solução não tendenciosa

Número de Rotações	Custo da Solução (em minutos)
21	$f(s) = 19851$

Tabela 15 – Valores das variáveis na solução não tendenciosa

Jornada	<i>HE</i>	<i>HEx</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>	Custo
Total	2250	1536	14521	1544	19851

(valores em minutos)



(valores em minutos)

Figura 22. Solução Real X Solução Não Tendenciosa.

Os experimentos descritos a seguir aplicaram diversas estratégias de otimização através da variação dos pesos de cada variável de decisão.

8.7 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE HORAS EXTRAS

Foram efetuados 20 experimentos visando minimizar o tempo gasto com Horas Extras através da variação do peso α_1 sobre a variável *HE*. As outras variáveis tiveram seus pesos mantidos conforme os resultados obtidos na solução não tendenciosa. A tabela 16 exhibe os valores que foram atribuídos ao peso α_1 no decorrer dos 20 experimentos e os respectivos valores das variáveis de decisão.

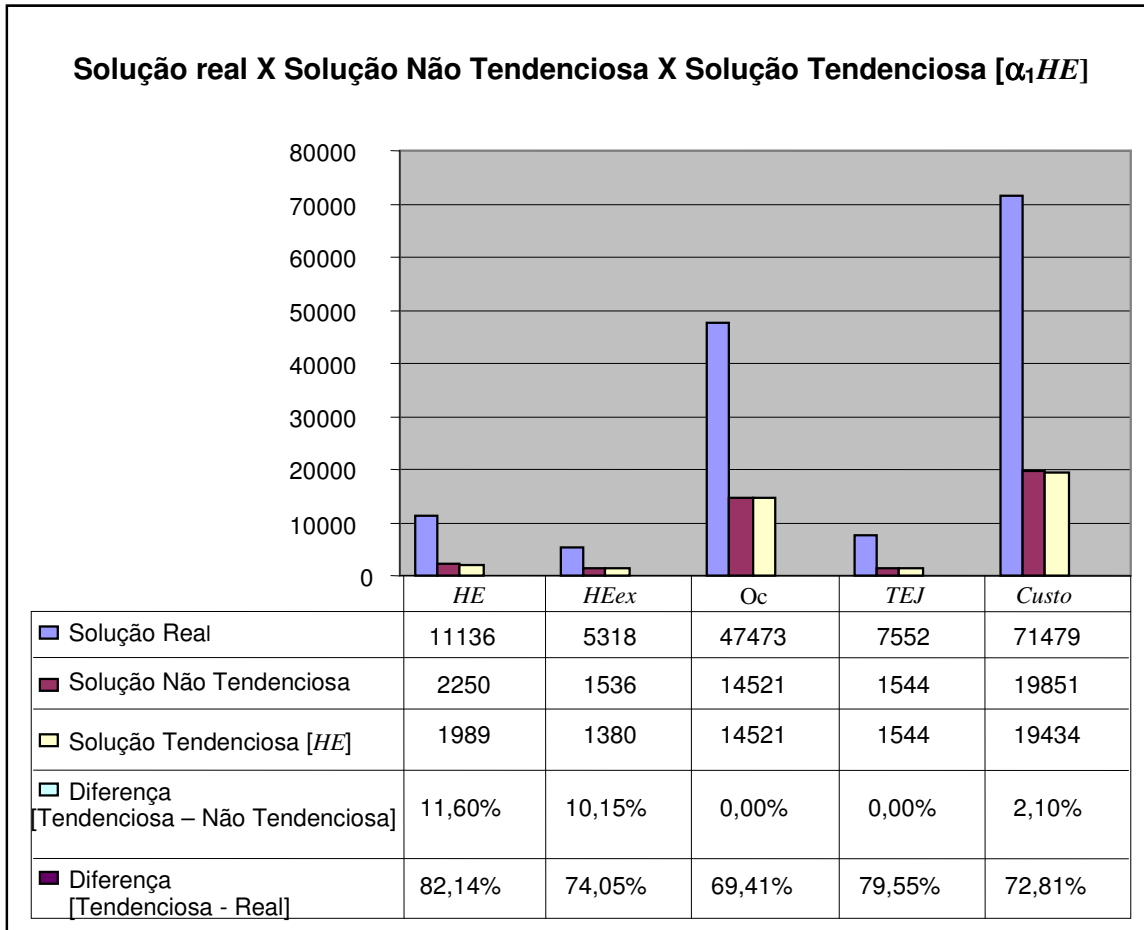
Tabela 16 – Minimização do tempo total de horas extras

Experimento	α_1	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
1	3	2250	1536	14521	1544
2	4	2250	1536	14521	1544
3	5	2250	1536	14521	1544
4	10	2250	1536	14521	1544
5	15	2250	1536	14521	1544
6	20	2250	1536	14521	1544
7	25	2160	1536	14521	1544
8	30	2160	1536	14521	1544
9	35	2160	1536	14521	1544
10	40	2160	1536	14521	1544
11	45	2160	1536	14521	1544
12	50	2160	1536	14521	1544
13	60	2160	1536	14521	1544
14	70	1989	1380	14521	1544
15	80	1989	1380	14521	1544
16	90	1989	1380	14521	1544
17	100	1989	1380	14521	1544
18	200	1989	1380	14521	1544
19	300	1989	1380	14521	1544
20	500	1989	1380	14521	1544

(valores em minutos)

Ao serem analisados os resultados, observou-se que a variável *HE* é influenciada pela variação do peso quando este atinge o valor 25 e assume um valor menor ainda quando o peso é igual ou superior a 70, registrando uma melhora da ordem de 11,60% com relação à solução não tendenciosa nesta fase do processo de minimização. Verificou-se, também, que a penalização da variável *HE*, faz surgir uma redução de 10,15% no valor da variável *HEex*, com relação à solução não tendenciosa, quando o valor do peso é igual ou superior a 70, demonstrando, assim, uma dependência entre as duas variáveis. Já as variáveis *Oc* e *TEJ* não sofreram influências da variação de α_1 . A figura 23 exibe a comparação desta solução tendenciosa com as demais soluções. Através da ilustração observa-se, ainda, que a solução, privilegiando a variável *HE*, produz uma melhora no processo de minimização em torno de 2% sobre o custo total da solução comparando-se com a solução não tendenciosa. Em comparação com a solução real, esta solução tendenciosa seria capaz de reduzir 72,81% o custo total da solução, 0,6% melhor que a solução

não tendenciosa. Embora a magnitude dos resultados possa parecer de pouca expressão, é importante salientar que a despesa com horas-extras de trabalho em uma empresa aérea de grande porte, normalmente, atinge a casa dos milhares de dólares no final de um ano e qualquer economia nesse quesito não deve ser desprezada.



(valores em minutos)

Figura 23. Solução Real X Solução Não Tendenciosa X Solução Tendenciosa privilegiando α_1 .

8.8 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE HORAS EXCEDENTES

Foram executados 20 experimentos com a finalidade de minimizar o tempo total de horas que excedem o período máximo permitido para a duração de uma jornada de trabalho através da variação do peso α_2 sobre a variável *HEx*. As outras variáveis tiveram seus pesos mantidos conforme os resultados obtidos na solução não tendenciosa. A tabela 17 ilustra os valores que

foram atribuídos ao peso α_2 no decorrer dos 20 experimentos e os respectivos valores das variáveis de decisão.

Tabela 17 – Minimização do tempo total de horas excedentes de uma jornada de trabalho

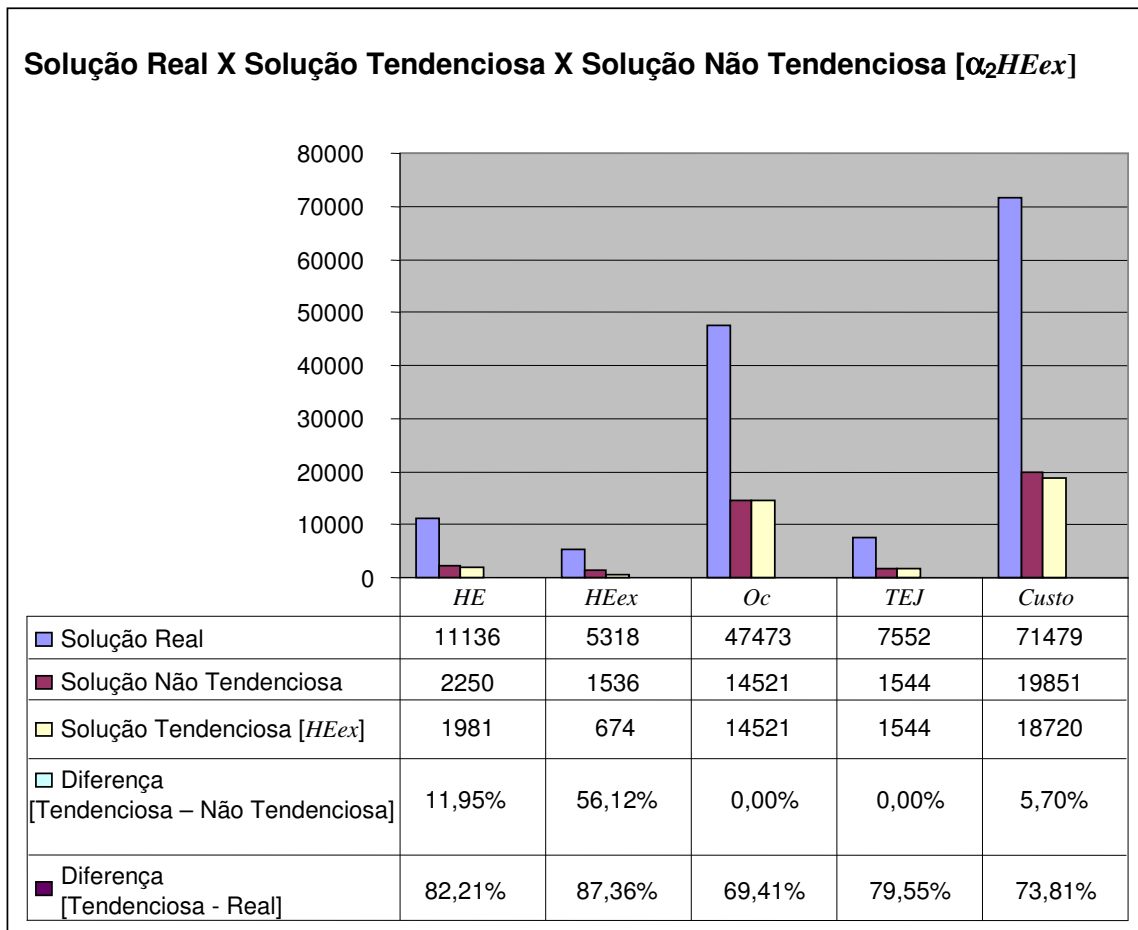
Experimento	α_2	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
1	5	2250	1536	14521	1544
2	7	2250	1536	14521	1544
3	9	2250	1536	14521	1544
4	10	2250	1536	14521	1544
5	15	2250	1536	14521	1544
6	20	2250	1536	14521	1544
7	25	1981	1134	14521	1544
8	30	1981	1134	14521	1544
9	35	1981	1134	14521	1544
10	40	1981	1134	14521	1544
11	45	1981	1134	14521	1544
12	50	1981	1134	14521	1544
13	60	1981	1134	14521	1544
14	70	1981	1134	14521	1544
15	80	1981	1134	14521	1544
16	90	1981	1134	14521	1544
17	100	1981	674	14521	1544
18	200	1981	674	14521	1544
19	300	1981	674	14521	1544
20	500	1981	674	14521	1544

(valores em minutos)

Nessa estratégia de otimização, observou-se que a variável *HEex* contribui mais para a minimização do valor da solução com pesos $\alpha_2 = 7$ e $\alpha_2 = 100$. Com esses valores, o valor de *HEex* passa a representar 1134 minutos, 26,17% menor que na solução não tendenciosa, e 674 minutos, 56,12% menor que na solução não tendenciosa, respectivamente. Esta estratégia de otimização, comparada à solução real produziu valores superiores a 80% para as variáveis *HE* e *HEex* e fez com que o custo total da solução chegasse a 73,81% melhor que a solução real.

Verifica-se, novamente, a dependência entre as variáveis *HEex* e *HE* que são influenciadas por ocasião da variação dos pesos α_2 e α_1 . A relação entre estas variáveis é

justificada, pois ambas medem os tempos de serviço dos tripulantes que excedem a jornada de trabalho ainda que sob horizontes de tempo diferentes. Já as variáveis *Oc* e *TEJ* permaneceram inalteradas. Esse comportamento também é admitido porque estas variáveis tratam dos tempos em que os tripulantes estão à disposição da empresa, porém sem estarem trabalhando efetivamente. A figura 24 mostra detalhes da relação entre as soluções e os valores assumidos pelas variáveis de decisão.



(valores em minutos)

Figura 24. Solução Real X Solução Não Tendenciosa X Solução Tendenciosa privilegiando α_2 .

8.9 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO TOTAL DE OCIOSIDADE

A próxima etapa dessa fase de testes trabalhou com a estratégia de otimização da solução do problema privilegiando a variável Oc , que representa a quantidade de tempo, em minutos, relativa à duração de uma jornada em que não há realização de viagens.

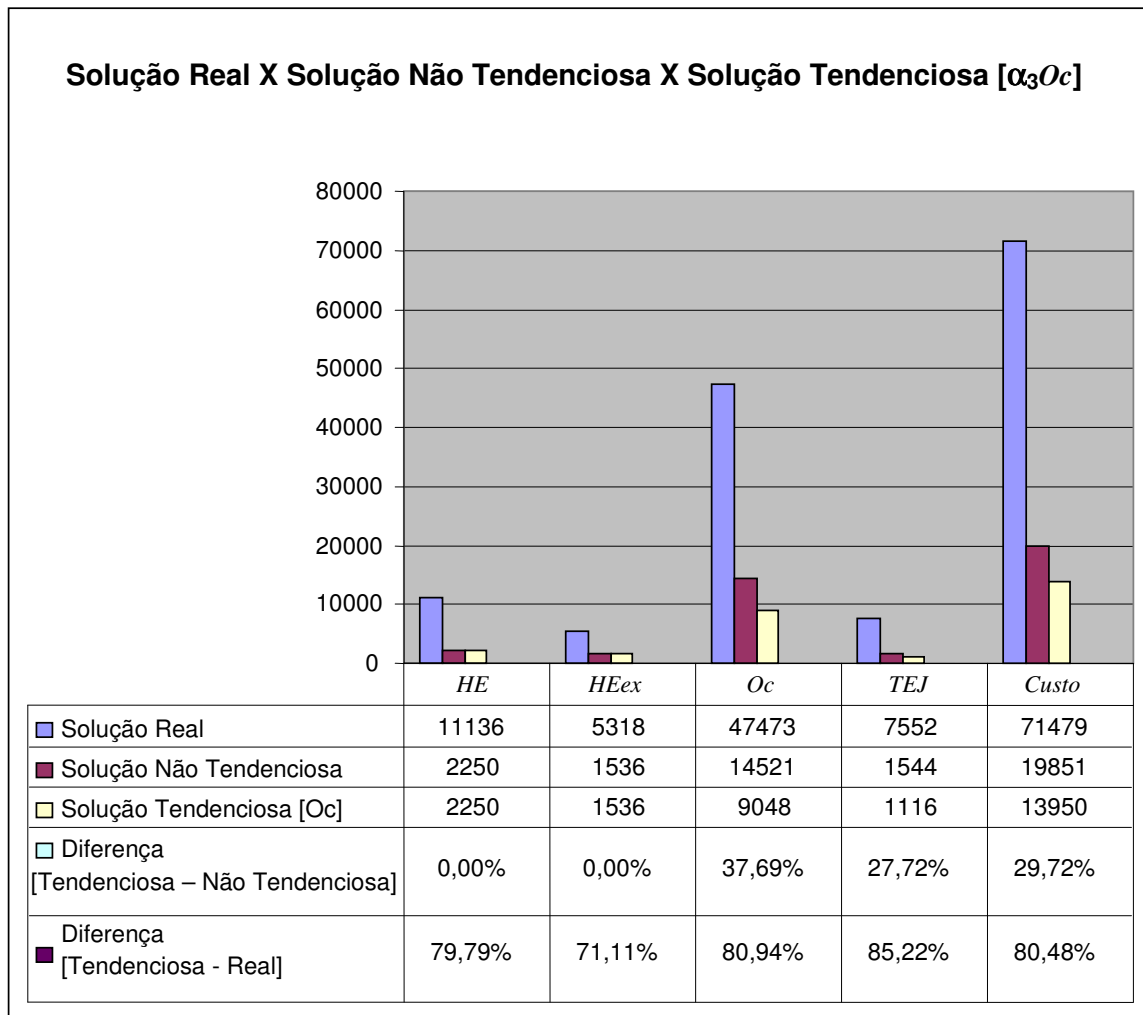
Foram executados 20 experimentos com a finalidade de minimizar o tempo total do que é considerada ociosidade, ou seja, são, basicamente, os intervalos em que os tripulantes esperam para assumir os vôos dentro de uma jornada de trabalho e o tempo de inatividade fora da base domiciliar em que o tripulante não está efetivamente trabalhando. Os experimentos ocorreram através da variação do peso α_3 sobre a variável Oc . As demais variáveis tiveram seus pesos mantidos conforme os resultados obtidos na solução não tendenciosa. A tabela 18 apresenta os valores que foram atribuídos ao peso α_3 no decorrer dos 20 experimentos e os respectivos valores das variáveis de decisão.

Tabela 18 – Minimização do tempo total de horas em ociosidade

Experimento	α_3	HE	$HEex$	Oc	TEJ
1	1	2250	1536	14521	1544
2	3	2250	1536	14521	1544
3	5	2250	1536	14521	1544
4	10	2250	1536	14521	1544
5	15	2250	1536	12049	1323
6	20	2250	1536	12049	1323
7	25	2250	1536	12049	1323
8	30	2250	1536	12049	1323
9	35	2250	1536	12049	1323
10	40	2250	1536	12049	1323
11	45	2250	1536	10174	1208
12	50	2250	1536	10174	1208
13	60	2250	1536	10174	1208
14	70	2250	1536	10174	1208
15	80	2250	1536	10174	1208
16	90	2250	1536	9048	1116
17	100	2250	1536	9048	1116
18	200	2250	1536	9048	1116
19	300	2250	1536	9048	1116
2	500	2250	1536	9048	1116

(valores em minutos)

O Experimento revelou que a variável de decisão Oc contribuiu mais para o processo de minimização quando o peso α_3 atingiu os valores 15 ($Oc = 12049$), 45 ($Oc = 10174$) e 90 ($Oc = 9048$). Houve uma redução de 37,69% no valor da variável em questão com relação à solução não tendenciosa. Já, se for comparada com a solução real, Oc foi reduzida para 80,94%. Esta estratégia foi capaz de resolver o problema com um custo 80% melhor que a solução real e 29,72% melhor que a solução não tendenciosa. A figura 25 apresenta a comparação das soluções real, não tendenciosa e tendenciosa privilegiando a variável que trata da ociosidade.



(valores em minutos)

Figura 25. Solução Real X Solução Não Tendenciosa X Solução Tendenciosa privilegiando α_3 .

8.10 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO ENTRE JORNADAS

Foram efetuados 20 experimentos com o objetivo de minimizar o período de tempo entre jornadas de trabalho através da variação do peso α_4 sobre a variável *TEJ*. As outras variáveis tiveram seus pesos mantidos conforme os resultados obtidos na solução não tendenciosa. A tabela 19 demonstra os valores que foram atribuídos ao peso α_4 no decorrer dos 20 experimentos e os respectivos valores das variáveis de decisão.

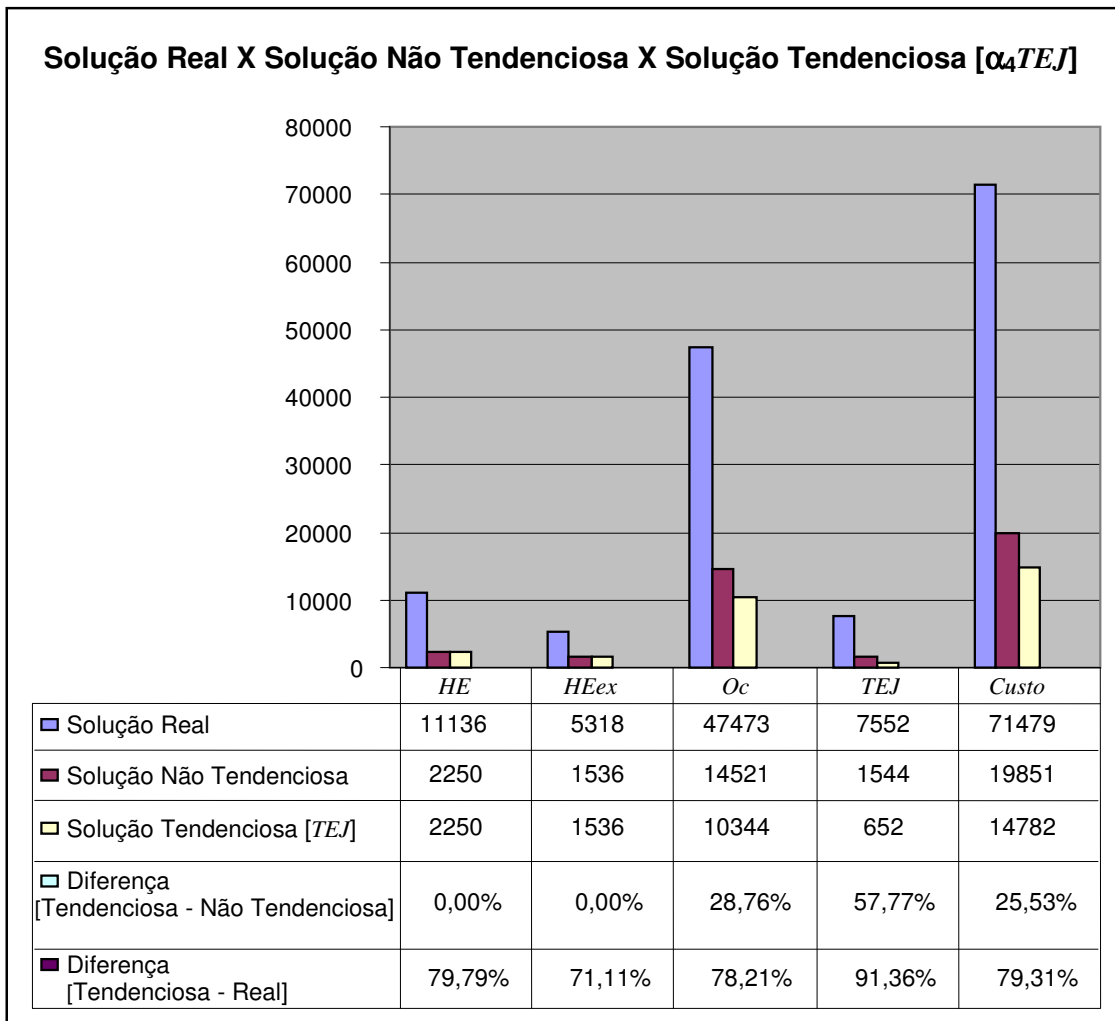
Tabela 19 – Minimização do tempo entre jornadas de trabalho

Experimento	α_4	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
1	9	2250	1536	14521	1544
2	10	2250	1536	14521	1544
3	11	2250	1536	14521	1544
4	12	2250	1536	14521	1544
5	15	2250	1536	14521	1544
6	20	2250	1536	14521	1544
7	25	2250	1536	14521	1544
8	30	2250	1536	12576	904
9	35	2250	1536	12576	904
10	40	2250	1536	12576	904
11	45	2250	1536	12576	904
12	50	2250	1536	12576	904
13	60	2250	1536	12576	904
14	70	2250	1536	12576	904
15	80	2250	1536	12576	904
16	90	2250	1536	10344	652
17	100	2250	1536	10344	652
18	200	2250	1536	10344	652
19	300	2250	1536	10344	652
20	500	2250	1536	10344	652

(valores em minutos)

Os resultados obtidos com esse experimento mostram que o valor da variável *TEJ* é reduzida em 41,45% quando α_4 torna-se igual ou superior a 30 e sofre uma redução maior ainda, 57,77%, quando α_4 atinge o valor de 90, permanecendo neste patamar até o final da experiência. Durante a evolução do estudo foi possível perceber a dependência entre as variáveis de decisão

TEJ e *Oc* novamente. A análise dos resultados indica que uma solução tendenciosa privilegiando a variável *TEJ* seria capaz de oferecer uma solução para o problema com um custo 79,31% menor que a solução real. A figura 26 expõe a comparação dos resultados nas soluções real, não tendenciosa e tendenciosa privilegiando a variável *TEJ*.



(valores em minutos)

Figura 26. Solução Real X Solução Não Tendenciosa X Solução Tendenciosa privilegiando α_4 .

A tabela 20 exibe um resumo dos resultados obtidos quando se tratou o problema com uma solução tendenciosa e demonstra a contribuição de cada variável no custo total da solução para o problema das rotações. Verificou-se que a maior influência esteve sobre a variável que trata a ociosidade (*Oc*). O estudo demonstra que a efetiva aplicação de políticas de minimização

sobre esse parâmetro pode fazer com que o custo na solução do problema atinja índices de redução da ordem de 80% em comparação com o que se conseguiu através da solução real. Com relação à técnica aplicada na solução do problema, observou-se que as janelas de tempo ofereceram maior flexibilidade nos horários de partida, o que permitiu a possibilidade de novas conexões e o aproveitamento melhor das jornadas de trabalho. Como consequência dessa estratégia, obteve-se valores menores para as variáveis que tratam da ociosidade dos tripulantes e do tempo entre jornadas de trabalho o que refletiu diretamente na minimização do custo total da solução do problema.

Tabela 20 – Resumo dos resultados com uma solução tendenciosa

Privilégio	Valor da Solução (em minutos)	Fator de minimização em comparação com a solução real
α_1 <i>HE</i>	19434	72,81%
α_2 <i>HEex</i>	18720	73,81%
α_3 <i>Oc</i>	13950	80,48%
α_4 <i>TEJ</i>	14782	7931%

8.11 ANÁLISE DO BTMax E DO TAMANHO DA LISTA TABU

Conforme já descrito, os experimentos realizados até essa etapa de testes utilizaram o algoritmo Busca Tabu com os parâmetros *BTMax* = 100 e Lista Tabu = 15. Contudo, sentiu-se a importância de se fazer mais experiências com o algoritmo, visando avaliar a influência dos referidos parâmetros na função objetivo.

Assim, foram realizados 5 experimentos envolvendo a solução não tendenciosa e as soluções tendenciosas descritas nos itens anteriores com os seus respectivos privilégios sobre as variáveis de decisão. A tabela 21 apresenta os valores selecionados para os pesos proporcionais na solução não tendenciosa e a tabela 22 exhibe os valores selecionados para os pesos proporcionais para cada variável a ser privilegiada nas soluções tendenciosas.

Tabela 21 – Valores dos pesos proporcionais na solução não tendenciosa

Experimento	α_1	α_2	α_3	α_4
1	3,25	5,97	1	9,04

Tabela 22 – Valores dos pesos proporcionais nas soluções tendenciosas

Experimento	Variável Privilegiada	α_1	α_2	α_3	α_4
2	<i>HE</i>	500	5,97	1	9,04
3	<i>HEex</i>	3,25	500	1	9,04
4	<i>Oc</i>	3,25	5,97	500	9,04
5	<i>TEJ</i>	3,25	5,97	1	500

Na tabela 23, observam-se os valores definidos para os parâmetros *BTMax* e Lista Tabu .

Tabela 23 – Valores definidos para os parâmetros do algoritmo Busca Tabu

<i>BTMax</i>	Lista Tabu
100	30
200	50
300	70
500	100
700	150
900	200
1000	300
1500	500
2000	700
3000	1000

Tabela 24 – Resultados utilizando a solução não tendenciosa

<i>BTMax</i>	Lista Tabu	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
100	30	2250	1536	14521	1544
200	50	2250	1536	14521	1544
300	70	2250	1536	14521	1544
500	100	2250	1536	14521	1544
700	150	2250	1536	14521	1544

900	200	2250	1536	14521	1544
1000	300	2250	1536	14521	1544
1500	500	2250	1536	14521	1544
2000	700	2250	1536	14521	1544
3000	1000	2250	1536	14521	1544

As tabelas que seguem demonstram o comportamento das variáveis de decisão no experimento onde são modificados os parâmetros do algoritmo de Busca Tabu.

Tabela 25 – Resultados utilizando a solução tendenciosa privilegiando *HE*

<i>BTMax</i>	<i>Lista Tabu</i>	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
100	30	1989	1380	14521	1544
200	50	1989	1380	14521	1544
300	70	1989	1380	14521	1544
500	100	1989	1380	14521	1544
700	150	1989	1380	14521	1544
900	200	1989	1380	14521	1544
1000	300	1989	1380	14521	1544
1500	500	1989	1380	14521	1544
2000	700	1989	1380	14521	1544
3000	1000	1989	1380	14521	1544

Tabela 26 – Resultados utilizando a solução tendenciosa privilegiando *HEex*

<i>BTMax</i>	<i>Lista Tabu</i>	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
100	30	1981	674	14521	1544
200	50	1981	674	14521	1544
300	70	1981	674	14521	1544
500	100	1981	674	14521	1544
700	150	1981	674	14521	1544
900	200	1981	674	14521	1544
1000	300	1981	674	14521	1544
1500	500	1981	674	14521	1544
2000	700	1981	674	14521	1544
3000	1000	1981	674	14521	1544

Tabela 27 – Resultados utilizando a solução tendenciosa privilegiando *Oc*

<i>BTMax</i>	Lista Tabu	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
100	30	2250	1536	9048	1116
200	50	2250	1536	9048	1116
300	70	2250	1536	9048	1116
500	100	2250	1536	11856	5994
700	150	2250	1536	11856	5994
900	200	2250	1536	8185	998
1000	300	2250	1536	8185	998
1500	500	2250	1536	9048	1116
2000	700	2250	1536	9048	1116
3000	1000	2250	1536	9048	1116

Tabela 28 – Resultados utilizando a solução tendenciosa privilegiando *TEJ*

<i>BTMax</i>	Lista Tabu	<i>HE</i>	<i>HEex</i>	<i>Oc</i>	<i>TEJ</i>
100	30	2250	1536	10344	652
200	50	2250	1536	10344	652
300	70	2250	1536	10344	652
500	100	2250	1536	10344	652
700	150	2250	1536	10344	652
900	200	2250	1536	91183	708
1000	300	2250	1536	91183	708
1500	500	2250	1536	10344	652
2000	700	2250	1536	10344	652
3000	1000	2250	1536	10344	652

Com a análise dos resultados desse experimento, constatou-se que a magnitude do parâmetro *BTMax* e o tamanho da Lista Tabu influenciaram na estratégia que visa minimizar a ociosidade dos tripulantes e o tempo entre jornadas de trabalho. O estudo concluiu que o aumento nas posições da Lista Tabu incrementou as estratégias de diversificação da vizinhança oferecendo a oportunidade de ser visitado um número maior de soluções. Verificou-se, também, que a variação no valor de *BTMax* agiu como política de intensificação para o algoritmo Busca Tabu.

Os experimentos foram realizados com êxito, contudo constatou-se o alto custo computacional envolvido. Em média, as experiências levaram 11 horas e 28 minutos para serem realizadas.

9 CONCLUSÕES

Este trabalho fez uma abordagem para a solução de problemas de rotações de tripulações em empresas aéreas, envolvendo atribuições de tripulações simples. Foi adotado o critério do problema diário por ser este o mais comentado na literatura e considerado como a etapa mais importante. Como referência para os dados de entrada, foi utilizado o planejamento da Varig S.A. na quarta-feira, dia 26 de abril de 2006, do qual foram selecionados 222 trechos de vôos, conectando 35 aeroportos distintos, sendo que 3 deles são bases domiciliares de tripulantes.

Através do estudo de caso realizado obteve-se a solução real para o problema que serviu de referência para o processo de validação ao ser comparada com a solução inicial gerada pelo modelo. Optou-se por um comportamento conservador ao se tratar, exclusivamente, o problema das rotações – *crew pairing problem* – na tentativa de se manter a fidelidade do modelo implementado com os resultados obtidos na solução real. Outro aspecto para justificar esse posicionamento reside no fato de o problema das rotações ser o estágio na solução do problema das escalas de vôo mais comentado na literatura e o que mais causa impactos na economia das empresas.

O modelo implementado está baseado numa função objetivo que reflete as estratégias de otimização segundo as variáveis de decisão e seus respectivos pesos, capazes de medir a influência de cada uma das variáveis na qualidade da solução do problema. O custo da solução do problema é influenciado diretamente pelo custo individual de cada jornada de trabalho. Assim, a função objetivo, visando o melhor aproveitamento das tripulações, teve como meta minimizar a quantidade de tempo que excedem a duração normal de uma jornada de trabalho, a quantidade de tempo que excedem a duração máxima de uma jornada de trabalho, a quantidade de tempo relativamente à duração de uma jornada em que não há realização de viagens e a quantidade de tempo que falta para a diferença entre o horário final da jornada em um dia e o horário inicial da jornada em um dia subsequente, de acordo com a legislação trabalhista vigente.

A aplicação desenvolvida utilizou a meta-heurística Busca Tabu que, a partir de uma solução inicial viável, é responsável pela otimização da solução do problema. Foram utilizados

dois critérios para a geração de vizinhança: o primeiro critério está baseado nos movimentos de realocação das jornadas de trabalho dentro de uma rotação, e o segundo critério, consiste na troca de jornadas de trabalho entre rotações diferentes. Ambos os movimentos visam diminuir os tempos gastos com horas-extras das tripulações, os tempos em que a jornada de trabalho tem seu tempo máximo excedido, os tempos de ociosidade das tripulações e os tempos entre jornadas de trabalho. O processo de otimização utilizou, também, técnica de janelas de tempo que criaram novas possibilidades de conexões de vôos, cujas jornadas de trabalho compuseram rotações com custos menores ainda.

9.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS E VALIDAÇÃO

Com a finalidade de avaliar a qualidade das rotações obtidas com o modelo foi feita, inicialmente, uma extração manual de informações a partir do planejamento da operação da empresa Varig S.A., visando verificar quais os resultados encontrados pela empresa para solucionar o problema proposto. A solução real obtida demonstrou que foram geradas, pela empresa, 74 jornadas de trabalho distribuídas em 24 rotações para solucionar o problema com um custo de 71479 minutos. Observou-se, também, que a variável que mais contribuiu para o resultado tratava dos tempos em que as tripulações encontram-se ociosas, mesmo estando à disposição da empresa. O valor do custo dessa ociosidade representou 47473 minutos.

A geração da solução inicial considerou as 222 etapas de vôo e gerou um conjunto de todas as possíveis jornadas de trabalho por enumeração completa, ou seja, foram consideradas todas as combinações de etapas de vôo que resultassem em jornadas de trabalho viáveis. O algoritmo utilizou 25 rotações para solucionar o problema, uma rotação a mais do que a solução real e os resultados verificados indicaram que a solução inicial gerada apresentava um custo 26,03 % maior que a solução real e que a variável *Ociosidade* ($Oc = 34,57 \%$) e a variável *TempoEntreJornadas* ($TEJ = 12,15 \%$) foram os parâmetros que contribuíram para esse acréscimo, tendo na primeira o maior significado. Já as variáveis *HorasExtras* ($HE = -7,70 \%$) e *HorasExcedentes* ($HEex = -3,14 \%$) demonstraram uma melhora pouco expressiva.

Com os resultados das soluções real e inicial, partiu-se para o processo de validação do modelo, comparando o modelo implementado, a partir da solução inicial, com a solução real obtida no estudo de caso da empresa aérea Varig S.A.. Selecionou-se na literatura utilizada as publicações, cujas experiências, mais se aproximavam com os objetivos deste trabalho. Infelizmente, os estudos que mais contribuiriam possuíam características que impediam a comparação direta dos experimentos. Pimentel (Pimentel, 2005), por exemplo, tratou o problema mensal considerando a utilização de tripulantes extras e avaliou os tempos de processamento para diversos algoritmos empregados na solução do problema. Pimentel (Pimentel, 2005), apesar da colaboração com relação aos principais conceitos envolvendo o estudo, tratou o problema visando uma avaliação da média de quilômetros e horas voadas nas rotações geradas. Assim, decidiu-se que o melhor critério para a validação deste trabalho seria a comparação direta entre a solução real e a solução inicial gerada e para obter-se uma segurança maior com relação à fidelidade do modelo, submeteu-se o mesmo à avaliação da então Gerência de Escalas de Vôo da empresa em questão. O resultado dessas iniciativas atestou que o modelo apresentou valores aceitáveis para a solução do problema e atendeu às restrições impostas sendo considerado válido.

O processo de otimização da solução inicial introduziu o algoritmo de Busca Tabu utilizando a técnica de janelas de tempo com a finalidade de encontrar novas oportunidades de conexões de vôos e, por consequência, rotações de custos menores. Para este experimento foi configurado o $BTMax = 100$ e a Lista Tabu = 15. Para estabelecer o critério de parada do algoritmo utilizou-se o número de iterações sem melhora no valor da melhor solução (BTMax). Foram admitidas janelas de tempo com intervalo [40, 180], coincidindo com o horário de chegada de um determinado vôo e a possível decolagem de um outro. Os resultados demonstram uma melhora significativa na solução inicial com um custo 57,61% menor que a solução real. Outro detalhe relevante verificado foi o fato de o algoritmo ter utilizado 3 rotações a menos (21) que a solução real (24) para determinar a solução do problema. Isso ocorreu em virtude do melhor aproveitamento das jornadas de trabalho na composição das rotações. A variável *Ociosidade (Oc)* teve seu valor bastante minimizado (72,64% em relação à solução inicial) porque, com a oportunidade de aproveitamento de outros vôos, conseguidos com as janelas de tempo, foi possível diminuir a ocorrência de dias inativos para os tripulantes em trânsito. A variável *TempoEntreJornadas (TEJ)* também sofreu influências pelo mesmo motivo (75,27% em

relação à solução inicial). A análise da resolução verificou que, com relação à solução real, *HE* apresentou melhora de 51,25%; *HEex*, 45,67%; *Oc*, 58,18% e *TEJ*, 71,84%.

A próxima etapa da fase de experimentos definiu pesos para cada variável de decisão com a intenção de avaliar o grau de influência de cada uma na função objetivo. Foram realizados mais 100 experimentos utilizando os valores proporcionais para as variáveis. Os resultados indicaram uma solução com custo igual a 19851 minutos representando um índice de minimização 72,22% melhor do que a solução real. Observou-se, também, que as variáveis apresentaram uma redução nos seus valores, contribuindo de forma mais intensa para a minimização do custo total da solução em comparação com a solução real. *HE* reduziu seu valor em 79,79%; *HEex* em 71,11%; *Oc* em 69,41% e *TEJ* em 72,22%. A tabela 14 demonstra o resultado para a solução não-tendenciosa com a utilização de 21 rotações. Já na tabela 15 são mostrados os valores de cada variável de decisão e suas magnitudes na solução do problema.

Foram efetuados 20 experimentos visando minimizar o tempo gasto com Horas Extras através da variação do peso α_1 sobre a variável *HE*. Ao serem analisados os resultados, observou-se que a variável *HE* é influenciada pela variação do peso quando este atinge o valor 25 e assume um valor menor ainda quando o peso é igual ou superior a 70, registrando uma melhora da ordem de 11,60% com relação à solução não tendenciosa nesta fase do processo de minimização. Verificou-se, também, que a penalização da variável *HE*, faz surgir uma redução de 10,15% no valor da variável *HEex*, com relação à solução não tendenciosa, quando o valor do peso é igual ou superior a 70, demonstrando, assim, uma dependência entre as duas variáveis. Já as variáveis *Oc* e *TEJ* não sofreram influências da variação de α_1 . A figura 18 exhibe a comparação desta solução tendenciosa com as demais soluções. Através da ilustração observa-se, ainda, que a solução, privilegiando a variável *HE*, produz uma melhora no processo de minimização em torno de 2% sobre o custo total da solução comparando-se com a solução não tendenciosa. Em comparação com a solução real, esta solução tendenciosa seria capaz de reduzir 72,81% o custo total da solução, 0,6% melhor que a solução não tendenciosa.

Foram executados 20 experimentos com a finalidade de minimizar o tempo total de horas que excedem o período máximo permitido para a duração de uma jornada de trabalho através da

variação do peso α_2 sobre a variável *HEex*. Nessa estratégia de otimização, observou-se que a variável *HEex* contribui mais para a minimização do valor da solução com pesos $\alpha_2 = 7$ e $\alpha_2 = 100$. Com esses valores, o valor de *HEex* passa a representar 1134 minutos, 26,17% menor que na solução não tendenciosa, e 674 minutos, 56,12% menor que na solução não tendenciosa, respectivamente. Esta estratégia de otimização, comparada à solução real produziu valores superiores a 80% para as variáveis *HE* e *HEex* e fez com que o custo total da solução chegasse a 73,81% melhor que a solução real.

A próxima etapa dessa fase de testes trabalhou com a estratégia de otimização da solução do problema privilegiando a variável *Oc*, que representa a quantidade de tempo, em minutos, relativa à duração de uma jornada em que não há realização de viagens. Foram executados 20 experimentos com a finalidade de minimizar o tempo total do que é considerada ociosidade, ou seja, são, basicamente, os intervalos em que os tripulantes esperam para assumir os vôos dentro de uma jornada de trabalho e o tempo de inatividade fora da base domiciliar em que o tripulante não está efetivamente trabalhando. O Experimento revelou que a variável de decisão *Oc* contribuiu mais para o processo de minimização quando o peso α_3 atingiu os valores 15 (*Oc* = 12049), 45 (*Oc* = 10174) e 90 (*Oc* = 9048). Houve uma redução de 37,69% no valor da variável em questão com relação à solução não tendenciosa. Já, se for comparada com a solução real, *Oc* foi reduzida para 80,94%. Esta estratégia foi capaz de resolver o problema com um custo 80% melhor que a solução real e 29,72% melhor que a solução não tendenciosa.

Foram efetuados 20 experimentos com o objetivo de minimizar o período de tempo entre jornadas de trabalho através da variação do peso α_4 sobre a variável *TEJ*. Os resultados obtidos com esse experimento mostram que o valor da variável *TEJ* é reduzido em 41,45% quando α_4 torna-se igual ou superior a 30 e sofre uma redução maior ainda, 57,77%, quando α_4 atinge o valor de 90, permanecendo neste patamar até o final da experiência. Durante a evolução do estudo foi possível perceber a dependência entre as variáveis de decisão *TEJ* e *Oc* novamente. A análise dos resultados indica que uma solução tendenciosa privilegiando a variável *TEJ* seria capaz de oferecer uma solução para o problema com um custo 79,31% menor que a solução real

A etapa de experimentos que se seguiu observou a importância de se fazer mais experiências com o algoritmo Busca Tabu, visando avaliar a influência dos referidos parâmetros na função objetivo. Assim, foram realizados 5 experimentos envolvendo a solução não tendenciosa e as soluções tendenciosas descritas nos itens anteriores com os seus respectivos privilégios sobre as variáveis de decisão. Com a análise dos resultados desse experimento, constatou-se que a magnitude do parâmetro *BTMax* e o tamanho da Lista Tabu influenciaram na estratégia que visa minimizar a ociosidade dos tripulantes e o tempo entre jornadas de trabalho. O estudo concluiu que o aumento nas posições da Lista Tabu incrementou as estratégias de diversificação da vizinhança oferecendo a oportunidade de ser visitado um número maior de soluções. Verificou-se, também, que a variação no valor de *BTMax* agiu como política de intensificação para o algoritmo Busca Tabu.

Outro aspecto relevante dos experimentos constatou o alto custo computacional envolvido para a realização dos experimentos. Em média, as experiências levaram 11 horas e 28 minutos para serem executadas.

9.2 CONTRIBUIÇÃO

O trabalho contribui, em primeiro lugar, para a Ciência da Computação ao apresentar uma abordagem utilizando Busca Tabu e Janelas de Tempo no tratamento de um problema clássico de Pesquisa Operacional e com poucas referências na literatura nacional. Do o ponto de vista prático, o modelo também deixa a sua contribuição por poder ser aplicado à realidade de uma empresa aérea mediante ajustes e adaptações.

9.3 TRABALHOS FUTUROS

Com relação ao modelo atual, poderão ser feitas diversas modificações e colaborações com a finalidade de melhorá-lo tornando-o mais realístico. Entre as quais pode-se destacar:

- a inclusão do uso de tripulantes extras;

- a flexibilidade do número de dias para as rotações geradas. Este modelo prevê rotações de 3 dias e é sabido que as grandes empresas chegam a gerar rotações de até 7 dias;
- melhorar o modelo para que o mesmo possa tratar o problema semanal e o problema mensal;
- aprimorar as técnicas de geração de vizinhança;
- desenvolver uma interface mais amigável e funcional para a aplicação.

Como sugestão, para a implementação de um novo modelo poderiam ser considerados:

- o tratamento do Problema de Rotações e do Problema das Rotas de forma Integrada, assim como fez Mercier (Mercier, 2005);
- o tratamento de todo o Problema de Escala de Vôo (*Airline Scheduling Problem*) de forma integrada;
- o atendimento a situações emergenciais de contingência como atrasos e cancelamentos de vôos não programados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(Abdelghany, 2004) ABDELGHANY, A., G. EKOLLU, R. NARASIMHAN, e K. ABDELGHANY. A Proactive Crew Recovery Decision Support Tool for Commercial Airlines During Irregular Operations. **Annals of Operations Research**, Special Issue on Staff Scheduling and Rostering, n.127, p. 309–331, 2004.

(Adeli, 1995) ADELI, H., & YU, G. An Integrated Computing Environment for Solution of Complex Engineering Problems Using the Object-Oriented Programming Paradigm and a Blackboard Architecture. **Computers and Structures**, n. 54, p. 255–265, 1995.

(Allen, 1983) ALLEN, J. F. Maintaining Knowledge About Temporal Intervals. **Communication of the ACM**, v. 26 n.11, p. 832–843, 1983.

(Anbil, 1991) ANBIL, R., E.L. JOHNSON, and R. TANGA. A Gopal Approach to Crew Pairing Optimization. **IBM Systems Journal**, n.31, p.71–78, 1991.

(Anbil, 1998) ANBIL, R., FORREST, J.; PULLEYBLANK, W. Column Generation and the Airline Crew Pairing Problem. **Documenta Mathematica – Journal der Deutschen Mathematiker-Vereinigung**, n.3, p. 677–686, 1998.

(Andersson, 1997) ANDERSSON, E.; HOUSOS, E.; KOHL, N.; WEDELIN, D. Crew Pairing Optimization. **Airline Industry**, p. 1–31, Boston, MA: Kluwer Academic, 1997.

(Arroyo, 2002) ARROYO, J. E. **Heurísticas e Meta-Heurísticas para Otimização Combinatorial Multiobjetivo**. 2002. 253 f. Dissertação (doutorado), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, [2002].

(Barnhart, 1998a) BARNHART, C; LU, F.; SHENOI, R. Integrated Airline Schedule Planning. In: Yu G, **Operations research in the airline industry**. p. 384–403, Boston: Kluwer, 1998.

(Barnhart, 1998b) BARNHART, C; BOLAND, N.; CLARKE, L.; JOHNSON, E.; NEMHAUSER, G.; SHENOI, R. Flight String Models for Aircraft Fleeting and Routing. **Transportation Science** 1998; n. 32, p. 208–220.

(Barnhart, 2003) BARNHART, C.; COHN, A.M.; JOHNSON, E.L.; KLABJAN, D.; NEMHAUSER, G. VANCE, P.H. Airline Crew Scheduling. **Handbook of Transportation Science**, p. 517-560. Kluwer, Boston, 2003.

(Battiti, 1992) BATTITI, R.; TECCHIOLLI, G. Parallel Biased Search for Combinatorial Optimization: Genetic Algorithms and Tabu. **Microprocessors e Microsystems**, Amsterdam, v. 16, n. 7, p. 351-367, 1992.

(Beasley, 1996) BEASLEY, J. E.; CAO, B. A Tree Search Algorithm for the Crew Scheduling Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 94, n. 3, p. 517-526, 1996.

(Bélanger, 2005) BÉLANGER, N.; DESAULNIERS, G.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J. Periodic Airline Fleet Assignment with Time Windows, Spacing Constraints, and Time Dependent Revenues. *Les Cahiers du GERAD*, ISSN: 0711-2440, 2005.

(Bornemann, 1982) BORNEMANN, D.R. The Evolution of Airline Crew Pairing Optimization. AGIFORS - Crew Management Study Group Proceedings, Rio de Janeiro, Abril, 1982.

(Butchers, 2001) BUTCHERS, R.; DAY, P. R.; GOLDIE, A. P.; MILLER, S.; MEYER, J. A.; RYAN, D. M.; SCOTT, A. C.; WALLACE, C. A. Optimized Crew Scheduling at Air New Zealand. *Interfaces*, v. 31, n. 1, p. 30-56, 2001.

(Campanhole, 2004) CAMPANHOLE, A. **CLT - Consolidação das Leis do Trabalho e Legislação Complementar**. 108 ed., São Paulo: Atlas, 2004.

(Caserta, 2005) CASERTA, M. Tabu Search-Based Algorithm for Large-scale Crew Scheduling Problems. *Contaduría y Administración*, n. 215, p. 49-70, 2005.

(Cao, 1998) CAO, B.; BEASLEY, J. E. A Dynamic Programming Based Algorithm for the Crew Scheduling Problem. *Computers & Operations Research*, v.25, p. 567-582, 1998.

(Carvalho, 2005) Carvalho, Marco A.; Santos, André G.; Mateus, Geraldo R. **Algoritmo Genético Aplicado ao Problema Set Covering Multiobjetivo: Uma Etapa do Problema de Escalonamento de Tripulações**. XXV CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, Unisinos, São Leopoldo, 2005.

(Cavique, 1999) CAVIQUE, L.; REGO, C.; THEMIDO, I. Subgraph Ejection Chains and Tabu Search for the Crew Scheduling Problem. *Journal of the Operational Research Society*, v. 50, p. 608-616, 1999.

(Cesta, 2002) CESTA, AMEDEO; ODDI, ANGELO. A Constraint-Based Method for Project Scheduling with TimeWindows. *Journal of Heuristics*, n. 8, p. 109-136, Kluwer, Academic Publishers, Netherlands, 2002.

(Chu, 1997) CHU, H; GELMAN, E.; JOHNSON, E. Solving Large Scale Crew Scheduling Problems. *European Journal of Operational Research*, v.97, p. 260-268, 1997.

(Clarke, 1996) CLARKE, L.; HANE, C.; JOHNSON, E.; NEMHAUSER, G. Maintenance and Crew Considerations in Fleet Assignment. *Transportation Science*, n. 30, p. 249-60, 1996.

(Clarke, 1997) CLARKE, L.; JOHNSON, E.; NEMHAUSER, G.; ZHU, Z. The Aircraft Rotation Problem. *Operations Research*, v. 69 n.33, p. 46, 1997.

(Cordeau, 2001) CORDEAU, J-F; STOJKOVIĆ, G; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J.; Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling. *Transportation Science*, n. 35, p.375-388, 2001.

- (Desaulniers, 1997) DESAULNIERS, G.; DESROSIERS, J.; DUMAS, Y.; SOLOMON, M.; SOUMIS, F. Daily Aircraft Routing and Scheduling. **Management Science**, n. 43, p.841–55, 1997.
- (Daskin, 1989) DASKIN M.; PANAYOTOPOULOS, N. A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in Hub and Spoke Networks. **Transportation Science**, n. 23, p.91–99, 1989.
- (Demeulemeester, 2002) DEMEULEMEESTER, E. L.; HERROELEN, W. S. **Project Scheduling: A Research Handbook**. Kluwer, 2002, ISBN1-4020-7051-9, 708 p.
- (Dorndorf, 2002) DORNDORF, U. **Project Scheduling with Time Windows - From Theory to Applications**. Springer, 2002, ISBN 3-7908-1516-0, 175 p.
- (Feo, 1989) FEO T.; BARD J. Flight scheduling and Maintenance Base Planning. **Management Science**, n.35, p.1415–1432, 1989.
- (Freling, 2004) FRELING, R.; LENTINK, R. M.; WAGELMANS, A.P.M. A Decision Support System for Crew Planning in Passenger Transportation Using a Flexible Branch-and-Price Algorithm. **Annals of Operations Research**, Special Issue on Staff Scheduling and Rostering, n. 127, p. 203–222, 2004.
- (Gamache, 2005) GAMACHE, M.; HERTZ, A.; OUELLET, J. O. A Graph Coloring Model for a Feasibility Problem in Monthly Crew Scheduling with Preferential Bidding. **Computers & Operations Research**, edição especial, 2005. Disponível em <<http://www.gerad.ca/fichiers/cahiers/G-2005-34.pdf>> , Acesso em 23 de junho de 2005.
- (Gabbay, 1994) GABBAY, D. M.; HODKINSON, I.; REYNOLDS, M. **Temporal Logic: Mathematical Foundations and Computational Aspects**. Oxford, England: Oxford University Press, 1994.
- (Glover, 1996) GLOVER, F. Tabu Search and Adaptive Memory Programming – Advances, Applications and Challenges. In: Barr, R; Helgason, R; Kennington, J. (Ed.). **Interfaces in Computer Science and Operations Research**. Boston Dordrecht London: Kluwer, p. 1-75, 1996.
- (Glover, 1998) GLOVER, F.; LAGUNA, M. **Tabu Search**. Kluwer Academic Publishers: Boston, ISBN: 0-7923-8187-4, 408 p., 1998.
- (Goldberg, 2000) GOLDBARG, M C.; LUNA, H. P. **Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos**. ISBN 85-352-0541-1, Rio de Janeiro: Campus, 2000
- (Gomes, 2003) GOMES, H. A.; BARROS NETO, J. F. **Utilização da Metaheurística Simulated Annealing na Programação de Escala de Pessoal em Empresas de Transporte Coletivo por Ônibus**. XXXVI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Natal-RN, 2003.

- (Gopalakrishnan, 2005) GOPALAKRISHNAN, B.; JOHNSON, E. L. Airline Crew Scheduling: State-of-the-Art. **Annals of Operations Research**, n. 140, p. 305–337, Springer Science, Netherlands, 2005.
- (Gopalan, 1998) GOPALAN, R.; TALLURI, K. The Aircraft Maintenance Routing Problem. **Operations Research**, n. 46, p.260–271, 1998.
- (Greeno, 1998) GREENO, J. G. The Situativity of Knowing, Learning, and Research. **American Psychologist**, n. 53, p. 5–26, 1998.
- (Guignard, 2002) GUIGNARD, M. Lagrangian Relaxation. In: PARDALOS, P. M.; RESENDE, M. G. **Handbook of Applied Optimization**. Oxford University Press, p. 465-474, 2002.
- (Guo, 2005) GUO, Y.; MELLOULI, T.; SUHL, L.; THIEL, M. P. A Partially Integrated Airline Crew Scheduling Approach with Time-Dependent Crew Capacities and Multiple Home Bases. **European Journal of Operational Research**, 2005.
- (Hansen, 1986) HANSEN, P. The Steep Ascent Mildest Descent Heuristic for Combinatorial Programming. **Congress on Numerical Methods in Combinatorial Optimization**, Capri: [s.n.], 1986.
- (Housos, 1997) HOUSOS, E. Automatic Optimization of Subproblems in Scheduling Airline Crews. **Interfaces**, v. 27, n. 5, p. 68–77, 1997.
- (Hillier, 2001) HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 7 ed., McGraw-Hill, ISBN: 0072535105, 2001.
- (Ioachim, 1999) IOACHIM, I.; DESROSIERS, J.; SOUMIS, F.; BÉLANGER, N. Fleet Assignment and Routing with Schedule Synchronization Constraints. **European Journal of Operational Research**, n.119, p. 75-90, 1999.
- (Jaszkiewicz, 2004) JASZKIEWICZ, A. A Comparative Study of Multiple-Objective Metaheuristics on the Bi-Objective Set Covering Problem and the Pareto Memetic Algorithm. **Annals of Operations Research** n. 131, p. 135-158. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- (Kinney, 2004) KINNEY, G.; BARNES, J; COLLETTI, B. **A Group Theoretic Tabu Search Algorithm for Set Covering Problems**. Graduate program in Operations Research and Industrial Engineering, University of Texas, Austin, 2004.
- (Kirlik, 1995) KIRLIK, A. Requirements for Psychological Models to Support Design: Toward Ecological Task Analysis. In J.M. FLACH, P; HANCOCK, J. CAIRD; K. J. VICENTE, **Global perspectives on the ecology of human–machine systems**, p. 68–120. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1995.

(Kis, 2004) KIS, T. Project Scheduling: A Review of Recent Books. **Operations Research Letters**, n. 33, p. 105 – 110, 2005.

(Klabjan, 2001) KLABJAN, D.; JOHNSON, E.; NEMHAUSER, G. Solving Large Airline Crew Scheduling Problems: Random Pairing Generation and Strong Branching. **Computational Optimization and Applications**, v. 20, n. 1, p. 73–91, 2001.

(Klabjan, 2002a) KLABJAN, D.; JOHNSON, E.; NEMHAUSER, G. Airline Crew Scheduling with Regularity. **Transportation Science**, v. 35, n. 4, p. 359–374, 2002.

(Klabjan, 2002b) KLABJAN, D. ; JOHNSON, E. L.; NEMHAUSER, G. L.; GELMAN, E.; RAMASWAMY, S. Airline Crew Scheduling with Time Windows and Plane-Count Constraints. **Transportation Science**, v. 36, p. 337-348, 2002.

(Kohl, 2004) KOHL, N.; KARISCH, S. Airline Crew Rostering: Problem Types, Modeling, and Optimization. **Annals of Operations Research**, n. 127, p. 223–257, Kluwer Academic Publishers, Manufactured in The Netherlands.2004.

(Lagerholm, 2000) LAGERHOLM, M.; PETERSON, C.; SÖDERBERG, B. Airline Crew Scheduling Using Potts Mean Field Techniques. **European Journal of Operational Research**. n. 120, p. 81-96, 2000.

(Lorena, 2003) LORENA, L. A. N.; PEREIRA, M. A.; SALOMAO, S. N. A. A Relaxação Lagrangeana/Surrogate e o Método de Geração de Colunas: Novos Limitantes e Novas Colunas. **Pesquisa. Operacional**, n.1, vol.23, p.29-47. ISSN 0101-7438, 2003.

(Marinho, 2004) MARINHO, E. H.; OCHI L. S.; DRUMMOND, L. M.; SOUZA, M. J.; SILVA, G. P. Busca Tabu Aplicada ao Problema de Programação de Tripulações de Ônibus Urbano. XXXVI SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. São João del Rei, MG, 2004.

(Mauri, 2004) MAURI, G. R. E LORENA, L. A. N. Método Iterativo para Resolução do Problema de Escalonamento de Tripulações. XXXVI SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. São João Del Rei - MG, 2004.

(Meehan, 2000) MEEHAN, R. Flight Schedule Optimization for Air New Zealand's International Fleet. The 35th ANNUAL CONFERENCE OF THE OPERATIONAL RESEARCH SOCIETY OF NEW ZEALAND, VICTORIA UNIVERSITY OF WELLINGTON, New Zealand, 2000.

(Mercier, 2005) MERCIER, A.; SOUMIS F. An Integrated Aircraft Routing and Crew Scheduling Modeling with Time Windows. **Computers & Operations Research**, n. 32, p.1451-1476, 2005.

(Militello, 1998) MILITELLO, L. G.; HUTTON, R. J. B. Applied Cognitive Task Analysis (ACTA): A Practitioner's Toolkit for Understanding Task Demands. **Ergonomics**, n. 41, p. 1618–1641, 1998.

(Montana, 2000) MONTANA, D.; RANA-STEVENS, S.; LUBIN, B. The Air Crew Scheduling System: The Design of a Real-World, Dynamic Genetic Scheduler. **Proceedings of the Second Genetic and Evolutionary Computation Conference Late Breaking Papers**, 2000.

(Morelli, 1999) MORELLI, C. D.; TOSCANI, L. V. Análise de Métodos Heurísticos de Característica Gulosa. Semana Acadêmica, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

(Neumann, 2003) NEUMANN, K.; SCHWINDT, C. ; ZIMMERMANN, J. Project Scheduling with Time Windows and Scarce Resources-Temporal and Resource-Constrained Project Scheduling with Regular and Non-regular Objective Functions. **Springer**, ISBN 3-540-40125-3, 398 p, 2003.

(Nii, 1986) NII, H. P. Blackboard systems: The Blackboard Model of Problem Solving and the Evolution of Blackboard Architectures. Part I. **AI Magazine**, n. 7, p. 38–53, 1986.

(Pimentel, 2005) PIMENTEL, A. L. G. **Uma Abordagem Heurística para a Solução de Problemas de Recobrimento de Conjuntos de Grande Porte, com Aplicação à Alocação de Tripulações para Companhias Aéreas**. 91 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [2005].

(Pontes, 2000) PONTES, R. et al. An Heuristic Approach for Large Scale Crew Scheduling Problems at Rio Sul Airlines. 40TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE AGIFORS, Istanbul, Turkey. **Proceedings of Extended Abstracts**, 16 p, Agosto 2000.

(Qi, 2004) QI, X.; BARD, J.; YU G. Class Scheduling for Pilot Training. **Operations Research**, n. 52, v. 1, p. 148-162, 2004.

(Rosseti, 2003) ROSSETI, I. **Estratégias seqüenciais e paralelas de GRASP com reconexão por caminhos para o problema de síntese de redes 2-caminhos**. Dissertação (Doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

(Rothrock, 2001) ROTHROCK, L. Using Time Windows to Evaluate Operator Performance. Department of Biomedical, Industrial, and Human Factors Engineering Wright State University, **International Journal of Cognitive Ergonomics**, n. 5, v. 1, p. 1–21, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2001.

(Rubin, 1973) RUBIN, J. A Technique for the Solution of Massive Set Covering Problems with Applications to Airline Crew Scheduling. **Transportation Science**, n. 7, p. 34–38, 1973.

(Rubin, 1988) RUBIN, K. S.; JONES, P. M.; MITCHELL, C. M. OFMspert: Inference of Operator Intentions in Supervisory Control Using a Blackboard Architecture. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, n. 18, p. 618–637, 1988.

(Rushmeier, 1997) RUSHMEIER, R.; KONTOGIORGIS, S. Advances in the Optimization of Airline Fleet Assignment. **Transportation Science**, n. 31, p. 159–69, 1997.

(Russell, 1995) RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. Prentice Hall, 1995.

(Santos, 2004) SANTOS, A.G.; MATEUS, G. R. Set Covering Multiobjetivo Tratado com Algoritmo Genético. CONGRESSO LATINO-IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES Y SISTEMAS - CLAIO, Havana, v. 1. p. 7, 2004.

(Schaerf, 1996) SCHAERF, A. Tabu Search Techniques for Large High-School Timetabling Problems. 13TH NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, p. 363-368, Portland, USA, AAAI Press/MIT Press, 1996.

(Senna, 2002) SENNA, V; HARPER, P. R; VIEIRA, I. T.; SHAHANI, A. K. Um Algoritmo Genético para Alocação de Projetos. XXXIV SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL. Rio de janeiro – RJ, 2002.

(Sohoni, 2005) SOHONI, M. G.; JOHNSON E. L.; BAILEY, G. Operatinonal Airline Reserve Crew Planning. **Working paper Series**, Indian School of Business, 2005.

(Talluri, 1998) TALLURI K. The Four-Day Aircraft Maintenance Routing Problem. **Transportation Science**, n. 32, p. 43–53, 1998.

(Tu, 2002) TU, Y.; YAN, S. A Network Model for Airline Cabin Crew Scheduling. **European Journal of Operational Research**, n.140, p. 531–540, 2002.

(Vance, 1997) VANCE, P. H.; BARNHART, C.; JOHNSON, E. L.; NEMHAUSER, G. L. Airline Crew Scheduling: A New Formulation and Decomposition Algorithm. **Operations Research**, n. 2, v. 45, p. 188-200, 1997.

(Veldhuizen, 2000) VELDHUIZEN, D. A.; LAMONT, G. B. Multiobjective Evolutionary Algorithms: Analyzing the State-of-Art. **Evolutionary Computation**, n. 8, v. 2, p. 125-147, Massachusetts Institute of Technology, 2000.

(Viana, 1998) Viana, G. V. R. Meta-heurísticas e Programação Paralela em Otimização Combinatória, EUFC, 1998, 250p.

(Vicente, 1999) VICENTE, K. J. **Cognitive Work Analysis: Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work**. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1999.

(Vranes, 1991) VRANES, S.; LUCIN, M.; STANOJEVIC, M.; STEVANOVIC, V.; SUBASIC, P. Blackboard Metaphor in Tactical Decision Making. **European Journal of Operational Research**, n. 61, p. 86–97, 1991.

(Wedelin, 1995) WEDELIN, D. An Algorithm for Large-Scale 0-1 Integer Programming with Applications to Airline Crew Scheduling. **Annals of Operations Research**, n. 57, p. 283–301, 1995.

(Weinert, 1999) WEINERT, T. E.; PROKSCH, M. Best Practice Simulated Annealing for the Airline Crew Scheduling Problem. **Journal of Heuristics**, n.5, p. 419–436, Kluwer Academic Publishers, 1999.

(Yan, 2002a) YAN, S.; TUNG, T.; TU, P. Optimal Construction of Airline Individual Crew Pairings. **Computers & Operations Research**, n. 29, p. 341-363, 2002.

(Yan, 2002b) YAN, S.; CHANG, J. **Airline Cockpit Crew Scheduling**. **European Journal of Operational Research**, n. 136, v. 3, p. 501–511, 2002.

(Zeghal, 2005) ZEGHAL, F.M.; MINOUX, M. Modeling and Solving a Crew Assignment Problem in Air Transportation. **European Journal of Operational Research**, In Press, Corrected Proof. Disponível em

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCT-4GG2J1R-N/2/1d1f501eb26036081e9779165a459939>> Acesso em: 23 de Junho de 2005.

ANEXO 1

RELAÇÃO DOS TRECHOS DE VÔO CONSIDERADOS NOS EXPERIMENTOS

Nº Etapa	Origem	Partida	Chegada	Destino	Duração
1	BOG	00:10	08:00	GRU	07:50
2	RBR	00:35	02:35	PVH	02:00
3	REC	00:40	01:20	JPA	00:40
4	REC	00:40	02:00	FOR	01:20
5	REC	00:50	01:30	NAT	00:40
6	BVB	01:00	02:15	MAO	01:15
7	CWB	01:00	02:00	IGU	01:00
8	FLN	01:10	02:05	POA	00:55
9	FOR	02:00	03:10	THE	01:10
10	MAO	02:45	07:30	GRU	04:45
11	PVH	02:55	06:45	BSB	03:50
12	MAO	03:20	07:20	BSB	04:00
13	MAO	04:00	08:45	GRU	04:45
14	MAO	05:00	08:00	BEL	03:00
15	MCP	05:30	06:20	BEL	00:50
16	MCZ	05:30	06:30	SSA	01:00
17	AJU	05:40	06:20	SSA	00:40
18	EZE	05:45	08:20	GRU	02:35
19	IGU	06:00	07:00	CWB	01:00
20	POA	06:10	07:05	FLN	00:55
21	FOR	06:15	07:30	REC	01:15
22	PLU	06:20	07:30	GRU	01:10
23	GIG	06:30	07:25	VIX	00:55
24	GRU	06:30	07:30	GIG	01:00
25	MVD	06:30	08:45	GRU	02:15
26	CGH	06:36	07:38	CWB	01:02
27	FOR	06:40	10:07	GRU	03:27
28	NAT	06:45	07:25	REC	00:40
29	SCL	06:45	11:30	GRU	04:45
30	CGH	06:56	08:30	BSB	01:34
31	BEL	07:00	10:30	GIG	03:30
32	EZE	07:00	10:00	GIG	03:00
33	GIG	07:00	08:05	GRU	01:05
34	JPA	07:00	07:30	REC	00:30
35	POA	07:05	08:55	GIG	01:50
36	BSB	07:17	08:44	CGH	01:27
37	GIG	07:30	11:00	EZE	03:30
38	GIG	07:30	08:40	GRU	01:10
39	GRU	07:30	10:10	EZE	02:40
40	GRU	07:30	09:10	POA	01:40
41	CWB	07:35	08:35	GRU	01:00
42	FLN	07:35	08:45	GRU	01:10

43	BSB	08:00	09:40	GIG	01:40
44	REC	08:00	10:46	BSB	02:46
45	REC	08:05	11:15	GRU	03:10
46	CWB	08:10	09:03	CGH	00:53
47	GRU	08:15	09:20	CNF	01:05
48	REC	08:15	11:05	GIG	02:50
49	BEL	08:30	10:30	FOR	02:00
50	GRU	08:35	10:05	POA	01:30
51	REC	08:40	09:50	SSA	01:10
52	GIG	08:45	10:29	BSB	01:44
53	GRU	08:50	12:40	BOG	03:50
54	BSB	09:00	10:29	CGH	01:29
55	GRU	09:15	10:54	BSB	01:39
56	GIG	09:20	10:19	CGH	00:59
57	GRU	09:20	10:20	CWB	01:00
58	BSB	09:26	11:10	GRU	01:44
59	GRU	09:30	10:30	GIG	01:00
60	CGH	09:33	10:47	FLN	01:14
61	GIG	09:35	12:20	REC	02:45
62	GRU	09:35	10:40	FLN	01:05
63	GRU	09:35	12:25	MAO	02:50
64	GRU	09:35	12:35	SCL	03:00
65	GRU	09:45	12:45	REC	03:00
66	CGH	09:48	10:48	CWB	01:00
67	CNF	09:50	11:00	GYN	01:10
68	GIG	09:50	11:00	GRU	01:10
69	GRU	09:50	12:55	LIM	03:05
70	GIG	10:00	12:00	POA	02:00
71	POA	10:00	11:55	EZE	01:55
72	GIG	10:20	12:15	SSA	01:55
73	GRU	10:20	12:30	SSA	02:10
74	GIG	10:40	12:40	SSA	02:00
75	GRU	10:50	12:25	IGU	01:35
76	CGH	10:52	11:52	CNF	01:00
77	CWB	11:00	12:40	VVI	01:40
78	FOR	11:00	12:15	REC	01:15
79	GRU	11:00	13:45	MAO	02:45
80	CGH	11:02	12:54	BPS	01:52
81	CGH	11:05	12:31	BSB	01:26
82	CGH	11:07	12:57	BPS	01:50
83	FLN	11:10	11:55	POA	00:45
84	GIG	11:10	12:10	GRU	01:00
85	CWB	11:13	12:18	POA	01:05
86	BSB	11:15	13:45	POA	02:30
87	BSB	11:16	13:00	MAO	01:44
88	CWB	11:20	13:00	VVI	01:40
89	FLN	11:20	12:31	CGH	01:11
90	GYN	11:25	12:05	BSB	00:40
91	BSB	11:40	14:10	BEL	02:30

92	EZE	11:40	14:20	GRU	02:40
93	GIG	11:50	13:15	CWB	01:25
94	GIG	11:50	12:50	VIX	01:00
95	GRU	11:50	15:00	FOR	03:10
96	GRU	11:55	13:30	POA	01:35
97	GRU	11:55	16:55	CCS	05:00
98	GIG	12:10	13:20	GRU	01:10
99	GRU	12:10	13:10	GIG	01:00
100	CNF	12:18	13:18	GIG	01:00
101	POA	12:30	14:20	GIG	01:50
102	BSB	12:40	14:25	SSA	01:45
103	GRU	12:50	14:25	IGU	01:35
104	REC	12:50	14:05	SSA	01:15
105	POA	12:56	14:01	CWB	01:05
106	CGH	12:59	14:00	CWB	01:01
107	BSB	13:00	14:30	CGH	01:30
108	IGU	13:05	13:05	ASU	00:00
109	MAO	13:10	18:30	MEX	05:20
110	POA	13:10	14:37	CGH	01:27
111	REC	13:20	15:25	FEN	02:05
112	REC	13:20	14:35	PNZ	01:15
113	GRU	13:30	15:45	SSA	02:15
114	BPS	13:31	15:27	CGH	01:56
115	SCL	13:35	18:05	GRU	04:30
116	BPS	13:36	15:29	CGH	01:53
117	BOG	13:40	17:40	MEX	04:00
118	CWB	13:45	15:05	GIG	01:20
119	GIG	13:48	14:48	CGH	01:00
120	GIG	13:50	15:50	SSA	02:00
121	LIM	13:55	20:40	GRU	06:45
122	ASU	14:00	16:00	IGU	02:00
123	GIG	14:00	15:10	GRU	01:10
124	POA	14:00	15:30	GRU	01:30
125	GRU	14:15	19:15	CCS	05:00
126	POA	14:15	16:00	EZE	01:45
127	MAO	14:25	18:09	BSB	03:44
128	CWB	14:26	15:26	CGH	01:00
129	CWB	14:35	15:40	POA	01:05
130	CGH	14:58	16:24	BSB	01:26
131	GIG	15:00	16:00	CNF	01:00
132	GIG	15:00	17:10	IGU	02:10
133	GRU	15:00	17:55	EZE	02:55
134	CGH	15:02	16:41	POA	01:39
135	BEL	15:10	17:45	BSB	02:35
136	PNZ	15:10	16:25	REC	01:15
137	MAO	15:20	19:55	GRU	04:35
138	NAT	15:25	16:55	SSA	01:30
139	CGH	15:26	16:26	GIG	01:00
140	IGU	15:30	17:00	GRU	01:30

141	FOR	15:35	19:05	GRU	03:30
142	FEN	16:00	16:00	REC	00:00
143	GIG	16:00	18:00	POA	02:00
144	REC	16:00	17:20	SSA	01:20
145	CGH	16:09	17:08	CWB	00:59
146	GRU	16:10	20:00	BOG	03:50
147	GRU	16:20	18:35	SSA	02:15
148	POA	16:20	17:25	CWB	01:05
149	CNF	16:30	17:30	GIG	01:00
150	EZE	16:35	18:05	POA	01:30
151	REC	16:35	19:35	GIG	03:00
152	IGU	16:40	18:10	GRU	01:30
153	GIG	16:56	17:56	VIX	01:00
154	BSB	17:00	18:28	CGH	01:28
155	REC	17:00	20:05	GRU	03:05
156	BSB	17:20	18:00	GYN	00:40
157	GIG	17:30	19:16	BSB	01:46
158	CWB	17:35	18:35	GRU	01:00
159	CWB	17:40	18:45	POA	01:05
160	CCS	17:45	18:45	AUA	01:00
161	GRU	17:45	18:45	CNF	01:00
162	GRU	17:45	18:40	GIG	00:55
163	IGU	17:45	19:35	GIG	01:50
164	POA	17:50	18:45	FLN	00:55
165	CWB	18:00	19:01	CGH	01:01
166	EZE	18:00	20:35	GRU	02:35
167	CGH	18:04	19:34	BSB	01:30
168	GIG	18:15	20:15	SSA	02:00
169	REC	18:25	19:40	FOR	01:15
170	BSB	18:30	20:10	GRU	01:40
171	CWB	18:30	19:30	GRU	01:00
172	POA	18:30	20:05	GRU	01:35
173	EZE	18:35	21:35	GIG	03:00
174	GYN	18:35	20:05	GRU	01:30
175	POA	18:40	21:10	BSB	02:30
176	BSB	18:54	20:35	GIG	01:41
177	GRU	18:55	21:15	SSA	02:20
178	POA	18:55	20:35	GRU	01:40
179	CGH	18:58	20:27	BSB	01:29
180	GRU	19:00	20:00	GIG	01:00
181	POA	19:05	20:55	GIG	01:50
182	MEX	19:10	23:10	BOG	04:00
183	FLN	19:15	20:35	GRU	01:20
184	GIG	19:15	20:25	GRU	01:10
185	GIG	19:20	22:55	BEL	03:35
186	GRU	19:20	20:20	GIG	01:00
187	CNF	19:25	20:30	GRU	01:05
188	POA	19:25	20:30	CWB	01:05
189	CGH	19:31	20:25	CWB	00:54

190	GRU	19:50	21:29	BSB	01:39
191	BSB	19:55	21:50	MAO	01:55
192	MEX	19:55	03:15	MAO	07:20
193	AUA	20:00	21:00	CCS	01:00
194	FOR	20:05	22:05	BEL	02:00
195	GIG	20:15	22:15	POA	02:00
196	GIG	20:35	21:35	GRU	01:00
197	GIG	20:45	23:59	EZE	03:14
198	GRU	20:45	22:55	SSA	02:10
199	CGH	20:48	22:15	BSB	01:27
200	BOG	21:00	04:50	GRU	07:50
201	CWB	21:01	22:04	CGH	01:03
202	BSB	21:02	22:36	CGH	01:34
203	GRU	21:15	00:15	REC	03:00
204	GRU	21:15	00:40	FOR	03:25
205	GIG	21:20	00:05	REC	02:45
206	GRU	21:30	00:40	SCL	03:10
207	BSB	21:40	00:10	REC	02:30
208	GRU	21:40	22:40	GIG	01:00
209	CCS	21:45	04:30	GRU	06:45
210	GIG	21:45	23:40	SSA	01:55
211	BSB	22:06	23:50	SSA	01:44
212	GRU	22:15	00:50	MVD	02:35
213	GRU	22:20	01:15	EZE	02:55
214	BEL	22:30	23:30	MAO	01:00
215	MAO	22:35	23:50	BVB	01:15
216	GRU	22:45	23:50	PLU	01:05
217	GRU	22:45	23:45	GIG	01:00
218	BSB	22:50	00:15	RBR	01:25
219	GRU	23:05	01:55	MAO	02:50
220	GRU	23:30	00:40	FLN	01:10
221	GRU	23:35	00:30	CWB	00:55
222	BEL	23:40	00:30	MCP	00:50

ANEXO 2

SOLUÇÃO REAL DO PROBLEMA

Rotação	Jornada	HE	HEex	OC	TEJ	Custo
	1	283	67	1036	87	1473
1	2	292	113	537	108	1050
	3	162	98	40	146	446
	4	270	48	155	94	567
2	5	231	51	583	169	1034
	6	129	105	720	35	989
	7	80	10	1406	61	1557
3	8	184	43	1222	69	1518
	9	238	23	420	12	693
	10	146	65	852	2	1065
	11	93	17	459	172	741
4	12	187	142	1186	124	1639
	13	181	25	1294	69	1569
	14	179	87	1098	162	1526
	15	205	111	359	123	798
	16	151	82	393	92	718
5	17	102	143	738	131	1114
	18	137	1	533	27	698
	19	195	20	272	82	569
	20	25	89	1004	97	1215
6	21	124	47	1002	44	1217
	22	9	130	47	102	288
	23	221	111	1179	44	1555
7	24	138	128	1187	91	1544
	25	137	49	346	183	715
8	26	162	78	894	15	1149
	27	212	35	68	59	374
	28	288	46	925	80	1339
9	29	108	46	296	44	494
	30	125	90	335	155	705
	31	175	88	99	5	367
	32	42	34	563	131	770
	33	83	123	1289	118	1613
10	34	114	3	349	33	493
	35	192	145	437	51	825
	36	263	16	812	137	1228

	37	182	101	1219	17	1519
11	38	116	121	374	153	764
	39	116	122	613	190	1041
	40	62	107	1290	45	1504
12	41	295	142	1250	117	1804
	42	194	65	212	145	616
	43	182	125	518	7	832
13	44	150	5	529	100	784
	45	86	143	3	147	379
	46	183	77	27	162	449
14	47	91	145	407	80	723
	48	94	50	327	133	604
	49	210	37	820	129	1196
15	50	298	137	347	184	966
	51	230	58	899	110	1297
	52	148	17	1392	36	1593
16	53	175	99	144	147	565
	54	221	114	611	14	960
	55	148	83	71	91	393
17	56	32	19	441	226	718
	57	180	38	589	104	911
	58	15	66	620	216	917
18	59	79	23	719	75	896
	60	152	56	361	10	579
	61	191	52	778	201	1222
19	62	125	86	537	8	756
	63	29	19	195	172	415
20	64	76	17	46	157	296
	65	253	75	1147	225	1700
	66	156	7	892	72	1127
21	67	80	100	568	84	832
	68	58	129	204	88	479
22	69	181	79	1044	23	1327
	70	95	27	1122	210	1454
23	71	87	31	1368	39	1525
	72	123	51	456	224	854
24	73	172	76	179	205	632
	74	8	116	1019	52	1195
	Total	11136	5318	47473	7552	71479

ANEXO 3

SOLUÇÃO INICIAL DO PROBLEMA

Rotação	Jornada	HE	HEex	OC	TEJ	Custo
	1	92	31	1677	211	2011
1	2	10	15	151	199	375
	3	149	19	1734	145	2047
	4	49	81	1197	163	1490
2	5	244	124	1116	101	1585
	6	110	102	828	26	1066
	7	271	22	857	243	1393
3	8	48	140	1477	42	1707
	9	189	13	797	96	1095
	10	105	60	1147	101	1413
4	11	206	31	634	185	1056
	12	150	89	811	64	1114
	13	187	14	487	79	767
5	14	21	41	649	168	879
	15	88	113	222	1	424
	16	230	101	546	138	1015
6	17	171	4	1214	276	1665
	18	247	44	881	221	1393
	19	130	38	1407	136	1711
7	20	35	6	1701	234	1976
	21	222	31	1366	188	1807
	22	127	88	422	7	644
8	23	96	49	1467	25	1637
	24	63	95	199	60	417
	25	66	17	481	209	773
9	26	219	93	216	24	552
	27	44	22	1290	24	1380
	28	112	33	661	10	816
10	29	163	4	147	3	317
	30	140	139	1075	95	1449
	31	244	127	708	159	1238
11	32	13	101	907	107	1128
	33	166	150	369	245	930
	34	75	74	1588	144	1881
12	35	279	27	846	90	1242
	36	122	123	1629	173	2047

	37	148	76	1293	1	1518
13	38	267	93	1396	58	1814
	39	11	102	276	99	488
	40	104	55	1618	134	1911
14	41	114	22	401	84	621
	42	282	88	1579	132	2081
	43	30	72	1490	33	1625
15	44	182	103	1659	62	2006
	45	185	92	1660	264	2201
	46	151	24	506	112	793
16	47	67	144	1286	118	1615
	48	63	119	585	1	768
	49	252	18	336	120	726
17	50	78	26	1645	105	1854
	51	200	107	1361	63	1731
	52	40	84	1646	162	1932
18	53	11	112	1224	278	1625
	54	234	136	339	75	784
	55	15	95	1171	24	1305
19	56	71	2	1139	16	1228
	57	269	60	988	104	1421
	58	16	148	691	2	857
20	59	256	63	1100	153	1572
	60	127	53	551	130	861
	61	130	18	608	5	761
21	62	94	52	1513	110	1769
	63	45	27	1098	215	1385
	64	17	65	965	202	1249
22	65	252	74	103	176	605
	66	17	57	842	13	929
	67	174	76	1373	185	1808
23	68	198	78	1177	157	1610
	69	175	84	252	31	542
	70	106	99	856	266	1327
24	71	182	9	243	22	456
	72	241	75	1178	130	1624
	73	237	49	1436	129	1851
25	74	119	125	1671	131	2046
	75	292	113	397	103	905
	Total	10335	5156	72556	8597	96644

ANEXO 4

SOLUÇÃO INICIAL COM OTIMIZAÇÃO

Rotação	Jornada	HE	HEex	OC	TEJ	Custo
	1	96	40	186	3	325
1	2	30	27	786	12	855
	3	27	63	746	25	861
	4	106	21	470	53	650
2	5	41	54	159	33	287
	6	120	34	147	43	344
	7	82	22	651	51	806
3	8	122	19	66	10	217
	9	87	38	357	52	534
	10	44	63	19	24	150
4	11	97	23	576	5	701
	12	131	41	109	50	331
	13	130	55	873	21	1079
5	14	131	67	523	44	765
	15	71	50	930	73	1124
	16	108	54	482	3	647
6	17	64	35	180	36	315
	18	54	64	966	95	1179
	19	104	46	31	48	229
7	20	41	62	767	33	903
	21	63	35	307	26	431
	22	72	48	131	59	310
8	23	84	61	613	5	763
	24	99	52	168	97	416
	25	116	39	46	30	231
9	26	27	39	433	51	550
	27	65	59	12	2	138
	28	127	19	95	38	279
10	29	82	66	13	92	253
	30	43	23	458	86	610
	31	108	32	102	17	259
11	32	120	71	118	3	312
	33	132	59	6	60	257
	34	60	33	652	45	790
12	35	121	77	233	57	488
	36	133	58	132	14	337

	37	135	28	318	51	532
13	38	121	60	534	33	748
	39	57	67	195	11	330
	40	99	66	16	3	184
14	41	39	22	90	53	204
	42	78	42	1453	13	1586
	43	93	52	267	21	433
15	44	36	23	343	2	404
	45	47	63	266	54	430
	46	64	44	219	13	340
16	47	92	18	125	4	239
	48	49	38	12	37	136
	49	91	36	24	17	168
17	50	136	39	188	35	398
	51	122	23	148	22	315
	52	111	33	1013	10	1167
18	53	67	63	235	15	380
	54	88	59	766	47	960
	55	100	44	28	24	196
19	56	127	62	162	1	352
	57	95	67	14	68	244
	58	118	65	236	21	440
20	59	47	25	100	97	269
	60	23	26	124	4	177
	61	88	58	58	13	217
21	62	91	67	293	7	458
	63	76	50	81	54	261
	Total	5428	2889	19851	2126	30294

ANEXO 5**SOLUÇÃO NÃO TENDENCIOSA**

Rotação	Jornada	HE	HEex	OC	TEJ	Custo
	1	41	30	102	3	176
1	2	15	43	702	3	763
	3	17	7	662	16	702
	4	51	49	386	44	530
2	5	4	16	75	24	119
	6	60	36	63	34	193
	7	27	48	567	42	684
3	8	62	51	18	1	132
	9	32	32	273	43	380
	10	6	7	65	15	93
4	11	41	47	492	4	584
	12	71	29	25	41	166
	13	80	15	14	12	121
5	14	69	3	439	35	546
	15	21	20	58	64	163
	16	38	16	398	6	458
6	17	14	35	96	27	172
	18	4	6	26	86	122
	19	11	24	53	39	127
7	20	9	8	683	24	724
	21	13	35	223	17	288
	22	22	22	47	50	141
8	23	34	9	529	4	576
	24	49	18	84	88	239
	25	4	31	38	21	94
9	26	23	31	349	42	445
	27	15	11	72	7	105
	28	7	51	11	29	98
10	29	32	4	71	83	190
	30	7	47	374	60	488
	31	58	38	18	8	122
11	32	70	1	34	6	111
	33	29	11	78	14	132
	34	10	37	568	36	651
12	35	71	7	149	48	275
	36	83	12	48	5	148
	37	85	42	234	42	403
13	38	71	10	450	24	555
	39	7	3	111	2	123

	40	49	4	68	6	127
14	41	11	48	1412	8	1479
	42	28	28	1369	4	1429
	43	43	18	183	12	256
15	44	14	47	259	7	327
	45	3	7	182	45	237
	46	14	26	135	4	179
16	47	42	52	41	5	140
	48	1	32	72	28	133
	49	41	34	60	8	143
17	50	86	31	44	26	187
	51	72	47	64	13	196
	52	61	37	11	1	110
18	53	17	7	151	6	181
	54	38	11	12	11	72
	55	50	26	958	15	1049
19	56	77	8	78	8	171
	57	45	3	156	59	263
	58	60	5	152	12	229
20	59	3	45	16	88	152
	60	27	44	100	5	176
	61	38	11	26	4	79
21	62	41	3	163	2	209
	63	26	20	124	18	188
	Total	2250	1536	14521	1544	19851