FERNANDO TEIXEIRA MENDES ABRAHÃO

A META-HEURÍSTICA COLÔNIA DE FORMIGAS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE UMA FROTA DE VEÍCULOS COM MÚLTIPLAS RESTRIÇÕES: APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Doutor em Engenharia.

São Paulo
2006

FERNANDO TEIXEIRA MENDES ABRAHÃO

A META-HEURÍSTICA COLÔNIA DE FORMIGAS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE UMA FROTA DE VEÍCULOS COM MÚLTIPLAS RESTRIÇÕES: APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. Nicolau D. F. Gualda

São Paulo
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Abrahão, Fernando Teixeira Mendes
A meta-heurística colônia de formigas para solução do problema de programação de manutenção preventiva de uma frota de veículos com múltiplas restrições: aplicação na força aérea brasileira / F.T.M. Abrahão. -- São Paulo, 2006.
139 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Engenharia de transportes 2.Manutenção de aeronaves 3. Pesquisa operacional 4.Meta-heurística I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

The higher we rise, the smaller we appear to
those who do not know how to fly.

Quanto mais alto subimos, menor parecemos
para aqueles que não sabem voar.

Nietzsche, Friedrich Wilhelm (1844 – 1900)

AGRADECIMENTOS

Ser homem é, precisamente, ser responsável

Começo meus agradecimentos citando Saint Exuperry que, em *Terra dos Homens*, ajuda a situar minha humanidade. Agradeço a todas as pessoas e organizações que, direta ou indiretamente, contribuíram para a consecução deste trabalho. Agradeço, dentre outras razões, pela importância do trabalho para minha formação como homem e como profissional.

Vejo a Força Aérea Brasileira como merecedora dos meus primeiros agradecimentos. Das organizações da Força Aérea onde trabalhei, nenhuma se compara ao Instituto de Logística da Aeronáutica – ILA. Agradeço àquela família pela confiança e apoio ao longo desta jornada.

O amigo, meu comandante e colega de programa de doutoramento, Ulisses Bonasser, agradeço o exemplo dado e a serenidade nos momentos difíceis.

Agradeço a Escola Politécnica da USP pela oportunidade de me tornar responsável por tantos conhecimentos ao longo destes anos de estudo. Necessariamente, sou mais homem hoje. Ao Prof. Dr. Nicolau Dionísio Fares Gualda, agradeço por gerenciar minhas descobertas. A ele e aos demais professores, agradeço a motivação, exemplo, inspiração e o compartilhamento de conhecimentos e idéias.

Meu pai, Jairo Abrahão. Agradeço por me educar e amar.

Minha mãe, Euzébia Narval. Agradeço por me amar e educar.

Meu filho, Fernando. Agradeço por tentar entender minha ausência durante esses anos de doutoramento.

Agradeço a Valéria, minha mulher, por me fazer feliz e por me permitir fazê-la feliz.

RESUMO

A programação da manutenção preventiva de frotas de veículos é tarefa complexa e carente de métodos de solução que levem a uma programação otimizada, considerando seu aspecto sistêmico e suas restrições intrínsecas. Os problemas decorrentes são, geralmente, de caráter não linear e do tipo *NP* - Difícil, o que impede a sua formulação e solução a partir de métodos de otimização clássicos, baseados, por exemplo, em programação linear. Assim sendo, esta pesquisa buscou explorar a utilização de meta-heurísticas para a modelagem e solução do problema. A Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF (do inglês *Ant Colony Optimization – ACO*) foi selecionada como base para essa modelagem e apresentou bons resultados para a solução de problemas-teste. A metodologia proposta, baseada na versão *ACS* (do inglês *Ant Colony System*) da MCF combinada com mecanismos de intensificação e de busca local, foi aplicada para a solução do Problema de Programação da Manutenção Preventiva – PPMP de uma frota de aeronaves da Força Aérea Brasileira – FAB. Os resultados alcançados permitem concluir pela aplicabilidade da metodologia proposta para a solução do PPMP. Sugestões de extensões da metodologia proposta são também apresentas. Embora o foco das aplicações da metodologia esteja voltado para o setor de defesa, a sua aplicação a problemas semelhantes do setor privado é naturalmente cabível.

ABSTRACT

Preventive maintenance scheduling of fleets of vehicles is a complex task that requires solution techniques to achieve optimized schedules, and yet considering its systemic approach and intrinsic restrictions. Related problems are generally non linear and NP-Hard, which limit their solutions based on linear programming or other classic optimization methods. This research explores metaheuristics to solve the problem. The Ant Colony Optimization metaheuristics (ACO) was chosen to develop the problem and was successfully tested solving several test instances. The methodology proposed, based on the Ant Colony System (ACS) algorithm combined with local search mechanisms, was applied to the solution of preventive maintenance scheduling problem of a Brazilian Air Force's fleet of aircraft. Obtained results drive to a conclusion that the proposed methodology is applicable to solve preventive maintenance scheduling problems. Suggestions of extensions of this research are also presented. Even though this research focus was on the defense sector, applications to similar problems on the private sector are naturally feasible.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS..... 1

1.1. Introdução..... 1

1.2. Colocação do problema..... 1

1.3. Objetivos do trabalho..... 6

1.4. Estruturação do trabalho..... 7

CAPÍTULO 2 - O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM AERONAVES NA LITERATURA... 8

2.1. Introdução..... 8

2.2. Problema de programação da manutenção preventiva - PPMP..... 8

2.2.1.Manutenção preventiva..... 9

2.2.2.Níveis de manutenção..... 12

2.2.3.Conceito de manutenção e plano de manutenção..... 13

2.2.4.Problemas de manutenção preventiva..... 14

2.2.5.Descrição do PPMP..... 17

2.2.5.1.Classificação do PPMP.....

2.2.5.1.1.PPMP Frota Homogênea – PPMPFH..... 33

2.2.5.1.2.PPMP Frota Heterogênea – PPMPFHET..... 34

2.2.5.1.3.PPMP Múltiplos Esquadrões – PPMPME..... 34

2.2.5.1.4.PPMP Múltiplas Oficinas – PPMPMO..... 34

2.2.5.2.Limitações dos modelos propostos.....

35

2.3. Problemas semelhantes ao PPMP na literatura..... 36

2.3.1.Problema de alocação de disciplinas às salas de aula ("*Timetabling*").....

38

2.3.2.Problema de roteamento de manutenção em aeronaves - ("*Aircraft Maintenance Routing*")…….....

41

2.4. Complexidade combinatorial dos problemas..... 43

2.5. Resumo e conclusões do capítulo..... 47

CAPÍTULO 3 – META-HEURÍSTICAS..... 50

3.1. Introdução..... 50

3.2. Heurísticas e mecanismos de busca local..... 50

3.3. Meta-heurísticas..... 53

3.3.1.Meta-heurística Recozimento Simulado (*simulated annealing*).... 58

3.3.2.Meta-heurística Busca Tabu (*tabu search*)..... 60

3.3.3.Meta-heurística Algoritmo Genético..... 61

3.3.4.Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF..... 62

3.3.4.1.AC*Savings*.....
77

3.4. Resumo e conclusões do capítulo..... 78

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA..... 81

4.1. Introdução..... 81

4.2. Estruturação dos métodos para a solução do PPMP..... 81

4.2.1.Método Enumeração Exaustiva..... 82

4.2.2.Método FAB..... 83

4.2.3.Método Ping-Pong..... 85

4.2.4.Método *ASmnt*..... 88

4.2.5.Método *ACSmnt*..... 90

4.2.6.Método Ping-Pong Busca Local - PPBL..... 91

4.2.7.Método *ASmnt* Busca Local - *ASmntBL*..... 92

4.2.8.Método *ACSmnt* Busca Local - *ACSmntBL*..... 93

4.3. Testes computacionais..... 93

4.3.1.Testes com enumeração exaustiva em instâncias pequenas.....
94

4.3.2.Testes comparativos dos métodos propostos..... 94

4.3.2.1.Geração das instâncias utilizadas nos testes..... 96

4.3.2.2.Apresentação dos resultados.....
98

4.3.2.3.Testes não-paramétricos para comparação dos métodos..... 99

4.3.3.Testes comparativos dos parâmetros utilizados pela MCF..... 100

4.3.3.1.Geração dos parâmetros utilizados nos testes.....101

4.3.3.2.Testes não-paramétricos para comparação de parâmetros.....102

4.3.4.Avaliação dos resultados..... 103

4.4. **Resumo e conclusões do capítulo..... 105**

CAPÍTULO 5 – APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA 107

5.1. **Introdução..... 107**

5.2. **Descrição da instância..... 107**

5.3. Descrição da frota de aeronaves e do sistema de manutenção.....

109

5.4. **Estratégia de solução..... 111**

5.5. **Apresentação dos resultados..... 113**

5.6. **Avaliação dos resultados..... 119**

5.7. **Resumo e conclusões do capítulo..... 119**

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES..... 121

6.1. **Introdução..... 121**

6.2. **Conclusões e contribuições do trabalho..... 121**

6.3. **Recomendações para futuras pesquisas..... 125**

ANEXO 1..... 127

ANEXO 2..... 128

ANEXO 3..... 129

ANEXO 4..... 130

Lista de referências..... 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Estágios da “curva da banheira” (Ebeling, 1997)..... 15

Tabela 2.2 Resumo dos dados para formulação do PPMP..... 26

Tabela 2.3 PPMP condição inicial (ilustração)..... 29

Tabela 2.4 Solução para o PPMP (ilustração)..... 30

Tabela 2.5 Maiores valores para *n* (Cormen *et al,* 2002)..... 44

Tabela 3.1 Aplicações da MCF (Dorigo; Stützle, 2004)..... 65

Tabela 3.2 MCF em ordem de desenvolvimento (Dorigo; Stützle, 2004) 74

Tabela 4.1 Método FAB: 1º estágio intermediário..... 84

Tabela 4.2 Método FAB: solução encontrada..... 85

Tabela 4.3 Método “ping-pong”: movimento de troca para *aeronave 3*. 87

Tabela 4.4 *ASmnt*: escolha do próximo recolhimento..... 90

Tabela 4.5 Configuração de parâmetros..... 95

Tabela 4.6 Parâmetros controlados para a geração das instâncias de teste..... 96

Tabela 4.7 Instâncias para os testes do PPMP..... 97

Tabela 4.8 Características da frota empregada nos testes (PAMA-SP, 2005)..... 98

Tabela 4.9 Resultados obtidos para o *PPMP_A25P25sq3h1*..... 98

Tabela 4.10 Comparação dos resultados relativos de cada método..... 99

Tabela 4.11 Testes de Friedman e de múltiplas comparações para métodos..... 100

Tabela 4.12 Parâmetros controlados para a geração das configurações 101

Tabela 4.13 Configuração dos testes para comparação entre os parâmetros..... 102

Tabela 4.14 Testes de Friedman e de múltiplas comparações para os parâmetros..... 103

Tabela 5.1 Parâmetros da instância *PPMP_FAB*..... 109

Tabela 5.2 Características da frota para o *PPMP_FAB* (PAMA-SP, 2005)..... 111

Tabela 5.3 Parâmetros para o *ACSmntBL* aplicados ao *PPMP_FAB*.. 112

Tabela 5.4 Aplicação global dos métodos de solução para o *PPMP_FAB*..... 113

Tabela 5.5 Programação para o 3º nível de manutenção..... 114

Tabela 5.6 Disponibilidades dos esquadrões e da frota..... 115
Tabela 5.7 Diagonal para o 3º nível de manutenção..... 116
Tabela 5.8 Diagonal para o 2º nível de manutenção..... 117
Tabela 5.8 Disponibilidades dos esquadrões e da frota..... 118

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1	A “curva da banheira” (Ebeling, 1997).....	15
Fig. 3.1	Configuração Inicial (T_0) (Jones, 2003).....	67
Fig. 3.2	Configurações de T (Jones, 2003).....	68
Fig. 3.3	Pseudocódigo da MCF (Dorigo; Di Caro, 1999).....	73

LISTA DE ABREVIATURAS

ACO	*Ant Colony Optimization*
AS	*Ant System*
ACSmnt	*Ant Colony System* Manutenção
ACSmntBL	Ant Colony System Manutenção Busca Local
ASmnt	*Ant System* Manutenção
ASmntBL	*Ant System* Manutenção Busca Local
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FAB	Força Aérea Brasileira
GA	*Genetic Algorithms*
ILA	Instituto de Logística da Aeronáutica
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PRV	Problema de Roteirização de Veículos
MCF	Meta-heurística Colônia de Formigas
PAMA	Parque de Material Aeronáutico
PAMA-SP	Parque de Material Aeronáutico de São Paulo
PPMP_FAB	PPMP Força Aérea Brasileira
PPMP-HET	PPMP Frota Heterogênea
PPMP-ME	PPMP Múltiplos Esquadrões
PPMP-MO	PPMP Múltiplas Oficinas
PPBL	“Ping-Pong” Busca Local
TFC	Taxa de Falha Crescente
TFD	Taxa de Falha Decrescente
TPM	*Total Productive Maintenance*
TS	*Tabu Search*
USAF	*United States Air Force*

LISTA DE SÍMBLOS

a_{ij}	Fórmula das penalidades incorridas ligadas a Cap_i
$AvDisp$	Disponibilidade média esperada para a frota (%)
b_{ij}	Fórmula das penalidades incorridas ligadas a $AvDisp$
c_{ij}	Fórmula das penalidades incorridas ligadas a $mDisp_{ij}$
Cap_i	Capacidade da oficina por divisão de período (anvs)
$Cap_{efetiva}$	Capacidade efetiva da oficina (anvs)
$Cap_{projeto}$	Capacidade projeto da oficina (anvs)
$DispVer_i$	Disponibilidade média verificada da frota (%)
H	Número de esquadrões
i	Índice de cada divisão do período (semana i, mês i, trimestre i)
j	Índice de cada aeronaves
J	Total de aeronaves
m	Intervalo previsto entre as inspeções (horas)
$mDisp_{ij}$	Horas remanescentes por aeronave a serem voadas no período (horas)
P	Período total avaliado (anos)
p	Divisões do período total avaliado (semanas, meses, trimestres)
Sm	Número de oficinas disponíveis
t_{ij}	Horas voadas esperadas por aeronave por período (horas)
T_p	Esforço aéreo anual esperado (horas)
T_{tot}	Tempo do ciclo de vida de cada aeronave (horas)
wa	Peso da penalidade para a
$wa´$	Peso da penalidade para a´
wb	Peso da penalidade para b
wc	Peso da penalidade para c
$wc´$	Peso da penalidade para c'
x_{ij}	Variável de decisão do problema
θ	Intervalo para busca local
ρ	Parâmetro para o ACS

β	Expoente para informação heurística MCF
α	Expoente par informação de feromônio
λ	Taxa de falha de um componente
η	Informação heurística
τ	Informação dos níveis de feromônio
ξ	Parâmetro do ACS

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

Esta tese trata da definição do problema de programação da manutenção preventiva de frotas de veículos e da exploração dos métodos de solução desse problema, com ênfase para a aplicação da Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF.

O trabalho dá continuidade aos trabalhos de pesquisa do autor explorando aspectos gerenciais das atividades de manutenção de aeronaves quando em situação de combate (Abrahão, 1998), estratégias de solução e da implementação de procedimentos meta-heurísticos para problemas de complexidade significativa (Cunha; Bonasser; Abrahão, 2002); (Abrahão; Gualda, 2004). A tese representa também o aprofundamento dos estudos do grupo de pesquisadores do Instituto de Logística da Aeronáutica – ILA e dos pesquisadores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP relacionados às atividades de apoio logístico a operações aéreas e operações de transporte em geral. Os trabalhos relacionados desenvolvidos pelos pesquisadores do ILA tiveram início com a criação do instituto em 1984 e foram desenvolvidos até agora com os trabalhos e dissertações de mestrado de Bonasser (1997), Saito (1998), Santos (1998), Sanches (2000) e Abreu (2002). Os trabalhos desenvolvidos na EPUSP por Gualda (1995), Cunha (1997) e Bonasser (2005), serviram como base e inspiração para o desenvolvimento desta tese.

1.2 Colocação do problema

O problema estudado nesta tese pode ser definido como a busca pela melhor forma de se programar a manutenção para frotas de veículos, dadas restrições operacionais.

Forças aéreas, assim como empresas aéreas, transportadoras, grandes indústrias, fazendas, prefeituras ou hospitais, geralmente possuem, entre seus recursos, veículos.

Os veículos cabíveis para cada um dos exemplos citados variam significativamente em termos de complexidade, principalmente no que diz respeito aos conceitos e custos de manutenção envolvidos.

Os elevados custos envolvidos com frotas de veículos e as múltiplas restrições, cada vez mais apertadas, fazem com que as atividades de manutenção desempenhem papel fundamental no cumprimento das exigências de apoio logístico para cada sistema.

Os conceitos envolvendo manutenção abrangem uma vasta área para exploração científica e, de uma definição mais abrangente do termo logística oriunda do setor de defesa (Russel, 2000), depreende-se que as atividades de manutenção podem estar ligadas aos quatro tipos principais de atividades logísticas.

De acordo com Russel (2000), práticas logísticas são classificadas em:

- Logística Militar: envolve o desenvolvimento das características de suportabilidade em sistemas de arma e outros bens fixos, avaliação de requisitos técnicos para treinamento e manutenção, cálculo das exigências de apoio pós-venda e integração de todos os aspectos do apoio e suporte para o sistema e, em última análise, envolve a capacidade operacional das forças militares;

- Logística Empresarial: lida com o planejamento e gerenciamento das provisões, suprimentos, estoques, produção, movimentação, manutenção, transporte, rede de distribuição, rede de informações de apoio e demais atividades relacionadas à administração de toda a cadeia de suprimentos ligada a um sistema produtivo. Todo o conjunto de atividades supracitadas estão fortemente relacionadas com o conhecimento e relacionamento com os requisitos dos clientes;

- Logística de Eventos: trata do conjunto de atividades que reúnem os recursos necessários para que um evento possa acontecer de acordo com o planejado. A logística ligada a eventos é caracterizada por: desdobramento de recursos e sua retirada de acordo com a programação dos eventos, planejamento voltado para contingências e presença marcante no gerenciamento dos vários

conjuntos de atividades componentes dos eventos. Olimpíadas, atendimento a catástrofes e campanhas militares são exemplos deste tipo de logística;

- Logística de processos: a aquisição, programação e o gerenciamento de recursos humanos e materiais para apoiar um determinado processo. A logística voltada aos processos envolve, tipicamente, o emprego coordenado de instalações, bens fixos, e recursos humanos para criar as condições modulares para que um processo aconteça conforme os requisitos dos cientes envolvidos no processo.

Vê-se que as atividades de manutenção para uma frota de veículos e suas conseqüências estão relacionadas com todas as práticas logísticas verificadas acima.

Os veículos de uma frota precisam estar disponíveis para poderem cumprir a programação das operações programadas. No entanto, para que eles possam ser operados de forma econômica ao longo dos seus respectivos ciclos de vida, são necessárias atividades de manutenção.

As atividades de manutenção podem ser de dois tipos principais: atividades de manutenção corretiva e atividades de manutenção preventiva. Grosso modo, atividades de manutenção corretiva são tomadas para corrigirem falhas ocorridas em sistemas ou produtos, no entanto, atividades de manutenção corretiva estão fora do escopo desta tese. Atividades de manutenção preventiva são tomadas para que sistemas e produtos não falhem devido a componentes que tem comportamentos de falhas previsíveis. As atividades de manutenção preventiva, normalmente, exigem que o sistema ou produto fique fora de operação enquanto a atividade de manutenção está sendo executada.

A indisponibilidade causada pelas atividades de manutenção preventiva custa para o desempenho do sistema. O fato de os custos também estarem relacionados com outras restrições, tais como a capacidade e ociosidade das oficinas para as atividades de manutenção, faz com que complicações computacionais sejam agregadas à natureza do problema.

As restrições operacionais e demais decisões às quais as operações com frotas de veículos estão sujeitas podem ser divididas e descritas como problemas de cunho estratégico, tático e operacional, dependendo dos diferentes graus de agrupamento de atividades, de agregação da informação e horizontes de aplicação.

No nível estratégico, decisões são tomadas pela alta administração do sistema e geram atos cujos efeitos são duradouros e mais difíceis de reverter. São oriundas do planejamento de longo prazo da organização e, no caso das forças armadas, baseadas nos conceitos doutrinários de emprego de cada arma. Exemplos estratégicos voltados para o setor de defesa incluem decisões relativas à aquisição de um novo sistema de armas e todo o espectro de circunstâncias logísticas envolvidas. Já decisões táticas são tomadas nos escalões intermediários e geram efeitos a prazos mais curtos e de menor impacto na essência e doutrina da organização. Tal esfera de decisão está representada no setor de defesa por problemas de gerenciamento de suprimentos, localização de aeródromos e de bases aéreas. No nível mais baixo da estrutura hierárquica da tomada de decisão encontram-se as decisões operacionais, as quais estão ligadas ao controle diário e atividades operacionais do sistema. No nível operacional verificam-se decisões envolvendo políticas de manutenção, problemas como os de programação diária das tarefas de uma oficina e seus recursos, dos vôos, das aeronaves e de suas respectivas tripulações.

Do ponto de vista teórico, grande parcela das áreas do conhecimento citadas apresentam problemas de complexidade significativa para a tomada de decisão por parte dos gerentes envolvidos. Do ponto de vista prático, ao deparar-se com problemas de tal natureza, os operadores de frotas de veículos ainda precisam lidar com a abordagem dinâmica presente na maioria dos casos, ou seja, como se não bastasse a complexidade intrínseca de cada enunciado, os acontecimentos, na medida em que sucedem, agregam novas características e parâmetros aos já complexos problemas em questão. Da mesma forma que em outros segmentos da sociedade atual, a dependência em recursos de informática e nas aplicações de sistemas de apoio à decisão baseados em pesquisa operacional, têm permitido que empresas aumentem a produtividade, reduzam os custos e melhorem sua lucratividade no que diz respeito ao gerenciamento da manutenção.

A busca por resultados práticos na solução de problemas complexos serve como motivação para utilização de métodos novos e de técnicas cada vez mais avançadas. Nas últimas duas décadas, uma nova classe de procedimentos aproximativos, denominados "meta-heurísticas", emergiu com o objetivo de tentar combinar procedimentos heurísticos básicos em um nível mais elevado de procura por soluções.

O termo deriva do verbo grego *heuriskein*, que significa "procurar", e do prefixo *meta*, que significa "além", "em nível mais elevado". A nova classe inclui, ainda que não esteja restrita à somente estas: Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF (do inglês *Ant Colony Optimization – ACO*), Meta-heurística Algoritmo Genético (do inglês *Genetic Algorithm – GA*), Meta-heurística Recozimento Simulado (do inglês *Simulated Annealing – SA* e a Meta-heurística Busca Tabu (do inglês *Tabu Search – TS*) (Blum; Roli, 2001).

Curiosa, recente e promissora, a meta-heurística envolvendo a lógica presente nas colônias de formigas ou, simplesmente, nos formigueiros, pode ser aplicada a problemas combinatoriais complexos representados na forma de grafos ou redes (Dorigo, 1996). A atividade verificada em uma colônia de formigas muito se parece com a atividade dos exércitos quando em campanha. Intuitivamente, a lógica, objetividade, persistência, instinto de sobrevivência, atuação sistêmica, disciplina e organização dos formigueiros aliados aos bons resultados alcançados pela MCF verificados na literatura, sugerem que sua aplicação para problemas logísticos militares possa ser interessante.

Então, além dos estudos necessários ao entendimento do problema de se programar a manutenção preventiva para uma frota de veículos, o trabalho visa também à busca por soluções com procedimentos meta-heurísticos envolvendo a utilização da MCF.

Os trabalhos desenvolvidos nesta tese contribuem para o conhecimento científico no sentido de descrever formalmente um problema pouco explorado e também ao implementar metodologia para solução com a utilização de procedimentos meta-heurísticos recentes e baseados em comportamentos encontrados na natureza, como o das formigas.

O trabalho em questão muito acrescenta ao conhecimento científico, à prática gerencial e à ciência militar, com várias possibilidades de aplicações e analogias para os setores de defesa, público e privado, envolvendo transportes, logística, planejamento da produção e pesquisa operacional, os quais podem ser desenvolvidos em conseqüência dos resultados dos trabalhos e experimentos verificados nesta tese.

1.3 Objetivos do trabalho

O objetivo do trabalho é o de buscar uma metodologia para a solução do Problema de Programação da Manutenção Preventiva – PPMP e, em particular, para os problemas do mesmo tipo no cenário da Força Aérea Brasileira – FAB. Por outro lado, essa busca envolve também a exploração da utilização da MCF para a solução do PPMP.

1.4 Estruturação do trabalho

Neste capítulo buscou-se a colocação do problema e os objetivos do trabalho. O capítulo apresenta também: os objetivos da tese, argumentos justificando os estudos envolvendo atividades de manutenção e um resumo da forma como está estruturado o trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da bibliografia referente ao estudo dos problemas de programação da manutenção preventiva, bem como faz uma comparação entre os problemas correlatos. Os problemas são estudados no sentido de serem levantados os procedimentos mais adequados para solução.

O Capítulo 3 apresenta a descrição geral dos procedimentos aproximados e meta-heurísticos na busca por soluções em problemas como os trabalhados nesta tese. As principais meta-heurísticas e os principais estudos sobre meta-heurísticas são apresentados e discutidos. Especial atenção é dada à descrição completa da MCF, desde a lógica por trás do pensamento coletivo das colônias de formigas, até a descrição de passos utilizados na implementação dos algoritmos conhecidos e dos desenvolvidos em função desta tese.

No Capítulo 4 são descritos os métodos de solução para o PPMP. O capítulo apresenta a descrição completa do processo de implementação da MCF para o caso do PPMP. Essa fase engloba também a descrição dos testes realizados, dos resultados obtidos, da análise dos resultados e das conclusões encontradas como fruto do trabalho desenvolvido.

O Capítulo 5 apresenta a aplicação dos métodos de solução e verificação dos resultados obtidos em um problema real que diz respeito à programação da manutenção de uma frota de aeronaves da FAB

O último capítulo trata das conclusões da tese, das contribuições verificadas, das recomendações para o desenvolvimento de novos trabalhos relacionados ao PPMP e da aplicação dos conhecimentos verificados em outros modelos promissores. O capítulo apresenta orientações e sugestões para novos trabalhos de pesquisa e a conclusão do trabalho.

Os resultados esperados podem ser divididos em resultados práticos para a FAB, resultados cientificamente consistentes e resultados interessantes quanto à utilização de práticas semelhantes em outros casos.

CAPÍTULO 2

O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM AERONAVES NA LITERATURA

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é o levantamento bibliográfico relevante para o problema estudado nesta tese. É apresentado na forma de discussão sobre variantes do problema que possuem semelhança com o PPMP. São apresentadas idéias, conceitos, formulações, semelhanças e sugestões praticadas na comunidade científica vinculados ao tema proposto.

Primeiramente é descrito o problema de programação da manutenção preventiva em veículos - PPMP. Depois são descritos os problemas tratados pela literatura que se assemelham ao PPMP para que as comparações possam ser feitas e possam ser verificadas as complexidades na busca por soluções no PPMP. Cada problema é explorado no sentido de classificá-lo do ponto de vista de sua complexidade e também no intuito de verificar suas características e semelhanças em relação ao PPMP. Em seguida é apresentada uma discussão envolvendo complexidade combinatorial na solução de problemas como os tratados neste capítulo. Por último, são apresentadas as conclusões do capítulo.

2.2 Problema de programação da manutenção preventiva – PPMP

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura envolvendo problemas de manutenção trata do problema de se determinar o melhor intervalo de manutenção de acordo com algum conjunto de medidas de desempenho (confiabilidade x custo total, disponibilidade x custos de manutenção, etc.). O PPMP, no entanto, trata também do quadro geral do ponto de vista sistêmico do planejador das atividades da frota e precisa levar em conta uma série de características que se apresentam como restrições para o problema de quando recolher cada veículo para suas atividades de manutenção preventiva. Pode ser que não seja possível recolher muitos veículos ao

mesmo tempo, pois os operadores ficariam sem veículos para o cumprimento de suas missões. Além do mais, pode ser que não se disponha de capacidade suficiente nas oficinas para atender a tantos veículos ao mesmo tempo.

A literatura não trata precisamente do PPMP. Faz-se necessário descrever o contexto das atividades de manutenção aplicadas a sistemas mais complexos, como os que possuem aeronaves, navios, sistemas de radares, linhas de produção, etc., para a melhor compreensão dos termos e conceitos envolvidos na descrição do PPMP. A definição de manutenção preventiva, dos tipos de manutenção, dos vários níveis de manutenção envolvidos no suporte logístico, do conceito de manutenção e do plano de manutenção aplicado a um sistema, contextualiza o cenário para a descrição dos problemas de manutenção preventiva (PMP) em geral. A descrição do PPMP está baseada no encadeamento desses conceitos e é apresentada como um modelo matemático representativo das relações entre as variáveis e restrições presentes no problema.

2.2.1 Manutenção preventiva

De acordo com Blanchard; Peterson; Verma (1994), manutenção inclui todo tipo de ação tomada no sentido de manter, ou restabelecer, um determinado estado operacional em um sistema ou produto. Atividades de manutenção podem ser descritas em seis diferentes categorias:

1. Manutenção corretiva. Abrange todas as atividades de manutenção não programadas efetuadas, como conseqüência de uma falha em um sistema ou produto, para restabelecer as condições do sistema ou produto a uma condição especificada. O ciclo de manutenção corretiva compreende identificação e verificação da falha, localização e isolamento da falha, desmontagem para obtenção do acesso ao item que falhou, remoção do item e instalação de um novo ou reparo local do item que havia falhado, montagem, checagem e verificação geral das condições;

2. Manutenção preventiva. Contempla todas as atividades de manutenção programadas efetuadas para manter um sistema ou produto em uma condição operacional especificada. As atividades de manutenção preventiva abrangem inspeções periódicas, monitoramento das condições, substituição de itens críticos, calibração periódica, etc. As atividades de serviço, tais como lubrificação e abastecimento de combustíveis, podem ser incluídas como atividades de manutenção programada. Algumas atividades de manutenção preventiva resultam em indisponibilidade do sistema ou produto enquanto executadas, enquanto outras podem ser efetuadas durante a operação dos mesmos ou em períodos de espera;

3. Manutenção preditiva. Diz respeito aos programas de manutenção preventiva que utilizam monitoramento das condições dos itens ou subsistemas para se determinar a condição exata do equipamento, predizer possíveis degradações das condições de operação e indicar onde ações de manutenção são mais necessárias. Os objetivos são os de predizer quando e onde falhas vão ocorrer e tomar as necessárias medidas preventivas;

4. Prevenção de manutenção. O termo faz parte do jargão utilizado nos conceitos de "*Total Productive Maintenance - TPM*" e envolve os esforços no sentido de se obter um sistema livre de atividades de manutenção. Prevenção de manutenção trata do desenvolvimento de sistemas ou produtos baseados nos conceitos de confiabilidade e manutenibilidade com o objetivo de minimizar indisponibilidades, minimizar requisitos para o apoio de manutenção, aumentar a produtividade e reduzir os custos do ciclo de vida (Nakagima, 1988 *apud* Blanchard; Peterson; Verma, 1996);

5. Manutenção adaptativa. O termo faz referência, primariamente, aos *softwares* e as modificações em seu processamento ou modificações no gerenciamento das estruturas de dados utilizadas; e

---

NAKAGIMA, S. ***An introduction to Total Productive Maintenance (TPM)***. Productivity Press, inc. Cambridge, MA, 1988.

6. Manutenção perfectiva. Refere-se às modificações no desenvolvimento de softwares no sentido de aprimorarem-se seus desempenhos, compactação de dados e manutenibilidade.

De acordo com Worsham (2005), a atividade de manutenção preventiva é desenvolvida e planejada para apoiar o ciclo de vida de um sistema e evitar que outras atividades de manutenção não planejadas ocorram desnecessariamente. Manutenção preventiva engloba atividades como as de pintura, lubrificação, ajustes e substituição de componentes no sentido de minimizar as quebras, aumentar a vida útil e diminuir a depreciação envolvida com o envelhecimento do sistema.

Um programa de manutenção preventiva, tipicamente, apresenta atividades de testes não destrutivos, inspeções periódicas, atividades de manutenção pré-planejadas e atividades de manutenção corretiva para as deficiências verificadas através dos testes e inspeções. Algumas das razões que justificam as atividades de manutenção preventiva, apresentadas por Worcham (2005), são:

- Perda de mercado devido a atrasos em uma linha de produção;
- Redução das necessidades de estoques;
- Redução de redundâncias em termos de equipamentos e procedimentos;
- Redução em consumo de energia;
- Redução de custos logísticos;
- Redução nos tempos de espera (*downtime*);
- Melhor conservação dos sistemas e aumento na expectativa de ciclo de vida;
- Utilização econômica dos recursos de manutenção;
- Redução nos custos de reparos por reduzirem-se falhas secundárias;
- Redução no número de produtos rejeitados, retrabalho e desperdício de material;
- Identificação dos equipamentos com elevado custo de manutenção, indicando a necessidade de treinamento das equipes de manutenção ou a substituição por obsolescência de equipamentos; e

- Aumento nos níveis de segurança e de qualidade percebida.

Vê-se que a manutenção preventiva pode ser descrita como sendo um conjunto de atividades de manutenção desempenhadas para que problemas de confiabilidade dos itens componentes de um sistema possam ser minimizados.

2.2.2 Níveis de manutenção

De acordo com Blanchard (2003), a manutenção preventiva pode ser efetuada no próprio sistema (ou em um de seus elementos), no local onde o sistema é operado, em uma estação intermediária próxima ao local onde o sistema é operado, em um parque de manutenção, no fornecedor ou nas instalações do fabricante. Os níveis de manutenção são as divisões das funções e das tarefas para cada área na qual a manutenção é executada.

A complexidade das tarefas, os requisitos em termos de níveis de capacitação para a mão de obra, freqüência das tarefas, necessidade de equipamentos de apoio especiais, critérios econômicos e assim por diante, são fatores que determinam em qual nível de manutenção quais atividades serão executadas. Blanchard (2003) e Jones (1994) sugerem que a manutenção seja dividida em três níveis principais: orgânico, intermediário e parque.

No nível orgânico de manutenção são realizadas inspeções mais simples, geralmente realizadas no próprio sistema (por exemplo: aeronave, veículo, linha de produção de um fabricante ou instalações de comunicação) sem a necessidade de equipamentos pesados de apoio à manutenção.

Atividades típicas do nível orgânico de manutenção incluem: atividades de verificação de desempenho, inspeções visuais, limpeza de elementos do sistema, pequenos ajustes externos, calibrações, lubrificações, instalação e remoção de subsistemas. Os recursos humanos envolvidos não efetuam reparos nos componentes removidos, mas os direcionam para o nível seguinte de manutenção (Blanchard, 2003) e (Jones, 1994).

As atividades de manutenção que não possam ser executadas no nível orgânico por causa das limitações de capacitação do pessoal e dos equipamentos, são realizadas no nível intermediário. As atividades de manutenção do nível intermediário são executadas em organizações mais especializadas que as do nível orgânico que e podem ser móveis, semi móveis ou fixas.

Neste nível, as tarefas de manutenção são mais detalhadas e os subsistemas e itens podem ser reparados com a remoção ou reposição de módulos, estruturas ou pequenas partes. Os recursos humanos são mais capacitados e melhor equipados que os do nível orgânico. Oficinas móveis ou semi móveis são utilizadas para acompanhar a operação dos sistemas quando os mesmos encontram-se operando desdobrados (fora de sede) e possuem, geralmente, equipamentos de teste, equipamentos de apoio e itens sobressalentes. As oficinas fixas estão normalmente ligadas ao apoio das atividades do nível orgânico e das unidades móveis (Blanchard, 2003); (Jones, 1994).

A manutenção "nível parque" (3º nível de manutenção) representa o nível mais elevado de manutenção e engloba todas as atividades que, devido a complexidade, recursos em termos de equipamento de teste e apoio e demais características, não possam ser realizadas nos níveis anteriores.

O "nível parque" inclui em suas tarefas revisões completas, reconstrução, modificação e calibração de equipamentos, assim como a execução das atividades mais complexas de manutenção. Possui em seu inventário maquinário complexo e pesado e linhas de produção são, tipicamente, encontradas em suas oficinas. Neste nível, as oficinas atendem, normalmente, a mais de um tipo de veículo (Blanchard, 2003); (Jones, 1994).

2.2.3 Conceito de manutenção e plano de manutenção

O conceito de manutenção aplicado a um sistema é descrito por Blanchard; Peterson; Verma (1994); Blanchard (2003) e Jones (1994) como sendo um conjunto de normas e ilustrações que definem os critérios para se abordarem os níveis de manutenção envolvidos com o sistema. Também são abordadas as principais funções de

manutenção desempenhadas por cada nível, as medidas de desempenho e os requisitos logísticos básicos para cada um dos níveis de manutenção.

O planejamento de manutenção pode ser descrito como sendo o processo de desenvolvimento dos requisitos iniciais de manutenção para um equipamento ou sistema. O processo inclui os estudos desenvolvidos para propor quem serão as responsáveis pela execução das tarefas que se fizerem necessárias e determinar os respectivos níveis de manutenção onde as mesmas serão realizadas (Jones, 1994).

O plano de manutenção aplicado a um sistema especifica os métodos e procedimentos a serem seguidos para o apoio de manutenção a ser prestado ao sistema durante todo o seu ciclo de vida. Planos de manutenção incluem a identificação e uso de todos os elementos logísticos para a manutenção do apoio necessário durante todo o ciclo de vida do sistema.

O desenvolvimento dos planos de manutenção tem como base os estudos de suportabilidade, manutenibilidade e confiabilidade dos itens e, geralmente, são preparados na fase de detalhamento do desenvolvimento de um sistema (Blanchard; Peterson; Verma, 1994); (Blanchard, 2003); (Jones, 1994).

2.2.4 Problemas de manutenção preventiva

A manutenção preventiva tradicional está baseada no conceito da *curva da banheira*. Isto significa que um componente novo passa por três estágios distintos quanto ao seu comportamento de falha. O estágio de *mortalidade infantil,* também conhecido como período de "*burn-in*" (Taxa de Falha Decrescente – TFD), o estágio onde a taxa de falhas permanece praticamente constante (Taxa de Falha Constante - TFCte) e o último estágio representando a fase do *envelhecimento* do sistema ou componente (Taxa de Falha Crescente – TFC) estão ilustrados na **Figura 2.1** de acordo com o comportamento de taxa de falha ao longo do ciclo de vida de um componente ou sistema.

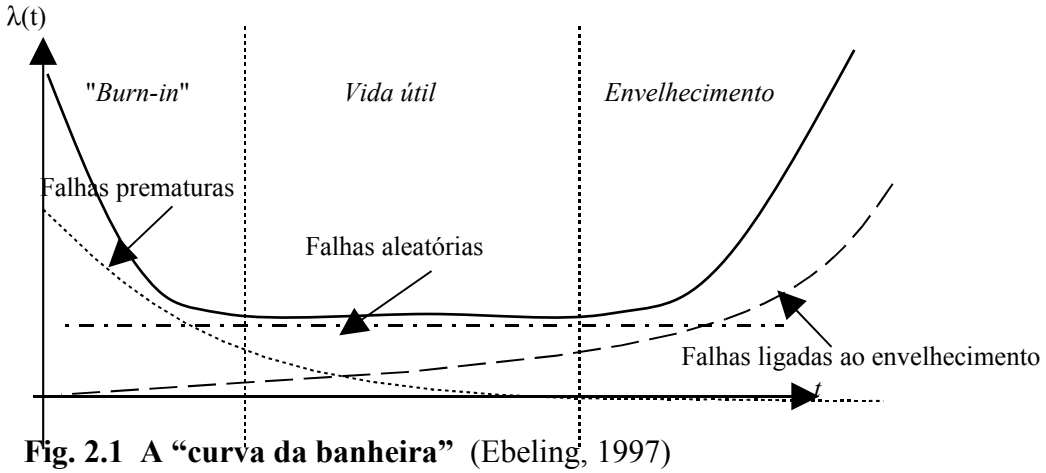


Fig. 2.1 A "curva da banheira" (Ebeling, 1997)

A manutenção preventiva atua substituindo ou reparando, economicamente, componentes antes de entrarem no estágio onde as taxas de falha começam a aumentar (*envelhecimento*).

A **Tabela 2.1** apresenta considerações sobre os estágios da curva da banheira.

Tabela 2.1 Estágios da "curva da banheira" (Ebeling, 1997).

Estágio	Características	Causa	Reduzido através
"Burn-in"	Taxa de falha decrescente - TFD	Defeitos de fabricação: Falha nas soldas, rachaduras, componentes com defeito, controle de qualidade insuficiente, contaminação, manufatura deficiente	Testes de *"burn-in"* Controle de qualidade Testes de aceitação
Vida útil	Taxa de falha constante - TFCte	Ambiente, cargas aleatórias, erros humanos, "Atos de Deus"	Redundâncias Folga de tolerância
Envelhecimento	Taxa de falha crescente - TFC	Fadiga, corrosão, envelhecimento, desgaste, fricção, carregamentos cíclicos	Manutenção preventiva Substituições Tecnologia

"Confiabilidade é a probabilidade de um componente ou sistema desempenhar com sucesso uma determinada função por um dado período de tempo quando usado sob condições operacionais padronizadas e predeterminadas" (Ebeling, 1997).

“Manutenabilidade é a probabilidade de um componente ou sistema que falhou ser reparado para uma condição especificada dentro de um dado período de tempo quando procedimentos de manutenção previstos e padronizados são executados” (Ebeling, 1997).

“Disponibilidade é a probabilidade de um componente desempenhar sua função primordial com sucesso em um dado ponto no tempo quando usado sob condições operacionais predeterminadas” (Ebeling, 1997).

Os livros de Blanchard, Peterson e Verma (1994); Blanchard (2003); Ebeling (1997) e Jones (1994) descrevem em maiores detalhes os conceitos de confiabilidade, suportabilidade, manutenibilidade e disponibilidade, utilizados para a descrição dos modelos matemáticos e demais estudos de manutenção.

Os estudos verificados até aqui tratam do problema de se identificar basicamente os intervalos de manutenção preventiva (confiabilidade) e implicações (manutenibilidade e disponibilidade) de forma isolada para cada sistema. Ou seja, os estudos são feitos para se determinar quando deve ser feita uma grande inspeção (950, 1000 ou 1050 horas?), quanto em termos de recursos serão necessários (tempo, materiais, mão de obra, etc.) e quais as conseqüências operacionais observadas. No entanto, os cálculos são feitos sem que dados específicos do ambiente onde tais sistemas estão inseridos sejam totalmente levados em consideração.

Como exemplo, se uma frota de 10 aeronaves necessita de uma revisão a cada 400 horas de vôo, sendo que cerca de dois meses são necessários para cada inspeção ser executada, observa-se que os estudos de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade se aplicam na identificação do intervalo entre inspeções mais interessante de acordo com uma função de custos, avaliação das atividades de manutenção propriamente ditas (tempos e recursos despendidos e em que níveis as atividades de manutenção devem ser executadas) e verificação dos impactos dos conceitos aplicados anteriormente nas condições de operação do sistema.

A aplicação conjunta dos três conceitos citados isolados das demais características do cenário onde opera o sistema de armas pode trazer soluções inviáveis para o caso real que contemple uma frota de veículos com múltiplas restrições.

2.2.5 Descrição do PPMP

O problema de programação da manutenção preventiva – PPMP pode ser definido como o problema relacionado com a programação da manutenção preventiva vivenciado por um sistema que possua uma frota de veículos (aviões, caminhões, máquinas, tratores, trens, etc.) sujeita a múltiplas restrições. Por razões de clareza, deste ponto em diante do trabalho, os veículos envolvidos no PPMP serão tratados apenas como aeronaves. O PPMP envolve dois tipos básicos de programação de atividades:

I. Programação das tarefas de manutenção nas oficinas, onde os problemas são similares aos problemas de escalonamento ou sequenciamento (do inglês *scheduling*) encontrados na literatura. Envolvem, tipicamente, a alocação de recursos limitados a tarefas ao longo do tempo. Neste caso, a solução do problema está em encontrar uma seqüência para todas as fases necessárias a uma revisão (testes, inspeções, delineamento das atividades, desmontagem, limpeza, reparos, substituições, montagem, pintura, testes, etc.), dadas limitações de recursos das oficinas. O trabalho de Pinedo (1995) apresenta maiores detalhes e considerações sobre este tipo de problema.

II. Programação dos recolhimentos das aeronaves para as atividades de manutenção preventiva necessárias, de acordo com as restrições verificadas no sistema. A solução, neste caso, pouco ou nada tem a ver com a programação do que acontece dentro das oficinas (muito embora considere as capacidades e os custos verificados nas oficinas), mas sim, com a ordenação dos recolhimentos para as atividades de manutenção preventiva necessários à uma frota de aeronaves ao longo de um período previsto de seu ciclo de vida.

Estudos visando à solução de problemas como os descritos em **I** só serão aprofundados neste trabalho na medida em que colaborem para esclarecimentos relacionados com procedimentos de solução em casos como os descritos em **II**.

Portanto, deste ponto em diante da tese, a sigla PPMP somente faz referência aos casos conforme descritos em **II**.

O PPMP apresenta as seguintes características:

- Frota de aeronaves: um determinado número de aeronaves a serem recolhidas para a manutenção preventiva compõe a frota a ser operada. A composição da frota pode ser heterogênea, podendo ser composta de aeronaves que possuem diferentes características de manutenção. O número de aeronaves pode ser variável em função da taxa de atrito (aeronaves perdidas) ou da aquisição de aeronaves do mesmo tipo para completar ou aumentar a frota previamente estabelecida. Cada aeronave possui um tempo de ciclo de vida que representa o tempo remanescente de operação disponível e é dado, normalmente, em horas de vôo, podendo também ser medido por ciclos de utilização. O tempo do ciclo de vida é variável na grande maioria dos casos e, uma vez que o tempo de ciclo de vida é dado do projeto da aeronave, para que este possa ser modificado (aumentado ou diminuído), extensivos trabalhos de engenharia, atualização e análise de fadiga estrutural são necessários. Cada aeronave possui um plano de manutenção que especifica todos os métodos e procedimentos a serem seguidos para apoiar a aeronave durante seu ciclo de vida. No plano de manutenção são especificadas todas as tarefas de manutenção preventiva e respectivos intervalos de tempo entre inspeções e revisões para que a aeronave possa ser operada com segurança durante seu tempo de ciclo de vida (Blanchard, 2003);
- Esforço aéreo: Quantidade de horas necessárias para o cumprimento das missões dentro de um intervalo de tempo (um ano, por exemplo). O esforço aéreo é previsto para períodos de tempo de acordo com o operador das aeronaves e é representado pela demanda de utilização desejada para as aeronaves por intervalos de tempo. O período de tempo para efeito de planejamento pode variar e normalmente é definido como sendo de um ano. O esforço aéreo para os sistemas de armas da FAB é definido pelo Comando

Geral do Ar – COMGAR. Para empresas aéreas, esforço aéreo é função da demanda pelos serviços que a empresa oferece;

- Oficinas de manutenção: organização encarregada das tarefas de manutenção necessárias para a operação segura das aeronaves. Verificam-se oficinas nos três níveis de manutenção, cada qual com suas tarefas, recursos, custos e limitações. Para empresas aéreas, nem sempre se verificam os três níveis de manutenção, uma vez que suas aeronaves não necessariamente adotam três níveis de manutenção. As empresas aéreas normalmente trabalham com dois níveis de manutenção: o das oficinas, que estão situadas nos principais aeroportos onde a empresa opera e o do fabricante, onde somente são feitos grandes reparos e revisões (semelhante ao nível parque para sistemas de arma);
- Conjunto de restrições: um conjunto de limitações atua sobre todo o gerenciamento da frota. Os requisitos de disponibilidade e de manutenção da frota podem ser antagônicos. Toda aeronave em manutenção não está disponível para o vôo enquanto estiver nessa condição. No entanto, uma vez atingido um intervalo de tempo entre inspeções, a aeronave se torna indisponível enquanto a requerida ação de manutenção não for executada. Portanto, objetivos de manutenção podem contrapor os de necessidade de utilização das aeronaves. As oficinas possuem restrições de capacidade para atender à demanda. Sempre que o número de aeronaves recolhidas for maior que a capacidade efetiva da oficina, custos extras serão incorridos em termos de mão de obra, tempo para execução das tarefas e suprimentos necessários. Por outro lado, se nenhuma aeronave é recolhida e o planejado era para que alguma aeronave fosse recolhida, custos da ociosidade também são incorridos (PAMA-SP, 1993); (PAMA-SP, 1994).

O número de aeronaves não é fixo, podendo variar para mais, no caso de aquisição de aeronaves, e para menos, em casos de acidentes, venda de parte da frota ou término de ciclo de vida das aeronaves.

O tempo de ciclo de vida de uma aeronave é definido como sendo o número total de horas de vôo disponíveis para serem utilizadas com a aeronave de acordo com a configuração de seu projeto. Uma série de fatores pode fazer com que este parâmetro varie no longo prazo, dependendo da forma como essas horas disponíveis são utilizadas. O tempo de ciclo de vida pode ser restrito por fatores estruturais e medido em ciclos (decolagem, vôo e pouso). Caso a aeronave execute uma série de vôos de curta duração, o que implica em um maior número de operações de pouso e decolagem, sua estrutura sofrerá esforços diferentes de outra aeronave que execute vôos mais longos (Blanchard, 2003); (PAMA-SP, 1994a).

O esforço aéreo previsto representa a necessidade de utilização dos meios aéreos (em termos de horas de vôo) do tipo de aeronave em questão. O operador, para cumprir suas missões, planeja um determinado esforço aéreo por equipamento, por esquadrão de vôo e por período de tempo. O esquadrão de vôo, por sua vez, planeja como utilizar suas aeronaves distribuindo o consumo das horas de vôo pelas aeronaves de acordo com o esforço aéreo previsto e o mais equitativamente possível.

Cada tipo de aeronave possui características específicas em seu plano de manutenção. O plano de manutenção de uma aeronave compreende todas as atividades de manutenção a serem realizadas para que níveis seguros de operação possam ser mantidos. As atividades de manutenção preventiva se dividem em atividades baseadas na utilização da aeronave (horas voadas) e nas baseadas no calendário (intervalo de tempo).

Podem incluir simples inspeções visuais executadas pelo próprio piloto diariamente, até o recolhimento da aeronave para oficinas especializadas para revisões que incluem tarefas mais complexas e demoradas. As atividades de manutenção preventiva são realizadas em intervalos de tempo (baseadas no uso ou no calendário) ou de número de ciclos definidos nos planos de manutenção previstos nos manuais técnicos de cada tipo de aeronave. As oficinas de manutenção incluem organizações que podem ser distribuídas nos três níveis de manutenção (Blanchard, 2003).

Percebe-se que o PPMP pode ser aplicado a diferentes níveis de planejamento e todas as descrições acima impõem restrições ao planejamento das operações aéreas na

medida em que toda atividade de manutenção tem que ser executada à custa da utilização de recursos e da indisponibilidade da aeronave em manutenção para o vôo.

A solução para o PPMP está em encontrar uma seqüência de calendário viável de recolhimentos das aeronaves para manutenção preventiva, de modo compatível com a utilização dos recursos disponíveis e de acordo com as demais restrições impostas pelo enunciado. A solução envolve várias características do problema, sendo que cada característica pode ser interpretada com sendo uma função a ser satisfeita com a solução.

Uma das funções a ser tratada envolve a maximização da taxa de utilização das aeronaves. A taxa de utilização consiste na razão com que são utilizadas as horas de vôo disponíveis das aeronaves e busca evitar que uma aeronave seja recolhida antes de ter completado um intervalo preconizado pelo plano de manutenção preventiva. Na medida em que recolhimentos são feitos antes dos prazos preconizados, o sistema incorre em mais ações de manutenção preventiva do que as necessárias, incorrendo em custos de manutenção e consumo da vida útil desnecessários para cada aeronave. O recolhimento antes dos prazos previstos é tolerado para o caso da manutenção preventiva de aeronaves e de componentes representando, portanto, uma restrição flexível para o problema.

Exemplo: Um aeronave que possua somente 55 horas de vôo disponíveis das suas 1500 horas de intervalo de manutenção preventiva, pode ser recolhida com 15 horas ainda disponíveis, caso seus motores possuam apenas 40 horas disponíveis. Nesse caso, pode não valer a pena em termos de tempo que a aeronave fica indisponível (em manutenção) devido à troca de motores daqui a 40 horas, mais o tempo que a aeronave fica indisponível devido à revisão das 1500 horas.. Ao recolher-se com as 40 horas tanto para a troca de motores quanto para a revisão das 1500 horas, pode-se estar deixando de ter a aeronave indisponível pelos dois meses contabilizados com a troca de motores. Caso recolhimentos sejam feitos antes do previsto de forma consistente, é de se esperar que, ao final do ciclo de vida da aeronave, mais manutenções do que as necessárias tenham sido realizadas e uma parcela das horas de vôo tenha sido desperdiçada.

O trabalho de Sarac; Batta e Rump (2004), ao descrever o problema de roteamento de aeronaves para a manutenção, explica a medida de desempenho utilizada em

empresas aéreas no que diz respeito à maximização da utilização das horas de vôo de cada aeronave.

Outra medida a ser maximizada é a da disponibilidade das aeronaves para o operador. Toda vez que uma aeronave é recolhida para que seja executada a atividade de manutenção programada, a mesma fica indisponível para o operador. Nesse caso, existe uma tolerância até um número mínimo de horas de vôo necessárias para o operador poder cumprir suas tarefas. A partir desse mínimo, disponibilidade passa a ser considerada uma restrição rígida para o problema, pois inviabiliza a solução para o operador. Do limite mínimo para cima, disponibilidade funciona como uma restrição flexível, pois quanto mais horas disponíveis para a frota uma solução propiciar, melhor.

As capacidades das oficinas envolvidas funcionam como restrições ao problema, pois existem limites estabelecidos pela capacidade efetiva e de projeto das oficinas. Recolhimentos simultâneos das aeronaves podem ser proibitivos ou significativamente custosos do ponto de vista das capacidades das oficinas. As restrições impostas pela capacidade das oficinas são rígidas na medida em que extrapolam a capacidade de projeto das mesmas. Caso a utilização das oficinas esteja entre a capacidade efetiva e a capacidade de projeto, a restrição imposta se torna flexível, penalizando mais as soluções que se aproximam da capacidade de projeto. Na medida em que se observa a utilização das oficinas de acordo com suas capacidades efetivas, o sistema não incorre em penalidades (Krajewski; Ritzman, 1996).

A capacidade de atendimento das oficinas pode incluir considerações sobre os níveis de estoque dos itens necessários às revisões. Então, não só as considerações envolvendo a capacidade em termos de espaço físico para as aeronaves limitam as possibilidades das oficinas, mas também em termos de recursos de maquinário e de mão de obra.

Por outro lado, pode tornar-se custoso deixar de recolher aeronaves para atividades de manutenção na medida em que se subutilizam as capacidades das oficinas. Se exceder capacidades pode gerar custos para o processo de gerenciamento da produção, subtilizar as capacidades das oficinas pode, paralelamente, trazer custos

indesejáveis ao processo. Subtilizar as capacidades das oficinas de manutenção constitui restrição flexível ao problema.

Como foi visto, uma solução viável qualquer não é, necessariamente, a melhor. Somente com a definição do objetivo ou do conjunto de objetivos do problema, é possível buscar-se as melhores soluções.

É necessário planejar o recolhimento de cada uma das aeronaves ao longo do seu ciclo de vida, podendo envolver um horizonte de mais de trinta anos, implicando considerações estratégicas do ponto de vista do planejamento das capacidades das oficinas e da infra-estrutura de suporte logístico. Para o planejamento das operações de manutenção de terceiro nível, onde são realizadas as inspeções mais demoradas e complexas, o PPMP deve ser resolvido para estabelecer os recolhimentos das aeronaves (os maiores intervalos entre inspeções são observados para este nível de manutenção) de modo que o planejamento das atividades das oficinas (de preferência) não seja restrito.

Em função do esforço aéreo específico para determinado ano, o nível tático de planejamento de manutenção requer que o PPMP seja solucionado também para intervalos de tempo menores, como no planejamento anual das atividades de manutenção nas oficinas de nível intermediário e orgânico.

O PPMP para o nível operacional sofre influência das decisões táticas e estratégicas na definição de parâmetros para a programação diária das atividades de manutenção, ou seja, definidas as datas de recolhimentos das aeronaves para inspeções previstas de 2º e 3º níveis, a programação diária dos vôos deverá ser feita levando-se em consideração o escalonamento previsto para os recolhimentos das aeronaves, necessidade em termos de horas de vôo a serem voadas para o cumprimento do esforço aéreo e restrições de capacidade das oficinas de manutenção.

O PPMP apresenta características dinâmicas, ainda que os parâmetros descritos anteriormente possam ser considerados determinísticos. Sempre que uma aeronave é recolhida, todo o restante do seu ciclo de vida de atividades de manutenção é alterado para ajuste ao novo quantitativo de horas disponíveis propiciado pela ação de manutenção.

O restante do sistema também se modifica na medida em que recursos de manutenção foram gastos naqueles períodos específicos e influenciarão os demais, assim como os valores das disponibilidades. Este fato diferencia o PPMP da maioria dos problemas de escalonamento encontrados na literatura (*Job Shop, Flow Shop, Open Shop*).

Baseado nas constatações vivenciadas por órgãos que administram frotas de aeronaves e através de uma série de publicações, normas técnicas, diretivas operacionais e boletins internos aos parques de manutenção, é possível definir e descrever um conjunto de objetivos para o PPMP (PAMA-SP, 2005):

- Minimizar problemas de capacidade nas oficinas: sempre que uma aeronave é recolhida em um período de tempo onde a capacidade efetiva das oficinas foi excedida, o sistema incorre em custos adicionais para aumentar a capacidade da oficina até que a capacidade de projeto da oficina seja atingida. O fato do não recolhimento em períodos onde são esperados recolhimentos, também faz com que o sistema incorra em custos ligados à manutenção da capacidade ociosa disponível na oficina. A equação (2.3) define as penalidades incorridas pelo sistema toda vez que, para um período $\boldsymbol{i}$, a capacidade efetiva das oficinas não é igualada.
- Maximizar a disponibilidade das aeronaves para o operador: os esquadrões de vôo, assim como companhias aéreas, têm um conjunto de metas para cumprir. A disponibilidade dos meios aéreos é a razão principal das ações de manutenção, no entanto, toda vez que uma ação de manutenção ocorre, gera uma indisponibilidade temporária. A programação das atividades de manutenção deve buscar satisfazer as demandas por aeronaves disponíveis ao longo dos períodos de interesse do operador. Quando uma aeronave deixa de voar as horas previstas por ter completado seu intervalo de manutenção e, não foi recolhida para a atividade de manutenção preventiva, a disponibilidade da frota cai em virtude desta aeronave não poder voar até que a revisão seja feita. A equação (2.4) define as penalidades incorridas pelo sistema toda vez que, para um período de tempo $\boldsymbol{i}$, a frota apresentar índices de disponibilidade menores que os desejados;
- Maximizar a taxa de utilização das horas de vôo disponíveis da frota: as horas de vôo disponíveis da frota são definidas como sendo o tempo que falta para a aeronave

ter que parar para fazer uma revisão. Toda vez que, por qualquer circunstância, uma aeronave é recolhida antes de completarem-se suas horas, horas são "desperdiçadas".

PAMA-SP. **Planejamento de Manutenção**. Rodadas de entrevistas com os planejadores das atividades de programação da manutenção das aeronaves das frotas atendidas pelo PAMA-SP. Divisão Técnica do PAMA-SP. 2005.

Uma vez que as aeronaves são os bens mais custosos envolvidos no problema, a melhor utilização de suas horas de vôo representa fator chave na solução do problema. A equação (2.5) define as penalidades incorridas pelo sistema toda vez que uma aeronave é recolhida para a atividade de manutenção com horas de vôo ainda disponíveis ou, uma vez esgotadas as horas de vôo disponíveis para uma aeronave, a mesma deixa de ser recolhida para a atividade de manutenção;

Os objetivos descritos acima podem misturar-se. Ao maximizar a taxa de utilização das horas de vôo da frota, provavelmente estarão sendo reduzidos os números de atividades de manutenção. Os custos de manutenção podem cair e um aumento na disponibilidade média da frota ao longo do ciclo de vida pode ser observado. No entanto, outros condicionantes estão presentes na solução do problema. A solução do problema está condicionada a restrições flexíveis e inflexíveis, sendo que as flexíveis não inviabilizam uma solução, muito embora incorram em penalidades junto à função-objetivo. As restrições inflexíveis inviabilizam a solução do problema. Constituem restrições ao PPMP (PAMA-SP, 2005):

- Uma aeronave poderá ser utilizada somente se houver horas disponíveis, ou seja, se o tempo previsto entre inspeções estiver completo, a aeronave somente poderá voltar a voar após ser recolhida para a oficina e revisada (inflexível);
- Uma aeronave não pode ser recolhida mais de uma vez em um mesmo período (inflexível);
- O esforço aéreo previsto para cada período não pode deixar de ser voado (inflexível);
- A capacidade da oficina definida para cada período de tempo não deve variar (flexível);

- Uma percentagem mínima da frota é desejável (flexível) que esteja disponível para que cada esquadrão possa voar suas missões. Os recolhimentos devem

PAMA-SP. **Planejamento de Manutenção**. Rodadas de entrevistas com os planejadores das atividades de programação da manutenção das aeronaves das frotas atendidas pelo PAMA-SP. Divisão Técnica do PAMA-SP. 2005.

ser escalonados de modo a não afetar significativamente a disponibilidade dos esquadrões;

A **Tabela 2.2** apresenta os demais dados gerais para o PPMP.

Tabela 2.2 Resumo dos dados para formulação do PPMP.

Símbolos	***Parâmetros***
Ttot	Tempo do ciclo de vida de cada aeronave (horas)
P	Período total avaliado (anos)
p	Divisões do período total avaliado (semanas, meses, trimestres)
i	Índice de cada divisão do período (semana *i*, mês *i*, trimestre *i*)
j	Índice de cada aeronave
I	Total de períodos
J	Total de aeronaves
Cap_i	Capacidade efetiva da oficina para o período *i* (anvs)
$Cap_{efetiva}$	Capacidade efetiva da oficina (anvs)
$Cap_{projeto}$	Capacidade projeto da oficina (anvs)
Sm	Número de oficinas disponíveis
H	Número de esquadrões
T_p	Esforço aéreo anual desejado (horas)
AvDisp	Disponibilidade desejada para a frota
m	Intervalo previsto entre as inspeções (horas)
wa	Peso da penalidade por ultrapassar Cap_i
wa´	Peso da penalidade por não alcançar Cap_i
wb	Peso da penalidade por não alcançar *AvDisp*
wc	Peso da penalidade por recolher aeronaves ainda com horas remanescentes disponíveis
wc´	Peso da penalidade por deixar de recolher uma aeronave que já tenha completado suas horas de vôo

Símbolos	***Variáveis***
x_{ij}	Variável de decisão do problema
$mDisp_{ij}$	Horas remanescentes por aeronave *j* a serem voadas no período *i* (horas)
t_{ij}	Horas voadas esperadas por aeronave *j* por período *i* (horas)

$DispVer_i$	$1 - \frac{\sum_{1}^{J} x_{ij}}{J}$ = Disponibilidade da frota verificada para o período i

Para o caso mais simples, com apenas um tipo de avião e uma só oficina, a solução está em encontrar:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & se\ a\ aeronave\ j\ for\ recolhida\ no\ período\ i \\ 0 & caso\ contrário \end{cases} \quad (2.1)$$

que minimize:

$$Min \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} \left(a_i + b_i + c_{ij} \right), \quad (2.2)$$

onde:

$$a_i = \begin{cases} \left(\left(\sum_{1}^{J} x_{ij} \right) - Cap_i \right) \times wa & se \sum_{1}^{J} x_{ij} > Cap_i \\ \left(Cap_i - \left(\sum_{1}^{J} x_{ij} \right) \right) \times wa' & se \sum_{1}^{J} x_{ij} < Cap_i \end{cases} \quad (2.3)$$

$$b_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{DispVer_i}{AvDisp} \right) \times wb & se\ DispVer_i < AvDisp \\ 0 & caso\ contra'rio \end{cases} \quad (2.4)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} \frac{(m - mDisp_{(i-1)j})}{m} \times wc \times x_{ik} & se\ mDisp_{(i-1)j} > 0 \\ wc'\left(1 - x_{ij}\right) & se\ mDisp_{ij} = mDisp_{(i-1)j} = 0 \\ 0 & caso\ contra'rio \end{cases} \quad (2.5)$$

sujeito a:

$$t_{ij} = \begin{cases} t(1 - x_{ij}) & se\ t \le mDisp_{ij} \\ mDisp_{ij}(1 - x_{ij}) & se\ 0 \le mDisp_{ij} < t \end{cases} \quad i = 1,2,...,I \quad j = 1,2,...,J \quad (2.6)$$

$$mDisp_{ij} = m * x_{(i-1)j} + (mDisp_{(i-1)j} - t_{(i-1)j})(1 - x_{(i-1)j}) \quad i = 1,2,...,I \quad j = 1,2,...,J \quad (2.7)$$

$$\left(mDisp_{(i-1)j} + t_{ij} \right) \le m \quad i = 1,2,...,I \quad j = 1,2,...,J \quad (2.8)$$

$$mDisp_{ij} \geq 0 \qquad i = 1,2,...,I \quad j = 1,2,...,J \qquad (2.9)$$

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} t_{ij} \geq T_p \qquad i = 1,2,...,I \quad j = 1,2,...,J \qquad (2.10)$$

$$x_{ij} = \{0, 1\} \qquad i = 1,2,...,I \quad j = 1,2,...,J \qquad (2.11)$$

As restrições (2.6) e (2.7) descrevem o comportamento das horas voadas esperadas por aeronave por período (t_{ij}) de acordo com as horas remanescentes ($mDisp_{ij}$). A combinação dessas duas restrições diferencia o PPMP dos demais problemas verificados neste estudo por recalcular as horas de vôo disponíveis e recombinar as matrizes de penalidade (custo) toda vez que um recolhimento (x_{ij}=1) acontece. A restrição (2.8) impede que o valor máximo de um intervalo de manutenção (m) seja ultrapassado e a restrição (2.9) que as horas remanescentes assumam um valor negativo, o que poderia ser o caso em condições de combate quando as aeronaves voariam além do valor de m. A restrição (2.10) impede que uma solução seja aceita sem que o esforço aéreo previsto (T_p) seja cumprido. (2.11) descreve x_{ij} como uma variável que só pode assumir os valores {0, 1}.

As equações (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6) demonstram descontinuidades presentes na função objetivo e nas restrições do problema. A equação (2.7) apresenta um produto entre as variáveis de decisão x_{ij} e $x_{(i-1)j}$ em alguns casos. Esses dois fatos limitam a utilização de procedimentos de programação linear para a solução do PPMP.

A principal diferença entre um problema de programação linear – *LP* (do inglês *Linear Programming – LP*) e um problema de programação não linear – *NLP* (do inglês *Non Linear Programming – NLP*) é que um problema *NLP* apresenta função objetivo e/ou uma ou mais restrições não lineares. Enquanto uma solução ótima em um *LP* ocorre sempre em um ponto de canto da região das soluções viáveis, o mesmo não é verdadeiro para um problema *NLP*. Soluções ótimas para problemas *NLP* podem estar nem mesmo nos limites da região de soluções viáveis, mas em seu interior. Estratégias de procura por soluções nos cantos da região das soluções viáveis como as utilizadas pelo método simplex para resolver problemas lineares não funcionam para problemas *NLP* (Ragsdale, 2001).

Os valores de *wa, wa´, wb, wc e wc´* correspondem aos fatores de penalidade aplicados no problema e foram ajustados para o PPMP de acordo com as constatações e experiências do setor de planejamento da divisão técnica do Parque de Material Aeronáutico de São Paulo - PAMA-SP, organização da FAB responsável pelo gerenciamento do ciclo de vida das aeronaves F-5E/F, C-115 e F-103 (PAMA-SP, 2005).

A **Tabela 2.3** apresenta um exemplo para o PPMP em uma versão bastante simples. Não estão representadas as restrições do modelo, apenas o relacionamento das horas de vôo disponíveis para cada aeronave do *período 0* ao *período 10* e o consumo de 100 horas de vôo por período. Ao completar suas horas de vôo (500 horas no exemplo dado), ou seja, esgotar o número de horas disponíveis, cada aeronave precisa ser recolhida para efetuar sua revisão das 500 horas.

Para o caso representado na **Tabela 2.3**, a *aeronave 2*, em *período 0*, acabou de sair de uma revisão e, portanto, possui 500 horas de vôo disponíveis. A *aeronave 1* possui apenas 200 horas de vôo disponíveis e, depois de completadas suas 200 horas de vôo, passa a condição de indisponível. A *aeronave 1* somente poderá voar esse quantitativo de horas até sua próxima revisão e segue, assim por diante, com as demais aeronaves.

Tabela. 2.3 PPMP condição inicial (ilustração).

período 0	***aeronave 1 200 horas disp.***	***aeronave 2 500 horas disp.***	***aeronave 3 90 horas disp.***	***aeronave 4 280 horas disp.***
período 1	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Vôo 90 horas	Vôo 100 horas
período 2	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Indisponível	Vôo 100 horas
período 3	Indisponível	Vôo 100 horas	Indisponível	Vôo 80 horas
período 4	Indisponível	Vôo 100 horas	Indisponível	Indisponível
período 5	Indisponível	Vôo 100 horas	Indisponível	Indisponível
período 6	Indisponível	Indisponível	Indisponível	Indisponível
período 7	Indisponível	Indisponível	Indisponível	Indisponível
período 8	Indisponível	Indisponível	Indisponível	Indisponível
período 9	Indisponível	Indisponível	Indisponível	Indisponível
período 10	Indisponível	Indisponível	Indisponível	Indisponível

A **Tabela 2.4** apresenta uma solução para a instância sugerida. Os recolhimentos foram programados para ocorrer assim que as horas de vôo de cada aeronave terminem. A programação descrita na **Tabela 2.4** prevê que, para os períodos 3, 4, 5

PAMA-SP. **Planejamento de Manutenção**. Rodadas de entrevistas com os planejadores das atividades de programação da manutenção das aeronaves das frotas atendidas pelo PAMA-SP. Divisão Técnica do PAMA-SP. 2005.

e 6,mais de uma aeronave esteja recolhida para efetuar sua revisão. Tal fato implica em dimensionamento de capacidade das oficinas para receber tais aeronaves sob pena de não ser possível atendê-las, ou a ocorrência de atrasos e custos além dos planejados. No *período 4*, três das quatro aeronaves estarão indisponíveis, o que implica na disponibilidade de apenas 25% da frota para aquele período.

Tabela 2.4 Solução para o PPMP (ilustração).

período 0	***aeronave 1 200 horas disp.***	***aeronave 2 500 horas disp.***	***aeronave 3 90 horas disp.***	***aeronave 4 180 horas disp.***
período 1	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Vôo 90 horas	Vôo 100 horas
período 2	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	***Recolhimento***	Vôo 100 horas
período 3	**Recolhimento**	Vôo 100 horas	***Manutenção***	Vôo 80 horas
período 4	**Manutenção**	Vôo 100 horas	***Manutenção***	***Recolhimento***
período 5	**Manutenção**	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	***Manutenção***
período 6	Vôo 100 horas	**Recolhimento**	Vôo 100 horas	***Manutenção***
período 7	Vôo 100 horas	**Manutenção**	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas
período 8	Vôo 100 horas	**Manutenção**	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas
período 9	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas
período 10	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Indisponível	Vôo 100 horas

A complexidade de encontrar soluções para o PPMP é, no mínimo, exponencial na medida em que cada problema apresenta 2^n possíveis soluções para cada instância de tamanho n (onde n representa o número de nós ij para cada instância).

Diferentemente do que ocorre em casos do conhecido Problema do Caixeiro Viajante – PCV (Reinelt, 1994), onde o problema está em encontrar um roteiro de menor distância (ou custo) que passe por um conjunto de nós, sendo cada nó visitado exatamente uma vez, cada vez que ocorre uma escolha (recolhimento de uma aeronave) por um nó ij, a vizinhança de ij se modifica no sentido de levar em consideração as conseqüências do

recolhimento da aeronave para todo o sistema. Ao comparar com os casos do PCV, onde a escolha por um nó (cidade) modifica apenas a solução formada até então, os custos (distâncias) para as demais cidades permanecem estáticos independente de qual nó seja o escolhido. Outra diferença entre o PPMP e o PCV reside no fato de que no PPMP, a solução busca por uma programação das manutenções de custo mínimo, mas que, não necessariamente, inclua todos os nós do problema.

Isto significa dizer que se o problema for representado através de um grafo, este, ainda que totalmente conectado, não possui valores sempre iguais para cada um de seus arcos. Por exemplo, dada a seqüência imaginária de recolhimentos $S = \{x_{23}; x_{76}; x_{24}\}$, seja o valor do arco $(x_{76}; x_{24})$ igual a 10. Caso o nó escolhido antes de x_{76} não seja x_{23}, o valor do arco $(x_{76}; x_{24})$ pode não ser igual a 10. Na medida em que cada nó é escolhido, os valores de todos os outros arcos são alterados de acordo com as modificações que a escolha do referido nó gerou nas restrições do problema.

Para o PPMP, especificamente, nenhuma metodologia para modelagem e solução foi verificada na literatura científica. O trabalho de Saito (1998) descreve uma série de considerações sobre problemas de escalonamento relacionados com frotas de uma força aérea, mas os métodos de solução não abordam a modelagem e a geração de soluções que envolvam um horizonte de tempo para todo o ciclo de vida do sistema.

A solução para o PPMP está sujeita a uma série de restrições de capacidade e variações em seus parâmetros. O PPMP pode ser estático, dinâmico, estocástico ou uma combinação dos três, na medida em que suas características podem variar conforme o tempo e as demandas para atividades de manutenção não programadas são decorrentes do comportamento de falhas dos componentes da aeronave, que são processos estocásticos (Ebeling, 1997).

A busca por soluções para o PPMP pode ser dividida em dois objetivos: o primeiro objetivo é a procura por uma solução viável (que satisfaça todas as restrições rígidas ou inflexíveis) e o segundo, uma vez encontrada uma solução viável, está relacionado à minimização de uma função de custo composta pelas restrições flexíveis do problema. A construção de soluções para o PPMP pode ser desenvolvida levando-se em consideração múltiplos objetivos, uma vez que, dependendo dos critérios estabelecidos, objetivos diferentes e, por vezes, conflitantes

podem estar envolvidos. Nesse caso, o problema passa a ser resolvido de acordo com a definição do Problema de Otimização com Múltiplos Objetivos – POMO (do inglês *Multi-Objective Optimization Problem – MOOP*), onde se busca uma solução de melhor relação de compromisso entre os vários objetivos do problema. Outro problema que se constitui uma generalização possível de ser adaptada para o PPMP são os problemas de cobertura (do inglês *set covering*).

Os métodos de solução para o PPMP também podem ser classificados em exatos, heurísticos, meta heurísticos ou uma combinação dos dois últimos (métodos híbridos). Os métodos exatos utilizados em problemas semelhantes ao PPMP, geralmente são baseados em procedimentos de enumeração implícita em árvore, conhecidos como *branch-and-bound* (*B&B*). Os trabalhos de Sprecher; Hartman; Drexel (1997) e Sprecher; Drexl (1998) tratam os casos de escalonamento com restrições de recursos com a abordagem *B&B* e árvore de precedência. Os métodos de solução exatos podem não ser aplicáveis para problemas de dimensão realista devido a complexidades presentes em casos semelhantes ao PPMP, muito embora sejam os únicos métodos que garantam soluções ótimas.

O PPMP apresenta relações não lineares na formulação de suas restrições, dificultando a aplicação de métodos envolvendo programação linear. O PPMP possui um número exponencial de programações de recolhimentos possíveis e, aparentemente, não pode ser resolvido diretamente de modo eficiente.

Os métodos heurísticos servem como alternativas práticas na busca por soluções para problemas maiores ou mais difíceis e envolvem a construção de soluções através de algoritmos de inserção, de lógica semelhante ao processo manual verificado em algumas organizações (Papadimitriou; Steiglitz, 1998).

Os procedimentos metaheurísticos fazem uso de diferentes estratégias para gerenciar procedimentos, heurísticos ou não, na busca de soluções melhores, em problemas de complexidade combinatorial significativa onde procedimentos heurísticos podem não conseguir obter bons resultados (Osman; Laporte, 1996). Dentre outros procedimentos metaheurísticos, apresentam possibilidades de aplicação no PPMP (devido à semelhança dos problemas testados e ao sucesso das aplicações verificadas pela literatura), Algoritmos Genéticos, Redes Neurais - MRN, Recozimento

Simulado MRS, Busca Tabu – MBT, Colônia de Formigas – MCF e procedimentos híbridos.

O PPMP é solucionado de modo empírico e manual nas organizações da FAB responsáveis pelo gerenciamento do ciclo de vida das aeronaves. Nos parques de manutenção, os recolhimentos são baseados nas horas de vôo remanescentes de cada aeronave e são inseridos, um a um, em uma planilha eletrônica até que uma solução viável seja encontrada. O processo pode levar semanas e não existe garantia de que os resultados não possam ser melhorados. Em outros níveis de manutenção, os recolhimentos acabam ocorrendo na medida em que as horas de vôo disponíveis para cada aeronave vão se esgotando, muitas vezes sem planejamento algum, acarretando em problemas para a manutenção dos níveis de serviço esperados para a frota (PAMA-SP, 2005).

2.2.5.1 Classificação do PPMP

O PPMP pode representar casos específicos e diferentes entre si. Portanto, faz-se necessário esclarecer os pontos onde diferem e as conseqüências para os procedimentos de procura por soluções. O leitor pode perceber certa semelhança na classificação do PPMP com as classificações do PCV e do Problema de Roteirização de Veículos - PRV.

O fato se deve à inspiração vinda dos estudos e procedimentos testados no começo do programa de doutoramento com casos do PCV e PRV (Cunha; Bonasser; Abrahão, 2002); (Abrahão; Gualda, 2004).

2.2.5.1.1 PPMP Frota Homogênea – PPMP-FH

No caso mais simples do PPMP, somente são verificadas aeronaves de um mesmo tipo. Neste caso o problema é resolvido para um conjunto de parâmetros sempre iguais para todas as aeronaves (aeronaves todas iguais). Uma limitação deste modelo é observada quando do envelhecimento da frota e, para as aeronaves mais desgastadas, determinadas revisões carecem ser feitas em intervalos menores que os das demais. Ou seja, na medida em que a frota pode não “envelhecer” de forma

uniforme, algumas aeronaves podem se desgastar antes que outras. Nesse caso, estudos de confiabilidade podem recomendar uma diminuição nos intervalos de manutenção para aeronaves mais "envelhecidas". O problema passa a representar

PAMA-SP. **Planejamento de Manutenção**. Rodadas de entrevistas com os planejadores das atividades de programação da manutenção das aeronaves das frotas atendidas pelo PAMA-SP. Divisão Técnica do PAMA-SP. 2005.

uma particularidade do PPMP para uma frota heterogênea, comentado a seguir.

2.2.5.1.2 PPMP Frota Heterogênea – PPMP-FHET

Neste caso, o problema é resolvido para uma frota com mais de um tipo de aeronave ou para aeronaves com diferentes intervalos para uma mesma atividade de manutenção. Um esquadrão que possua mais de um tipo de aeronave em seu acervo enfrenta um PPMP-FHET. A dificuldade na busca por soluções aumenta na medida em que diferentes tipos de aeronaves podem apresentar diferentes características de manutenção, restrições e parâmetros.

2.2.5.1.3 PPMP Múltiplos Esquadrões – PPMP-ME;

Para o caso onde mais de um esquadrão opere um determinado tipo de aeronave, restrições adicionais relacionadas às disponibilidades e ao esforço aéreo são acrescentadas ao problema. Este é o caso onde uma frota é operada por mais de um esquadrão e a programação das atividades de manutenção precisa considerar restrições de mais de um operador.

2.2.5.1.4 PPMP Múltiplas Oficinas – PPMP-MO

Nos casos anteriores, todas as atividades de manutenção estavam restritas a serem executadas em uma única oficina. Muito embora seja o caso para a grande maioria da frota da FAB (uma única oficina responsável pelo sistema de armas), empresas aéreas normalmente utilizam mais de uma oficina no roteamento das aeronaves para as atividades de manutenção. O PPMP-MO apresenta o desafio de, no processo de busca por soluções, alocar aeronaves a oficinas para, daí então, encontrar uma

programação exeqüível e minimizar uma função de custo. Este caso possui características semelhantes ao PRV para múltiplos depósitos em sua estruturação.

As características do PPMP descritas acima podem estar presentes em um mesmo problema. O "*PPMP_FHET_ME_MO*" seria uma instância do PPMP onde estão presentes: uma frota heterogênea, múltiplos esquadrões e múltiplas oficinas. As instâncias testadas no decorrer desta tese serão referenciadas de acordo com as classificações descritas acima.

2.2.5.2 Limitações dos problemas propostos

O modelo, da forma como está definido e descrito, apresenta limitações em relação ao problema real. No começo deste capítulo, definiu-se manutenção corretiva, mas as implicações relacionadas a ela não foram incluídas no modelo. Todas as atividades de manutenção corretiva são consideradas executadas sempre que necessário e ao menor tempo possível. De fato, o tempo para execução da manutenção corretiva é considerado nulo na modelagem proposta. Tal hipótese compromete o modelo por desconsiderar o tempo que cada aeronave pode passar na condição de indisponível. Então, é preciso clarificar que os valores de disponibilidade verificados e esperados pela modelagem do problema para a frota desconsideram as atividades de manutenção corretiva.

A modelagem dos problemas supõe que atrasos administrativos e logísticos não comprometem o tempo necessário para a execução das atividades de manutenção preventiva. Os tempos das atividades de manutenção considerados na modelagem são considerados determinísticos para cada tipo de atividade de manutenção e para cada tipo de aeronave.

O valor das horas voadas por período (***t***) é considerado constante e igual à média esperada de horas de vôo por período para cada aeronave ao longo de seu ciclo de vida, caso cada aeronave possua horas disponíveis suficientes. Esta hipótese está relacionada com a busca pela distribuição mais eqüitativa possível das horas de vôo através da frota ao longo dos respectivos ciclos de vida.

É esperado que a solução encontrada para o problema com a utilização de um modelo matemático necessite de um processo de ajustes para sua aplicação operacional. Um exemplo diz respeito às horas voadas por período (***t***). Muito embora o modelo considere que o valor de ***t*** seja constante e igual à média esperada de horas de vôo por período para cada aeronave ao longo de seu ciclo de vida, os gerentes envolvidos na tomada de decisão nos níveis operacional (1º nível de manutenção), tático (2º nível de manutenção) e estratégico (3º nível de manutenção) podem intervir no sentido de, uma vez gerada a melhor solução possível através do modelo, aplicar pequenos ajustes que se fizerem necessários.

A capacidade "efetiva", ou seja, a capacidade economicamente sustentável no médio e longo prazo, e a capacidade "de projeto", ou seja, acapacidade máxima sustentável somente por curtos períodos de tempo, são consideradas conhecidas, bem como os custos da manutenção de tais capacidades (inclusive quando na condição de ociosas).

2.3 Problemas semelhantes ao PPMP na literatura

A literatura aborda problemas semelhantes ao PPMP e que podem ser interpretados e adaptações baseadas em suas estruturas podem ser usadas para sua modelagem e solução. Os primeiros problemas relatados são os baseados em modelos de confiabilidade e manutenibilidade. Boa parte dos problemas de manutenção preventiva verificados na literatura está relacionada com os cálculos para se determinar o "melhor" intervalo para que as ações de manutenção sejam efetuadas ou para se determinar a "melhor" forma de se escalonar as tarefas de manutenção "dentro" do ambiente das oficinas, sem levar em consideração restrições presentes no sistema onde estão inseridas as aeronaves. Os modelos baseados nos conceitos de confiabilidade e manutenibilidade estão fora do foco deste trabalho.

Os problemas que se aproximam das características do PPMP são descritos genericamente como problemas de alocação ou problemas de cobertura.

Problemas de alocação são descritos como aqueles em que um conjunto de objetos, atividades, etc., necessita ser alocado a um dado número de recursos (localidades, agentes, máquinas, etc.). O problema de alocação quadrática (do inglês *quadratic assignement problem – QAP*) pode ser descrito como o problema de alocar um

conjunto de instalações a um conjunto de localidades dadas distâncias entre as localidades e valores dos fluxos entre as instalações. O problema de alocação generalizada (do inglês *generalized assignement problem – GAP*) envolve um conjunto de tarefas a serem alocadas a um conjunto de agentes de modo que uma função de custo possa ser minimizada.

Cada agente possui capacidade limitada e cada tarefa, uma vez alocada a um agente, consome parte desta capacidade. Os custos envolvidos em alocar determinada tarefa a um agente são conhecidos e o objetivo está em encontrar uma programação para as alocações que seja exeqüível e de mínimo custo.

O problema de alocação em cursos de uma universidade (do inglês *university course timetabling problem – UCTP*) completa o quadro dos problemas de alocação mais conhecidos e é definido como: dados um conjuntos de horários, um conjunto de eventos, um conjunto de salas de aula, um conjunto de características, um conjunto de estudantes e dois tipos de restrição (flexíveis e inflexíveis), o objetivo está em alocar os eventos aos horários e às salas de aula de modo a não infringir as restrições inflexíveis e minimizando uma função objetivo baseada nas penalidades impostas pelas restrições flexíveis (Dorigo; Stützle, 2004).

Em problemas de cobertura, dada uma matriz binária de m x n, $A = [a_{ij}]$, cada coluna recebe um custo (não negativo) b_{ij}. Uma coluna j cobre uma linha i caso $a_{ij} = 1$.

O objetivo do problema é encontrar um subconjunto de colunas de peso mínimo que cubra todas as linhas.

A representação matemática para um subconjunto J de colunas e y_j , uma variável binária que assume o valor 1, caso $j \in J$, e 0 caso contrário, fica assim (Dorigo; Stützle, 2004):

$$Min \sum_{j=1}^{n} b_j y_j \tag{2.11}$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} y_j \geq 1, \qquad i = 1,...,m, \tag{2.12}$$

$$y_j \in \{0,1\}, \qquad j = 1,...,n, \tag{2.13}$$

O problema de partição de conjuntos (do inglês *set partition problem*) é similar ao problema de cobertura apresentado acima com exceção da equação (2.12), que é substituída por uma equação de igualdade. De acordo com Dorigo; Stützle (2004), problemas de partição são significativamente mais difíceis de resolver que problemas de cobertura, pois encontrar uma solução exeqüível já é *NP - Difícil*.

Dos problemas estudados, os problemas de alocação em cursos de uma universidade e os problemas de roteamento de aeronaves para manutenção que contém um problema de partição como um subproblema (Sarac; Batta e Rump, 2004), apresentam maiores similaridades com o PPMP e serão estudados em maior detalhe a seguir.

2.3.1 **Problema de alocação em cursos de uma universidade (*"timetabling")***

Os problemas de alocação em cursos de uma universidade são considerados problemas clássicos de otimização combinatória que consistem em estabelecer uma seqüência de encontros entre professores e estudantes durante um período prefixado de tempo (uma semana, normalmente), satisfazendo um conjunto variado de restrições (Schaerf, 1999). Portanto, dados um conjunto de horários, um conjunto de eventos, um conjunto de salas de aula, um conjunto de características e limitações, um conjunto de estudantes e dois tipos de restrições (flexíveis e inflexíveis), o objetivo está em alocar os eventos aos horários e às salas de aula de modo a não infringir as restrições inflexíveis e minimizando uma função objetivo baseada nas penalidades impostas pelas restrições flexíveis (Dorigo; Stützle, 2004); (Rossi-Doria *et al*, 2004).

O problema é considerado *NP-Completo* devido ao grande conjunto de restrições aplicáveis e cabíveis (Even, Itai e Shamir, 1976); (Cooper e Kingston, 1996); (Dorigo; Stutzle, 2004); (Rossi-Doria *et al*, 2004). Rardin e Uszoy (2001) usam os problemas de alocação em cursos de uma universidade para ilustrar as dificuldades em se buscar soluções exatas para problemas complexos. "Problemas de alocação em cursos de uma universidade são alvos ideais para pesquisa com procedimentos heurísticos devido sua ampla possibilidade de aplicação, característica intratável para algoritmos exatos e trocas naturais de vizinhanças na procura por soluções." O

problema é descrito de vários modos na literatura, sendo que a principal diferença entre eles está baseada no tipo de instituição onde são verificados e no tipo de restrições aplicáveis (Schaerf, 1999); (Rossi-Doria *et al*, 2004). A literatura considera três tipos principais para a classificação dos problemas de alocação em cursos de uma universidade:

I. Problema das escolas: Envolve a programação dos horários semanais das aulas de uma escola, evitando que professores sejam alocados para duas aulas diferentes ao mesmo tempo e *vice versa*;

II. Problema dos Cursos: Envolve a programação semanal de todas as aulas de um conjunto de cursos universitários, minimizando sobreposições de aulas de cursos que possuam os mesmos estudantes; e

III. Problema dos exames: Envolve a programação dos exames de um conjunto de cursos universitários , evitando sobreposição de exames de cursos que possuam os mesmos alunos e espaçando os exames tanto quanto possível.

A classificação acima não é rígida, na medida em que casos específicos podem estar entre duas das classes citadas e não se adapte a nenhuma das classes sugeridas.

Os procedimentos verificados na literatura sugerem que as soluções do problema podem ser divididas em problemas de procura por soluções, quando se busca uma grade horária viável, e problemas de otimização, quando se busca minimizar uma função objetivo relacionada com as restrições flexíveis do problema (Schaerf, 1999); (Rossi-Doria *et al*, 2004).

No primeiro caso, o sucesso é verificado na medida em que todas as atividades são alocadas. Ou seja, se uma solução que não infrinja as restrições rígidas for encontrada. No segundo caso, a medida do sucesso é dada pelo valor verificado na função objetivo do problema. Os valores obtidos pela função objetivo podem representar algo facilmente referenciável ou algo difícil de ser traduzido de forma operacional, como no caso de soluções dadas pelo somatório de penalidades relacionadas às restrições flexíveis (Schaerf, 1999); (Rossi-Doria *et al*, 2004).

Os resultados obtidos pelos métodos heurísticos e metaheurísticos são, geralmente, comparados entre si e com os resultados obtidos de modo manual. A complexidade computacional dos métodos propostos é, tipicamente, medida em termos de tempo de execução dos métodos em computadores. Formulação matemática genérica dos problemas de alocação em cursos de uma universidade de acordo com Schaerf (1999):

Encontrar :

$$y_{ik} \qquad (i = 1,...,q;\ k = 1,...,p) \tag{2.14}$$

$$Max \sum_{i=1}^{q} \sum_{k=1}^{p} d_{ik} y_{ik} \tag{2.15}$$

sujeito a

$$\sum_{k=1}^{p} y_{ik} = k_i \qquad (i = 1,...,q) \tag{2.16}$$

$$\sum_{i=1}^{q} y_{ik} \leq l_k \qquad (k = 1,...,p) \tag{2.17}$$

$$\sum_{i \in S_l} y_{ik} \leq 1 \qquad (i = 1,...,q;\ k = 1,...,p) \tag{2.18}$$

$$y_{ik} = \{0,1\} \qquad (i = 1,...,q;\ k = 1,...,p) \tag{2.19}$$

Se $y_{ik} = 1$, uma aula do curso K_i está alocado ao período k, $y_{ik} = 0$, caso contrário. O valor de d_{ik} representa o "desejo" de ter uma aula do curso K_i alocada ao período k. As restrições impõem que: o correto número de aulas está alocado para cada curso (2.16), não existem mais aulas que salas de aula em um determinado período (2.17) e não existem aulas conflitantes para serem alocadas no mesmo período (2.18). Os trabalhos de Socha (2003) e Rossi-Doria *et al* (2004) apresentam um resumo e comparações entre as principais metaheurísticas aplicadas aos problemas de alocação em cursos de uma universidade. O trabalho de Schaerf (1999) apresenta detalhes da formulação matemática e das variantes do problema de alocação de cursos em universidades.

Os problemas de alocação em cursos de uma universidade podem ser adaptados, de forma genérica, para o PPMP, fazendo-se que o conjunto de eventos passe a representar o conjunto de atividades de manutenção, o conjunto de horários passe a

representar o conjunto de períodos para os recolhimentos, o conjunto das salas de aula passe a representar o conjunto de oficinas disponíveis, o conjunto de alunos passe a representar o conjunto de aeronaves e o conjunto de características e limitações das salas de aulas e dos eventos passe a representar o conjunto de restrições descritas para o PPMP.

Modelando o problema dessa forma, as características de complexidade NP-Difícil do problema de alocação em cursos de uma universidade estão presentes também no PPMP. Muito embora o PPMP apresente outras características diferentes das do problema de alocação em cursos de uma universidade, tais características agregam dificuldades envolvendo o caráter dinâmico do problema. O PPMP, caso modelado com base no problema de alocação em cursos de uma universidade, apresenta um problema de alocação em cursos de uma universidade como um subproblema.

2.3.2 Problema de roteamento de aeronaves para manutenção - PRAM.

As atividades de pesquisa operacional ligadas ao apoio logístico de aeronaves estão voltadas principalmente para a programação das escalas de vôo, alocação da frota de aeronaves às escalas, roteamento ou roteirização das aeronaves e operações de contingenciamento.

O problema de programar as escalas de vôo trata da preparação de uma lista de rotas juntamente com os horários de decolagem e pouso visando a atender demandas dos clientes do processo. O problema de alocação dos tipos de aeronave, as quais serão utilizadas para cumprir as rotas definidas pelo problema anterior são discutidos em problemas de alocação de frota (do inglês *fleet assignement*). Os trabalhos de Abara (1989); Hane *et al* (1995); Clarke *et al* (1996) descrevem em maiores detalhes os problemas de alocação de frota.

Os problemas de roteamento de aeronaves tratam da alocação das aeronaves pelo número de matrícula para cada rota gerada pelos processos anteriores. Os trabalhos de Feo e Bard (1989); Kabani e Patty (1993); Clarke *et al* (1997); Cohn e Barnhart (2003); Barnhart *et al* (1997) descrevem em maiores detalhes os problemas de roteamento de aeronaves. Os aspectos tratados pelos três problemas anteriores não

levam em consideração o ambiente dinâmico onde as operações das linhas aéreas ocorrem.

Os problemas de contingenciamento (*disruption recovery*) levam em conta tais considerações e lidam com o "re-roteamento" de aeronaves, tripulações e passageiros no intuito de minimizar problemas gerados pelas contingências (Sarac; Batta; Rump, 2004). Os trabalhos de Jarra *et al* (1993); Cao; Kanafani, (2000); Klabjan et al, (2001) descrevem problemas de contingenciamento relacionados com aeronaves.

O problema apresentado no trabalho de Sarac; Batta e Rump (2004) apresenta similaridades com o PPMP por buscar uma solução (programação) exeqüível que maximize o consumo das horas de vôo disponíveis para cada aeronave. No entanto, a modelagem utilizada é desenvolvida para um horizonte de aplicação bastante curto, pois não considera um horizonte de tempo além do diário. O modelo busca roteirizar aeronaves de modo que possam ser atendidas em estações de manutenção (quando acontece um contingenciamento), minimizando o desperdício das horas disponíveis.

O PPMP difere do PRAM, dentre outras coisas, por buscar minimizar um conjunto sistêmico de penalidades, não apenas o desperdício das horas de vôo disponíveis. A modelagem do PRAM leva em consideração apenas as aeronaves que, quando do contingenciamento, estão classificadas com "tempos de vôo elevado" (do inglês *high time*) e as roteiriza de modo que pernoitem em aeródromos com oficinas compatíveis com a tarefa de manutenção a ser executada.

Formulação matemática genérica do PRAM de acordo com Sarac, Batta e Rump (2004):

$$Min \sum_{k \in K} \sum_{j \in R_k} c_j^k y_j^k \tag{2.20}$$

sujeito a

$$\sum_{j \in R_k}^{n} y_j^k = 1 \qquad \forall k \in K \tag{2.21}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in R_k} \gamma_{ji}^{k} y_j^k = 1 \qquad \forall i \in N \tag{2.22}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in R_k} a_m^k d_{js}^k y_j^k \leq L_{ms} \qquad \forall m \in M \; e \; s \in S_m \tag{2.23}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in R_k} b_m^k d_{js}^k y_j^k \leq Z_{ms} \qquad \forall m \in M \; e \; s \in S_m \tag{2.24}$$

$$y_j^k \in \{0,1\}, \qquad \forall k \in K \; e \; j \in R_k \tag{2.25}$$

O valor de c_j^k representa o coeficiente de custo para a rota j voada pela aeronave k. Caso a aeronave k não seja classificada como com "tempos de vôo elevado", o coeficiente de custo para suas rotas passa a ser zero. Caso contrário, c_j^k passa a valer o total de horas disponíveis para a aeronave k, menos o tempo que durar a rota voada. As restrições descritas estão relacionadas com a cobertura das aeronaves (2.21), cobertura das rotas (2.22), disponibilidade de mão de obra (2.23) e as vagas nas oficinas, tanto fisicamente quanto com relação a mão de obra ligada a cada oficina (2.24). O PRAM apresenta complexidade exponencial e é considerado difícil para ser resolvido diretamente de modo eficiente. O trabalho de Sarac (2000) *apud* Sarac; Batta e Rump (2004) mostra que o PRAM é *NP-Difícil* uma vez que contém um problema *NP-Completo* de cobertura como um subproblema.

2.4 Complexidade combinatorial dos problemas

O dicionário Webster da língua inglesa, define o termo algoritmo como "qualquer método sistemático de resolver certo tipo de problema matemático". Algoritmos são procedimentos para solucionar problemas. De acordo com Cormen *et al* (2002): "...qualquer procedimento computacional bem definido que toma um valor, ou conjunto de valores, como entrada e produz um valor, ou conjunto de valores, como saída... ...também podemos visualizar um algoritmo como uma ferramenta para resolver problemas computacionais bem especificados. O enunciado do problema especifica, em termos gerais, o relacionamento entre a entrada e a saída desejada. O

algoritmo descreve um procedimento computacional específico para alcançar esse relacionamento entre a entrada e a saída."

Procedimentos utilizados na solução de problemas devem, portanto, estar de acordo com a complexidade verificada para cada problema candidato. A não observância do exposto acima pode comprometer significativamente a exeqüibilidade de algoritmos em casos práticos.

SARAC, A. ***Daily operational aircraft maintenance routing problem***. Departamento de Engenharia Industrial (Tese Ph.D. não publicada), Universidade de Buffalo, Buffalo, NY, 2000.

A **Tabela 2.5** foi adaptada de Cormen *et al* (2002) e apresenta uma comparação entre os possíveis tempos de processamento e a dimensão máxima para diferentes problemas. Supondo que, para resolver cada problema, o algoritmo gaste *f(n)* microssegundos para resolver o problema, determinam-se os maiores valores de *n* para resolver cada instância no tempo *t*.

Tabela 2.5 Maiores valores para *n* (adaptado de Cormen *et al,* 2002).

		1 segundo	1 minuto	1 hora	1 dia	1 mês	1 ano	1 século
f(n)	n	60	3600	216000	5184000	155520000	1892160000	1,89216E+11
	n^2	8	19	465	2277	12471	43499	434999
	2^n	6	12	18	23	28	31	38
	$n!$	5	7	9	11	12	13	15

Em outras palavras, o esforço computacional para a resolução pode crescer exponencialmente com o número de pontos a serem atendidos ou visitados. De acordo com Obtiko (1999), uma característica dos problemas de otimização combinatorial é que um algoritmo simples, por vezes óbvio à primeira vista, pode ser usado para encontrar soluções úteis. No entanto, esta abordagem produz muitas soluções possíveis e testar todas as soluções possíveis é um processo muito lento. Para instâncias maiores desse tipo de problema, essa abordagem pode ser inútil.

Para problemas pequenos, uma forma simples de resolver problemas de otimização combinatória seria a utilização de um procedimento de busca até que, exaustivamente, todas as combinações possíveis fossem testadas e, escolhida a melhor (menor valor para um caso de minimização, ou maior valor para um caso de maximização) (Rardin;Uszoy, 2001).

Caso os problemas não sejam simples ou pequenos, como nos caso de problemas práticos de otimização combinatória, é necessário que se avalie a dificuldade em encontrar a solução ótima para o problema.

O estudo da complexidade combinatorial considera um tipo diferente de problema em seu jargão. Problemas de decisão são problemas do tipo "sim" ou "não" e certificam se um problema pode ser ou não comparado a um parâmetro. Na classe de problemas *NP*, dada uma solução, esta pode ser facilmente verificada. Isto não significa que seja fácil encontrar uma solução para um problema *NP*, mas que, uma vez encontrada uma solução, esta pode ser verificada em tempo polinomial. Caso um problema de decisão seja certificado como intratável, seu problema original também receberá o mesmo certificado (Dorigo; Stützle, 2004).

Uma das formas de se expressar o quão difícil será obter a solução ótima para um problema é através da complexidade de tempo para o pior caso. Seja *n* a medida que demonstra a dimensão do problema de otimização. O problema apresenta complexidade *O(f(n))* quando o melhor algoritmo conhecido para sua solução encontra a solução ótima para qualquer instância de tamanho *n* em um tempo de computação que não excede o produto de *g* (uma constante) pelo valor de *f(n)* (Dorigo; Stützle, 2004).

Se *f(n)* representa uma função polinomial, tendo como *k* o seu maior expoente, então o problema apresenta complexidade $O(n^k)$, e o problema de decisão a ele correspondente pertence à classe *P* (do inglês *Polynomial time*). Os algoritmos com complexidade polinomial são computacionalmente tratáveis, requerendo um tempo de execução limitada por uma função polinomial.

Os problemas que não possuem algoritmo de tempo polinomial conhecido formam a classe conhecida como *NP*. Um problema polinomial não-determinístico – *NP* (do inglês *Non-deterministic Polynomial time*) é um caso computável cujas soluções

conhecidas até então, são de ordem exponencial e não se sabe se existe uma solução melhor, de complexidade polinomial. O termo "não-determinístico" não implica em aleatoriedade, apenas não se pode afirmar a existência de um algoritmo de complexidade polinomial para o problema em consideração. Podem-se descrever os problemas pertencentes à classe *NP*, também, como sendo problemas em que soluções podem ser encontradas em tempo polinomial, ou seja, caso fosse fornecida uma solução correta, a sua autenticidade poderia ser confirmada em tempo polinomial (Cormen *et al*., 2001).

Os problemas pertencentes à classe *NP* são computacionalmente relacionados e possuem como propriedade o fato de só poderem ser resolvidos em tempo polinomial, se e somente se, todos os outros problemas da classe *NP* também puderem.

Uma outra forma de definir e explicar a classe *NP* repousa na definição de algoritmos determinísticos e não determinísticos. Em algoritmos determinísticos, o resultado de cada operação é definido de uma única forma. Na teoria é possível ignorar este fato e os algoritmos poderiam envolver operações não determinísticas. Os algoritmos não determinísticos são capazes de escolher, dentre várias alternativas, uma das possíveis. As operações produzem resultados definidos não apenas de uma forma. Um “computador não determinístico” (que é imaginário, na verdade) é capaz de resolver problemas de decisão do tipo “sim” ou “não”. O computador não determinístico é capaz de produzir cópias de si mesmo quando diante de duas ou mais alternativas, e continuar a computação de modo independente para cada alternativa. Outra definição é a de uma máquina capaz de adivinhar a solução e confirmar, de forma determinística e em tempo polinomial, que a solução é correta. O computador não determinístico não existe, mas ainda assim fornece evidências de que certos problemas não podem ser resolvidos por algoritmos deterministicos em tempo polinomial (Almeida; Ziviani, 2005).

É amplamente aceito na literatura que $P \subseteq NP$, pois algoritmos determinísticos são casos especiais dos algoritmos não determinísticos, mas não pôde ser provado, ainda, se $P = NP$. Caso existam algoritmos polinomiais determinísticos para todos os problemas na classe *NP*, isto implica em afirmar que $P = NP$. De acordo com Cook,

a maioria da comunidade de pesquisadores em teoria da complexidade acredita que *P* ≠ *NP*, já que é objeto de estudos por parte de toda a comunidade e nunca se encontrou uma prova de que *P* = *NP* (Cook, 2000); (Cormen et al., 2001).

Para se definir a classe *NP-Completo* é necessário entender o conceito de "redução em tempo polinomial". Sejam $\prod_1$ e $\prod_2$ problemas de decisão. Caso um algoritmo A_2 resolva $\prod_2$, seja possível transformar $\prod_1$ em $\prod_2$ e a solução de $\prod_2$ na solução de $\prod_1$, então A_2 pode ser utilizado para resolver $\prod_1$. Uma conseqüência interessante dessa definição é que, caso um problema $\prod_1$ possa ser resolvido em tempo polinomial, e caso exista um problema $\prod_2$ que possa ser reduzido em tempo polinomial à forma do problema $\prod_1$, então a solução para o problema $\prod_2$ também pode ser obtida em tempo polinomial (Almeida; Ziviani, 2005); (Cormen et al., 2001). Baseado nesse conceito pode-se dizer que um problema $\prod$ é *NP-difícil* se todos os problemas pertencentes à classe *NP* puderem ser reduzidos em tempo polinomial à forma do problema $\prod$. Caso um problema *NP-difícil* pertença à classe *NP*, então passa a ser considerado problema *NP-completo*, muito embora não precise, necessariamente, pertencer à classe *NP* (Dorigo; Stützle, 2004).

Percebe-se que a solução de um problema *NP-difícil* é tão ou mais difícil de ser obtida que a solução de um problema na classe *NP*. Percebe-se, também, que os problemas *NP-completos* são os que apresentam maior dificuldade de solução entre os problemas na classe *NP*. Portanto, se for obtido um algoritmo de solução em tempo polinomial para um problema *NP-completo*, então todos os problemas *NP-completos* e, por conseqüência, todos os problemas na classe *NP* também poderiam ser solucionados em tempo polinomial (Dorigo; Stützle, 2004).

Para efeito de clareza, um problema diz respeito a uma questão geral a ser resolvida, enquanto uma instância de um determinado problema diz respeito à forma especificada dos valores das variáveis e demais parâmetros para um caso específico. Problemas possuem instâncias diferentes entre si quanto à dimensão e características específicas (Dorigo; Stutzle, 2004);

O trabalho de Garey e Johnson (1979) apresenta discussões aprofundadas sobre complexidade e um catálogo dos vários problemas reconhecidos como sendo *NP-Completos*.

2.5 Resumo e conclusões do capítulo

Este capítulo descreve as características e a formulação matemática do problema de programação da manutenção preventiva em veículos – PPMP. As descrições contextualizam o ambiente de manutenção preventiva para uma frota de veículos e o cenário de restrições ali verificadas, sistemicamente.

Verifica-se que o problema não está bem definido na literatura, pois não foi encontrado um similar exato para o PPMP. Existe grande quantidade de estudos voltados para modelos de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, mas que não abordam sistemicamente os casos abordados pelo PPMP.

Os estudos desenvolvidos indicam que o fato do PPMP não ser resolvido com facilidade nas organizações da FAB é devido à complexidade verificada na estruturação do problema. O PPMP realmente não pode ser resolvido facilmente de modo direto e apresenta características não lineares em sua formulação.

Depois, são descritos os problemas tratados pela literatura que se assemelham ao PPMP. Comparações são feitas para que possam ser verificadas as complexidades na busca por soluções e métodos de solução sugeridos. Cada problema é explorado no sentido de classificá-lo do ponto de vista de sua complexidade e também no intuito de verificar suas características e semelhanças em relação ao PPMP. Todos os problemas semelhantes ao PPMP estudados apresentam complexidade combinatorial exponencial e sugerem a utilização de procedimentos aproximados para os casos práticos. Em seguida é apresentada uma discussão envolvendo complexidade combinatorial na solução de problemas como os tratados neste capítulo. Por último, são apresentadas as conclusões do capítulo.

As características de complexidade e não linearidades verificadas até o presente e a semelhança com problemas que apresentam características *NP-Difícil* e *NP-Completo* verificados na literatura, abrem possibilidade para a exploração de novos métodos de solução apropriados para modelos com tais características. Todos os problemas semelhantes estudados são tratados com procedimentos meta-heurísticos para casos de tamanho significativo.

O problema de alocação de cursos de uma universidade apresentou similaridades para que o PPMP possa ser modelado de forma semelhante, já o PRAM apresenta uma limitação ligada à sua formulação envolvendo seu horizonte de aplicação.

O caráter dinâmico presente na estruturação e na busca por soluções no PPMP sugere que os métodos de solução devam ser capazes de levar tais características, ainda que parcialmente, em conta no desenvolvimento de procedimentos de procura por soluções.

Com as dificuldades de obtenção de soluções através de procedimentos manuais, da característica *NP-difícil* e o do fato do PPMP ser repleto de parâmetros que variam com o passar do tempo, uma modelagem que permita soluções automatizadas constitui desafio do ponto de vista acadêmico e prático para pesquisadores no âmbito da FAB.

Tendo em vista o que foi apresentado, conclui-se que a modelagem para a solução do PPMP deva ser feita com procedimentos meta-heurísticos. O capítulo seguinte explora conceitos envolvendo meta-heurísticas e, em particular, a Meta-heurística Colônia de Formigas - MCF.

CAPÍTULO 3

META-HEURÍSTICAS

3.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é o estudo de procedimentos meta-heurísticos para a solução do PPMP. O capítulo é apresentado na forma de discussão sobre variantes dos processos de solução meta-heurísticos encontrados na literatura, principalmente os relacionados com a Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF e suas variantes. O capítulo inicia-se com a apresentação da definição dos métodos aproximados, conhecidos como heurísticas, e com a descrição de procedimentos de busca local na procura por soluções. O capítulo segue com a conceituação de meta-heurística e lista as principais categorias de procedimentos meta-heurísticos. A MCF é apresentada por último e em maior detalhe. O capítulo termina com uma discussão a respeito das expectativas da aplicabilidade de procedimentos meta-heurísticos para o PPMP e, em especial, da MCF.

3.2 Heurísticas e mecanismos de busca local

Heurísticas são normalmente conhecidas como procedimentos que procuram por uma solução sem, no entanto, garantir que será possível encontrar uma (Greenberg, 1999). Um procedimento heurístico é definido por Rayward-Smith *et al* (1996) como: "Uma técnica heurística (ou simplesmente, uma heurística) é um método que procura por boas soluções (*i.e.* próxima da ótima) a um custo computacional adequado sem ser possível garantir otimalidade e, possivelmente, exeqüibilidade. Infelizmente, pode ser que nem mesmo seja possível afirmar o quão perto da solução ótima uma solução heurística esteja". Muito embora a definição possa parecer desanimadora, muitos procedimentos heurísticos atuais são capazes de alcançar soluções muito boas para casos práticos de problemas combinatoriais complexos (Rayward-Smith *et al*, 1996).

O trabalho de Silver (2002) enumera alguns argumentos para a utilização de procedimentos heurísticos na busca por soluções de problemas:

- Simplicidade para o entendimento e facilidade de implementação, função do entendimento intuitivo do funcionamento dos procedimentos;
- Soluções aproximadas podem ser suficientes e representar melhorias em comparação com procedimentos manuais;
- Obtenção de resultados razoáveis em pouco tempo aliado ou não a ausência de um procedimento exato disponível;
- Robustez, virtude da insensibilidade à variabilidade dos parâmetros;
- Utilização como parte de procedimentos compostos na geração de soluções iniciais ou limites superiores e inferiores.

Outros autores comentam que o fato de certas características de um determinado problema serem relaxadas ao aplicar-se um método de solução exato, pode resultar em uma solução prática pior que o caso onde todos os parâmetros são fielmente representados, mas o método de solução é aproximado.

Os métodos heurísticos abrangem dentre outros, dois grupos principais: métodos de construção de soluções e métodos de melhorias de soluções. Alguns autores consideram também o grupo dos métodos compostos, em que heurísticas de construção e melhoria de solução são utilizadas de forma conjunta (Helsgaun, 2000); (Dorigo; Stützle, 2004).

Nos métodos de construção de soluções, os nós vão sendo incluídos na solução gradualmente, de modo seqüencial, segundo alguma regra de construção, sem que a solução parcial obtida seja melhorada. Em outras palavras, uma solução é construída iterativamente, sem modificação posterior das seqüências parciais de nós, definidas ao longo do processamento do algoritmo (Cunha; Bonasser; Abrahão, 2002).

O conhecido método de construção do "vizinho mais próximo" parte de um nó inicial e segue anexando, de acordo com os menores custos verificados, nós que passam a integrar o roteiro-solução.

Os métodos, ditos de melhoria, procuram melhorar soluções obtidas através de algum outro método de construção. Os métodos de melhoria tradicionalmente utilizados são do tipo *k-opt*, conforme proposto por Lin e Kernighan (1973), nos quais *k* arcos são removidos de uma solução e substituídos por outros *k* arcos, com a finalidade de diminuir o custo total incorrido. Conforme Laporte *at al* (2000), quanto maior o valor de *k,* melhor a precisão do método, porém maior também é o esforço computacional necessário. Na prática, são considerados os métodos *2-opt* e *3-opt*, isto é, *k* assumindo os valores 2 ou 3.

De forma resumida, o método *2-opt* testa trocas possíveis entre pares de arcos, refazendo as conexões quando houver uma melhoria na solução. O processo termina quando não for possível realizar troca que resulte em melhoria. Este procedimento possui ordem de complexidade $O(n^2)$. No caso do *3-opt* são considerados três arcos ao invés de dois, a fim de se avaliarem as alterações nas conexões entre os nós, o que resulta em sete possíveis combinações.

Os mecanismos de busca local costumam ser empregados na exploração da vizinhança de soluções iniciais obtidas através de outros procedimentos. A exploração é feita de modo repetitivo e, na medida em que soluções melhores são encontradas, passam a compor a nova solução inicial até que algum critério de parada seja satisfeito (Dorigo; Stutzle, 2004).

Seja x o vetor que representa uma solução inicial e X o conjunto das soluções possíveis. Ao vetor x pode ser associado um conjunto de soluções possíveis $V(x) \subseteq X$, chamado de *vizinhança de x*, de tal forma que as soluções contidas em $V(x)$ podem ser alcançadas através de um único "movimento", partindo-se de x. Um movimento pode ser considerado uma operação aplicada a uma solução que altere um ou mais valores das variáveis da solução. A qualidade da melhoria observada depende da amplitude da busca efetuada. Caso "toda" a vizinhança seja explorada, pode-se perder mais tempo e encontrar melhorias mais significativas, ao passo que o processo pode parar assim que encontrar uma melhoria qualquer, o qual pode perder menos

tempo (Dorigo; Stutzle, 2004). O trabalho de Reinelt (1994) apresenta detalhes sobre a caracterização das vizinhanças para o problema do caixeiro viajante – PCV. Dentre as características e métodos citados, destacam-se o dos diagramas de Voronoy e o das triangulações de Delaunay para limitar o espaço de procura por soluções em grafos.

3.3 Meta-heurísticas

Meta-heurísticas são classes de métodos aproximados que têm se desenvolvido significativamente desde sua inserção no cenário científico no início dos anos oitentas. Uma meta-heurística pode ser formalmente definida como um processo de geração iterativa que direciona heurísticas subordinadas, combinando diferentes estratégias e conceitos para explorar o espaço de solução. Estratégias que favorecem o aprendizado são utilizadas para estruturar as informações no intuito de procurar, eficientemente, soluções quase ótimas. O trabalho de Osman e Laporte (1996) apresenta vasta bibliografia sobre meta-heurísticas e problemas utilizados para obtenção de soluções com a utilização das mesmas.

As meta-heurísticas procuram guiar o processo de busca por soluções de modo a explorar tanto características de intensificação, quanto características de diversificação. Tão rápido quanto possível, procedimentos meta-heurísticos buscam identificar regiões mais interessantes na busca por soluções ao mesmo tempo em que fogem de áreas previamente verificadas e, possivelmente, pouco interessantes. A intensificação em uma meta-heurística é a exploração em busca por melhores soluções em uma vizinhança promissora (portanto, um procedimento local). Diversificação é a exploração de todo o espaço de soluções em busca das regiões mais interessantes, o que pode significar a fuga de uma região que já não se mostre interessante. Durante os procedimentos de diversificação, meta-heurísticas podem "aceitar" soluções piores que as atuais para fugir de regiões pouco promissoras.

Os procedimentos meta-heurísticos aplicados a uma instância qualquer de um problema devem combinar tanto características de diversificação como de intensificação. Dependendo das particularidades de cada caso, o balanço dos parâmetros que controlam a diversificação e a intensificação precisa ser bem

ajustado, sob risco de comprometer a qualidade da solução encontrada e o tempo computacional envolvido (Blum; Roli, 2003).

Meta-heurísticas são capazes de usar informações relevantes provenientes da estrutura do problema e o conhecimento gerado com o passar das iterações em sua busca por soluções. A conseqüência natural dos conceitos discutidos acima é que, dificilmente, uma meta-heurística se aplica com o mesmo desempenho a todas as instâncias de um mesmo problema. Dificilmente um procedimento meta-heurístico vai apresentar bom desempenho sem que os necessários ajustes de seus parâmetros sejam executados (Dorigo; Stutzle, 2004).

Ao comparar o desempenho de procedimentos heurísticos, faz-se necessário separar os objetivos envolvidos nas comparações. Rardin e Uzsoy (2001) sugerem que os objetivos voltados para pesquisa, onde se busca a geração de novos métodos para a solução de problemas, e os objetivos voltados para o desenvolvimento, onde se procuram aprimoramentos e ajuste em métodos comprovados e conhecidos, como sendo os principais.

Como o objetivo desta tese envolve a aplicação de um procedimento relativamente novo (MCF) a um problema pouco explorado na literatura (PPMP), os objetivos das comparações de desempenho estão voltados para pesquisa. No entanto, a aplicação prática dos métodos sugeridos carece de testes e ajustes para que possa resolver instâncias úteis.

De forma complementar, além do modo como o desempenho deve ser abordado, é preciso que as comparações sejam feitas em testes que sejam representativos dos problemas e instâncias reais. A situação hipotética de se poder contar com número suficiente de casos reais pode não se verificar. Rardin e Uzoy (2001) destacam as principais fontes para testes com procedimentos heurísticos e meta-heurísticos:

- Casos reais: infelizmente, casos reais de diferentes tamanhos nem sempre estão disponíveis em abundância e em variedade. Caso se deseje testar um procedimento, para o qual só existem instâncias pequenas, em problemas de grande porte, é possível que as instâncias pequenas sejam representativas apenas

para os sistemas que estão em funcionamento. Isso provoca sérias limitações quanto à variação do tamanho e das características das instâncias;

- Variações aleatórias de casos reais: a estrutura original dos problemas reais é mantida e alterações aleatórias são feitas no sentido de expandir as possibilidades dos testes;
- Instâncias da literatura: várias coleções de instâncias testadas (algumas com resultados ótimos confirmados) estão disponíveis na literatura. Isto permite, para os casos às quais se refiram, que testes possam ser executados. A disponibilidade de tais instâncias pode demandar muito esforço de pesquisa para sua solução. Este fato pode enviesar os estudos sem a devida distinção entre problemas de pesquisa e desenvolvimento; e
- Instâncias geradas aleatoriamente: apresentam relativa simplicidade e facilidade para obtenção e podem representar as características importantes do problema. No entanto, é possível que, ao desenvolver tais instâncias, o pesquisador acabe por desenvolver estruturas que apresentem resultados enviesados.

O PPMP não conta com instâncias consagradas na literatura para que os procedimentos propostos por esta tese possam ser testados. As instâncias reais verificadas no cenário da FAB, naturalmente, não são representativas de todo o espaço amostral ao qual os procedimentos podem ser aplicados.

Portanto, as instâncias utilizadas nos testes são: reais, reais aleatoriamente modificadas, ou instâncias geradas aleatoriamente.

Uma vez que os problemas candidatos à aplicação de procedimentos meta-heurísticos apresentam complexidade significativa, a otimalidade alcançada nos resultados ou o quão perto da otimalidade, está entre os critérios mais complexos de serem avaliados. Ainda que o problema não fosse novo, soluções ótimas verificadas são raras para instâncias de tamanho prático.

Rardin e Uzsoy apresentam sugestões para testes com meta-heurísticas em problemas e instâncias *NP-Completos* e *NP-Difíceis*:

- Soluções exatas para instâncias pequenas: abordagem das mais utilizadas e das menos apropriadas, com poucas exceções, de acordo com os autores. Normalmente são obtidas soluções à custa de longos tempos de processamento para comparações com os procedimentos heurísticos. A expectativa é a de que se funcionar bem para pequenas instâncias, funcionará bem para instâncias maiores. Na opinião dos autores, não representa uma boa opção e melhor seria utilizar o esforço gasto com métodos exatos para pequenas instâncias, no desenvolvimento de heurísticas cada vez melhores;

- Limites dos valores ótimos: a vantagem deste procedimento é geração de limites superiores prováveis do desvio da solução ótima para a solução heurística. Caso os limites não possam ser calculados da forma mais precisa e adequada possível, permanece a dúvida se o desvio é gerado pela imprecisão do limite ou pelo desempenho da heurística. Caso os limites fossem fáceis de calcular, o problema poderia ser solucionado por meio de métodos do tipo *branch-and-bound*;

- Construção de soluções ótimas: a geração de soluções ótimas é possível para alguns casos onde, através de um processo aleatório, são criadas soluções até que a solução ótima se torne conhecida. A desvantagem apresentada pelos autores é que o processo de geração de soluções está intimamente ligado em informações especificas de cada problema;

- Estimação estatística dos valores ótimos: dada uma amostra significativamente grande de soluções, é possível calcular, através de cálculos estatísticos, previsões a respeito das soluções ótimas. Os autores acreditam que os procedimentos estatísticos são promissores, mas ainda requerem bastante pesquisa;

- Melhores soluções conhecidas: na impossibilidade do uso das alternativas anteriores, ou em suplemento ao que já foi tentado, a grande maioria dos trabalhos compara o desempenho dos procedimentos e soluções encontradas aos melhores valores conhecidos para cada instância. Os argumentos são os de que se outros pesquisadores já tentaram muitas vezes obter a solução de instâncias de

domínio público, é provável que os resultados alcançados estejam muito próximos dos valores ótimos para cada instância.

As comparações envolvendo o PPMP sofrem e se beneficiam das caracterizações abordadas acima. Na medida em que os procedimentos de solução são desenvolvidos para o PPMP, os testes são feitos em instâncias reais (ou desenvolvidas baseadas nas reais) e comparadas com as soluções previamente obtidas por outros métodos.

As comparações são feitas de acordo com o sugerido por Golden; Stewart (1985) com a utilização de testes não paramétricos. Os testes de Friedman (Conover, 1990) se mostram mais adequados quando lidando com mais de três comparações que, repetidamente, aplicar os testes de Wilcoxon (Golden; Stewart, 1985).

Os testes de Friedman são usados para comparar o desempenho de diferentes categorias de métodos baseado na classificação obtida pelos resultados dos respectivos métodos em relação aos demais. Os testes são equivalentes a análise de variância "*two-way*" computada com uma observação por célula (Conover, 1980).

A hipótese "*null*" de que não existe diferença entre os tratamentos (classificação das categorias) é testada.

As condições necessárias para assegurar a validade do teste são as seguintes:

- As varáveis b e k (métodos e instâncias) são mutuamente independentes . Os resultados apresentados por um método não influencia os resultados dos outros métodos em outras instâncias;
- Para cada instância, os resultados dos métodos são classificados de acordo com os resultados obtidos pela função objetivo. O método com o melhor desempenho recebe a classificação "1".

A hipótese a ser testada é:

Ho: As classificações dos métodos para cada instância são iguais. (os resultados dos métodos têm o mesmo efeito)

Ha: Pelo menos um dos métodos tende a apresentar valores maiores que pelo menos um dos outros métodos.

Teste estatístico:

$$A_2 = \sum_{i=1}^{b} \sum_{j=1}^{k} [R(X_{ij})]^2 \quad \text{, onde b = instâncias e k = métodos} \tag{3.1}$$

$$B_2 = \frac{1}{b} \sum_{j=1}^{k} R_j^2 \quad \text{, onde} \quad R_j = \sum_{i=1}^{b} R(X_{ij}) \tag{3.2}$$

$$T_2 = \frac{(b-1)[B_2 - bk(k+1)^2]/4}{A_2 - B_2} \tag{3.3}$$

Regra de decisão: Rejeita-se a *null* para o nível α se T_2 for maior que 1-α quartil da distribuição F com $K_1 = K\text{-}1$ *and* $K_2 = (b\text{-}1)(k\text{-}1)$.

Comparações múltiplas: Extensão do teste de Friedman usada para comparações individuais entre métodos, caso o teste de Friedman rejeite a hipótese *null.*

Os métodos *i* e *j* são diferentes se a seguinte inequação for satisfeita:

$$\left|R_j - R_i\right| > t_{1-\alpha/2} \left[\frac{2b(A_2 - B_2)}{(b-1)(k-1)} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.4}$$

3.3.1 **Meta-heurística Recozimento Simulado (*simulated annealing*)**

Recozimento simulado é um método de busca local probabilística utilizado para encontrar soluções em problemas de otimização. O termo não possui correspondente consagrado em português e, por isso permanecerá sendo referenciado como recozimento simulado. O nome do processo é devido ao fato de simular o aquecimento e, posterior, resfriamento de um conjunto de átomos em um sólido.

As características estruturais de um sólido dependem da razão e forma com que seu resfriamento ocorre após ter sido aquecido até o ponto de fusão. Quando um sólido atinge seu ponto de fusão, grande quantidade de energia está presente no material

prestes a derreter. Na medida em que a temperatura diminui, a energia presente também diminui. Caso o processo de resfriamento ocorra de forma lenta e gradual, cristais melhor estruturados podem se formar, beneficiando a composição do material. Caso o resfriamento aconteça de forma descontrolada, propriedades não desejadas podem aparecer, fragilizando a composição do material (Jones, 2003).

O processo começa com a criação de uma solução inicial, normalmente de forma aleatória, para gerar uma base para o processo de procura por melhores resultados. O procedimento principal consiste em um *loop* que gera aleatoriamente, a cada iteração, um vizinho para a solução atual. A definição da vizinhança, naturalmente, depende do tipo e da estrutura do problema de otimização em questão.

A etapa seguinte procede uma decodificação da solução atual no intuito de verificar sua qualidade em relação ao problema. Neste ponto é verificada a "energia" da solução atual na solução do problema.

O processo seguinte pode ser descrito como um modificador da solução atual. A solução atual é copiada como uma solução de "trabalho" e, então, modificada através de algum mecanismo de troca. O mecanismo através do qual se faz a modificação aleatória da solução de trabalho depende da estruturação e codificação de cada problema. Após ser modificada, a solução de "trabalho" é avaliada para verificar sua energia na solução do problema.

As duas soluções obtidas (atual e a de trabalho) são comparadas, sendo que a solução de trabalho, caso melhor que a atual, é copiada como sendo a solução atual e uma redução na temperatura acontece. Caso contrário, a solução de trabalho é avaliada através de um critério de aceitação baseado em conceitos de termodinâmica.

$$P(\delta E) = \exp(-\frac{\delta E}{T}) \tag{3.5}$$

A eq. 3.5 retorna a probabilidade de aceitação da solução analisada. T representa a temperatura do processo e δE a diferença entre as energias da solução de trabalho e a da solução atual. Altas temperaturas favorecem a aceitação de soluções, enquanto que diferenças de energia altas, desfavorecem. Quando em altas temperaturas, o

método aceita soluções piores para poder procurar melhor o espaço de solução disponível. Na medida em que a temperatura diminui, a busca permitida vai diminuindo até uma situação de equilíbrio.

A redução de temperatura ocorre depois de um determinado número de iterações. O resfriamento pode seguir vários critérios, incluindo funções lineares e não lineares.

$$T_{i+1} = \alpha T_i \tag{3.6}$$

A eq. (3.6) apresenta um caso para a redução de temperatura onde α é um número entre 0 e 1. O processo se repete até que a temperatura chegue a zero.

3.3.2 **Meta-heurística Busca Tabu (*tabu search*)**

Busca tabu - BS (do inglês *Tabu Search*) é uma técnica de busca local por soluções em problemas de otimização. Técnicas de busca local por soluções estão baseadas na idéia de vizinhança. Dado um problema de otimização *P*, seja *S* o espaço de solução para *P*, e seja *f* a função objetivo a ser minimizada ou maximizada (conforme o problema). Uma função *N* aloca para cada solução exeqüível $s \in S$ a vizinhança $N(s) \subseteq S$. Cada solução $s' \in N(s)$ é chamada de vizinha de s. Partindo de uma solução inicial gerada por outro método qualquer, uma técnica de busca local navega o espaço de solução de uma solução para outra da sua vizinhança.

Com a meta-heurística BS, o método explora um subconjunto *V* da vizinhança *N(s)* da solução atual. O elemento de *V* que apresente o menor (ou maior, conforme o caso) valor para a função objetivo passa a ser a nova solução atual, independe do fato de seu valor ser maior ou menor que o de *s*.

No intuito de prevenir que o algoritmo trabalhe em ciclos fechados, o método faz uso da *lista tabu*. A lista tabu se constitui de uma lista de soluções para as quais o algoritmo está proibido de voltar. A lista é constituída das últimas *k* soluções "atuais" sendo que *k* é um dos parâmetros do método. Funciona como uma fila que, quando completa, faz que a última solução seja descartada com a chegada de uma nova solução.

No entanto, caso uma solução apresente uma melhoria muito significativa, um mecanismo de sobreposição atua fazendo com que sua condição tabu caia e seja aceita como nova solução atual. A função aspiração *A* retorna, para cada valor da função objetivo, um valor que representa o quanto o algoritmo aspira alcançar a cada iteração. Então, dados a solução atual *s*, a função objetivo *f*, e a melhor solução da vizinhança *s'*, caso $f(s') < A(f(s))$, *s'* se torna a nova solução atual, mesmo que seja uma troca tabu.

O critério de parada para o procedimento pode estar relacionado com o alcançar de um número preestabelecido de iterações ou quando a função objetivo atinge um limite também preestabelecido.

Uma característica interessante da meta-heurística BS é que os procedimentos podem aceitar, inclusive, soluções não viáveis. Penalidades proporcionais às violações são aplicadas e somadas à função objetivo como uma forma de lidar com restrições eventuais (Glover; Laguna, 1997); (Hertz; Tailard; de Werra, 1997); (Blum; Roli, 2001); (Silver, 2002).
Os principais parâmetros de controle da BS são o tamanho da lista tabu (*k*), a função aspiração *A* e a cardinalidade do conjunto *V* de soluções vizinhas testadas a cada iteração.

Os trabalhos de Glover (1989) e Glover e Laguna (1997) apresentam considerações genéricas sobre o assunto e os trabalhos de Osman (1993); Taillard (1993), Gendreau; Hertz; Laporte (1994), Rochat; Taillard (1995) e Cordeau; Gendreau; Laporte (1997) apresentam diferentes implementações voltadas para problemas de roteirização de veículos.

Os trabalhos de Hertz (1991 e 1992) e Rossi-Doria *et al* (2003) apresentam considerações e comparações sobre a aplicação da metaheurística BS para problemas de "*timetabling*".

3.3.3 Meta-heurística Algoritmo Genético

De acordo com Obtiko (1999), algoritmos genéticos – GA (do inglês Genetic Agorithms) são parte da computação evolucionária (do inglês *Evolutionary*

Algorithms) inspirados na teoria da evolução de Darwin. Os problemas são resolvidos através de um processo evolutivo que resulta na melhor (mais adequada) solução (a sobrevivente).

O algoritmo começa com um conjunto de soluções (representadas por cromossomos) chamadas de população. As soluções geradas partindo de uma população são utilizadas para formar uma nova população de soluções. Isto é motivado pela expectativa de que a nova população será melhor do que a primeira.

Soluções para formar novas gerações de soluções são selecionadas de acordo com sua adequação e, quanto melhores, mais chances de reprodução e sobrevivência, terão.

O processo é repetido até que alguma condição de parada seja satisfeita como, por exemplo, o número de populações ou o aperfeiçoamento da melhor solução seja atingido.

3.3.4 Meta-heurística Colônia de Formigas

A denominação Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF será utilizada como termo geral para algoritmos de solução envolvendo a lógica baseada no comportamento das formigas e suas colônias. Na medida em que algoritmos específicos envolvendo colônias de formigas forem citados ou utilizados, os mesmos serão referenciados conforme cada caso. A seguir, a meta-heurística de otimização com a utilização de colônias de formigas é descrita.

Primeiramente, um breve histórico dos estudos envolvendo o assunto até a atualidade é apresentado. Depois, é descrita a lógica que norteia a meta-heurística, bem como são descritos os principais algoritmos conhecidos e respectivas características. Finalmente, é comentada a implementação dos algoritmos e estratégias para o caso da MCF de acordo com cada problema sugerido como candidato.

Os procedimentos ditos meta-heurísticos buscam soluções além dos limites encontrados em procedimentos heurísticos mais simples, seja através de combinação ou

superposição de vários procedimentos heurísticos e estratégias de solução, seja por analogia a comportamentos inspirados em fenômenos naturais. Via de regra, procedimentos meta-heurísticos apresentam resultados melhores para problemas *NP-Difíceis* que procedimentos heurísticos simples, muito embora não se possa garantir que isto aconteça sempre.

Os algoritmos das formigas (do inglês *Ant Algorithms*) ou os algoritmos de otimização com a utilização de colônias de formigas (do inglês *Ant Colony Optimization – ACO*) foram apresentados primeiramente pelo pesquisador Marco Dorigo em seu trabalho de doutoramento (Dorigo, 1992) e utilizam a metáfora natural das colônias de formigas e do fenômeno da "estigmergia" (do inglês *stigmergy*) para resolver problemas em um espaço físico de solução. Curiosamente, as inspirações para uma série de métodos e idéias no campo da otimização em pesquisa operacional são oriundas de comportamentos encontrados na natureza.

Os algoritmos de otimização com a utilização de colônias de formigas são particularmente interessantes pelo fato de poderem ser utilizados para resolução de problemas com características não apenas estáticas, mas também problemas com características e comportamento dinâmico.

A MCF foi aplicada primeiramente em instâncias do PCV apresentando resultados encorajadores para problemas considerados pequenos (Dorigo; Di caro, 1999); (Dorigo; Stützle, 1999). No decorrer de seu desenvolvimento como meta-heurística, muito embora seu desempenho não se compare aos procedimentos dedicados para o PCV, a MCF apresenta resultados bastante competitivos para uma série de problemas e instâncias complexas.

Na MCF, formigas (agentes de uma colônia) são distribuídas em um programa de computador. O código implementado simula a busca por alimentos e, muito embora as formigas sejam praticamente cegas, são capazes de navegar em ambientes complexos, encontrar comida a alguma distância do ponto de onde partiram (ninho) e retornar com sucesso para seus respectivos ninhos. O modo, através do qual as formigas fazem isso, é caracterizado pelo depósito de uma substância chamada feromônio enquanto navegam no ambiente do problema (grafo). O processo é chamado de estigmergia e modifica o ambiente para permitir a comunicação entre as

formigas e a colônia, assim como sua volta para o ninho (Dorigo; Maniezzo; Colorni, 1991).

O termo "estigmergia" foi introduzido pelo biologista francês Grassé na década de 1950 enquanto estudava o comportamento social dos insetos. A palavra vem de duas palavras gregas: "*stigma*" (marca significativa) e "*ergon*" (trabalho) dando o sentido de "incentivo ao trabalho baseado no produto do próprio trabalho".

O conceito representa um mecanismo de coordenação composto de tarefas simples, o qual permite que animais simples, do ponto de vista inteligente, atinjam comportamentos altamente sofisticados através de comunicação indireta quando atuando em sociedade. O conceito ganhou significativa aceitação nos campos da inteligência artificial e das ciências da computação recentemente.

Do ponto de vista logístico, as formigas tendem a utilizar as melhores rotas entre o ninho e pontos externos onde se encontra comida. Esse processo de otimização é função da estigmergia. Na medida em que mais e mais formigas utilizam uma rota particular para alcançar comida, maior se torna a concentração de feromônio naquela rota.

Quanto mais perto está localizada a fonte de comida, maior o número de idas e vindas completadas por cada formiga, portanto, maior concentração de feromônio. Quanto maior a concentração de feromônio em uma rota, maior a probabilidade de que esta rota seja escolhida pelas formigas em detrimento de outras possíveis rotas disponíveis. Este processo iterativo constrói rotas consideradas sub-ótimas, até ótimas, entre pontos de origem e destino.

Outro aspecto curioso e interessante é que os algoritmos de otimização com a utilização de colônias de formigas compartilham fundamentos e qualidades das formigas reais. As formigas são altruístas, cooperativas e trabalham de modo coletivo em busca de uma meta comum.

A **Tabela 3.1** apresenta as principais aplicações da MCF de acordo com o tipo de problema e em ordem cronológica de desenvolvimento de seus algoritmos.

Tabela 3.1 Aplicações da MCF (Dorigo; Stützle, 2004).

Aplicações da MCF listadas cronologicamente de acordo com o tipo de problema

Problema	Nome do Problema	Referências Principais
Roteirização	PCV	Dorigo, Maniezzo, & Colorni (1991., 1996)
		Dorigo (1992)
		Gambardella & Dorigo (1995)
		Dorigo & Gambardella (1997)
		Stutzle & Hoos (1997, 2000)
		Bullnheimer, Hartl, & Strauss (1999)
		Córdon, De Viana, Herrera, &Morena (2000)
	PRV	Bullnheimer, Hartl, & Strauss (1999)
		Gambardella, Taillard, & Agazzi (1999)
		Reimann, Stummer, & Doerner (2002)
	Ordenação Sequencial	Gambardella & Dorigo (1997, 2000)
Assignment	*Quadratic Assignment*	Maniezzo, Colorni, & Dorigo (1994)
		Stutzle (1997)
		Maniezzo & Colorni (1999)
		Maniezzo (1999)
		Stutzle & Hoos (2000)
	Coloração Gráfica	Costa & Hertz (1997)
	Generalized Assignment	Lourenço & Serra (1998, 2000)
	Frequency Assignment	Maniezz & Carbonaro (2000)
	Programação de Cursos	Socha, Knowles, & Sampels (2002)
	Universitários	Socha, Sampels, & Manfrim (2003)
Sequenciamento	*Job Shop*	Colorni, Dorigo, Maniezzo, Trubian (1994)
	Open Shop	Pfahinger (1996)
	Flow Shop	Stutzle (1998)
	Total Tardiness	Bauer, Bullnheimer, Hartl, & Strauss (2000)
	Total Weighted Tardiness	den Besten, Stutzle, & Dorigo (2000)
		Merkle, Middendorf, & Schmeck (2000, 2002)
		Gagné, Price, & Gravel (2002)
	Project Scheduling	Merkle, Middendorf, & Schmeck (2000, 2002)
	Group Shop	Blum (2002, 2003)
Partição	Mochila Múltipla	Leguizamón & Michalewicz (1999)
	Max Independent Set	Leguizamón & Michalewicz (2000)
	Redundancy Allocation	Liang & Smith (1999)
	Cobertura	Leguizamón & Michalewicz (2000)
		Hadji, Rahoual, Talbi, & Bachelet (2000)
	Weight Constrained Graph Tree Partition	Cordone & Maffioli (2001)
	Arc-Weighted l-cardinality Tree	Blum & Blesa (2003)
	Maximum Clique	Fenet & Solnon (2003)

continuação

Problema	Nome do Problema	Referências Principais
Outros	*Shortest Common Supersequence*	Michel & Middendorf (1998, 1999)
	Satisfação de Restrições	Solnon (2000, 2002)
	2D-HP Protein Folfing	Shmygelsa, Aguirre-Hernández, & Hoos (2002)
	Bin Packing	Levine & Ducatelle (2003)
Aprendizado de Máquinas	Regras de Classificação	Parpinelli, Lopes, & Freitas (2002)
	Redes Bayesianas	de Campos, Gámez & Puerta (2002)
	Sistemas *Fuzzy*	Casillas, Córdon, & Herrera (2000)
Roteamento em Redes	Roteamento em Redes *Connection-oriented*	Schoonderwoerd, Holland, Bruten, & Rothkrantz (1996) Schoonderwoerd, Holland, & Bruten (1997) White, Pagurek, & Oppacher (1998) Di Caro & Dorigo (1998) Bonabeau, Henavy, Guérin, Snyers, Kuntz, & Theraulaz (1998)
	Roteamento em Redes Desconectadas	Di Caro & Dorigo (1997, 1998) Subramanian, Druschel, & Chen (1997) Heusse, Snyers, Guérin, & Kuntz (1998) van der Put (1998)
	Roteamento em Redes Ópticas	Navarro Varela, & Sinclair (1999)

Assim como as formigas reais, os algoritmos de otimização com a utilização de colônias de formigas também fazem uso destas características para interagir com o ambiente em paralelo na busca de soluções para o problema e, através da estigmergia, auxiliam as demais formigas cooperando para a melhoria dos resultados globais (Dorigo; Gambardella, 1997).

A **Figura 3.1 r**epresenta um caso simples onde um par de formigas deve buscar comida do outro lado da barreira no instante T_0. Supondo que as duas formigas saiam do mesmo ponto, ambas terão iguais probabilidades de seguirem por qualquer um dos lados da barreira. Suponha que cada formiga tome um lado da barreira como rota. As formigas marcam suas rotas com o depósito de feromônio enquanto navegam.

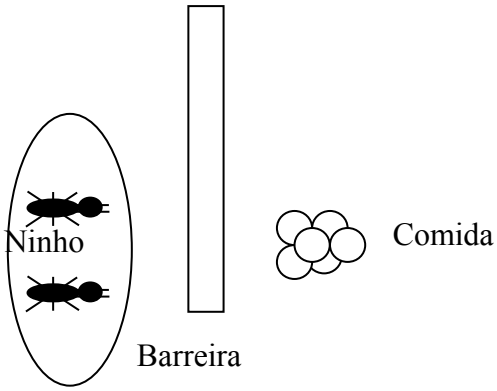


Fig. 3.1 Configuração Inicial (T_0) (Jones, 2003)

O caminho pela direita da barreira é significativamente mais curto que o da esquerda. Suponha que o caminho mais curto seja exatamente a metade do caminho mais longo. Então, quando a formiga que escolheu o caminho mais curto atingir seu objetivo, a comida, a formiga que escolheu o caminho mais longo ainda estará a meio caminho da comida.

Ao atingir a fonte de comida, cada formiga apanha uma unidade de comida e retorna ao ninho utilizando o mesmo caminho da ida. Em T_2, a formiga que foi pela direita (caminho mais curto) já retornou ao ninho com uma unidade de comida, enquanto a formiga que foi pela esquerda (caminho mais longo) finalmente chegou à fonte de comida.

Como cada formiga deposita feromônio enquanto navega procurando seu objetivo, a formiga que escolheu o caminho mais curto tem sua rota marcada duas vezes pelo feromônio depositado (uma vez na ida e outra na volta), enquanto que a rota escolhida pela formiga que foi pela esquerda da barreira tem seu caminho marcado apenas uma vez (apenas na ida). Portanto, a rota mais curta possui duas vezes mais feromônio que a rota mais longa.

Em T_4, a formiga que escolheu o caminho mais longo terá retornado ao ninho com uma unidade de comida e terá completado sua primeira viajem de ida e volta. Enquanto isso, a formiga que escolheu o caminho mais curto terá completado um segundo ciclo completo de ida e volta, também ilustrado na **Figura 3.2**

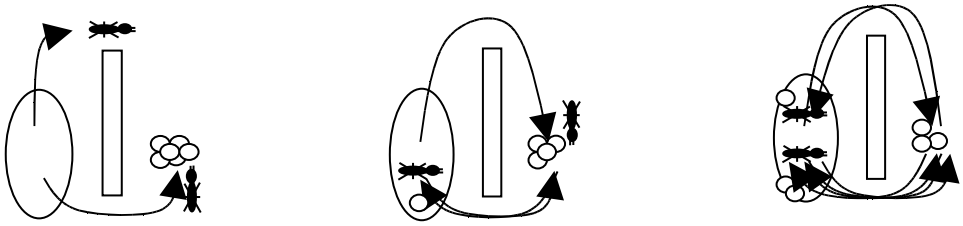


Figura 3.2 Configurações de *T* (Jones, 2003)

A partir do instante T_4, a concentração de feromônio na rota da direita (mais curta) será o dobro da concentração de feromônio na rota da esquerda (mais longa). Então, as formigas que partirem do ninho, baseadas na concentração de feromônio observada, tenderão a escolher a rota mais curta (rota da direita). Esta é o conceito principal dos algoritmos envolvendo a lógica das colônias de formigas para problemas de otimização (Jones, 2003).

Cada formiga constrói uma solução movendo-se através de uma seqüência finita de estados sucessivos. Os movimentos são selecionados a partir da regra de transição de estados que se baseia na memória da formiga e na quantidade de feromônio acumulada nas trilhas. O que se observa é que pontos que não foram muito visitados no início serão menos ainda com o passar do tempo. Para evitar uma rápida convergência de todas as formigas em direção a mesma região do espaço de busca, um componente probabilístico e um mecanismo de evaporação podem ser incorporados à regra que define a transição de estados. O nível de estocasticidade e a quantidade de feromônio acumulada determinarão o balanceamento entre a exploração de novos caminhos no espaço de busca e o aprofundamento dos melhores caminhos encontrados (Lorenzoni; Ahonen; Alvarenga, 2001).

Enquanto constrói uma solução, cada formiga coleta informações sobre as características do problema e do seu próprio desempenho, utilizando essas informações para modificar a representação do problema, o que poderá ser percebido pela colônia (Dorgo; Stützle, 1999) . Se expressa uma solução como um caminho, com custo mínimo, que respeite as restrições impostas pelo problema. O estado

interno da formiga armazena informações sobre o seu passado, tais como a seqüência de estados que gera a solução, a contribuição de cada movimento executado e o valor da solução gerada, formando assim a sua memória (Lorenzoni; Ahonen; Alvarenga, 2001). O trabalho de Gambardella (2004) detalha como a MCF é comparada com busca heurística em grafos, simulação *Monte Carlo*, redes neurais e computação evolucionária (do inglês *Evolutionary Computation* – EC).

As formigas implementam uma heurística de construção tomando decisões probabilísticas em função dos traços encontrados de feromônio e possíveis informações disponíveis nos dados de entrada do problema. Enquanto constrói sua solução, cada formiga coleta informações sobre as características do problema e do seu próprio desempenho, utilizando essas informações para modificar a representação do problema, o que poderá ser percebido por toda a colônia.

Cada formiga é um agente da MCF e faz parte de uma população maior (colônia) usada para resolver um dado problema. Cada agente se movimenta conforme uma série simples de regras que define como ele escolhe sua rota através do grafo. A formiga mantém uma lista de nós visitados (lista tabu) necessária para que uma mesma formiga não visite um nó mais de uma vez em sua rota (Jones, 2003). Cada formiga carrega também uma lista de nós visitados na ordem em que foram visitados em seu roteiro para identificar o peso (tamanho ou comprimento) total do roteiro estabelecido.

Dependendo da estratégia de implementação do algoritmo, diferentemente das formigas naturais, as formigas do algoritmo podem depositar o feromônio após terminarem seus roteiros. As formigas naturais depositam o feromônio na medida em que navegam em busca de alimentos.

De acordo com Dorigo e Stützle (2004), são características e propriedades das formigas:

- Exploram uma rede em busca de soluções possíveis de custo mínimo;
- Possuem memória para guardar informação sobre o caminho percorrido até então. A memória pode ser usada para:
    - A construção dos roteiros;

  - Avaliação dos roteiros encontrados; e
  - Percorrer o roteiro de trás para frente no intuito de depositar feromônio.
- Podem ser marcadas por um estado (condição) inicial e uma ou mais condições de término. Geralmente, a condição inicial é expressa pelo comprimento de uma seqüência ou por uma seqüência vazia;
- Quando no estado *Xr = (Xr-1 , i)*, caso nenhuma condição de término seja satisfeita, ela se move para um nó *j* da sua vizinhança, ou seja, para o estado *(Xr , j)*. Geralmente, movimentos para os estados que são viáveis são favorecidos por informações heurísticas τ disponíveis ou através do acesso à memória da formiga;
- Um movimento é selecionado através da aplicação de uma regra de decisão probabilística. Tal regra é função de:
  - Traços de feromônio verificados nos arcos e informações heurísticas disponíveis;
  - Da informação guardada na memória de cada formiga; e
  - Restrições impostas pelo problema.
- O procedimento de construção de um roteiro de uma formiga *k* pára quando pelo menos uma condição de término é satisfeita;
- Quando um novo componente *Cj* é adicionado à solução, este pode atualizar o traço de feromônio associado ao arco formado. Este caso se chama "Atualização de Feromônio Passo a Passo"; e
- Uma vez construída uma solução, o roteiro pode ser percorrido de trás para frente e atualizados os traços de feromônio dos arcos componentes. Este caso se chama "Atualização Posterior de Feromônio".

O movimento das formigas está baseado em uma regra probabilística relativamente simples. Enquanto uma formiga não completou seu roteiro (visitando exatamente uma vez cada nó do grafo), utiliza a regra de decisão para mudança de estados (regra dos movimentos das formigas). A probabilidade da formiga *k* ir de *i* para *j* no tempo *t* será:

$$p_{ij}^{k}(t) = \frac{\left[\tau_{ij}(t)\right]^{\alpha} * \left[\eta_{ij}\right]^{\beta}}{\sum_{l \in N_i^k} \left[\tau_{il}(t)\right]^{\alpha} * \left[\eta_{il}\right]^{\beta}} \quad se\ j\ pertence\ a\ N_i^k \tag{3.7}$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \tag{3.8}$$

onde η_{ij} está relacionado com o histórico heurístico do problema e, na forma mais simples, é representado pelo inverso da distância entre os pontos. α e β são parâmetros que determinam a infuência dos traços de feromônio e da componente heurística de construção do roteiro. Se α = 0, a seleção será proporcional ao componente heurístico e provavelmente os nós mais próximos serão escolhidos. Se β = 0, somente os traços de feromônio serão levados em consideração e é esperado que haja uma rápida convergência para os primeiros roteiros completados pelas formigas (estagnação da busca por melhores roteiros).

Uma vez que cada formiga somente percorre nós ainda não visitados em um determinado ciclo de acordo com sua *lista tabu*, então as probabilidades de mudança de estado são calculadas apenas para os nós ainda não visitados naquele ciclo. Um roteiro vai existir quando uma formiga tiver visitado cada um dos nós do grafo uma única vez. Uma vez completado um ciclo, o seu comprimento pode ser observado através da soma de todas as distâncias dos arcos percorridos no roteiro armazenado na memória de cada formiga.

A cada transição é associada uma quantidade de feromônio, que representa o acúmulo da contribuição de todas as formigas do sistema desde o início do processo de busca. As decisões sobre quando as formigas devem espalhar o feromônio no ambiente e o quanto de feromônio deve ser depositado depende das características do problema e do projeto de implementação. As formigas podem espalhar feromônio durante a construção da solução, assim cada vez que um novo estado é selecionado, o feromônio associado à transição pode ser atualizado (atualização local) e/ou quando todas as formigas tiverem gerado uma solução completa. Daí, as transições

associadas aos estados percorridos pela formiga que gerou a melhor solução, também podem ter os seus níveis de feromônio atualizados (atualização global).

Em geral, a quantidade de feromônio depositada é proporcional a qualidade da solução que foi construída (ou que está em construção). Desta maneira, se uma transição contribuiu para gerar uma boa solução, a quantidade de feromônio associada à transição, será incrementada proporcionalmente a sua contribuição. Segue a descrição da regra de atualização dos níveis de feromônio seja após a cada mudança de estados (regra dos movimentos das formigas), seja após o término de uma interação completa (com ou sem a aplicação de qualquer método de busca local):

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) * \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau_{ij}^{k}(t) \qquad (3.9)$$

onde $0 < \rho < 1$ representa a razão de evaporação de feromônio e m o número de formigas. O parâmetro ρ é usado para evitar o acúmulo exagerado de feromônio e permitir que o algoritmo "esqueça" decisões ruins tomadas anteriormente. Os arcos ignorados terão seus níveis de feromônio cada vez mais baixos (decréscimo exponencial com o passar das iterações). A quantidade de feromônio que a formiga k deposita nos arcos é definido por:

$$\Delta\tau_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} 1/L^{k}(t) & caso\ ij\ tenha\ sido\ usado \\ 0 & caso\ contrario \end{cases} \qquad (3.10)$$

onde $L_k(t)$ é o comprimento do arco da $K_{ézima}$ formiga. Portanto, quanto menor o arco, mais feromônio será depositado. Após um roteiro estar completo com os custos dos arcos computadas e com a atualização dos níveis de feromônio realizada, o algoritmo pode ser reiniciado.

A *lista tabu* é limpa e a distância do roteiro, zerada. As formigas vão navegar novamente através do grafo utilizando-se da regra de transição de estados como guia para o próximo nó a ser investigado. Este processo pode ser repetido um número predeterminado de vezes ou até que nenhuma mudança ocorra nos roteiros por um determinado número de iterações.

O melhor roteiro é considerado solução do problema. A **Figura 3.3** apresenta o procedimento em pseudo-código.

```
1 procedimento MCF ()
2       enquanto (critério de parada não satisfeito)
3               programa atividades
4                       geração e ação das formigas();
5                       evaporação de feromônio();
6                       busca local();          opcional
7               termina programa atividades
8       termina enquanto
9 termina procedimento

1 procedimento geração e ação das formigas()
2       enquanto (recursos disponíveis)
3               programa a criação de nova formiga();
4               ativa nova formiga();
5       termina enquanto
6 termina procedimento

1 procedimento ativa nova formiga()
2        inicializa formiga();
3       M= atualiza memória formiga();
4       enquanto (estado atual ≠ estado desejado)
5               A = ler lista local da formiga();
6               P = compute probabilidades de transição (A;M; );
7               próximo estado = aplica regra de decisão(P; );
8               move para próximo estado (próximo estado);
9               se (atualização local de feromônio)
9                       deposita feromônio no arco visitado();
10                      atualiza lista local da formiga();
11              termina se
11              M= atualiza memória interna();
12      termina enquanto
13      se (atualização global de feromônio)
13              para cada arco visitado do
14                      deposita feromônio no arco visitado();
15                      atualiza lista local da formiga();
16              termina para cada
17      termina se
17      morre();
18 termina procedimento
```

Figura 3.3 – Pseudocódigo da MCF (Dorigo; Di Caro, 1999)

Dorigo e Stützle (2004) comentam detalhadamente cada um dos algoritmos desenvolvidos a partir das idéias iniciais envolvendo colônias de formigas para solução de problemas combinatoriais complexos.

O livro, além do histórico da MCF, apresenta uma visão geral dos vários aspectos da meta-heurística, indo da detalhada descrição da lógica que fundamenta a MCF e da descrição dos algoritmos disponíveis até a definição de como os algoritmos podem ser aplicados a uma variada gama de problemas de otimização.

A **Tabela 3.2** apresenta algoritmos MCF de acordo com a ordem cronológica de desenvolvimento.

Tabela 3.2 MCF em ordem de desenvolvimento (Dorigo; Stützle, 2004).

Algoritmos MCF	PCV	Principais referências
Ant System (AS)	Sim	Dorigo (1992); Dorigo, Maniezzo, & Colorni (1991a,b, 1996)
Elitist AS	Sim	Dorigo (1992); Dorigo, Maniezzo, & Colorni (1991a,b, 1996)
Ant-Q	Sim	Gambardella & Dorigo (1995); Dorigo & Gambardella (1996)
Ant Colony System	Sim	Dorigo & Gambardella (1997a,b)
Max-Min AS	Sim	Stutzle & Hoos (1996, 2000); Stutzle (1999)
Rank-based AS	Sim	Bullnheimer, Hartl, & Strauss (1997,1999c)
ANTS	Não	Maniezzo (1999)
Hyper-cube AS	Não	Blum, Roli, & Dorigo (2001); Blum & Dorigo (2004)

A coluna PCV indica se a MCF já foi aplicada ao Problema do Caixeiro Viajante

Conforme visto acima, o AS foi o primeiro algoritmo MCF aplicado ao PCV e, embora tenha apresentado resultados encorajadores no princípio, mostrou-se, com o passar dos anos, inferior aos algoritmos no estado da arte para o PCV. O AS serviu como inspiração para os melhoramentos e extensões que levou ao desenvolvimento dos algoritmos MCF de maior sucesso. Os sucessores diretos do AS incluem *o Elitist AS, Rank-based AS* e o *Max-Min AS*. As principais diferenças entre o AS e suas extensões são as formas como os índices de feromônio são atualizados, assim como detalhes adicionais no gerenciamento das trilhas de feromônio.

A estratégia "elitista" consiste em dar ao melhor roteiro até então um adicional de feromônio. Esse melhor roteiro é chamado de T_{gb} (*Global Best Tour*) e toda vez que os traços de feromônio são atualizados, os nós pertencentes ao T_{gb} recebem um montante extra de feromônio. Para esse caso a equação da atualização de feromônio passa a ser a seguinte:

$$\Delta \tau_{ij}^{gb}(t) = \begin{cases} e / L^{gb}(t) & caso\ o\ arco\ ij\ pertença\ ao\ T_{gb} \\ 0 & caso\ contrario \end{cases} \qquad (3.11)$$

onde $L_{gb}(t)$ é o comprimento do roteiro e "*e*" um número inteiro positivo.

Uma versão utilizando-se de uma classificação para a escolha das formigas a serem favorecidas pela estratégia elitista também pode ser implementada (*Rank-based* AS).

Nesse caso, formigas são separadas e ordenadas de acordo com o comprimento dos roteiros que constroem. Daí, somente (*w - 1*) formigas e a formiga com o melhor resultado até então farão a atualização de feromônio. A $r_{ézima}$ formiga selecionada contribuirá para a atualização de feromônio com peso dado *por max(0, w – r)* enquanto que a formiga T_{gb} (*Global Best Tour*) reforçará os traços de feromônio com peso *w*. Veja como fica a equação da atualização de feromônio:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)*\tau_{ij}(t) + \sum_{r=1}^{w-1}(w-r)\Delta\tau_{ij}^{r}(t) + w\Delta\tau_{ij}^{gb}(t) \qquad (3.12)$$

onde $\Delta\tau_{ij}^{r}(t) = 1/L^{r}(t)$ e $\Delta\tau_{ij}^{gb}(t) = 1/L^{gb}$.

O último dos sucessores do AS a ser citado aqui está relacionado com limites para os níveis de feromônio encontrados nos arcos e nós. O modelo *Max-Min* AS introduz limites superiores e inferiores para os traços de feromônio e uma forma diferente de inicializá-los. No *Max-Min* AS os traços de feromônio na primeira iteração são ajustados para o limite superior, o que favorece fortemente um mecanismo de busca (exploração) ao invés de um mecanismo de aprofundamento. Os traços de feromônio estão limitados ao intervalo $[\tau_{\max}, \tau_{\min}]$, onde $\tau_{\min} \leq \tau_{ij} \leq \tau_{\max}, \forall \tau_{ij}$. Assim, somente o melhor roteiro recebe feromônio (*global best* ou *iteration best*) e mecanismos de busca local são utilizados para melhoria de desempenho.

Outros algoritmos MCF que modificam mais substancialmente as características do AS também são indicados pela literatura. No *Ant Colony System* – ACS a estratégia de aprofundamento é privilegiada em relação à de exploração. Dois mecanismos são sugeridos. O primeiro envolve uma forte estratégia elitista similar à vista acima para atualização dos traços de feromônio. O segundo faz com que as formigas escolham os próximos nós através da regra proporcional pseudo-aleatória que consiste em utilizar uma probabilidade *q0* para a mudança para o nó *j*, o qual possui o valor máximo do produto entre o traço de feromônio e a informação heurística.

Portanto, onde $j = \arg\max_{j \in N_i^k} \{\tau_{ij}(t) * \eta_{ij}^{\beta}\}$. Enquanto com probabilidade *(1- q0)* as formigas operam um mecanismo de busca enviesada onde a probabilidade $p_{ij}^k(t)$ de mover-se para o nó *j*, segue a mesma formulação vista anteriormente em (3.7). Nota-se que se o parâmetro *q*0 for próximo a 1, o aprofundamento é favorecido, enquanto que se *q*0 for próximo a 0, a regra de mudança de estado passa a ser a mesma explicada para o AS.

Somente o melhor desempenho recebe a atualização de feromônio (mecanismo elitista), lembrando que a atualização pode ocorrer a cada iteração.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) * \tau_{ij}(t) + \rho \Delta \tau_{ij}^{Best}(t) \qquad (3.13)$$

onde $\Delta \tau_{ij}^{Best} = 1/C^{Best}$.

O ACS difere de outros modelos anteriores por promover a evaporação do feromônio enquanto são construídos os roteiros, ou seja, cada formiga "engole" parte do feromônio dos arcos e nós onde passa. Dessa forma, podem-se balancear as características de exploração de novos roteiros com as estratégias elitistas descritas acima.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\xi) * \tau_{ij}(t) + \xi \tau_0 \qquad (3.14)$$

onde ξ , $0 < \xi < 1$ e τ_0 são parâmetros de ajuste. Experimentalmente, um bom valor para ξ é 0.1, enquanto que para τ_0, $1/nC^{nn}$. Onde, para o PCV, n é o número de cidades e C^{nn} o comprimento do roteiro obtido com a heurística do vizinho mais próximo (Dorigo; Stützle, 2004).

Outras duas considerações a respeito do ACS é que rotinas de busca local podem ser aplicadas a cada iteração e uma lista de nós candidatos pode ser empregada. Portanto, terminada uma iteração e eleito seu melhor roteiro, um mecanismo de busca local (*2-opt*, *3-opt*, por exemplo) pode ser aplicado sobre o roteiro. A lista de nós candidatos é composta pelos nós mais próximos de cada nó componente do grafo. Alguns autores sugerem que não mais de 20 candidatos componham a lista em virtude da complexidade envolvida em instâncias maiores.

Os testes demonstram que o número de nós *nn* da lista de nós candidatos deve ser ajustado de acordo com cada problema e dimensão da complexidade envolvida nas

instâncias. A utilização da lista de nós candidatos permite que as formigas busquem os nós subseqüentes de forma muito mais rápida. Caso todos os nós da lista de nós candidatos tenham sido visitados, a formiga escolhe um outro nó dentre os nós restantes (Dorigo; Stützle, 2004).

3.3.4.1 ACSavings

Um procedimento alternativo foi desenvolvido pelo autor desta tese durante os testes e implementações da MCF para soluções de problemas de roteamento de veículos (problema do caixeiro viajante – PCV e o problema de roteirização de veículos - PRV).

A idéia da implementação do ACSavings está baseada no que está exposto a seguir. No caso do PRV e suas restrições adicionais, a MCF necessita de pequenas adaptações para encontrar soluções. O algoritmo AS_{rank} foi adaptado por Bullnheimer et al (1997, 1999) para o PRV com restrições de capacidade (AS_{rank}-*CVRP*). O AS_{rank}-*CVRP* faz uso das informações de distância η_{ij} combinadas com a lista de economias $S_{i,j}$ (Clarke & Wright, 1964) para cada par de nós. O modelo foi posteriormente aprimorado por Reimann *et al.* (2002), passando a fazer uso da lista de economias $S_{i,j}$ diretamente como informação heurística para a regra de decisão de movimentos ao invés de combiná-las com as distâncias.

O processo de construção de roteiros inicia com a elaboração de uma lista decrescente do quão atrativo cada par de nós é $\left(\xi_{ij}\right)$. A lista consiste dos seguintes valores:

$$\xi_{ij=}\left[s(i,j)\right]^{\beta}\left[\tau_{ij}\right]^{\alpha} \tag{3.15}$$

onde τ_{ij} representa o nível de feromônio no arco *ij* e *S(i,j)* a economia verificada ao acrescentar-se o arco *ij* ao roteiro em questão. Portanto, a probabilidade para a regra de transição de estados fica do seguinte modo:

$$p_{ij} = \begin{cases} \dfrac{\xi_{ij}}{\sum_{(h,i)\in\Omega_k}\xi_{hl}} & caso\ \xi_{ij} \in \Omega_k \\ 0 & caso\ contrário \end{cases} \tag{3.16}$$

onde Ω_k representa o conjunto dos k vizinhos viáveis permitindo as maiores economias. Um mecanismo de busca local *2-opt* é aplicado para cada roteiro construído por cada formiga antes que a atualização dos níveis de feromônio aconteça. Após a construção dos roteiros por todas as formigas, os níveis de feromônio são atualizados deixando dois tipos de atualização de acordo com a seguinte fórmula:

$$\tau_{ij}^{new} = \rho \tau_{ij}^{old} + \sum_{\mu=1}^{\sigma-1} \Delta \tau_{ij}^{\mu} + \sigma \Delta \tau_{ij}^{*} \qquad (3.17)$$

onde $0 \leq \rho \leq 1$ representa a persistência da trilha de feromônio e σ o número de formigas elitistas. A elitista deposita $\Delta \tau_{ij}^{*} = 1/L^{*}$, sendo L^{*} o valor da melhor solução até então. As σ-*1* elitistas depositam feromônio de acordo com sua posição na lista μ e da qualidade da solução L^{u} encontrada, de tal forma que a $\mu_{ézima}$ formiga deposita $\Delta \tau_{ij}^{\mu} = (\sigma - \mu)/L^{\mu}$. Os demais arcos não recebem feromônio e sofrem o processo de evaporação na razão (*1*-ρ) (Reimann, 2002).

O *ACSavings* (de ACS+*Savings*) nada mais é que um procedimento ACS que faz uso das informações obtidas de modo similar ao método das "economias" (Clarke; Wright, 1964) como informação heurística. A idéia é a de fazer uso, o quanto antes, das informações que só estariam disponíveis depois de algumas iterações em instâncias do PCV e do PRV. Uma matriz com as "economias" é gerada no início do processo e, a partir daí, o *ACSavings* faz uso dessas informações na escolha dos nós. Os resultados obtidos em um trabalho do autor (não publicado) mostraram-se encorajadores. O trabalho de Bonasser (2005) explora o *ACSavings* como mecanismo de diversificação na busca por soluções para o PRV com múltiplas restrições.

3.4 Resumo e conclusões do capítulo

O capítulo inicia-se com uma série de definições de métodos aproximados conhecidos como procedimentos heurísticos e procedimentos heurísticos propensos a serem utilizados nesta tese e os métodos de busca local. O capítulo segue com as

definições e descrições das meta-heurísticas e das características de suas representantes no cenário de procura por soluções em problemas como o PPMP. Os mecanismos de intensificação, diversificação e a capacidade de fazer uso das informações do próprio problema na busca por soluções são discutidos e são apresentadas as formas sujeridas para as comparações de desempenho. São apresentadas as principais características das meta-heurísticas recozimento simulado, busca tabu e algoritimo genético.

A meta-heurística Colônia de Formigas – MCF é apresentada por último e em maior detalhe. O capítulo termina com uma discussão a respeito das expectativas da aplicabilidade de procedimentos meta-heurísticos para o PPMP e, em especial, da MCF.

O desenrolar dos trabalhos nestes três primeiros capítulos contextualizam o PPMP em um cenário de problemas complexos que não podem ser facilmente resolvidos por métodos diretos e exatos. O problema é não linear e apresenta complexidade exponencial na medida em que o número de entrada de dados aumenta. Os problemas semelhantes são todos *NP-Completos*.

O desenrolar dos estudos sobre os procedimentos meta-heurísticos mostrou que o PPMP é candidato para testes com procedimentos que possam se valer de mecanismos de diversificação para escapar de ótimos locais em sua solução, mas que mantenham boa capacidade de intensificação nos procedimentos de busca local, paralelamente.

A solução do PPMP necessita de um procedimento que possa ser adaptado à estrutura do problema e, preferencialmente possa utilizar todo tipo de informação que os dados de entrada do problema apresentar.

A meta-heurística baseada em colônias de formigas é particularmente interessante pelo fato de poder ser utilizada para resolução de problemas com características não apenas estáticas, mas também problemas com características e comportamento dinâmico, tais como os casos apresentados do PPMP.

A MCF apresenta boas possibilidades para solucionar o PPMP, seja pelo caráter *NP-Difícil* das instâncias, seja pelos bons resultados alcançados em aplicações semelhantes (como no caso dos problemas de alocação de cursos em universidades).

A MCF pode ser significativamente ajudada pelas informações levantadas dos dados de entrada do problema, tais como o desejo de se recolher uma aeronave neste ou naquele período, uso das oficinas, restrições variadas e grande número de nós. Verifica-se que a MCF pode ser aplicada a uma grande variedade de problemas combinatoriais complexos e, dentre eles, os que apresentam características semelhantes às do PPMP. É desejável, no entanto, que se mantenham as capacidades de mecanismos de intensificação nos procedimentos, visto que se pretende obter soluções úteis também do ponto de vista prático.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 Introdução

Os objetivos deste capítulo são os de descrever os aspectos gerais da metodologia utilizada nos estudos, assim como os métodos e técnicas empregados na obtenção dos resultados. A estratégia empregada na busca pelos resultados contendo a implementação das meta-heurísticas e dos mecanismos de busca local, as descrições das instâncias utilizadas nos testes, as aplicações dos métodos propostos, os resultados alcançados e as reflexões sobre os mesmos são descritos de modo a garantir repetibilidade aos processos desenvolvidos nesta tese. Inicia-se com a descrição detalhada da estruturação dos procedimentos e das adaptações necessárias à MCF para a solução do PPMP. Um conjunto de procedimentos de testes computacionais é descrito e empregado para a verificação do desempenho dos métodos de solução desenvolvidos e propostos para o PPMP. O desempenho de cada método é testado com a utilização de procedimentos não paramétricos para verificar se existe diferença entre eles. Uma vez verificadas diferenças, cada método é comparado com os demais no sentido de classificá-los. A continuação do capítulo aborda testes específicos ligados às configurações possíveis para os parâmetros da MCF aplicados ao PPMP. Novos testes não paramétricos para a comparação entre os parâmetros indicam que existe diferença entre diferentes configurações de parâmetros para a MCF, mas que só distingue satisfatoriamente as configurações em grupos. O capítulo termina sugerindo o procedimento *ACSmntBL* como o mais interessante para ser testado em um caso prático do cenário da FAB.

4.2 Estruturação dos métodos para a solução do PPMP

Visto que o PPMP se trata de um problema de programação das atividades de manutenção, seria conveniente tentar-se primeiro, manualmente, encontrar uma solução viável para um problema pequeno. Pelo que foi estudado, tal procedimento

só serviria para satisfazer a curiosidade do pesquisador e confirmar o que já vem sendo feito nas organizações da FAB. No entanto, é conveniente demonstrar as dificuldades crescentes encontradas na resolução do problema com esses procedimentos e reconhecer uma série características úteis para a implementação dos outros procedimentos. O "método FAB" é, em última analise, heurístico e pode ser representado computacionalmente de forma muito similar aos procedimentos do tipo "vizinho mais próximo" utilizados como métodos de construção de soluções para o PCV e o PRV (Cunha; Bonasser; Abrahão, 2002).

Outra forma relativamente simples de ser implementada para a solução do PPMP, mas desaconselhável (se considerada isoladamente) por ser muito custosa do ponto de vista computacional, são os procedimentos de enumeração exaustiva de procura por soluções. Muito embora não seja considerada adequada para ser a única referência em termos de desempenho computacional e busca pela otimalidade em problemas complexos (Rardin; Uszoy, 2001), um procedimento desse tipo é comentado para complementar os estudos e confirmar as dificuldades na busca por soluções em instâncias de tamanho significativo.

Os demais procedimentos estão estruturados com a utilização de algoritmos MCF combinados ou não com procedimentos de busca local. Os próximos itens deste capítulo descrevem especificamente a estruturação dos métodos empregados na busca por soluções para o PPMP.

4.2.1 Método Enumeração Exaustiva

O procedimento de enumerar exaustivamente todas as soluções possíveis é aplicado através de um gerador de soluções que testa o comportamento do problema para cada solução gerada. O método é exaustivo e são testadas 2^n soluções para um problema que contenha n nós. Sempre que uma solução melhor que as anteriores for verificada, esta fica guardada na memória do método até que uma nova solução superior apareça.

4.2.2 Método FAB

A estratégia representa o modo como normalmente o problema é resolvido nas organizações responsáveis pelo gerenciamento do ciclo de vida do sistema de armas em questão. Para cada aeronave, os recolhimentos são programados de acordo com a proximidade do completarem-se as horas de vôo até a próxima atividade de manutenção preventiva. O procedimento é heurístico e apresenta características dos procedimentos que "constroem" soluções.

Considera-se como o "vizinho mais próximo", a aeronave que está mais próxima de completar suas horas de vôo para o recolhimento. Na medida em que os recolhimentos vão sendo programados, as penalidades vão sendo computadas e atualizadas em uma matriz de penalidades. O procedimento apresenta semelhanças com heurísticas de construção e as regras *FIFO* (do inglês *first in, first out*) do ambiente de gerenciamento da produção, pois a primeira aeronave que completa suas horas é a primeira a ser recolhida.

O grupo de heurísticas de construção de soluções se baseia em algoritmos do tipo "vizinho mais próximo" ou algoritmos de inserção. Nos métodos de construção de soluções, nós (recolhimentos) vão sendo incluídos (inseridos) na solução gradualmente, de modo seqüencial, segundo alguma regra de construção, sem que a solução parcial obtida seja melhorada. Em outras palavras, uma solução é gerada iterativamente, sem modificação posterior das seqüências parciais de recolhimentos, definidas ao longo do processamento do algoritmo (Cunha *et al*, 2002). Especificamente, o método de construção do "vizinho mais próximo" parte de um nó inicial e segue anexando, de acordo com as menores distâncias verificadas, os nós que passam a integrar o roteiro-solução.

Caso uma solução viável não seja encontrada, o processo se repete com movimentos de troca até que uma solução viável seja encontrada. O processo é manual e pode levar (dependendo das características de cada instância) semanas até que uma solução viável possa ser encontrada.

O procedimento apresenta uma diferença significativa quando comparada sua aplicação ao PCV e PRV. A construção da solução no PPMP não busca por um ciclo Hamiltoniano, como nos casos do PCV e PRV, mas sim, por uma programação

(roteiro de caminho mais curto) que minimize a função-objetivo. No caso do PCV e do PRV, busca-se passar por todos os nós do problema exatamente uma vez e retornar ao nó de origem. No caso do PPMP, a solução não "passa" obrigatoriamente por todos os nós do problema, mas escolhe o caminho menos custoso para programar as atividades de manutenção para uma frota de aeronaves. Outra diferença reside no fato de que o nó de origem para o PCV pode ser qualquer um dos nós do problema, enquanto que para o PPMP esta característica não está presente, pois os nós do PPMP são representações dos possíveis recolhimentos (x_{ij}).

A **Tabela 4.1** é baseada na **Tabela 2.3** e representa o que seria a primeira escolha de um recolhimento para a atividade de manutenção preventiva com os procedimentos descritos acima. A ***aeronave 3,*** durante o 1º período, teoricamente voaria as 100 horas previstas como todas as outras aeronaves, mas conta com apenas 90 horas de vôo disponíveis. Então, partindo de um ***nó inicial*** imaginário, a primeira aeronave que completar suas horas é escolhida (o nó $x_{23} = 1$, composto pelo ***período 2*** e pela ***aeronave 3***). Para este exemplo, as ações de manutenção duram três períodos (o período do recolhimento conta como um período de manutenção) e o intervalo entre as atividades de manutenção é de 500 horas de vôo para todas as aeronaves da frota.

Tabela 4.1 Método FAB: 1º estágio intermediário.

nó inicial

período 0	***aeronave 1*** *200 horas disp.*	***aeronave 2*** *500 horas disp.*	***aeronave 3*** ***90 horas disp.***	***aeronave 4*** *280 horas disp.*
período 1	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Vôo 90 horas	Vôo 100 horas
período 2	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	***Recolhimento***	Vôo 100 horas
período 3	Indisponível	Vôo 100 horas	***Manutenção***	Vôo 80 horas
período 4	Indisponível	Vôo 100 horas	***Manutenção***	Indisponível
período 5	Indisponível	Vôo 100 horas	Disponível	Indisponível

nó final

O procedimento continua com a atualização da atividade de manutenção alocada para o nó x_{23} enquanto durar a indisponibilidade da aeronave (enquanto estiver em manutenção). Quando a atividade de manutenção é encerrada, a aeronave volta à

condição de disponível e suas horas de vôo são restituídas. A **Tabela 4.1** apresenta este 1º estágio intermediário.

A próxima aeronave a ser escolhida (a que, agora, primeiramente completar suas horas de vôo) é a ***aeronave 1*** (nó composto pela ***aeronave 1*** no ***período 3***). O procedimento termina quando todos os recolhimentos tenham sido programados atingindo o ***nó final***. A **Tabela 4.2** apresenta a solução encontrada para o exemplo com a utilização do método FAB.

Tabela 4.2 Método FAB: solução encontrada.

nó inicial

período 0	***aeronave 1*** ***200 horas disp.***	***aeronave 2*** ***500 horas disp.***	***aeronave 3*** ***90 horas disp.***	***aeronave 4*** ***280 horas disp.***
período 1	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Vôo 90 horas	Vôo 100 horas
período 2	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	***Recolhimento***	Vôo 100 horas
período 3	**Recolhimento**	Vôo 100 horas	***Manutenção***	Vôo 80 horas
período 4	**Manutenção**	Vôo 100 horas	***Manutenção***	***Recolhimento***
período 5	**Manutenção**	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	***Manutenção***

nó final

O exemplo acima não leva em consideração as restrições descritas anteriormente para o PPMP. Dada a solução acima, percebe-se que no ***período 4*** apenas uma aeronave está disponível para voar, o que pode ser inaceitável para o problema. Então, no caso real das organizações da FAB, uma nova iteração é feita trocando-se manualmente alguns recolhimentos de lugar até que uma solução viável apareça ou na esperança que uma solução viável apareça.

4.2.3 Método "ping-pong" – PP

Uma forma intuitiva de mecanismos de procura por soluções para o caso do PPMP foi sugerida por Douglas Coimbra de Andrade durante os trabalhos de implementação da MCF com mecanismos de busca local em seu estágio de adaptação às organizações da FAB, realizado no Instituto de Logística da

Aeronáutica. O procedimento, batizado por ele de "ping-pong", começa com a geração de uma solução baseada em algum método de construção. Uma solução pode ser obtida da mesma forma como se faz na prática (nas organizações da FAB) com a escolha dos períodos para os recolhimentos das aeronaves, conforme descrito anteriormente. A solução gerada é aceita, independentemente das penalidades incorridas e de sua viabilidade. O mecanismo de trocas começa a funcionar e muito se assemelha às heurísticas de melhoria.

Os métodos de melhoria procuram melhorar soluções obtidas através de algum outro método de construção. Os métodos de melhoria, tradicionalmente utilizados, são do tipo *k-opt*, conforme proposto por Lin e Kernighan (1973), nos quais *k* arcos são removidos de um roteiro e substituídos por outros *k* arcos, com a finalidade de diminuir a distância total percorrida. Conforme Laporte *et al.* (2000), quanto maior o valor de *k*, melhor a precisão do método, porém maior também é o esforço computacional necessário. Na prática, são considerados os métodos *2-opt* e *3-opt*, isto é, *k* assumindo os valores 2 ou 3. De forma resumida, o método *2-opt* testa trocas possíveis entre pares de arcos, refazendo as conexões quando houver uma melhoria na solução. O processo termina quando não for possível mais realizar nenhuma troca que resulte em melhoria. Este procedimento possui ordem de complexidade $O(n^2)$. No caso do "ping-pong", as trocas são efetuadas e testadas caso a caso e, sempre que uma solução melhor que a solução atual for encontrada, esta passa a ser considerada a nova solução atual. As trocas são tentadas para todos os nós verificados na solução inicial fazendo com que, para cada nó, partindo do primeiro nó da solução, uma troca pelo nó vizinho seja tentada. É preciso lembrar que um nó vizinho para o PPMP significa um movimento do recolhimento de um período para outro para uma mesma aeronave.

Primeiramente as trocas são feitas com os nós vizinhos anteriores e, depois de verificadas todas as trocas desta forma, são tentadas trocas com os nós vizinhos posteriores. Finalmente, é verificado se a inserção ou remoção de um nó provoca alguma melhoria na função objetivo do problema. A melhor solução encontrada fica na memória do procedimento. O procedimento pára quando, por duas iterações consecutivas, nenhuma melhoria for observada. O "ping-pong" difere dos procedimentos *K-opt* em função da amplitude reduzida da lista de vizinhança onde

são verificadas as trocas. Os movimentos acontecem de forma local para uma mesma aeronave, "subindo" ou "descendo" o recolhimento em uma posição. A **Tabela 4.4** é baseada na solução apresentada pela **Tabela 4.2** e descreve um exemplo de troca "ping-pong" para a solução gerada pelo procedimento anterior. As informações das outras aeronaves foram suprimidas por motivo de clareza.

Tabela 4.3 Método "ping-pong": movimento de troca para *aeronave 3.*

período 0	*aeronave 1* *200 horas disp.*	*aeronave 2* *500 horas disp.*	*aeronave 3* *90 horas disp.*	*aeronave 4* *280 horas disp.*
período 1			Vôo 90 horas	
período 2			***Recolhimento***	
período 3			***Manutenção***	
período 4			***Manutenção***	
período 5			Vôo 100 horas	

Para o caso específico da aplicação híbrida do procedimento "ping-pong" com a MCF, a solução inicial passa a ser gerada por uma seqüência predeterminada de iterações da MCF. O "ping-pong" é aplicado sobre a solução gerada pela MCF até que nenhuma melhoria seja observada por duas iterações consecutivas. Os níveis de feromônio são atualizados de forma diferente da forma como são atualizados em uma iteração do normal da MCF. No caso do "ping-pong", a atualização de feromônio é mais intensa e proporcional à melhoria observada como o processo. O procedimento geral continua com a MCF de acordo com a estratégia adotada para cada instância.

O método *PP* parte de uma solução inicial sem que qualquer recolhimento esteja incluído. O procedimento vai inserindo recolhimentos nos primeiros nós (período 1) para depois aplicar as trocas "ping-pong". Mesmo que a solução gerada não seja viável, o método a aceita e prossegue com a aplicação dos movimentos de troca do procedimento "ping-pong". O procedimento é repetido até que, por duas iterações consecutivas, não seja obtida nenhuma melhoria ou até que um limite de tempo preestabelecido seja atingido.

Uma das restrições observadas para este procedimento acontece quando a frota possui um número muito parecido de horas de vôo iniciais. Suponha que a frota seja

toda nova ou que todas as aeronaves estivessem com o mesmo número de horas de vôo remanescentes no início do problema. Nesse caso o *PP* não é capaz de "fugir" dos ótimos locais e não consegue bons resultados.

4.2.4 **Método *ASmnt***

ASmnt (de *AS* manutenção) é o nome dado pelo autor deste trabalho para identificar o método que tem como base um algoritmo MCF do tipo *AS* (do inglês *Ant System*) para o problema de programação de manutenção preventiva – PPMP. A adaptação do *AS* para o PPMP é feita tomando-se como base as experiências bem sucedidas de adaptações da MCF para o problema de alocação de cursos em universidades (*timetabling*) (Rossi-Doria *et al*, 2004).

O procedimento começa montando-se um grafo inteiramente conectado formado por nós representando todos os recolhimentos possíveis ao longo do período de interesse e arcos representando os custos (penalidades) de cada escolha. Os agentes (formigas) utilizam a proximidade do momento de serem completadas as horas remanescentes para o recolhimento de uma aeronave como informação heurística (τ). A construção da solução não busca por um ciclo Hamiltoniano, como nos casos do PCV e PRV, mas sim, por uma programação (roteiro de menor custo) que minimize a função-objetivo.

Um algoritmo *AS* é utilizado como base para as adaptações para o *ASmnt*. Nenhum método de busca local é utilizado para este caso, mas uma estratégia de atualização de feromônio é aplicada para os nós da melhor solução de cada iteração. Portanto, o algoritmo utilizado se assemelha também ao *Elitist AS* comentado no **Capítulo 3**. No *ASmnt* , o feromônio fica depositado nos nós e não nos arcos como no PCV e no PRV. Os arcos não apresentam valores constantes com o decorrer do tempo. Cada recolhimento de uma aeronave faz com que o relacionamento de custo entre as opções de recolhimento (nós) varie com o passar do tempo. Este caso é diferente de dos casos do PCV assimétrico, pois a escolha de um nó x anterior pode fazer com que os arcos entre dois outros nós variem de valor. Eq.(4.1) representa a adaptação da equação usada pelo *AS* para o *ASmnt*.

$$\eta_{ij} = \frac{1}{mDisp_{ij}} \qquad (4.1)$$

onde η_{ij} está relacionado com o histórico heurístico do problema que, no caso do *ASmnt* , diz respeito ao inverso do valor de $mDisp_{ij}$.

Um outro detalhe da adaptação do *AS* para o *ASmnt* está na vizinhança de um nó x_{ij}. As vizinhanças são geradas por movimentos a partir de um nó ou solução atual em direção a nós ou soluções "próximas". A vizinhança de um nó x_{ij} representa a vizinhança de um recolhimento efetuado pelas formigas no sistema. Os nós candidatos ao próximo recolhimento poderiam ser todos os outros nós, mas para o PPMP esse procedimento pode não fazer sentido.

Por exemplo, se a ***aeronave 3*** foi recolhida no ***período 5***, não fará sentido algum procurar por um novo recolhimento para a mesma ***aeronave 3*** em períodos anteriores ao ***período 6***. Da mesma forma, se uma aeronave tem suas horas de vôo esgotadas no ***período 3***, não parece fazer sentido procurar por recolhimentos para esta aeronave em períodos muito distantes do período onde suas horas se esgotaram. A **Tabela 4.4** mostra como é feita a escolha de cada novo recolhimento por cada formiga do processo.

Tabela 4.4 *ASmnt*: escolha do próximo recolhimento.

período 0	***aeronave 1*** ***200 horas disp.***	***aeronave 2*** ***500 horas disp.***	***aeronave 3*** ***90 horas disp.***
período 1	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Vôo 90 horas
período 2	Vôo 100 horas	Vôo 100 horas	Indisponível
período 3	Indisponível	Vôo 100 horas	Indisponível
período 4	Indisponível	Vôo 100 horas	Indisponível
período 5	Indisponível	Vôo 100 horas	Indisponível

??? Utilizam-se eq.(3.7) e eq.(4.1) para a escolha do próximo recolhimento

A vizinhança de um nó x_{ij} , portanto, é limitada pela modelagem do *ASmnt*. Note que no exemplo da **Tabela 4.4**, os nós x_{51} e x_{53} não fazem parte da vizinhança da formiga *k*.

Um número de formigas equivalente ao número de nós é utilizado pelo *ASmnt* e os parâmetros α e β são ajustados para valores iniciais iguais a 1. Os próximos itens apresentam os resultados dos estudos para a avaliação das melhores configurações de parâmetros para a solução do PPMP.

Cabe uma explicação importante a respeito dos procedimentos que se utilizam da MCF. Cada formiga gera (ou procura gerar) uma solução por iteração do método. Caso o método MCF apresente um determinado numero de iterações, a cada iteração, *K* formigas estarão completando, cada uma, um ciclo completo de construção de solução conforme descrito no **Capítulo 3**. A cada iteração, um conjunto de *K* soluções é gerado, níveis de feromônio são atualizados e melhores soluções são recolhidas para a memória do problema após comparadas com as demais. Como a MCF é um processo de busca que envolve valores probabilísticos em sua estrutura, um conjunto de iterações, por exemplo *iter* =20, pode chegar a um resultado diferente de um outro conjunto de mesmo número de iterações. Iteração após iteração, os caminhos de feromônio vão se intensificando e, a partir de um determinado ponto, as possibilidades de se encontrar uma outra solução boa passam a ser pequenas.

Um recurso para fugir desse ponto tão intenso de feromônio que já não se consiga pesquisar por soluções é utilizar o recurso das tentativas. Cada tentativa significa um início do procedimento MCF. Então se o procedimento possui 10 formigas, perfaz 10 iterações e 5 tentativas, o algoritmo da MCF é processado com 5 inícios diferentes, já que cada decisão de movimento envolve um fator probabilístico num total de 500 iterações (10*10*5). Testes preliminares a esta tese envolvendo a MCF mostraram que as chances de se obter melhores resultados aumentam significativamente se várias tentativas são utilizadas para um mesmo número total de iterações.

4.2.5 **Método *ACSmnt***

ACSmnt (de *ACS* manutenção) é o nome dado pelo autor deste trabalho para identificar o método que tem como base um algoritmo *ACS* (do inglês *Ant Colony System*) para o problema de programação de manutenção preventiva – PPMP. De

forma muito semelhante ao que acontece com o *ASmnt*, a adaptação do *ACS* para o *ACSmnt* é feita tomando-se como base as experiências bem sucedidas de adaptações da MCF para o problema de alocação de cursos em universidades (*timetabling*) (Rossi-Doria *et al*, 2004).

Um algoritmo *ACS* é utilizado como base para as adaptações para o *ACSmnt*. Muito embora o *ACS* tenha sido o primeiro dos algoritmos da MCF a se beneficiar de procedimentos de busca local, nenhum método de busca local é utilizado para este caso específico, muito embora uma estratégia de atualização de feromônio também seja aplicada para os nós da melhor solução de cada iteração da mesma forma que para o *ASmnt*. Portanto, o *ACSmnt* também se assemelha ao *Elitist AS* neste aspecto. No *ACSmnt*, o feromônio também fica depositado nos nós e não nos arcos como no PCV e no PRV.

O número de formigas utilizado nos testes iniciais é igual a dez, conforme sugestão de alguns autores (Jones, 2003); (Dorigo; Stutzle, 2004). Os parâmetros α e β são ajustados para valores iniciais iguais a 1. Os valores de ρ e q0 são ajustados inicialmente para valores iniciais iguais a 0.2 e 0.8, respectivamente. Os itens **4.4.2.3** e **4.4.2.4** apresentam discussões e testes mais aprofundadas para a avaliação das melhores configurações de parâmetros para a solução do PPMP com o *ACSmnt* (Jones, 2003); (Dorigo; Stützle, 2004).

4.2.6 **Método "ping-pong" Busca Local - *PPBL***

O método *PPBL* nada mais é do que a junção de uma heurística de construção de soluções, no caso o método *FAB*, com uma outra heurística de melhoria de soluções, neste caso o próprio procedimento "ping-pong". Este método não conta com tanta exploração das características de diversificação, como no caso dos métodos que se utilizam da MCF na procura por soluções, mas é significativamente mais rápido por não precisar de tantas operações para recalcular vizinhanças, informações heurísticas e de feromônio. O procedimento é tão simples que não carece nem de ajustes de parâmetros como nos caso com a utilização da MCF.

O método inicia-se com a criação de uma solução com a lógica do procedimento "vizinho mais próximo" adaptado para o *PPMP*. Mesmo que a solução gerada não

seja viável, o método a aceita e prossegue com a aplicação dos movimentos de troca do procedimento "ping-pong". O procedimento é repetido até que, por duas iterações consecutivas, não seja obtida nenhuma melhoria ou até que um limite de tempo preestabelecido seja atingido. Algumas restrições observadas para este procedimento são semelhantes ao que acontece com o *PP*. Supondo uma frota de aeronaves novas ou que todas as aeronaves estivessem com o mesmo número de horas de vôo remanescentes no início do problema. Nesse caso o *PPBL,* assim como o *PP,* não é capaz de "fugir" dos ótimos locais e não consegue bons resultados.

4.2.7 **Método ASmnt Busca Local - *ASmntBL***

O *ASmnt* Busca Local é inspirado em uma adaptação que deu certo nas implementações da MCF para soluções do PCV e PRV (Abrahão; Gualda, 2004); (Dorigo;Stützle, 2004). O método incorpora os algoritmos "ping-pong" intercalados a cada conjunto θ de iterações completadas por cada formiga. A aplicação dos procedimentos "ping-pong" se repetem sucessivas vezes até que nenhuma melhoria seja observada e o algoritmo continua suas iterações com o *ASmnt*.

Após a aplicação das rotinas "ping-pong", a atualização de feromônio só ocorre caso haja melhoria no roteiro, caso contrario, o nível de feromônio presente antes da aplicação do mecanismo de busca local é mantido evitando que o efeito de aprofundamento seja intensificado de forma desproporcional para a rodada seguinte com o uso das formigas.

No caso do *ASmntBL* o procedimento *ASmnt* funciona como uma heurística de construção de solução enquanto que o procedimento "ping-pong" funciona como uma heurística de melhoria de solução. Após as primeiras iterações, tanto o *ASmnt* e o "ping-pong" passam a funcionar como mecanismos de melhoria, contudo o *ASmnt* diversificando a procura por soluções promissoras e o "ping-pong" intensificando o processo de procura local por soluções.

O intuito da incorporação dos procedimentos "ping-pong" é o de verificar possíveis melhorias em termos de desempenho computacional com a utilização de mecanismos de busca local intercalados com a aplicação do *ASmnt*.

4.2.8 **Método ACSmnt Busca Local - *ACSmntBL***

O *ACSmntBL* também é inspirado na adaptação apresentada em Abrahão; Gualda (2004). O método também incorpora os algoritmos "ping-pong" intercalados a cada conjunto θ de iterações completadas por cada formiga. A aplicação dos procedimentos "ping-pong" se repetem sucessivas vezes até que nenhuma melhoria seja observada ou que o tempo limite seja atingido.

Da mesma forma que no *ASmn-BL*, após a aplicação das rotinas "ping-pong", a atualização de feromônio só ocorre caso haja melhoria no roteiro, caso contrário, o nível de feromônio presente antes da aplicação do mecanismo de busca local é mantido evitando que o efeito de aprofundamento seja intensificado de forma desproporcional para a rodada seguinte com o uso das formigas.

Também para o caso do *ACSmnt-BL* o procedimento *ACSmnt* funciona como uma heurística de construção de solução enquanto que o procedimento "ping-pong" funciona como uma heurística de melhoria de solução. Após as primeiras iterações, tanto o *ACSmnt* quanto o "ping-pong" passam a funcionar como mecanismos de melhoria, contudo o *ACSmnt* diversificando a procura por soluções promissoras e o "ping-pong" intensificando o processo de procura local por soluções.

4.3 Testes computacionais

Os testes computacionais para o PPMP foram desenvolvidos principalmente para testar a qualidade das soluções encontradas. O PPMP está voltado para o gerenciamento do ciclo de vida de uma frota de veículos e não para o ajuste fino das decisões diárias tomadas para o gerenciamento das contingências logísticas de uma frota. No entanto, todos os procedimentos de teste efetuados evidenciam que as boas soluções não precisam necessariamente levar mais tempo para serem alcançadas.

Os testes comparam o desempenho dos algoritmos desenvolvidos para o PPMP em diferentes instâncias para a verificação dos resultados em termos de qualidade da solução e tempo computacional.

Primeiramente são testados os procedimentos de busca por soluções ótimas enumerando-se todas as soluções possíveis. Os testes seguintes comparam os

métodos descritos acima em 18 instâncias geradas no intuito de representar o universo do PPMP para um operador (no caso, a FAB). Em seguida são testadas e comparadas as configurações de parâmetros para os algoritmos que se utilizam da MCF para a solução do PPMP. Por último, são apresentadas as avaliações dos resultados obtidos com os testes. Os PPMP testados neste capítulo são do tipo PPMP_ME e envolvem: frota homogênea de aeronaves, uma oficina e múltiplos esquadrões.

4.3.1 Testes com enumeração exaustiva em instâncias pequenas

Os procedimentos utilizando-se de busca exaustiva para o PPMP foram testados para instâncias de dez a trinta e dois nós, com o tempo de computação de resultados variando de poucos segundos até alguns dias.

As instâncias foram geradas inspiradas em frotas pequenas (até 04 aeronaves) e por períodos de até doze meses. Verificou-se que para instâncias ainda pequenas, como no caso de quatro aeronaves e oito períodos (32 nós), o algoritmo de busca exaustiva levou cerca de 188.830 segundos (mais de dois dias) para testar todas as soluções. Para a mesma instância, todos os procedimentos propostos como métodos de solução para o PPMP, apresentaram o mesmo resultado, sabidamente ótimo, de 16 unidades de penalidade. Nenhum procedimento heurístico ou metaheurístico levou mais de 2 segundos para alcançar o resultado ótimo. Dados os resultados obtidos com estes testes e a expectativa de aumento muito significativo de tempo de cálculo (mais de 60 dias para 33 nós), esta abordagem não segue sendo testada nesta tese.

4.3.2 Testes comparativos dos métodos propostos

O objetivo desta parte da tese é verificar se os procedimentos propostos funcionam e se existem diferenças de desempenho, principalmente em termos de qualidade, entre os métodos de solução sugeridos para o PPMP.

Os testes desenvolvidos para comparar o desempenho dos métodos para o PPMP são executados nas 18 instâncias geradas especialmente para este fim. O número total de iterações é limitado a 3000 e todos os métodos utilizam, sempre que possível, de

parâmetros iguais, visto que existem diferenças entre as estruturas dos algoritmos dificultando comparações mais elaboradas (Golden; Stewart, 1985); (Rardin; Uszoy, 2001).

Parte dos valores dos parâmetros apresentados são sugeridos por Jones (2003) e por Dorigo; Stützle (2004). O número de iterações está ajustado para permitir tanto o processo de diversificação quanto o de intensificação esperados nos procedimentos que utilizam a MCF.

O valor de θ está ajustado para permitir que os procedimentos de busca local ocorram três vezes durante a aplicação dos métodos. Isto parece fazer com que a MCF, ou a solução gerada até então pela MCF, sofra uma "chacoalhada" e possa melhorar os processos de busca por outras regiões promissoras do espaço de solução (Abrahão; Gualda, 2004).

Uma outra alternativa seria ajustar θ para o mesmo valor do número de iterações totais. Isso faria com que os procedimentos de busca local só ocorressem depois de esgotadas as tentativas dos métodos de construção.

Cada instância é testada por 30 vezes com os métodos: *FAB*; *ASmnt*; *ACSmnt*; *ASmntBL*; *ACSmntBL* e *PPBL*. Portanto, os resultados apresentados representam a média obtida nesses 30 testes, cada qual com as configurações de parâmetros apresentados pela **Tabela 4.5**.

Tabela 4.5 Configuração de parâmetros.

	Parâmetros	Valores
α	Peso da informação heurística	Constante = 1 *
β	Peso da informação de feromônio	Constante = 1 *
ρ	Atualização dos níveis de feromônio	Constante = 0.2 **
q0	Regra proporcional pseudo-aleatória	Constante = 0.8 **
ξ	Decréscimo do feromônio (ACS)	Constante = 0.1 **
θ	Intervalo para busca local (iterações)	Constante = 1000
K	Número de formigas por iteração	Constante = 20
Iter	Número de iterações por tentativa	Constante = 30
Tent	Número de tentativas	Constante = 5
TotIter	Número total de iterações	Constante = 3000

* (Jones, 2003)

** (Dorigo; Stützle, 2004)

4.3.2.1 Geração das instâncias utilizadas nos testes

Muito embora alguns testes pudessem ser aplicados em instâncias de outros problemas semelhantes, os testes desta tese foram todos executados em instâncias geradas tendo como base problemas reais. Instâncias geradas para outros testes podem trazer significativa quantidade de viés, os quais poderiam atrapalhar a avaliação do desempenho dos métodos sugeridos para a finalidade deste trabalho. A **Tabela 4.6** apresenta uma lista dos parâmetros para a geração das instâncias utilizadas nos procedimentos de testes.

Tabela 4.6 Parâmetros controlados para a geração das instâncias de teste.

	Parâmetros	Valores
j	Número de aeronaves	Constante = 10; 25; 40
i	Número de períodos	Constante = 25
Sm	Número de oficinas	Constante = 1
H	Número de esquadrões	Constante = 1; 2; 3
$t_{iniciais}$	Horas de vôo iniciais	Aleatório = $h_1(400)$; $h_2(400)$

O produto dos valores apresentados na **Tabela 4.6** gera um total de 18 instâncias (*3*1*1*3*2 = 18*) para os testes com o PPMP. Cada instância foi batizada primeiramente com o tipo do problema (***PPMP***...). O número de aeronaves (*PPMP_A*(**10;25;40**)...) envolvidas, o número de períodos (*PPMP_AxxP**25***...), esquadrões (*PPMP_AxxP25sq*(**1;2;3**)...) e a base do procedimento de geração aleatória utilizado para as horas de vôo (*PPMP_AxxP25sqyh*(**1;2**)) completam as informações contidas no nome de cada instância.

O valor atribuído ao número de aeronaves está ligado ao fato da frota completa da FAB apresentar um valor médio de 25 aeronaves para cada tipo de aeronave. Existem frotas pequenas, como no caso do avião do presidente da república (apenas uma aeronave ACJ), até a frota dos EMB – 312 Tucano, que conta com 112 aeronaves.

Os valores atribuídos ao número de esquadrões seguem a mesma lógica. O valor atribuído para o número de períodos (25 para todas as instâncias) está relacionado com um prazo de pelo menos dois anos do ciclo de vida de cada aeronave (caso cada

período equivalha a um mês). O numero de períodos limitado a 25 também está relacionado com o tamanho das instâncias. Períodos maiores poderiam estar representados caso cada período *i* equivalesse a um bimestre ou trimestre. Naturalmente a solução perderia em precisão, mas um horizonte de mais de quatro anos estaria compreendido pela solução.

Os valores gerados aleatoriamente para duas configurações iniciais das horas de vôo da frota visam a abordar as condições práticas observadas em um dado instante para estes parâmetros.

Os demais valores para cada característica e os dados gerais para a modelagem do problema estão baseados e verificados em informações contidas nos boletins técnicos (PAMA-SP, 1998); (PAMA-SP, 2000), ordens técnicas – TO (do inglês *Technical Orders*) (PAMASP, 2000ª); (USAF, 2000), instruções do Ministério da aeronáutica (DIRMA, 1986); (DIRMA, 1988); (DIRMA, 1989); (DIRMA, 1995) os quais definem as características e procedimentos de manutenção quanto à periodicidade das inspeções programadas efetuadas nas aeronaves.

A **Tabela 4.7** apresenta as 18 instâncias-teste e suas características.

Tabela 4.7 Instâncias para os testes do PPMP.

Instâncias	Aeronaves	Esquadrões	Raiz aleatória
PPMP_A10P25sq1h1	10	1	h_1
PPMP_A10P25sq1h2	10	1	h_2
PPMP_A10P25sq2h1	10	2	h_1
PPMP_A10P25sq2h2	10	2	h_2
PPMP_A10P25sq3h1	10	3	h_1
PPMP_A10P25sq3h2	10	3	h_2
PPMP_A25P25sq1h1	25	1	h_1
PPMP_A25P25sq1h2	25	1	h_2
PPMP_A25P25sq2h1	25	2	h_1
PPMP_A25P25sq2h2	25	2	h_2
PPMP_A25P25sq3h1	25	3	h_1
PPMP_A25P25sq3h2	25	3	h_2
PPMP_A40P25sq1h1	40	1	h_1
PPMP_A40P25sq1h2	40	1	h_2
PPMP_A40P25sq2h1	40	2	h_1
PPMP_A40P25sq2h2	40	2	h_2
PPMP_A40P25sq3h1	40	3	h_1
PPMP_A40P25sq3h2	40	3	h_2

Outras informações importantes vêm da composição da frota de aeronaves. A **Tabela 4.8** apresenta as características da frota testada com os métodos propostos.

Tabela 4.8 Características da frota empregada nos testes (PAMA-SP, 2005)

Características da frota	Valores
Quantidade de períodos que compõem um ano	12
Intervalo entre atividades de manutenção (*m*):	400*
Períodos necessários para manutenção	4*
Horas de vôo de cada aeronave (*t*) (por período):	25**
Disp. de manutenção nos Parques (*c*) (por período):	3**
Penalidade por hora não utilizada antes da manutenção (*wc*):	20**
Penalidade por aeronave ociosa com horas vencidas (*wc'*):	10**
Penalidade por baixar disponibilidade da frota (*wb*):	100**
Penalidade superutilização dos Parques (*wa*):	5**
Penalidade subutilização dos Parques (*wa'*):	1**
Expoente da superutilização dos parques: *Ep*	2
Disponibilidade média (esperada) da frota (AvDisp):	0,55***

* (PAMASP, 2000[a]); (USAF, 2000)

** (PAMA-SP, 1998); (PAMA-SP, 2000)

*** (PAMA-SP, 1998); (PAMA-SP, 2000) e (PAMASP, 2000[a])

4.3.2.2 Apresentação dos resultados

A **Tabela 4.9** apresenta um extrato dos resultados para o *PPMP_A25P25sq3h1*. Nela estão descritos os métodos empregados, os resultados obtidos em termos de valor das penalidades incorridas e os tempos totais gastos para completar cada procedimento. A última coluna apresenta a porcentagem observada acima do melhor resultado alcançado para cada método. O Anexo 1 apresenta os dados complementares do *PPMP_A25P25sq3h1*.

Tabela 4.9 Resultados obtidos para o *PPMP_A25P25sq3h1.*

Método	Penalidade	Tempo (*seg.*)	% acima
FAB	997	0,04	72%
PP	985	0,08	70%
ASmnt	1352	339,05	133%
ACSmnt	808	159,77	39%
ASmntBL	645	196,85	11%
ACSmntBL	**580**	**149,83**	**0%**
PPBL	647	6,29	11%

A **Tabela 4.10** apresenta uma comparação dos resultados obtidos por todos os métodos em todas as instâncias em todas as rodadas baseada na classificação que cada método obteve para cada instância.

Tabela 4.10 Comparação dos resultados relativos de cada método.

Métodos	Classificação dos resultados em cada instância																		Soma
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
FAB	6	3	6	6	6	6	6	6	6	6	5	6	7	5	5	5	5	5	100
PP	7	4	7	7	7	7	5	5	5	5	6	5	6	7	6	7	6	7	109
ASmnt	5	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7	5	6	7	6	7	6	109
ACSmnt	3	6	3	4	4	2	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	69
ASmntBL	2	7	2	3	3	3	3	3	3	3	4	2	3	2	2	1	1	2	49
ACSmntBL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	3	2	3	3	26
PPBL	4	2	4	2	2	4	2	2	2	2	1	3	2	3	1	3	2	1	42

O método melhor classificado recebe "1". O somatório das classificações está apresentado na coluna da direita e indica o método que apresentou o melhor desempenho.

Os resultados mostram que, em uma avaliação superficial, o método *ACSmntBL* apresentou os melhores resultados em termos de qualidade da solução encontrada. Os métodos *FAB* e *ASmnt* nem sequer conseguiram encontrar soluções viáveis para todas as instâncias.

4.3.2.3 Testes não-paramétricos para comparação dos métodos

Os testes empregados para a comparação entre os métodos seguem o que é sugerido por Golden e Stewart (1985), que propõem a utilização de testes não paramétricos para comparação entre mais de dois procedimentos heurísticos ou metaheurísticos. Os procedimentos apresentados a seguir aplicam os testes de Friedman (Conover, 1980) para verificar se existe significância estatística para afirmar que os desempenhos dos métodos são diferentes uns dos outros. Caso o resultado do teste rejeite a $\boldsymbol{H_0}$, comparações múltiplas são utilizadas para se determinar quais diferenças entre pares de desempenhos são significantes.

A hipótese de que não existe diferença entre os desempenhos dos métodos foi rejeitada pelo teste de Friedman. Os testes para múltiplas comparações apresentaram os seguintes resultados para $\alpha = 0.95$: o método *ACSmntBL* se distingue do método *PPBL*; não existe evidência estatística para distinguir o desempenho do método *PPBL* do método *AsmntBL*; o método *ASmntBL* se distingue do método *ACSmnt* que, por sua vez, também se distingue do método *ASmnt*. Não existe evidência estatística ($\alpha = 0.95$) para distinguir o método *FAB* do método *ASmnt*. O **Anexo 3** apresenta os dados completos dos testes não-paramétricos para a comparação dos desempenhos dos métodos testados para o PPMP.

A **Tabela 4.11** apresenta o resultado dos testes de Friedman e de múltiplas comparações para os métodos de solução propostos para o PPMP.

Tabela 4.11 Testes de Friedman e de múltiplas comparações para métodos

Parâmetros	Valores	
T_2	60.27	(T estatístico)
$F\ (a, K_1, K_2)$	2.98	(valor crítico)
"P-value"	0.01	-
Rejeita Ho ?	**Sim**	*(T2>F) para T. de Friedman*
α	0.95	-
$t_{1-a/2,k2}$	1.98	-
$T_{crítico}$	12.40	-
Método	Classificação (R)	$R_i - R_{(i-1)} > T_{crítico}$
ACSmntBL	26	A
PPBL	42	B
ASmntBL	49	B
ACSmnt	69	C
FAB	100	D
ASmnt	109	D

4.3.3 Testes comparativos dos parâmetros utilizados pela MCF

Os testes desenvolvidos até aqui sugerem que os métodos envolvendo a MCF, particularmente o *ACSmntBL*, apresentam resultados promissores na solução do PPMP. Uma vez que os testes desenvolvidos anteriormente utilizaram apenas uma

configuração de parâmetros para a estratégia de solução, faz-se necessário verificar quais seriam as configurações de parâmetros mais interessantes para o PPMP.

Muito embora o desempenho de procedimentos metaheurísticos e heurísticos possam estar significativamente ligados às características de cada instância, o PPMP apresenta um universo relativamente limitado de possibilidades em termos de variabilidade em sua estruturação.

A MCF permite o ajuste do balanceamento entre os procedimentos de diversificação e de intensificação na procura por soluções. O *ACS* permite ainda alguns outros ajustes ligados à sua estrutura mais elaborada. O estudo que segue não

esgota as possibilidades de ajustes de parâmetros para a solução do problema, visto que os parâmetros envolvendo outras estratégias de solução não estão abordados.

4.3.3.1 Geração das configurações de parâmetros utilizados nos testes

A **Tabela 4.12** apresenta uma lista dos valores utilizados para a geração das configurações de parâmetros utilizadas nos testes. Os valores apresentados cobrem o espectro de opções de parâmetros para a exploração das alternativas da MCF para o PPMP dentro do escopo desta tese.

Tabela 4.12 Parâmetros controlados para a geração das configurações.

	Parâmetros	Valores
α	Peso da informação heurística	Constante = 1; 1.5; 2
β	Peso da informação de feromônio	Constante = 1; 1.5; 2
ρ	Atualização dos níveis de feromônio	Constante = 0.1; 0.4; 0.7; 0.9
q0	Regra proporcional pseudo-aleatória	Constante = 0.5; 0.7; 0.9

O produto dos valores gera um total de 108 configurações (*3*3*4*3 = 108*) de parâmetros testados com os métodos *ACSmntBL*. Por motivo de clareza, o conjunto de todas as configurações de parâmetros geradas neste procedimento está apresentado no **Anexo 2** desta tese. A **Tabela 4.13** apresenta a configuração dos testes executados com cada uma das 18 instâncias representativas do universo do

problema para a FAB. Cada instância do problema é testada com cada uma das configurações de parâmetros de forma independente.

Tabela 4.13 Configuração do teste para comparação entre os parâmetros.

	Parâmetros	Valores
α	Conforme **Anexo 2**	-
β	Conforme **Anexo 2**	-
ρ	Conforme **Anexo 2**	-
q0	Conforme **Anexo 2**	-
ξ	Decréscimo do feromônio (ACS)	Constante = 0.1 **
θ	Intervalo para busca local (iterações)	Constante = 1000
K	Número de formigas por iteração	Constante = 20
Iter	Número de iterações por tentativa	Constante = 30
Tent	Número de tentativas	Constante = 35
TotIter	Número total de iterações por configuração	Constante = 21000

** (Dorigo; Stützle, 2004)

4.3.3.2 Testes não-paramétricos para comparação das configurações

Os testes seguem os mesmos procedimentos comentados em **4.4.2.3** para comparações entre os métodos. Neste caso, comparam-se as 108 diferentes configurações de parâmetros para o método *ACSmntBL* no intuito de verificar se existe evidência estatística para afirmar que uma configuração ou um grupo de configurações é melhor que outra ou que as demais.

A **Tabela 4.14** apresenta o resultado dos testes de Friedman e de múltiplas comparações. A hipótese de que não existe diferença entre o desempenho das configurações de parâmetros foi rejeitada.

Com $\alpha = 0.95$, no entanto, não existe evidência estatística para mostrar diferenças entre o desempenho da *Configuração 79* (melhor classificada nos testes) e as próximas 14 configurações. As diferenças só são significativas a partir da *Configuração 105*.

Tabela 4.14 Testes de Friedman e de múltiplas comparações para os parâmetros

Parâmetros	Valores	
T_2	12.48	(T estatístico)
$F\ (a, K_1, K_2)$	1.36	(valor crítico)
"P-value"	0.01	-
Rejeita Ho ?	**Sim**	*(T2>F) para T. de Friedman*
α	0.95	-
$t_{1-a/2,k2}$	1.96	-
$T_{crítico}$	287,90	-
Configuração	Classificação (R)	$R_i - R_{(i-1)} > T_{crítico}$
79	307	FALSO
76	336	FALSO
80	384	FALSO
88	408	FALSO
77	413	FALSO
78	423	FALSO
73	430	FALSO
74	430	FALSO
...	...	...
75	583	FALSO
105	607	Diferente
...	...	...
30	1660	Diferente

4.3.4 Avaliação dos resultados

Os resultados apresentados até o momento confirmam que os procedimentos propostos resolvem o PPMP. Muito embora alguns procedimentos em algumas instâncias não alcancem soluções viáveis, a maioria dos procedimentos propostos pelo autor como métodos de solução para o PPMP com a utilização da MCF obtém resultados viáveis.

A forma como as instâncias foram geradas apresenta uma limitação no que diz respeito a capacidades das oficinas. Tal fato fica exposto pelos valores de penalidades incorridos nas instâncias maiores no que diz respeito à capacidade das oficinas. Da forma como foram geradas as instâncias, não importa se a frota é composta de 10 ou 40 aeronaves, a capacidade das oficinas é sempre a mesma. Naturalmente que, na medida em que o problema cresce, as penalidades ligadas à

super-utilização das oficinas aumentem significativamente. Vale a pena ressaltar que os testes realizados neste capítulo foram desenvolvidos para testar os procedimentos uns em relação aos outros baseados em instâncias representativas da realidade.

Os procedimentos que se utilizaram dos procedimentos de busca local apresentaram resultados melhores que os que fazem uso da meta-heurística pura. Este fato está de acordo com a opinião da maioria dos pesquisadores que têm trabalhado com a MCF (Dorigo; Stützle, 2004). A aplicação das rotinas "ping-pong" favorecem a continuação do mecanismo de procura por melhores soluções do *AS* e do *ACS*. É como se as rotinas *"ping-pong"* "chacoalhassem" a solução anteriormente gerada pela MCF como sendo a melhor e propiciasse novas oportunidades de melhoria anteriormente "escondidas" no ambiente de solução considerado.

O *ACSmntBL* apresentou os melhores resultados em termos de qualidade, no entanto o *PPBL* é o mais rápido e com resultados muito bons. A aplicação conjunta de um procedimento que favoreça a diversificação, como no caso da MCF, e outro que intensifique o processo de busca local, como o "ping-pong" apresentou os melhores resultados. Muito embora os testes não paramétricos tenham mostrado uma diferença em termos de desempenho entre os dois métodos, o procedimento *PPBL* apresentou resultados próximos aos do *ACSmntBL* em tempos mais baixos.

Uma opção testada em separado e que apresenta todas as aeronaves com um número igual de horas de vôo disponíveis no início do problema restringiu a qualidade das soluções com o *PPBL*. Para esse caso específico, o *PPBL* apresentou restrições maiores que os demais procedimentos que se utilizam da MCF. Uma explicação para o desempenho limitado do *PPBL* para este caso é que os mecanismos de procura por soluções estão limitados a trocas na vizinhança imediata de cada recolhimento, o que impede uma exploração maior de vizinhanças mais distantes.

O teste das configurações de parâmetros mostrou que, muito embora exista uma diferença significativa do ponto de vista estatístico para o conjunto de configurações testadas, não existe distinção em termos de desempenho entre a primeira configuração classificada e as seguintes 14 (de 108 configurações) primeiro colocadas. Isto está de acordo com as afirmações de Dorigo; Stützle (2004) em respeito ao ajuste de parâmetros. A conseqüência natural é que ajustes são

necessários e parte integrante da utilização da MCF em casos como os explorados aqui.

Uma das idéias de aprimoramento que surgiu no decorrer dos testes e da implementação da MCF para o PPMP é a da utilização de uma informação mais elaborada da estrutura do problema para auxiliar nos processos de busca por soluções. De forma semelhante ao que ocorre com o caso das economias (Clarke; Wright, 1964) para o *ACSavings* discutido anteriormente, o *ACSavingsMnt* faria uso da informação das economias verificadas em se escolher um nó em relação aos demais. No entanto, o caráter dinâmico das atualizações necessárias no espaço de solução do problema dificulta o procedimento que ainda não foi implantado com sucesso.

4.4 Resumo e conclusões do capítulo

Os procedimentos desenvolvidos neste capítulo constituem as bases para os demais trabalhos desenvolvidos para testar a aplicação prática das descobertas nesta tese e outros trabalhos que porventura surgirem com a aplicação dos procedimentos em problemas práticos e teóricos. O capítulo apresenta a metodologia empregada nos testes necessários ao trabalho de tese. Inicia com a descrição da estruturação dos procedimentos e das adaptações necessárias à MCF para a solução do PPMP. Os testes computacionais empregados para a verificação do desempenho dos métodos de solução para o PPMP são propostos e descritos em seguida.

O desempenho de cada método é testado com a utilização de procedimentos não paramétricos para verificar se existe diferença entre eles. Uma vez verificadas diferenças, cada método é comparado com os demais no sentido de classificá-los. Os testes indicaram o método *ACSmntBL* como o mais promissor e, por esta razão, novos testes são executados para a verificação do melhor ajuste para seus parâmetros.

Os testes não paramétricos para a comparação entre os parâmetros indica que existe evidência estatística para diferenciar configurações de parâmetros para o *ACSmntBL*, mas que só distingue satisfatoriamente as configurações em grupos. O capítulo

termina sugerindo o procedimento *ACSmntBL* como o mais interessante para ser testado em um caso prático do cenário da FAB.

As principais conclusões deste capítulo são as de que as estratégias de solução propostas são capazes de encontrar soluções viáveis para o PPMP. Dentre os métodos propostos o *ACSmntBL* apresenta os melhores resultados e apresenta um grupo de configurações mais promissoras em termos de desempenho para a solução de problemas como o PPMP.

O capítulo seguinte descreve a aplicação do método *ACSmntBL* para uma frota de aeronaves da FAB.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO NA FORÇA AÉREA BRASILEIRA

5.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é a aplicação da metodologia sugerida pelos resultados dos estudos e testes anteriores em uma instância da Força Aérea Brasileira. Portanto, a descrição completa das aplicações envolvendo os métodos empregados, as estratégias de busca por soluções, a apresentação dos resultados obtidos e avaliação dos resultados são apresentadas neste capítulo. O capítulo trata dos testes efetuados em uma instância do problema de programação da manutenção preventiva encontrada no cenário de operações da FAB.

Primeiramente são descritos os dados da instância do problema a ser testada com o método *ACSmntBL*. Em seguida são apresentados os parâmetros referentes à frota de aeronaves empregada no problema. As estratégias de solução para o problema são definidas e descritas a seguir. Os resultados são apresentados separadamente por motivo de clareza. Primeiramente são apresentados os resultados da programação das atividades de 3º nível de manutenção e depois os resultados para o 2º nível de manutenção. A avaliação dos resultados e demais considerações são apresentados por último.

5.2 Descrição da instância

A instância escolhida para a aplicação do método *ACSmntBL* é do tipo PPMP_ME, ou seja, um problema de programação da manutenção preventiva para uma frota homogênea em termos das suas aeronaves, mas com dois esquadrões. O nome da instância testada é PPMP_FAB e conta com 20 aeronaves com atividades de manutenção a serem programadas em um horizonte de 25 períodos.

Como cada período equivale a um mês, o horizonte previsto é de pelo menos dois anos do ciclo de vida dessas aeronaves. O sistema conta com duas oficinas e as horas de vôo iniciais foram distribuídas de forma diferente para cada esquadrão.

O primeiro esquadrão conta com dez aeronaves e tem suas horas de vôo iniciais distribuídas aleatoriamente até no máximo 1200 horas. Este procedimento simula o caso da maioria das frotas da FAB compostas de um mesmo tipo de aeronave. O que se quer dizer é que, em um dado momento, o número de horas de vôo consumidas do ciclo de vida de cada aeronave de uma frota composta de um mesmo tipo, não segue uma ordem esperada de consumo para o intervalo de 1200 horas.

O caso da aeronave F-5, por exemplo. Cada aeronave já conta com pelo menos 20 anos no acervo da FAB e é possível medir e verificar que o tempo de ciclo delas está em torno de, suponhamos, 6000 horas cada. Isto significa que existem aeronaves com 5600 horas, outras com 6800 e assim por diante. No entanto, cada aeronave tem o seu histórico de vôo e de atividades de manutenção preventiva e corretiva.

É possível que uma aeronave com 6000 horas de tempo de ciclo de vida (múltiplo de 1200 horas), possua 700 horas de vôo disponíveis até a próxima inspeção de 1200 horas. Como o pretendido para efeito da programação das atividades de manutenção é o tempo do ciclo de vida para a atividade de manutenção, uma distribuição aleatória dentro das 1200 horas previstas para cada atividade de manutenção é suficiente para abordar a variabilidade deste quesito para os testes.

O segundo esquadrão de vôo possui as outras dez aeronaves. A parte da frota alocada ao segundo esquadrão acabou de passar por um processo de modernização no fabricante e suas aeronaves acabaram de ser entregues.

O segundo esquadrão, do ponto de vista dos ciclos de manutenção, possui aeronaves novas, ou seja, cada aeronave possui 1200 horas de vôo disponíveis até a próxima atividade de manutenção.

Novamente, se a aeronave F-5 for utilizada como exemplo, percebe-se que o que está sendo sugerido reflete o que está acontecendo no momento (2005) com as aeronaves recém entregues pelo contrato de modernização.

A **Tabela 5.1** apresenta os dados da instância PPMP_FAB

Tabela 5.1 Parâmetros da instância PPMP_FAB.

	Parâmetros	Valores
j	Número de aeronaves	Constante = 20
i	Número de períodos	Constante = 25
Sm_3	Número de oficinas 3º nível de manutenção	Constante = 1
Sm_2	Número de oficinas 2º nível de manutenção	Constante = 2 (uma para cada esquadrão)
H	Número de esquadrões	Constante = 2 (10 aeronaves cada)
$t_{iniciais}$	Horas de vôo iniciais	Aleatório = $h_1(1200)$; 0

5.3 Descrição da frota de aeronaves e do sistema de manutenção

A frota de aeronaves para o PPMP_FAB é composta por 20 aeronaves do tipo F-5 do acervo da FAB. O plano de manutenção dessas aeronaves indica os intervalos para que as atividades de manutenção ocorram dentro do ciclo de vida de cada uma. As atividades de manutenção preventiva estão previstas para os três níveis de manutenção. As atividades de manutenção preventiva do 1º nível de manutenção não estão sendo programadas nem levadas em consideração nestes procedimentos. Isto se deve ao fato das atividades de manutenção de 1º nível serem as mais simples, diárias e corriqueiras das três.

Na medida em que uma aeronave consome seu tempo de ciclo de vida, uma grande quantidade de conhecimento sobre o comportamento de falha é adquirida pelos operadores. Caso algum componente apresente evidências significativas de que seu comportamento de falhas é diferente do previsto nas TOs (do inglês *Technical Orders*), o estabelecimento de novos intervalos de inspeção pode ocorrer. Isto é o que acontece, por exemplo, quando do envelhecimento dos sistemas.

Na medida em que se tornam mais velhos e menos confiáveis, intervalos menores entre as inspeções podem garantir a segurança necessária para sua operação. Tais modificações são introduzidas nos planos de manutenção de cada aeronave e determinam os intervalos de tempo ou de ciclos até uma nova atividade de manutenção.

Para o F-5 consideram-se duas atividades de manutenção no PPMP_FAB. Uma atividade de manutenção de 2º nível e que é realizada nas instalações dos Esquadrões de Suprimento e Manutenção – ESM das bases onde os esquadrões estão sediados. No caso do PPMP_FAB, as atividades de manutenção de 2º nível de cada esquadrão serão realizadas em uma oficina de manutenção do ESM da base a qual o esquadrão estiver sediado.

A outra atividade de manutenção preventiva é de 3º nível e realizada no parque de manutenção daquela aeronave (no caso do F-5, o PAMA-SP). As atividades de manutenção de 2º nível são realizadas a cada 400 horas voadas de cada aeronave, enquanto que as atividades de 3º nível são realizadas a cada 1200 horas.

As atividades de 2º nível consomem dois períodos de trabalho de cada oficina (considera-se que se aeronave foi recolhida no período x_{ij}, estará disponível em $x_{(i+2)j}$). As atividades de manutenção de 3º nível, da mesma forma, levam cinco períodos pra ficarem prontas.

A capacidade das oficinas para efeito deste trabalho é medida em número de vagas no hangar. Então, têm-se que, para qualquer período, a capacidade das oficinas de 2º nível é de cinco aeronaves. Para as atividades de 3º nível, a capacidade da oficina fica restrita a quatro aeronaves por período. Todos os valores descritos são valores para a capacidade efetiva das oficinas e estão de acordo com a realidade das oficinas da FAB. A capacidade de projeto (restrição rígida para o problema) foi fixada em 25% a mais que a afetiva (sofrendo penalidade w_a).

No entanto, caso a capacidade de projeto da oficina seja ultrapassada, a solução continua aceitável, mas com o peso w_a passando a assumir um valor suficientemente alto para que o valor da função objetivo indique a eventual inviabilidade na solução final.

Uma das hipóteses do PPMP_FAB é a de que, caso disponível, uma aeronave vai voar um número sempre igual de horas em todos os períodos. Ela só vai deixar de voar aquele quantitativo de horas caso esteja indisponível por estar em manutenção ou por ter esgotado suas horas de vôo remanescentes. Isto se justifica no sentido de procurar-se voar sempre o mais próximo possível de um número de horas de vôo por aeronave que permita o planejamento mais eqüitativo da distribuição das horas de

vôo que cada uma dispõe. A disponibilidade média esperada da frota é dado em função da demanda esperada de utilização daquele sistema de arma.

O valor das penalidades descrito na **Tabela 5.2** vem de várias rodadas de entrevistas com os gerentes de uma das organizações encarregadas de solucionar o PPMP para a FAB. O PAMA-SP é o responsável pelo gerenciamento do ciclo de vida de aeronaves como o F-5, C-115 e F-103. Esses valores podem ser ajustados conforme contingenciamentos ocorram. Uma das vantagens de se ter um método que propicie respostas rápidas em termos de auxílio à tomada de decisão está em poder verificar o impacto das contingências no planejamento das atividades de manutenção. A **Tabela 5.2** apresenta os valores para os parâmetros discutidos.

Tabela 5.2 Características da frota para o PPMP_FAB (PAMA-SP, 2005).

Características da frota	Valores
Quantidade de períodos que compõem um ano	12
Intervalo entre atividades de manutenção de 3º nível (m_1)	1200*
Intervalo entre atividades de manutenção de 2º nível (m_2)	400*
Períodos necessários para manutenção de 3º nível	5*
Períodos necessários para manutenção de 2º nível	2*
Horas de vôo de cada aeronave por período (t)	50
Disp. de manutenção no 3º nível (c_1) (por período)	4*
Disp. de manutenção no 2º nível (c_2) (por período)	5*
Taxa da capacidade de projeto das oficinas:	25%*
Disponibilidade média (esperada) da frota (AvDisp)	0,55*
Penalidade por hora não utilizada antes da manutenção (wc)	20**
Penalidade por aeronave ociosa (wc')	10**
Penalidade por baixar disponibilidade da frota (wb)	10**
Penalidade superutilização dos Parques (wa)	5**
Penalidade subutilização dos Parques (wa')	1**

* (PAMA-SP, 1998); (PAMASP, 2000ª); (USAF, 2000)

** (PAMA-SP, 2005)

5.4 Estratégia de solução

O primeiro passo para a solução do PPMP_FAB testa a aplicação de todos os métodos apresentados anteriormente neste trabalho. Muito embora os estudos anteriores sugiram a aplicação direta do *ACSmntBL* para o caso, uma vez que os outros métodos estão disponíveis para a aplicação, decidiu-se que, num primeiro momento, todos deveriam ser aplicados para verificação dos desempenhos. O passo

seguinte consiste da aplicação do *ACSmntBL* dedicado para resolver o PPMP_FAB para o 3º nível de manutenção. Uma vez executada a programação das atividades de manutenção de 3º nível, são feitos os ajustes para que as atividades de manutenção de 2º nível possam ser programadas. Neste caso específico, o método *ACSmntBL* requer ajustes além dos mencionados anteriormente e referentes às atividades de manutenção de 2º nível apenas.

A solução para as atividades de manutenção de 2º nível necessita levar em consideração que as atividades de manutenção de 3º nível estarão sendo executadas conforme o previsto em sua programação original. Os períodos previstos para as atividades de manutenção de 3º nível constituem nós proibidos para as atividades de manutenção de 2º nível. O último passo do procedimento de solução do PPMP_FAB envolve atividades de ajuste interativo junto aos gerentes de manutenção para a implementação da programação proposta.

A estratégia proposta limita a busca por soluções, pois soluciona primeiro uma parte do problema, para depois solucionar o restante sem possibilidade de evolução na solução gerada na primeira parte do processo. A configuração de parâmetros específicos da MCF apresentada para a solução do PPMP_FAB é a que apresentou o melhor desempenho nos testes realizados no capítulo anterior.

O valor do número de formigas, o número de iterações por tentativa e o número de tentativas foram ajustados para o total de 3000 iterações. A **Tabela 5.3** apresenta os valores para os parâmetros do *ACSmntBL* utilizados para a solução do PPMP_FAB.

Tabela 5.3 Parâmetros para o *ACSmntBL* aplicados ao PPMP_FAB.

	Parâmetros	Valores
α	Peso da informação heurística	Constante = 1 *
β	Peso da informação de feromônio	Constante = 2 *
ρ	Atualização dos níveis de feromônio	Constante = 0.1 *
q0	Regra proporcional pseudo-aleatória (ACS)	Constante = 0.9 *
ξ	Decréscimo do feromônio (ACS)	Constante = 0.1 **
θ	Intervalo para busca local (iterações)	Constante = 1000
K	Número de formigas por iteração	Constante = 20
Iter	Número de iterações por tentativa	Constante = 30
Tent	Número de tentativas	Constante = 5
TotIter	Número total de iterações	Constante = 3000

* *Configuração 79*

** (Dorigo; Stützle, 2004)

5.5 Apresentação dos resultados

Os primeiros resultados apresentados são os da aplicação de todos os métodos ao PPMP_FAB. Percebe-se que o desempenho do *ACSmntBL* continua com o melhor resultado em termos de qualidade. A **Tabela 5.4** apresenta os resultados da aplicação global de todos os métodos sugeridos por este estudo para a solução do PPMP_FAB. Os valores das horas de vôo disponíveis demonstram que a melhor solução envolve uma relação de compromisso com as demais restrições do problema.

Tabela 5.4 Aplicação global dos métodos de solução para o PPMP_FAB.

Método	Penalidade	% Pior	Tempo (s)	Horas disponíveis totais, por esquadrão e por ano
FAB	465,00	402%	2,37	Total: 21431 ; [4893; 6000;][4538; 6000;]
Asmnt	147,56	59%	158,77	Total: 20699 ; [4648; 6000;][4651; 5400;]
ACSmnt	105,11	14%	86,70	Total: 20478 ; [4843; 5900;][4635; 5100;]
ASmntBL	95,69	3%	178,40	Total: 20014 ; [4164; 6000;][5300; 4550;]
PPBL	95,06	3%	21,66	Total: 20092 ; [4893; 5100;][4449; 5650;]
ACSmntBL	92,60	0%	155,27	Total: 19845 ; [4893; 5250;][4502; 5200;]

A **Tabela 5.5** apresenta a programação para as atividades de manutenção de 3º nível resultante da aplicação do *ACSmntBL* ao PPMP_FAB. A primeira linha logo abaixo da linha das matrículas de cada aeronave (*Anv1, Anv2, ..., Anv10*) representa o quantitativo de horas de vôo consumidas até o período i_0. A coluna da esquerda indica o período (*i*) para a frota de aviões (*j*). A coluna "R?" indica se recolhe ou não cada aeronave. Um "S" significa o período em que a aeronave foi recolhida. Para fins deste estudo, o período em que ocorre o recolhimento faz parte do número de períodos necessários para o cumprimento da atividade de manutenção. Caso um "S" apareça seguido de um valor que não "0", o valor expressa o quantitativo de horas de vôo desperdiçado pela aquela aeronave. Um "M" significa que a aeronave está indisponível e em manutenção. A coluna "H.R." indica o quantitativo de horas de vôo remanescentes para cada aeronave. Conforme os parâmetros do PPMP_FAB, a cada período que uma aeronave esteja na condição de disponível, a mesma voará 50 horas (*t*). Caso uma aeronave não disponha de *t* horas de vôo disponíveis, considera-se que voará o número de horas de vôo que estiverem disponíveis para aquele período.

Tabela 5.5 Programação para o 3º nível de manutenção

	Anv1	*Anv2*	*Anv3*	*Anv4*	*Anv5*	*Anv6*	*Anv7*	*Anv8*	*Anv9*	*Anv10*
	299	197	962	248	552	1193	216	1174	1108	620
i	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.
1	N 901	N 1003	N 238	N 952	N 648	N 7	N 984	N 26	N 92	N 580
2	N 851	N 953	N 188	N 902	N 598	**S 0**	N 934	**S 0**	N 42	N 530
3	N 801	N 903	N 138	N 852	N 548	**M 0**	N 884	**M 0**	**S 0**	N 480
4	N 751	N 853	N 88	N 802	N 498	**M 0**	N 834	**M 0**	**M 0**	N 430
5	N 701	N 803	N 38	N 752	N 448	**M 0**	N 784	**M 0**	**M 0**	N 380
6	N 651	N 753	**S 0**	N 702	N 398	**M 0**	N 734	**M 0**	**M 0**	N 330
7	N 601	N 703	**M 0**	N 652	N 348	N 1200	N 684	N 1200	**M 0**	N 280
8	N 551	N 653	**M 0**	N 602	N 298	N 1150	N 634	N 1150	N 1200	N 230
9	N 501	N 603	**M 0**	N 552	N 248	N 1100	N 584	N 1100	N 1150	N 180
10	N 451	N 553	**M 0**	N 502	N 198	N 1050	N 534	N 1050	N 1100	N 130
11	N 401	N 503	N 1200	N 452	N 148	N 1000	N 484	N 1000	N 1050	N 80
12	N 351	N 453	N 1150	N 402	N 98	N 950	N 434	N 950	N 1000	N 30
13	N 301	N 403	N 1100	N 352	N 48	N 900	N 384	N 900	N 950	**S 0**
14	N 251	N 353	N 1050	N 302	**S 0**	N 850	N 334	N 850	N 900	**M 0**
15	N 201	N 303	N 1000	N 252	**M 0**	N 800	N 284	N 800	N 850	**M 0**
16	N 151	N 253	N 950	N 202	**M 0**	N 750	N 234	N 750	N 800	**M 0**
17	N 101	N 203	N 900	N 152	**M 0**	N 700	N 184	N 700	N 750	**M 0**
18	N 51	N 153	N 850	N 102	**M 0**	N 650	N 134	N 650	N 700	N 1200
19	N 1	N 103	N 800	**S 52**	N 1200	N 600	N 84	N 600	N 650	N 1150
20	**S 0**	**S 0**	N 750	**M 0**	N 1150	N 550	**S 34**	N 550	N 600	N 1100
21	**M 0**	**M 0**	N 700	**M 0**	N 1100	N 500	**M 0**	N 500	N 550	N 1050
22	**M 0**	**M 0**	N 650	**M 0**	N 1050	N 450	**M 0**	N 450	N 500	N 1000
23	**M 0**	**M 0**	N 600	**M 0**	N 1000	N 400	**M 0**	N 400	N 450	N 950
24	**M 0**	**M 0**	N 550	N 1200	N 950	N 350	**M 0**	N 350	N 400	N 900
25	N 1200	N 1200	N 500	N 1150	N 900	N 300	N 1200	N 300	N 350	N 850

	Anv11	*Anv12*	*Anv13*	*Anv14*	*Anv15*	*Anv16*	*Anv17*	*Anv18*	*Anv19*	*Anv20*
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.
1	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200
2	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150
3	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100
4	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050
5	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000
6	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950
7	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900
8	**S 850**	**S 850**	**S 850**	N 850	N 850	N 850	N 850	N 850	N 850	N 850
9	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 800	N 800	N 800	N 800	N 800	N 800	N 800
10	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 750	N 750	N 750	N 750	N 750	N 750	N 750
11	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 700	N 700	N 700	N 700	N 700	N 700	N 700
12	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 650	N 650	N 650	N 650	N 650	N 650	N 650
13	N 1200	N 1200	N 1200	N 600	**S 600**	N 600	N 600	N 600	N 600	N 600
14	N 1150	N 1150	N 1150	N 550	**M 0**	N 550	N 550	N 550	N 550	N 550
15	N 1100	N 1100	N 1100	N 500	**M 0**	N 500	N 500	**S 500**	N 500	N 500
16	N 1050	N 1050	N 1050	N 450	**M 0**	N 450	N 450	**M 0**	N 450	N 450
17	N 1000	N 1000	N 1000	N 400	**M 0**	N 400	N 400	**M 0**	N 400	N 400
18	N 950	N 950	N 950	N 350	N 1200	N 350	N 350	**M 0**	N 350	N 350
19	N 900	N 900	N 900	N 300	N 1150	N 300	N 300	**M 0**	N 300	N 300
20	N 850	N 850	N 850	N 250	N 1100	N 250	N 250	N 1200	N 250	N 250
21	N 800	N 800	N 800	N 200	N 1050	N 200	N 200	N 1150	N 200	N 200
22	N 750	N 750	N 750	N 150	N 1000	N 150	N 150	N 1100	N 150	N 150
23	N 700	N 700	N 700	N 100	N 950	N 100	N 100	N 1050	N 100	N 100
24	N 650	N 650	N 650	N 50	N 900	**S 50**	N 50	N 1000	N 50	N 50
25	N 600	N 600	N 600	**S 0**	N 850	**M 0**	**S 0**	N 950	**S 0**	**S 0**

Por motivo de clareza e organização o restante da tabela está colocado logo abaixo da tabela para as aeronaves do 1º Esquadrão. As aeronaves do 2º Esquadrão começam todas com 100% das suas horas de vôo disponíveis e com as mesmas características da parte de cima da tabela.

A **Tabela 5.6** apresenta os valores da disponibilidade das aeronaves nos dois esquadrões para os dois anos que o problema engloba. Percebe-se que tanto a disponibilidade da frota quanto a dos esquadrões, estão bem acima dos 55% desejados pelo sistema.

Tabela 5.6 Disponibilidades dos esquadrões e da frota.

Programação para o 3º nível de manutenção (186 de penalidade em 155s)		
	Esquadrão 1	Esquadrão 2
Disponibilidade ano 1	83%	88%
Disponibilidade ano 2	75%	87%
	Frota	
Disponibilidade ano 1	0,85	
Disponibilidade ano 2	0,81	

No entanto, cabe uma explicação. Muito embora os índices de disponibilidade aparentemente indiquem uma solução "folgada" para o problema, vale ressaltar que os parâmetros de disponibilidade não incluem outras causas de indisponibilidades que não a manutenção preventiva de 3º nível.

Para o caso real, outras indisponibilidades estariam acontecendo devido às atividades de 1º e 2º níveis de manutenção, manutenção corretiva, falta de itens de suprimento, acidentes, etc..

A **Tabela 5.7** é semelhante à **Tabela 5.5**, no entanto apresenta a programação para as atividades de 3º nível escalonadas de acordo com a ordem cronológica dos recolhimentos. A aparência da tabela indica uma outra forma segundo o qual o PPMP é referenciado, ou seja, "problema de diagonal de manutenção".

A **Tabela 5.8** apresenta a programação para as atividades de 2º nível de manutenção resultante da aplicação do *ACSmntBL* sobre a solução previamente encontrada.

Tabela 5.7 Diagonal para o 3º nível de manutenção

	Anv6	*Anv8*	*Anv9*	*Anv3*	*Anv10*	*Anv5*	*Anv4*	*Anv7*	*Anv1*	*Anv2*
	1193	1174	1108	962	620	552	248	216	299	197
i	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.
1	N 7	N 26	N 92	N 238	N 580	N 648	N 952	N 984	N 901	N 1003
2	**S 0**	**S 0**	N 42	N 188	N 530	N 598	N 902	N 934	N 851	N 953
3	**M 0**	**M 0**	**S 0**	N 138	N 480	N 548	N 852	N 884	N 801	N 903
4	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 88	N 430	N 498	N 802	N 834	N 751	N 853
5	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 38	N 380	N 448	N 752	N 784	N 701	N 803
6	**M 0**	**M 0**	**M 0**	**S 0**	N 330	N 398	N 702	N 734	N 651	N 753
7	N 1200	N 1200	**M 0**	**M 0**	N 280	N 348	N 652	N 684	N 601	N 703
8	N 1150	N 1150	N 1200	**M 0**	N 230	N 298	N 602	N 634	N 551	N 653
9	N 1100	N 1100	N 1150	**M 0**	N 180	N 248	N 552	N 584	N 501	N 603
10	N 1050	N 1050	N 1100	**M 0**	N 130	N 198	N 502	N 534	N 451	N 553
11	N 1000	N 1000	N 1050	N 1200	N 80	N 148	N 452	N 484	N 401	N 503
12	N 950	N 950	N 1000	N 1150	N 30	N 98	N 402	N 434	N 351	N 453
13	N 900	N 900	N 950	N 1100	**S 0**	N 48	N 352	N 384	N 301	N 403
14	N 850	N 850	N 900	N 1050	**M 0**	**S 0**	N 302	N 334	N 251	N 353
15	N 800	N 800	N 850	N 1000	**M 0**	**M 0**	N 252	N 284	N 201	N 303
16	N 750	N 750	N 800	N 950	**M 0**	**M 0**	N 202	N 234	N 151	N 253
17	N 700	N 700	N 750	N 900	**M 0**	**M 0**	N 152	N 184	N 101	N 203
18	N 650	N 650	N 700	N 850	N 1200	**M 0**	N 102	N 134	N 51	N 153
19	N 600	N 600	N 650	N 800	N 1150	N 1200	**S 52**	N 84	N 1	N 103
20	N 550	N 550	N 600	N 750	N 1100	N 1150	**M 0**	**S 34**	**S 0**	**S 0**
21	N 500	N 500	N 550	N 700	N 1050	N 1100	**M 0**	**M 0**	**M 0**	**M 0**
22	N 450	N 450	N 500	N 650	N 1000	N 1050	**M 0**	**M 0**	**M 0**	**M 0**
23	N 400	N 400	N 450	N 600	N 950	N 1000	**M 0**	**M 0**	**M 0**	**M 0**
24	N 350	N 350	N 400	N 550	N 900	N 950	N 1200	**M 0**	**M 0**	**M 0**
25	N 300	N 300	N 350	N 500	N 850	N 900	N 1150	N 1200	N 1200	N 1200

	Anv11	*Anv12*	*Anv13*	*Anv15*	*Anv18*	*Anv16*	*Anv14*	*Anv17*	*Anv19*	*Anv20*
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.
1	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200	N 1200
2	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150	N 1150
3	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100	N 1100
4	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050	N 1050
5	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000	N 1000
6	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950	N 950
7	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900	N 900
8	**S 850**	**S 850**	**S 850**	N 850	N 850	N 850	N 850	N 850	N 850	N 850
9	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 800	N 800	N 800	N 800	N 800	N 800	N 800
10	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 750	N 750	N 750	N 750	N 750	N 750	N 750
11	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 700	N 700	N 700	N 700	N 700	N 700	N 700
12	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 650	N 650	N 650	N 650	N 650	N 650	N 650
13	N 1200	N 1200	N 1200	**S 600**	N 600	N 600	N 600	N 600	N 600	N 600
14	N 1150	N 1150	N 1150	**M 0**	N 550	N 550	N 550	N 550	N 550	N 550
15	N 1100	N 1100	N 1100	**M 0**	**S 500**	N 500	N 500	N 500	N 500	N 500
16	N 1050	N 1050	N 1050	**M 0**	**M 0**	N 450	N 450	N 450	N 450	N 450
17	N 1000	N 1000	N 1000	**M 0**	**M 0**	N 400	N 400	N 400	N 400	N 400
18	N 950	N 950	N 950	N 1200	**M 0**	N 350	N 350	N 350	N 350	N 350
19	N 900	N 900	N 900	N 1150	**M 0**	N 300	N 300	N 300	N 300	N 300
20	N 850	N 850	N 850	N 1100	N 1200	N 250	N 250	N 250	N 250	N 250
21	N 800	N 800	N 800	N 1050	N 1150	N 200	N 200	N 200	N 200	N 200
22	N 750	N 750	N 750	N 1000	N 1100	N 150	N 150	N 150	N 150	N 150
23	N 700	N 700	N 700	N 950	N 1050	N 100	N 100	N 100	N 100	N 100
24	N 650	N 650	N 650	N 900	N 1000	**S 50**	N 50	N 50	N 50	N 50
25	N 600	N 600	N 600	N 850	N 950	**M 0**	**S 0**	**S 0**	**S 0**	**S 0**

Tabela 5.8 Diagonal para 2º nível de manutenção

	Anv6	*Anv8*	*Anv9*	*Anv3*	*Anv10*	*Anv5*	*Anv4*	*Anv7*	*Anv1*	*Anv2*
	393	374	308	162	220	152	248	216	299	197
i	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R?	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.
1	N 7	N 26	N 92	N 238	N 180	N 248	N 152	**S 184**	**S 101**	**S 203**
2	S 0	S 0	N 42	N 188	N 130	N 198	N 102	**M 0**	**M 0**	**M 0**
3	M 0	M 0	**S 0**	N 138	**S 80**	N 148	N 52	N 400	N 400	N 400
4	M 0	M 0	M 0	N 88	**M 0**	N 98	**S 2**	N 350	N 350	N 350
5	M 0	M 0	M 0	N 38	N 400	N 48	**M 0**	N 300	N 300	N 300
6	M 0	M 0	M 0	S 0	N 350	**S 0**	N 400	N 250	N 250	N 250
7	N 400	N 400	M 0	M 0	N 300	**M 0**	N 350	N 200	N 200	N 200
8	N 350	N 350	N 400	M 0	N 250	N 400	N 300	N 150	N 150	N 150
9	N 300	N 300	N 350	M 0	N 200	N 350	**S 250**	N 100	N 100	N 100
10	N 250	N 250	N 300	M 0	N 150	N 300	**M 0**	**S 50**	N 50	**S 50**
11	N 200	N 200	N 250	N 400	N 100	N 250	N 400	**M 0**	**S 0**	**M 0**
12	N 150	N 150	N 200	N 350	N 50	N 200	N 350	N 400	**M 0**	N 400
13	N 100	N 100	N 150	N 300	S 0	N 150	N 300	N 350	N 400	N 350
14	**S 50**	N 50	N 100	N 250	M 0	S 100	N 250	N 300	N 350	N 300
15	**M 0**	**S 0**	N 50	N 200	M 0	M 0	N 200	N 250	N 300	N 250
16	N 400	**M 0**	**S 0**	N 150	M 0	M 0	N 150	N 200	N 250	N 200
17	N 350	N 400	**M 0**	N 100	M 0	M 0	N 100	N 150	N 200	N 150
18	N 300	N 350	N 400	N 50	N 400	M 0	N 50	N 100	N 150	N 100
19	N 250	N 300	N 350	**S 0**	N 350	N 400	S 0	N 50	N 100	N 50
20	N 200	N 250	N 300	**M 0**	N 300	N 350	M 0	S 0	S 50	S 0
21	N 150	N 200	N 250	N 400	N 250	N 300	M 0	M 0	M 0	M 0
22	N 100	N 150	N 200	N 350	N 200	N 250	M 0	M 0	M 0	M 0
23	N 50	N 100	N 150	N 300	N 150	N 200	M 0	M 0	M 0	M 0
24	**S 0**	N 50	N 100	N 250	N 100	N 150	N 400	M 0	M 0	M 0
25	**M 0**	**S 0**	N 50	N 200	N 50	N 100	N 350	N 400	N 400	N 400

	Anv11	*Anv12*	*Anv13*	*Anv15*	*Anv18*	*Anv16*	*Anv19*	*Anv20*	*Anv17*	*Anv14*
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.
1	N 400	N 400	N 400	N 400	N 400	N 400	N 400	N 400	N 400	N 400
2	N 350	N 350	N 350	N 350	N 350	N 350	N 350	N 350	N 350	N 350
3	N 300	N 300	N 300	N 300	N 300	N 300	N 300	N 300	N 300	N 300
4	N 250	N 250	N 250	N 250	N 250	N 250	N 250	N 250	N 250	N 250
5	N 200	N 200	N 200	N 200	**S 200**	N 200	**S 200**	**S 200**	N 200	N 200
6	N 150	N 150	N 150	N 150	**M 0**	N 150	**M 0**	**M 0**	N 150	N 150
7	N 100	N 100	N 100	N 100	N 400	**S 100**	N 400	N 400	**S 100**	N 100
8	S 50	S 50	S 50	N 50	N 350	**M 0**	N 350	N 350	**M 0**	N 50
9	M 0	M 0	M 0	**S 0**	N 300	N 400	N 300	N 300	N 400	**S 0**
10	M 0	M 0	M 0	**M 0**	N 250	N 350	N 250	N 250	N 350	**M 0**
11	M 0	M 0	M 0	N 400	N 200	N 300	N 200	N 200	N 300	N 400
12	M 0	M 0	M 0	N 350	N 150	N 250	N 150	N 150	N 250	N 350
13	N 400	N 400	N 400	S 300	N 100	N 200	N 100	N 100	N 200	N 300
14	N 350	N 350	N 350	M 0	N 50	N 150	N 50	N 50	N 150	N 250
15	N 300	N 300	N 300	M 0	S 0	N 100	**S 0**	**S 0**	N 100	N 200
16	N 250	N 250	N 250	M 0	M 0	N 50	**M 0**	**M 0**	N 50	N 150
17	N 200	N 200	N 200	M 0	M 0	**S 0**	N 400	N 400	**S 0**	N 100
18	N 150	N 150	N 150	N 400	M 0	**M 0**	N 350	N 350	**M 0**	**S 50**
19	N 100	N 100	N 100	N 350	M 0	N 400	N 300	N 300	N 400	**M 0**
20	N 50	N 50	N 50	N 300	N 400	N 350	N 250	N 250	N 350	N 400
21	**S 0**	**S 0**	**S 0**	N 250	N 350	N 300	N 200	N 200	N 300	N 350
22	**M 0**	**M 0**	**M 0**	N 200	N 300	N 250	N 150	N 150	N 250	N 300
23	N 400	N 400	N 400	N 150	N 250	N 200	N 100	N 100	N 200	N 250
24	N 350	N 350	N 350	N 100	N 200	S 150	N 50	N 50	N 150	N 200
25	N 300	N 300	N 300	N 50	N 150	M 0	S 0	S 0	S 100	**S 150**

Os dados da **Tabela 5.8** estão expostos da mesma forma que os dados na **Tabela 5.5**. As atividades de manutenção de 2º nível estão, na medida do possível, intercaladas com as de 3º nível. Vale a pena salientar que as horas de vôo disponíveis no período t_0 permanecem as mesmas que no mesmo período da tabela anterior. A diferença é que, muito embora a aeronave 3 (*Anv3*) possua 962 horas consumidas em seu intervalo de manutenção de 3º nível, para efeito da atividade de manutenção de 2º nível, ela está distante as mesmas 238 horas da próxima inspeção. Neste caso, toda vez que uma aeronave é recolhida para a atividade de manutenção de 3º nível, a atividade de manutenção de 2º nível também é executada. A **Tabela 5.9** apresenta os valores da disponibilidade das aeronaves nos dois esquadrões para os dois anos que o problema agora leva em consideração. Percebe-se que, tanto a disponibilidade da frota quanto a dos esquadrões, permanecem acima dos 55% desejados pelo sistema de manutenção avaliado.

Tabela 5.9 Disponibilidades dos esquadrões e da frota.

Programação para 3º e 2º nível de manutenção (212 de penalidade em 163s)		
	Esquadrão 1	Esquadrão 2
Disponibilidade ano 1	67%	76%
Disponibilidade ano 2	66%	73%
	Frota	
Disponibilidade ano 1	71%	
Disponibilidade ano 2	69%	

As observações descritas após a **Tabela 5.6** também são consistentes para os resultados apresentados na **Tabela 5.9** . Muito embora os índices de disponibilidade aparentemente indiquem uma solução "folgada" para o problema, vale ressaltar que os parâmetros de disponibilidade não incluem outras causas de indisponibilidades que não a manutenção preventiva de 3º nível. Novamente, para o caso real, outras indisponibilidades estariam acontecendo devido às atividades de 1º nível de manutenção, manutenção corretiva, falta de itens de suprimento, acidentes, etc..

5.6 Avaliação dos resultados

Os resultados apresentados relacionados com os testes feitos com um caso prático envolvendo uma frota com características distintas para dois esquadrões (muito embora não constitua uma frota heterogênea) demonstram que os métodos desenvolvidos para a solução do PPMP funcionam de forma bastante boa e rápida. A estratégia escolhida para a solução do problema de 3º nível de manutenção primeiro, para depois solucionar o problema de 2º nível, limita, muito provavelmente, a qualidade da solução encontrada, visto que o método não pode lidar sistemicamente com as restrições que afetam o problema como um todo. O total de penalidades não pode ser somado simplesmente para os dois testes devido aos diferentes parâmetros empregados em cada um. O método para o problema com duas oficinas distintas como sugerido acima ainda está em desenvolvimento e não pode ser apresentado nesta tese. O tempo total gasto (sem considerar-se a alimentação dos dados de cada problema) não chega a seis minutos de processamento, levando-se em consideração que a resposta engloba a programação para um horizonte de dois anos.

5.7 Resumo e conclusões do capítulo

Este capítulo trata dos testes efetuados em uma instância do problema no cenário de operações da FAB. Primeiramente são descritos todos os dados da instância do problema a ser testada com o método *ACSmntBL*. São apresentados os parâmetros referentes à frota de aeronaves empregada no problema com todas as suas características de manutenção. O problema a ser resolvido, o PPMP_FAB, é apresentado em seguida e, de forma mais realista (não necessariamente mais difícil) que os testes teóricos anteriores, aborda uma distribuição de horas de vôo iniciais diferente para cada esquadrão e também atividades de manutenção de 3º e 2º nível realizadas em duas oficinas diferentes. São descritas as estratégias de solução para o problema e apresentados os resultados. Primeiramente são apresentados os resultados da programação das atividades de 3º nível de manutenção e depois os resultados para o 2º nível de manutenção. A avaliação dos resultados e demais considerações são apresentados por último.

Os testes serviram para concluir que o *ACSmntBL* pode ser aplicado de imediato para a solução de instâncias semelhantes ao PPMP_FAB. Os resultados demonstram as possibilidades de, inclusive resolverem-se dois problemas de programação para uma mesma aeronave com a estratégia proposta. O *ACSmntBL* foi o procedimento que melhor qualidade de solução apresentou em praticamente todos os testes, no entanto não foi o mais rápido. É conclusão deste capítulo e deste estudo que, caso a tomada de decisão fosse praticada no nível operacional (decisão diária ou contingencial), os outros procedimentos poderiam apresentar melhor resultados. O *ACSmntBL* mostrou-se mais eficaz na busca pelas melhores soluções, enquanto que o PPBL o mais eficiente.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DA TESE

6.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é o de apresentar as conclusões de todo o desenvolvimento desta tese. Além das conclusões mencionadas, esta parte do trabalho apresenta o conjunto de sugestões para pontos importantes que carecem ser abordados para completar o conhecimento sobre os assuntos aqui tratados. O capítulo inicia-se com as conclusões e contribuições de todo o trabalho. As conclusões abrangem os principais resultados obtidos para a comunidade científica, principalmente os estudos de problemas complexos como os de programação da manutenção preventiva de uma frota de aeronaves. São descritos também os resultados para o setor de defesa e, em especial, para a Força Aérea Brasileira e, dado que o trabalho não esgota o assunto, o texto aborda uma série de sugestões que orientam o desenvolvimento de futuras pesquisas.

6.2 Conclusões e contribuições do trabalho

Esta tese tem como objetivo a definição do Problema de Programação da Manutenção Preventiva – PPMP de frotas de veículos e da exploração dos métodos meta-heurísticos para sua solução, com especial atenção voltada para a aplicação da Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF.

Os estudos desenvolvidos durante este trabalho contribuíram para a comunidade científica por definir e formular, matematicamente, o PPMP, no sentido de melhor compreender as relações existentes em problemas de manutenção preventiva em uma frota de veículos, especialmente no caso de uma força aérea. O trabalho descreve as características e a formulação matemática do problema de programação da manutenção preventiva em veículos – PPMP.

Verifica-se que o problema não está bem definido na literatura, pois não foi encontrado um similar exato para o PPMP. Existe grande quantidade de estudos voltados para modelos de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, mas que não abordam sistemicamente as peculiaridades abordadas no PPMP.

A pesquisa inovou por definir um problema de importância significativa para o gerenciamento das atividades de manutenção que se encontra muito pouco explorado na literatura científica.

Os estudos desenvolvidos concluíram que o PPMP não pode ser resolvido com facilidade nas organizações encarregadas do gerenciamento das atividades de manutenção devido à complexidade verificada na estruturação do problema e a presença de características não lineares em sua formulação. A complexidade na procura por soluções para o PPMP aumenta de modo exponencial na medida em que aumenta a dimensão do problema. As não linearidades comprometem a utilização de procedimentos clássicos de programação linear. O caráter dinâmico presente em sua estruturação sugere que os métodos de solução devam ser capazes de, ainda que parcialmente, levar tais características em conta no desenvolvimento de procedimentos de procura por soluções.

Todos os problemas semelhantes ao PPMP estudados apresentam complexidade combinatorial exponencial e características NP - Difícil e NP - Completo (Even, Itaí e Shamir, 1976); (Cooper; Kingston, 1996); (Dorigo; Stützle, 2004); (Rossi-Doria *et al*, 2004); (Rardin; Uszoy, 2001) e sugerem a utilização de procedimentos aproximados para os casos práticos.

O PPMP modelado de acordo com os problemas de alocação de cursos em uma universidade (*timetabling*) ou de acordo com problemas PRAM, os quais são NP – Difícil (Even, Itaí e Shamir, 1976); (Cooper; Kingston, 1996); (Dorigo; Stützle, 2004); (Rossi-Doria *et al*, 2004); (Rardin; Uszoy, 2001), apresenta as mesmas características NP – Difícil para sua solução.

Este trabalho de pesquisa concluiu, dadas as similaridades observadas durante os estudos, pela modelagem dos procedimentos de solução para o PPMP baseado nos problemas de alocação de cursos em universidades (*timetabling*).

Este trabalho conclui que devido às características do PPMP de: complexidade exponencial, não linearidades, semelhança com problemas que apresentam características *NP-Difícil* e *NP-Completo* e o caráter dinâmico presente em sua estruturação e na busca por soluções, os métodos de solução devam ser meta-heurísticos e capazes de levar em conta as características dinâmicas no desenvolvimento de procedimentos de procura por soluções.

O trabalho descreve as definições de métodos aproximados conhecidos como procedimentos heurísticos e meta-heurísticos propensos a serem utilizados nesta tese. Especial atenção foi dada às conceituações dos mecanismos de intensificação, diversificação e a capacidade de fazer uso das informações do próprio problema na busca por soluções para a seleção de que procedimentos meta-heurísticos utilizar.

O desenrolar dos estudos sobre os procedimentos meta-heurísticos mostrou que o PPMP é candidato para testes com procedimentos que possam se valer de mecanismos de diversificação para escapar de ótimos locais em sua solução, mas que mantenham boa capacidade de intensificação nos procedimentos de busca local paralelamente.

A solução do PPMP necessita de um procedimento que possa ser adaptado à estrutura do problema, incluindo suas características dinâmicas, e possa utilizar todo tipo de informação que os dados de entrada do problema possa apresentar.

Dado o caráter *NP-Difícil* das instâncias e os bons resultados alcançados em aplicações semelhantes (como no caso dos problemas de alocação de cursos em universidades), conclui-se que a MCF pode apresentar boas soluções para o PPMP.

A pesquisa inova no sentido de utilizar um procedimento relativamente novo (ainda na fase de desenvolvimento de seu ciclo de aplicações) a um problema nunca explorado com seus mecanismos de busca por soluções.

Este trabalho contribui e inova ao descrever:

- a estruturação dos procedimentos e das adaptações necessárias à MCF para a solução do PPMP;
- o desenvolvimento de testes computacionais empregados para a verificação do desempenho dos métodos de solução para o PPMP com a utilização de procedimentos não paramétricos;

O trabalho demonstrou as possibilidades de se implementar os procedimentos da MCF a outro problema complexo. Muito embora ainda continue a ser explorada, a MCF solucionou muito bem o PPMP. O fato da maior parte das referências sobre problemas de manutenção não abordar o PPMP, por si só, simboliza boa parte das contribuições voltadas para a ciência neste aspecto.

Os estudos anteriores levaram à conclusão de que, dentre os métodos testados, o método *ACSmntBL* se mostrou o mais eficaz e promissor para a solução do PPMP.

Os testes não paramétricos para a comparação entre os parâmetros de ajuste para a MCF indica que existe diferença entre diferentes configurações de parâmetros para o *ACSmntBL*, porém somente existem distinções satisfatórias entre grupos de configurações. Este trabalho concluiu que o desempenho do *ACSmntBL* deve ser testado em um caso prático com a configuração de parâmetros que apresentou o melhor desempenho nos testes, mas que demais aplicações práticas devem testar grupos de configurações.

Este trabalho inova ao aplicar uma abordagem científica a um caso prático do PPMP (o P*PMP_FAB*) no cenário da Força Aérea Brasileira - FAB.

São descritos todos os dados da instância do problema a ser testada com o método *ACSmntBL* de forma mais abrangente e completa que nos testes teóricos anteriores. O *PPMP_FAB* aborda uma distribuição de horas de vôo iniciais diferente para cada esquadrão e também atividades de manutenção de 3º e 2º nível.

São descritas as estratégias de solução para o problema e apresentados os resultados. Primeiramente é apresentada a solução parcial para as atividades de 3º nível de manutenção, depois os resultados para o 2º nível de manutenção. O trabalho inova ao abordar a programação de manutenção com dois tipos distintos de atividades e

conclui que existe espaço para melhorias no desempenho apresentado caso o método de solução possa abordar o problema com mais de uma oficina.

A atividade de planejamento dos gerentes do ciclo de vida dos veículos passa a contar com um método que os habilite a delinear melhor todo o espectro de atividades relacionadas no PPMP. Os operadores dos veículos se beneficiam com a possibilidade de contarem com um planejamento baseado nas medidas de desempenho sistêmicas e que realmente orientam o desempenho das atividades de manutenção.

Depreende-se, do acima exposto, que a metodologia proposta pode ser empregada de imediato para apoiar a tomada de decisão relacionada à programação da manutenção das frotas de aeronaves da FAB. Há que considerar, no entanto, possíveis extensões à pesquisa, que poderão estender e aprimorar a utilização da metodologia proposta.

6.3 Recomendações para futuras pesquisas

A primeira sugestão deste trabalho é que os problemas e métodos trabalhados nesta tese continuem a ser pesquisados. Tanto o campo das meta-heurísticas como o campo dos problemas complexos e de manutenção são fartos em termos de possibilidades de desenvolvimento.

Para se tornar mais completo, o PPMP precisa abordar mais características de um sistema de manutenção. Vale a pena destacar as limitações encontradas na aplicação do *ACSmntBL* a uma instância real onde o problema teria sido melhor resolvido se o método de solução levasse em consideração mais de uma oficina. Naquele caso seria possível resolver o problema considerando-se muito mais aspetos e limitações.

Outro aspecto a ser abordados nas aplicações práticas e nos estudos é o da definição dos valores para as penalidades (*wa, wa´, wb, wc e wc´)*. Neste trabalho, as penalidades foram baseadas nas constatações e experiência do setor de planejamento da divisão técnica do Parque de Material Aeronáutico de São Paulo - PAMA-SP, que é a organização da FAB responsável pelo gerenciamento do ciclo de vida das aeronaves F-5E/F, C-115 e F-103. A frota da FAB não conta somente com o PAMA-SP como oficina central de suas aeronaves, assim como a frota de operadores

de outras aeronaves e veículos contam com características que precisam ser apreciadas para o melhor ajuste possível das funções de penalidade. Um estudo dos custos envolvidos nas atividades de manutenção pode agregar muito valor à qualidade das soluções encontradas para o PPMP.

Os métodos empregados neste trabalho só foram comparados entre si. Seria bastante interessante a implementação de outros métodos de solução para o PPMP além da MCF. Uma das sugestões surgidas durante os trabalhos de teste foi o de desenvolver um método semelhante ao *ACSavings* para o PPMP. Outras meta-heurísticas e outros procedimentos híbridos envolvendo várias estratégias podem ser experimentados para o PPMP.

Uma outra linha de desenvolvimento poderia utilizar outros procedimentos para a tarefa de intensificar a procura por soluções. Uma sugestão é a de uma aplicação híbrida da MCF com outra meta-heurística combinada, como algoritmo genético, busca tabu ou recozimento simulado.

Muito embora pareça desaconselhável, alguns autores sugerem que se teste a utilização do *MAX-MIN Ant System* da MCF sem fazer uso da informação heurística (Rossi-Doria et al, 2002) (Socha; Samples; Manfrin, 2003); (Socha, Knowles, Samples, 2002). O procedimento ficaria mais rápido e só conta com a regra pseudo-aleatória e as marcas de feromônio deixadas pelo caminho na busca das formigas pelas melhores soluções.

Uma outra idéia é a de desenvolver um método que se utilize dos níveis de suprimento de items reparáves como limitante das capacidades de manutenção. Para o PPMP só foram consideradas as restrições de espaço nas oficinas e de mão-de-obra, mas não os níveis de estoque ou de giro dos itens mais caros. Dessa forma, poder-se-ia relacionar as políticas de estoque empregadas com as atividades que as demandam. O número de atividades de manutenção estaria restrito aos níveis de suprimento disponíveis para a frota. Implementa-se uma restrição no código que limita o número de revisões de acordo com os estoques de material disponíveis (separadamente da capacidade da oficina). Então, passaria a existir mais um limite ao invés de só o da capacidade efetiva e de projeto da oficina.

ANEXO 1

Resultados completos da solução do *PPMP_A25P25sq1h1*

Dados do problema PPMP_A25P25sq1h1

Dados dos esquadrões

Num. Do Esquad.	Aeronave inicial	Disponibilidade média desejada
1	1	0,55
2	9	0,55
3	18	0,55

Horas de vôo iniciais de cada aeronave:

3,6	206,1	357,5	301,6	49,0	142,6	29,7	139,8	70,0	372,7	160,2
185,8	319,3	163,0	74,01	290,0	170,5	218,3	382,0	44,0	173,8	112,3
288,2	61,6	213,0								

Resultados

Método	Penalidade	Tempo	Disponibilidades
PPBL	646	6,2	Total: 11560
PP	1291	8,126953E-02	Total: 11783
FAB	997	5,126953E-02	Total: 11970
ASmnt	1351	339	Total: 11363
ACSmnt	807	159	Total: 11850
ASmntBL	644	196	Total: 11552
ACSmntBL	580	149	Total: 11654

Melhor solução obtida: Ant Colony System com Busca Local

0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
0 0 2 0 0 0 0 0 0 2 0 0 2 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0
0 1 2 0 0 0 0 0 0 2 0 0 2 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0
0 2 2 0 0 0 0 0 0 2 0 0 2 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0
0 2 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0
0 2 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 2 0 0
0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 2 0 1 0 0 0 0 2 0 0
0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 2 0 2 0 0 0 0 2 0 1
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 2 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 2
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 0 2 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 2
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 2 2 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 2
0 0 0 0 0 1 0 2 0 0 2 2 0 0 0 0 2 0 0 0 2 0 0 0 0
0 0 0 0 0 2 0 2 0 0 0 0 0 0 1 0 2 0 0 0 2 1 0 0 0
0 0 0 0 0 2 0 2 0 0 0 0 0 0 2 0 2 0 0 0 2 2 0 0 0
0 0 0 0 0 2 0 0 1 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 2 0 1 0
0 0 0 0 0 0 1 0 2 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 1 0 2 0 2 0
1 0 0 0 1 0 2 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 2 0
2 0 0 0 2 0 2 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 2 0
2 0 0 0 2 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0
2 0 0 0 2 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 1 0 0 0 0 0 0 2 0 0 2 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 2 0 0 0 0 0 0 2 0 0 2 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0
0 0 2 0 0 0 0 0 0 2 0 0 2 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0
0 1 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0
0 2 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0

ANEXO 2

Configurações de parâmetros para a MCF

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
alfa	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1
beta	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1
rho	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7
q0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Configurações de parâmetros para a MCF

	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
alfa	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5
beta	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1	1
rho	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1
q0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7

Configurações de parâmetros para a MCF

	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
alfa	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2
beta	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1	1	1
rho	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7
q0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Configurações de parâmetros para a MCF

	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
alfa	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1
beta	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5
rho	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1
q0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9

Configurações de parâmetros para a MCF

	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
alfa	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5
beta	1,5	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5	1,5
rho	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
q0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
alfa	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2
beta	1,5	2	2	2	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2	2	2
rho	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
q0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Testes não-paramétricos utilizados na solução do PPMP

	Data	FAB	Ping-Pong	ASmnt 3	ACSmnt	ASmntBL	ACSmntBL	PPBL	$[R(Xij)]^2$
	PPMP_A10P25sq1h1	6	7	5	3	2	1	4	140
	PPMP_A10P25sq1h2	3	4	5	6	7	1	2	140
	PPMP_A10P25sq2h2	6	7	5	3	2	1	4	140
	PPMP_A10P25sq2h1	6	7	5	4	3	1	2	140
	PPMP_A10P25sq3h2	6	7	5	4	3	1	2	140
	PPMP_A10P25sq3h1	6	7	5	2	3	1	4	140
	PPMP_A25P25sq1h2	6	5	7	4	3	1	2	140
	PPMP_A25P25sq1h1	6	5	7	4	3	1	2	140
	PPMP_A25P25sq2h2	6	5	7	4	3	1	2	140
	PPMP_A25P25sq2h1	6	5	7	4	3	1	2	140
	PPMP_A25P25sq3h1	5	6	7	3	4	2	1	140
	PPMP_A25P25sq3h2	6	5	7	4	2	1	3	140
	PPMP_A40P25sq1h1	7	6	5	4	3	1	2	140
	PPMP_A40P25sq1h2	5	7	6	4	2	1	3	140
	PPMP_A40P25sq2h1	5	6	7	4	2	3	1	140
	PPMP_A40P25sq2h2	5	7	6	4	1	2	3	140
	PPMP_A40P25sq3h1	5	6	7	4	1	3	2	140
	PPMP_A40P25sq3h2	5	7	6	4	2	3	1	140
	Rj	**100**	**109**	**109**	**69**	**49**	**26**	**42**	**2520**
	Rj^2	10000	11881	11881	4761	2401	676	1764	
	SRj^2	**43364**							

H_0: As configurações se equivalem?

b=	18	**$A_{2=}$**	2520
k=	7	**$B_{2=}$**	2409,111111
$K_{1=}$	6	**$T_{2=}$**	60,27 (T statitstics)
$K_{2=}$	102	**F (a, K_1, K_2)=**	**2,984** (critical value)
		Overall P-value	0,0100000
		Reject H_0 ?	**Yes** (T_2>F)

a	$t_{1-a/2,k2}$	$T_{critical}$
0,95	1,98350	**12,409**

R> $T_{critical}$; next level

Note: Adapted from Conover, J. 1980: 300

$$|R_{fn-1} - R_f| > t_{1-\alpha/2}\left[\frac{2b(A_2 - B_2)}{(b-1)(k-1)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

MULTIPLE COMPARISON		
Config	**Rank**	**I**
ACSmntBL	26	A
PPBL	42	dif
ASmntBL	49	FALSO
ACSmnt	69	dif
FAB	100	dif
Ping-Pong	109	FALSO
ASmnt 3	109	FALSO

Testes não-paramétricos utilizados na comparação das configurações do ACSmntBL

	Data	1	2	3	4	5	6	7	8	...	107	108	$[R(Xij)]^2$
	PPMP_A10P25sq1h1	51	84	69	47	78	90	38	55	...	20	4	0
	PPMP_A10P25sq1h2	64	80	99	60	67	86	44	70	...	31	8	0
	PPMP_A10P25sq1h22	81	86	82	21	92	89	2	77	...	41	6	0
	PPMP_A10P25sq2h1	20	24	66	3	33	45	15	22	...	43	87	0
	PPMP_A10P25sq2h2	67	73	81	55	50	61	18	46	...	44	7	0
	PPMP_A10P25sq3h1	68	52	37	24	31	89	2	13	...	51	58	0
	PPMP_A10P25sq3h2	20	13	25	8	21	15	1	12	...	94	90	0
	PPMP_A25P25sq1h1	98	88	101	77	97	91	67	78	...	41	10	0
	PPMP_A25P25sq1h2	66	78	96	59	82	75	51	73	...	33	24	0
	PPMP_A25P25sq2h1	93	94	100	59	95	79	53	65	...	15	18	0
	PPMP_A25P25sq3h1	78	77	98	75	71	88	44	72	...	31	24	0
	PPMP_A25P25sq3h2	68	95	88	47	77	86	59	73	...	26	20	0
	PPMP_A40P25sq1h1	76	49	73	68	80	91	53	101	...	19	20	0
	PPMP_A40P25sq1h2	41	44	9	27	4	28	82	17	...	46	35	0
	PPMP_A40P25sq2h1	73	1	31	10	7	99	77	23	...	101	38	0
	PPMP_A40P25sq2h2	1	4	49	46	93	60	43	18	...	78	74	0
	PPMP_A40P25sq3h1	49	101	91	78	76	63	36	90	...	5	14	0
	PPMP_A40P25sq3h2	72	86	76	82	80	71	70	90	...	10	3	0
	Rj	**1086**	**1129**	**1271**	**846**	**1134**	**1306**	**755**	**995**	...	**729**	**540**	**0**
	Rj^2	1179396	1274641	1615441	715716	1285956	1705636	570025	990025	...	531441	291600	
	SRj^2	**10159877**											

H_0: As configurações se equivalem?

b=	18	**$A_{2=}$**	7663572	
k=	108	**$B_{2=}$**	6574187,56	
$K_{1=}$	107	**$T_{2=}$**	12,48	(T statitstics)
$K_{2=}$	1819	**F (a, K_1, K_2)**	**1,360**	(critical value)
		Overall P-va	0,0100000	
		Reject H_0 ?	**Yes**	(T_2>F)

a	$t_{1-a/2,k2}$	$T_{critical}$	MULTIPLE COMPARISON		
0,95	1,96127	**287,980**	**Config**	**Rank**	**I**
R> $T_{critical}$; next level			79	307	FALSO
Note: Adapted from Conover, J. 1980: 300			76	336	FALSO
			80	384	FALSO
$\lvert R_{fn-1} - R_f \rvert > t_{1-\alpha/2}\left[\frac{2b(A_2 - B_2)}{(b-1)(k-1)}\right]^{\frac{1}{2}}$			88	408	FALSO
			77	413	FALSO
			...	...	...
			75	583	FALSO
			105	607	Diferente
			...	...	...