

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/314072911>

Meta-Heurística Colônia de Formigas para Solução do Problema de Programação de Manutenção Preventiva de Frotas de Veículos.

Conference Paper · September 2006

CITATIONS

11

READS

1,428

2 authors:



Fernando Teixeira Mendes Abrahão

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brazil, São José dos Campos

12 PUBLICATIONS 57 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Nicolau Dionísio Fares Gualda

University of São Paulo

116 PUBLICATIONS 279 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

A META-HEURÍSTICA COLÔNIA DE FORMIGAS PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE FROTAS DE VEÍCULOS

Fernando Teixeira Mendes Abrahão

Instituto de Logística da Aeronáutica – ILA, Guarulhos, São Paulo, Brasil, ferabr@ig.com.br

Nicolau Dionísio Fares Gualda

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, São Paulo, Brasil, ngualda@usp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta a definição do Problema de Programação da Manutenção Preventiva – PPMP de frotas de veículos e a exploração de métodos meta-heurísticos para a sua solução, com especial atenção para a aplicação da Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF. O problema pode ser definido como a busca pela melhor forma de se programar a manutenção preventiva para frotas de veículos, dadas restrições operacionais. O problema representa tarefa complexa e carente de métodos de solução que levem a uma programação otimizada, considerando o aspecto sistêmico e múltiplas restrições. 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. O PPMP trata do quadro geral do ponto de vista do planejador das atividades da frota e leva em conta características que se apresentam como restrições para o problema de quando recolher veículos para suas atividades de manutenção preventiva. A Meta-heurística Colônia de Formigas – MCF (do inglês *Ant Colony Optimization – ACO*) foi selecionada como base para a modelagem e apresentou bons resultados para a solução de problemas-teste. O trabalho incorpora a formulação matemática do PPMP, a estruturação dos procedimentos e as adaptações da MCF para sua solução. Foram desenvolvidos procedimentos híbridos utilizando a estrutura básica da MCF combinada com procedimentos de intensificação (busca local), estes desenvolvidos especificamente para o PPMP. Os métodos propostos foram aplicados a um caso prático envolvendo a programação da manutenção de uma frota de vinte aeronaves. São descritas as estratégias de solução, apresentados os resultados para dois níveis diferentes de manutenção e sugeridas extensões da metodologia proposta. Embora as aplicações da metodologia relacionem-se a uma frota de aeronaves, a sua aplicação cabe também para a programação da manutenção preventiva de frotas de outros tipos de veículos.

PALAVRAS-CHAVE: Logística, Manutenção, Meta-heurística Colônia de Formigas

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta a definição do Problema de Programação da Manutenção Preventiva de frotas de veículos (PPMP) e a exploração de métodos meta-heurísticos para a sua solução, com especial atenção voltada para a aplicação da Meta-heurística Colônia de Formigas (MCF). O PPMP não está bem definido na literatura e os estudos existentes são, geralmente, voltados para problemas e modelos de confiabilidade. No entanto, nenhum deles lida com os requisitos sistêmicos e peculiaridades presentes no PPMP. O PPMP pode ser brevemente descrito como a busca pela melhor programação da manutenção preventiva para uma frota de veículos, dadas restrições operacionais. A solução para o PPMP está em encontrar uma seqüência de calendário viável de recolhimentos de veículos para manutenção programada, 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. Do ponto de vista prático, em se tratando de problemas como o PPMP, os gerentes de frotas de veículos ainda precisam considerar o caráter dinâmico presente em muitos casos. Em outras palavras, como se não bastasse a complexidade intrínseca de cada enunciado, os eventos, na medida em que sucedem, agregam novas características e parâmetros aos já complexos problemas sendo resolvidos.

O trabalho está organizado da seguinte forma: o **Item 2** aborda a definição e principais aspectos do PPMP. O **Item 3** descreve as características dos procedimentos meta-heurísticos considerados na solução do problema. As aplicações, testes e análise dos resultados estão descritos no **Item 4**. O **Item 5** apresenta as conclusões e recomendações do trabalho.

2. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA – PPMP DE UMA FROTA DE VEÍCULOS

O 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.) carente de atividades de manutenção programada e sujeito a múltiplas restrições. No entanto, grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura envolvendo problemas de manutenção preventiva, 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.) (Blanchard *et al*, 1995). O PPMP 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. Como exemplo, no caso de uma frota de aeronave, pode ser que não seja possível recolher todos os veículos ao mesmo tempo, pois as linhas aéreas ficariam sem aeronaves 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.

Percebe-se que o PPMP pode ser aplicado a diferentes níveis de planejamento e todas as descrições acima impõem restrições ao planejamento das operações com a frota, na medida em que toda atividade de manutenção tem que ser executada à custa da utilização de recursos e da indisponibilidade dos veículos em manutenção para as operações cotidianas. A **Tabela 1** apresenta os parâmetros e variáveis do PPMP. Para o caso mais simples, com apenas um tipo de avião e uma só oficina, a solução está em encontrar:

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

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

que minimize:

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

onde:

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

$$b_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{\text{DispVer}_i}{\text{AvDisp}} \right) \times wb & \text{se } \text{DispVer}_i < \text{AvDisp} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} \frac{(m - m\text{Disp}_{(i-1)j})}{m} \times wc \times x_{ik} & \text{se } m\text{Disp}_{(i-1)j} > 0 \\ wc'(1 - x_{ij}) & \text{se } m\text{Disp}_{ij} = m\text{Disp}_{(i-1)j} = 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.5)$$

As restrições (2.3), (2.4) e (2.5) representam as fórmulas que calculam as penalidades incorridas pelo modelo na busca por soluções. Cada uma delas descreve os custos envolvidos com as restrições de capacidade das oficinas (2.3), com os requisitos de disponibilidade da frota (2.4) e com a taxa de utilização do ciclo de vida dos veículos (2.5). As restrições (2.3), (2.4) e (2.5) demonstram descontinuidades presentes na função objetivo e nas restrições do problema, fato que limita a utilização de procedimentos de programação linear para a solução do PPMP. Os valores de wa , wa' , wb , wc e wc' correspondem aos fatores de penalidade aplicados no problema e podem ser ajustados para o PPMP de acordo com as constatações e experiência do setor de planejamento da gerencia da frota em questão. O trabalho de Abrahão (2006) apresenta a formulação completa e detalhada do PPMP.

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* e *Open Shop*). Dos problemas estudados, os problemas de alocação em cursos de uma universidade e os problemas de roteamento de aeronaves para manutenção, que contêm um problema de partição como um subproblema (Sarac *et al.*, 2004),

apresentam maiores similaridades com o PPMP. Todos os problemas semelhantes ao PPMP estudados apresentam complexidade combinatorial exponencial e características *NP-Difícil* e *NP-Completo* (Even *et al*, 1976); (Dorigo; Stützle, 2004); (Rossi-Doria *et al*, 2004); (Rardin; Uzsoy, 2001) e sugerem a utilização de procedimentos aproximados para os casos práticos. Faz-se necessário esclarecer os pontos onde os PPMP diferem e as consequências 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 pesquisa com casos do PCV e PRV (Cunha *et al*, 2002); (Abrahão; Gualda, 2004).

2.1 PPMP Frota Homogênea – PPMP-FH

No caso mais simples do PPMP, somente estão presentes veículos de um mesmo tipo. Neste caso, o problema é resolvido para um conjunto de parâmetros sempre iguais para todos os veículos (veículos todos iguais). Uma limitação deste modelo é observada quando do envelhecimento da frota e, para os veículos mais desgastados, determinadas revisões necessitam ser feitas em intervalos menores que os dos demais. Ou seja, na medida em que a frota pode não “envelhecer” de modo uniforme, alguns veículos podem se desgastar antes que outros. Nesse caso, estudos de confiabilidade podem recomendar uma diminuição nos intervalos de manutenção programada para os veículos mais “envelhecidos”. O problema passa a representar uma particularidade do PPMP para uma frota heterogênea, comentado a seguir.

2.2 PPMP Frota Heterogênea – PPMP-FHET

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

2.3 PPMP Múltiplos Operadores – PPMP-ME;

Para o caso onde mais de um operador utilize um mesmo 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 operador e a programação das atividades de manutenção precisa considerar as restrições adicionadas pela presença de mais de um operador.

2.3 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 dos veículos para as atividades de manutenção. O PPMP-MO apresenta o desafio de, no processo de busca por soluções, alocar veículos a oficinas para, daí então, encontrar uma programação exequível 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 características de complexidade e não linearidades verificadas e a semelhança com problemas que apresentam características *NP-Difícil* e *NP-Completo*, 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 caráter dinâmico presente na estruturação e na busca por soluções no PPMP sugere que os métodos de solução devam ser capazes de levar em conta tais características, ainda que parcialmente, no desenvolvimento de procedimentos de busca por soluções. Tendo em vista o que foi apresentado, conclui-se que cabe a utilização de procedimentos meta-heurísticos para modelagem e solução do PPMP.

3. META-HEURISTICA COLÔNIA DE FORMIGAS

A MCF baseia-se no comportamento das formigas na busca por alimentos. 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. Para tal, as formigas lançam mão do depósito de uma substância chamada feromônio, enquanto caminham. O processo é chamado de estigmergia (do inglês *stigmergy*) e modifica o ambiente para permitir a comunicação entre as formigas e a colônia, assim como sua volta para o ninho (Dorigo, 1992); (Dorigo; Gambardella, 1997); (Dorigo; Gambardella, 1997a); (Dorigo; Di Caro, 1999); (Dorigo; Stützle, 1999). As formigas tendem a utilizar as melhores rotas entre o ninho e pontos externos onde se encontra a comida. Esse processo de otimização é função da estigmergia. Na medida em que mais e mais formigas utilizam uma rota particular para alcançar a comida, maior se torna a concentração de feromônio. 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 ou até ótimas entre pontos de origem e término (Dorigo; Stützle, 2004).

De acordo com Jones (2003), cada formiga constrói uma solução movendo-se através de uma seqüência finita de estados sucessivos. Os movimentos são selecionados a partir de uma regra de transição de estados que se baseia na memória da formiga e na quantidade de feromônio acumulada nas trilhas. Observa-se que pontos não muito visitados no início serão menos ainda com o passar do tempo. Para evitar uma rápida convergência de todas as formigas em direção à 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. 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 pela colônia. Expressa-se 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. O trabalho de Gambardella (2004) detalha como a MCF é comparada com busca heurística em grafos,

simulação *Monte Carlo*, redes neurais e *Evolutionary Computation* – EC. A **Figura 1** apresenta a MCF em pseudocódigo, de acordo com Dorigo e Di Caro (1999). Maiores detalhes sobre os procedimentos e respectiva implementação computacional são encontrados no trabalho de Abrahão (2006).

4 METODOLOGIA, TESTES E APLICAÇÕES

A metodologia empregada para a solução do PPMP envolve a implementação dos procedimentos meta-heurísticos e dos demais mecanismos de solução, bem como as descrições das instâncias utilizadas nos testes, as aplicações dos métodos e os resultados alcançados. Os testes envolvem a verificação do desempenho dos métodos de solução desenvolvidos e propostos para o PPMP e procedimentos não-paramétricos para verificar se existem diferenças entre eles. Testes não-paramétricos são também utilizados para a comparação entre os parâmetros aplicados aos procedimentos, verificando-se a presença ou não de diferenças entre diferentes configurações.

4.1 Método Heurística Construtiva - *HC*

A estratégia representa o modo como normalmente o problema é resolvido na prática. Para cada veículo, os recolhimentos são programados de acordo com a proximidade do final das horas disponíveis até a próxima atividade de manutenção preventiva. O procedimento é heurístico e muito se assemelha ao procedimento “vizinho mais próximo” utilizado na solução de instâncias modestas do Problema do Caixeiro Viajante – PCV (Reinelt, 1994). No caso do PPMP, considera-se como “vizinho mais próximo” o veículo que está mais próximo de completar suas horas 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 o primeiro veículo que completa suas horas é o primeiro a ser recolhido.

4.2 Método Heurística Busca Local - *HBL*

Os métodos de busca local 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. O processo termina quando não for possível mais realizar nenhuma troca que resulte em melhoria. Para o PPMP, primeiramente as trocas são efetuadas 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 e o método pára quando, por duas iterações consecutivas, nenhuma melhoria for observada.

4.3 Método *ASmnt*

ASmnt (de *Ant System* manutenção) é o nome dado pelos autores 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). 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* (Dorigo e Stützle, 2004). No *ASmnt*, o feromônio fica depositado nos nós e não nos arcos, como no PCV. 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 casos do PCV assimétrico, pois a escolha de um nó x anterior pode fazer com que os arcos entre dois outros nós mudem de valor. 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.

4.4 Método *ACSmnt*

ACSmnt (de *ACS* manutenção) é o nome dado pelos autores 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, ainda que 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 fica depositado nos nós e não nos arcos, como no PCV.

4.5 Método Heurística Construtiva e Busca Local – *HCBL*

O procedimento começa com a geração de uma solução baseada em algum método de construção. A solução gerada é aceita, independente das penalidades incorridas e de sua viabilidade. O método *HCBL* nada mais é do que a junção de uma heurística de construção de soluções, no caso o método *HC*, com uma outra heurística de melhoria de soluções, neste caso o próprio procedimento *BL*. O *HCBL* 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 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. 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 método difere dos procedimentos

K-opt (Lin; Kerninghan, 1973) 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 de uma posição.

4.6 Método ASmnt Busca Local - *ASmntBL*

O *ASmntBL* é inspirado em uma adaptação implementada com sucesso na utilização da MCF para solução do PCV e PRV (Abrahão; Gualda, 2004); (Dorigo; Stützle, 2004). O método incorpora os procedimentos *BL* intercalados a cada conjunto θ de iterações completadas por cada formiga. A aplicação dos procedimentos *BL* se repete sucessivas vezes, até que nenhuma melhoria seja observada.

4.7 Método *ACSmnt Busca Local - *ACSmntBL**

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

4.8 Testes Comparativos para os Métodos

Foram geradas 18 instâncias representativas das características do PPMP encontradas em frotas de aeronaves militares para os testes comparativos. A **Tabela 2** e a **Tabela 3** apresentam a configuração de parâmetros utilizados para os procedimentos de teste e os parâmetros utilizados para a geração das instâncias. A **Tabela 4** apresenta o resultado das comparações feitas entre os métodos propostos e indica, para as características dos testes como aqui apresentados, que o procedimento *ACSmntBL* apresenta os resultados mais consistentes. Os testes não-paramétricos (Golden e Stewart, 1985); (Conover, 1980) indicam que há evidencia estatística para confirmar que o procedimento *ACSmntBL* realmente apresentou melhores resultados que os demais procedimentos. Uma vez que os resultados da MCF podem ser significativamente afetados pela qualidade da escolha de parâmetros para os procedimentos (Dorigo e Stützle, 2004), faz-se necessário explorar quais seriam as melhores configurações de parâmetros para uma eventual aplicação prática. 108 configurações de parâmetros foram geradas de acordo com o apresentado na **Tabela 5** e testadas nas 18 instâncias do problema. Os resultados dos testes comparativos (não-paramétricos) indicam que não é possível distinguir a configuração que obteve o melhor desempenho das demais; no entanto, é possível distinguir-se grupos de configurações com diferentes desempenhos. O conjunto de testes aplicados e respectivos resultados verificados permitem concluir que as estratégias de solução propostas são capazes de encontrar soluções viáveis para o PPMP e, dentre os procedimentos propostos, que o *ACSmntBL* apresenta os melhores resultados, associado à configuração de parâmetros “79”.

4.8 Aplicação a um Caso Prático

A **Tabela 6** apresenta os dados da instância PPMP_FAB. Um caso tipicamente encontrado no gerenciamento das atividades de manutenção programada vivenciada por uma frota de aeronaves militares. O valor das penalidades descrito na **Tabela 7**, a qual apresenta características da frota em questão, vem de várias entrevistas com os gerentes de uma das organizações encarregadas de solucionar o PPMP para a FAB. Esses valores podem ser ajustados conforme cada problema. 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. O passo seguinte consiste da aplicação do *ACSmntBL* 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. 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 para a programação de 3º nível. A diferença é que, por exemplo, 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.

Os resultados apresentados para uma frota com características distintas e 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 sistematicamente 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 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. A **Tabela 8** apresenta o resultado final após as aplicações dos procedimentos para as atividades de 3º e 2º níveis. A **Tabela 9** apresenta como um dos resultados, 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% esperados pelo sistema. Maiores detalhes sobre a aplicação dos procedimentos propostos ao PPMP_FAB podem ser encontrados em Abrahão (2006).

5. CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E RECOMENDAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho resume os principais aspectos de uma pesquisa de doutorado voltada para a modelagem e a solução do problema de programação da manutenção preventiva em uma frota

de veículos, especialmente no caso de aeronaves. Dentre os métodos propostos e testados, o método *ACSmntBL*, que combina um procedimento baseado na MCF com uma heurística de trocas para intensificação, mostrou-se o mais eficaz para a solução do *PPMP* e foi aplicado com sucesso a um caso prático. Destaques deste trabalho incluem: a formulação matemática do *PPMP*; a implementação de procedimentos baseados na aplicação da MCF a problemas de alocação de cursos em uma universidade (*timetabling*) para a solução do *PPMP*; testes não-paramétricos para comparar as diferentes estratégias propostas na solução do *PPMP* e testes não-paramétricos para ajuste de parâmetros do método *ACSmntBL*. Sugestões para trabalhos futuros incluem: explorar uma estratégia de solução com o *PPBL* como heurística de construção para a aplicação posterior do *ACSmntBL*; considerar mais de uma oficina na modelagem e solução do *PPMP*; e comparar o *ACSmntBL* com outros procedimentos meta-heurísticos, como Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*), Busca Tabu (*Tabu Search*) e Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm*).

Referências Bibliográficas

- ABARA, J. (1989) *Applying integer linear programming to the fleet assignment problem*. *Interfaces*, v 19, p20-28.
- ABRAHÃO, F. T. M. (2006) *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*. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 139p. (Tese de Doutoramento).
- ABRAHÃO, F. T. M.; GUALDA, N. D. F. (2004) *Aplicação da meta-heurística colônias de formigas e das heurísticas 2-opt e 3-opt na solução de problemas logísticos da força aérea brasileira*. In: XXVI SBPO, São João Del Rei, MG. 2204. *Anais: Trigésimo sexto congresso da sociedade brasileira de pesquisa operacional*. Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2004. p856 - 866
- BLANCHARD, B. S.; PETERSON, E. L.; VERMA, D. (1995) *Introduction to Maintainability*. In: *Maintainability: A key to effective serviceability and maintenance management*. Nova York: John Willey & Sons, Inc. p15-16.
- BLUM, C.; ROLI, A. (2003) *Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison*. ACM Computing Surveys, 35(3), 268-308.
- CUNHA, C.B.; BONASSER, U. O.; ABRAHÃO, F. T. M. (2002) *Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o problema do caixeiro viajante*. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 16., Natal, RN, 2002. *Anais: Panorama nacional da pesquisa em transportes*. Rio de Janeiro: ANPET, 2002. v.2, p. 105-117.
- DORIGO, M. (1992) *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Tese de Doutoramento. Departamento de Eletrônica. Politécnica de Milão, Milão.
- DORIGO, M.; DI CARO, G. (1999) *The ant colony optimization meta-heuristic*. Em D. Corne, M. Dorigo, & F. Glover (Eds.), *New ideas in optimization*. Maidenhead, UK: McGraw-Hill.
- DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. (1997) *Ant colonies for the traveling salesman problem*. BioSystems, 43:73 - 81.
- DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. (1997a) *Ant Colony System: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1(1), 53–66.
- DORIGO, M.; STÜTZLE, T. (1999) *ACO Algorithms for the Traveling Salesman Problem*. Em K. Miettinen P. Neittaanmäki, J. Periaux e M.M. Müakelüa, editors, *Evolutionary Algorithms in Engineering and*

Computer Science: Recent Advances in Genetic Algorithms, Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Programming and Industrial Applications. Editora John Wiley & Sons.

DORIGO, M.; STÜTZLE, T. (2004) *Ant colony optimization*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2004. 305p.

EVEN, S.; ITAI, A.; SHAMIR, A. (1976) *On the complexity of timetabling and multicommodity flow problems*. SIAM Journal of Computation, v. 5, p691-703.

GAMBARDELLA, L. M. (2004) *Engineering complex systems: Ant Colony Optimization (and in general natural inspired metaheuristic) to model and to solve complex dynamic problems*. IDSIA, Istituto Dalle Molle di studi sull'Intelligenza Artificiale Galleria 2, 6928 Manno, Lugano, Switzerland. luca@idsia.ch.

JONES, M. T. (2003) *A.I. Application Programming*. Hingham, Massachusetts: Charles River Media, Inc. p. 363. ISBN 1-58450-278-9.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. (1973) *An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem*, Operations Research, v.21, p.498-516.

LORENZONI, L. L.; AHONEN, T. N.; ALVARENGA, A. G. (2001) **Colônia de Formigas para o Problema de Escalonamento com Restrições de Recursos**. XXXIII SBPO Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Campos do Jordão. p. 1001-1010.

RARDIN, R. L.; UZSOY, R. (2001) *Experimental evaluation of heuristic optimization algorithms: a tutorial*. *Journal of Heuristics*, v.7, n.3, p.261-304.

REINELT, G. (1994). *The Traveling Salesman – Computational Solutions for TSP Applications*. Berlin: Springer-Verlag.

ROSSI-DORIA, O. et al. (2002) *A comparison of the performance of different metaheuristics on the timetabling problem*. In: BURKE, E. K. e DE CAUSMAECKER, P. 4th International Conference on Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2002).

SARAC, A.; BATTA, R; RUMP, C. M. (2005) *A branch-and-price approach for operational aircraft maintenance routing*. European Journal of Operational Research. Em Impressão. Disponível online 15 Agosto 2005 <<http://www.sciencedirect.com/science>> 2005.

Tabela 1 Resumo dos dados para formulação do PPMP.

Símbolos	Parâmetros
T_{tot}	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)
$DispVer_i$	$1 - \frac{\sum_{j=1}^J x_{ij}}{J} = \text{Disponibilidade da frota verificada para o período } i$

Tabela 2 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)

Tabela 3 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 = $h_1(400); h_2(400)$

Tabela 4 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	
HC	6	3	6	6	6	6	6	6	6	5	6	7	5	5	5	5	5	100	
BL	7	4	7	7	7	5	5	5	5	6	5	6	7	6	7	6	7	109	
$ASmnt$	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	3	4	4	4	4	4	4	4	69	
$ASmntBL$	2	7	2	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	2	1	1	1	3	2	3	3	26	
$HCBL$	4	2	4	2	2	4	2	2	2	1	3	2	3	1	3	2	1	42	

Tabela 5 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

Tabela 6 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 = $h_1(1200); 0$

Tabela 7 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 (w_c)	20**
Penalidade por aeronave ociosa (w_c')	10**
Penalidade por baixar disponibilidade da frota (w_b)	10**
Penalidade superutilização dos Parques (w_a)	5**
Penalidade subutilização dos Parques (w_a')	1**

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

** (PAMA-SP, 2005)

Tabela 8 Diagonal para 2º e 3º nível de Manutenção.

<i>Anv8</i>	<i>Anv9</i>	<i>Anv3</i>	<i>Anv10</i>	<i>Anv5</i>	<i>Anv4</i>	<i>Anv7</i>	<i>Anv1</i>	<i>Anv2</i>
374	308	162	220	152	248	216	299	197
R? H.R.	R?	R? H.R.	R? H.R.	R? H.R.				
N 26	N 92	N 238	N 180	N 248	N 152	S 184	S 101	S 203
S 0	N 42	N 188	N 130	N 198	N 102	M 0	M 0	M 0
M 0	S 0	N 138	S 80	N 148	N 52	N 400	N 400	N 400
M 0	M 0	N 88	M 0	N 98	S 2	N 350	N 350	N 350
M 0	M 0	N 38	N 400	N 48	M 0	N 300	N 300	N 300
M 0	M 0	S 0	N 350	S 0	N 400	N 250	N 250	N 250
N 400	M 0	M 0	N 300	M 0	N 350	N 200	N 200	N 200
N 350	N 400	M 0	N 250	N 400	N 300	N 150	N 150	N 150
N 300	N 350	M 0	N 200	N 350	S 250	N 100	N 100	N 100
N 250	N 300	M 0	N 150	N 300	M 0	S 50	N 50	S 50
N 200	N 250	N 400	N 100	N 250	N 400	M 0	S 0	M 0
N 150	N 200	N 350	N 50	N 200	N 350	N 400	M 0	N 400
N 100	N 150	N 300	S 0	N 150	N 300	N 350	N 400	N 350
N 50	N 100	N 250	M 0	S 100	N 250	N 300	N 350	N 300
S 0	N 50	N 200	M 0	M 0	N 200	N 250	N 300	N 250
M 0	S 0	N 150	M 0	M 0	N 150	N 200	N 250	N 200
N 400	M 0	N 100	M 0	M 0	N 100	N 150	N 200	N 150
N 350	N 400	N 50	N 400	M 0	N 50	N 100	N 150	N 100
N 300	N 350	S 0	N 350	N 400	S 0	N 50	N 100	N 50
N 250	N 300	M 0	N 300	N 350	M 0	S 0	S 50	S 0
N 200	N 250	N 400	N 250	N 300	M 0	M 0	M 0	M 0
N 150	N 200	N 350	N 200	N 250	M 0	M 0	M 0	M 0
N 100	N 150	N 300	N 150	N 200	M 0	M 0	M 0	M 0
N 50	N 100	N 250	N 100	N 150	N 400	M 0	M 0	M 0
S 0	N 50	N 200	N 50	N 100	N 350	N 400	N 400	N 400
<i>Anv12</i>	<i>Anv13</i>	<i>Anv15</i>	<i>Anv18</i>	<i>Anv16</i>	<i>Anv19</i>	<i>Anv20</i>	<i>Anv17</i>	<i>Anv14</i>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
R? H.R.								
N 400								
N 350								
N 300								
N 250								
N 200	N 200	N 200	S 200	N 200	S 200	S 200	N 200	N 200
N 150	N 150	N 150	M 0	N 150	M 0	M 0	N 150	N 150
N 100	N 100	N 100	N 400	S 100	N 400	N 400	S 100	N 100
S 50	S 50	N 50	N 350	M 0	N 350	N 350	M 0	N 50
M 0	M 0	S 0	N 300	N 400	N 300	N 300	N 400	S 0
M 0	M 0	M 0	N 250	N 350	N 250	N 250	N 350	M 0
M 0	M 0	N 400	N 200	N 300	N 200	N 200	N 300	N 400
M 0	M 0	N 350	N 150	N 250	N 150	N 150	N 250	N 350
N 400	N 400	S 300	N 100	N 200	N 100	N 100	N 200	N 300
N 350	N 350	M 0	N 50	N 150	N 50	N 50	N 150	N 250
N 300	N 300	M 0	S 0	N 100	S 0	S 0	N 100	N 200
N 250	N 250	M 0	N 50	M 0	M 0	M 0	N 50	N 150
N 200	N 200	M 0	M 0	S 0	N 400	N 400	S 0	N 100
N 150	N 150	N 400	M 0	M 0	N 350	N 350	M 0	S 50
N 100	N 100	N 350	M 0	N 400	N 300	N 300	N 400	M 0
N 50	N 50	N 300	N 400	N 350	N 250	N 250	N 350	N 400
S 0	S 0	N 250	N 350	N 300	N 200	N 200	N 300	N 350
M 0	M 0	N 200	N 300	N 250	N 150	N 150	N 250	N 300
N 400	N 400	N 150	N 250	N 200	N 100	N 100	N 200	N 250
N 350	N 350	N 100	N 200	S 150	N 50	N 50	N 150	N 200
N 300	N 300	N 50	N 150	M 0	S 0	S 0	S 100	S 150

Tabela 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%	

```

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)
10       deposita feromônio no arco visitado();
11       atualiza lista local da formiga();
12     termina se
13   M= atualiza memória interna();
14   termina enquanto
15   se (atualização global de feromônio)
16     para cada arco visitado do
17       deposita feromônio no arco visitado();
18       atualiza lista local da formiga();
19     termina para cada
20   termina se
21   morre();
22 termina procedimento

```

Figura 1 – Pseudocódigo da MCF (Dorigo; Di Caro, 1999)