

# PESQUISA OPERACIONAL APLICADA NA OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA DIAGONAL DE MANUTENÇÃO DAS AERONAVES F-5M DO 1º GAVCA

Mauro Martins Alves Machado \*  
Antônio de Biaso Junior †  
Jardel Figueira da Silva ‡

## RESUMO

Este trabalho aborda o problema relacionado ao planejamento da diagonal de manutenção preventiva através da aplicação das ferramentas de Pesquisa Operacional (PO). Tal abordagem se faz necessária com o intuito de tornar eficiente o planejamento da diagonal de manutenção do 1º Grupo de Aviação de Caça (1º GAvCa), que ainda hoje é realizado de forma manual. O objetivo deste trabalho é propor um método que minimize a quantidade de aeronaves que estão em manutenção preventiva simultaneamente, maximizando a disponibilidade da frota e otimizando a utilização da mão de obra disponível. Este intento foi conseguido por meio da revisão bibliográfica de pesquisas relacionadas ao assunto e posterior sugestão de um modelo matemático adaptado às necessidades do 1º GAvCa. Com esse estudo, foi possível desenvolver um método para auxiliar os gestores no planejamento da diagonal de manutenção, reduzindo os erros associados à atual metodologia utilizada e tornando o processo mais eficiente, com o objetivo final de elevar a capacidade operacional através da maximização da disponibilidade da frota.

**Palavras-chave:** Branch-and-Cut. Pesquisa Operacional. Diagonal de Manutenção.

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda o problema relacionado à elaboração da diagonal de manutenção preventiva das aeronaves F-5M do 1º Grupo de Aviação de Caça (1º GAvCa), utilizando ferramentas de Pesquisa Operacional. O Problema de Programação da Manutenção Preventiva (PPMP), segundo Abrahão (2006, p. 2), “pode ser brevemente descrito como a busca pela melhor programação da manutenção preventiva para uma frota de veículos, dada as restrições operacionais”. A solução do PPMP hoje é feita de forma empírica pelos gerentes do projeto F-5M, resultando em uma diagonal de manutenção

---

\* Graduado em Ciências Aeronáuticas, Graduado em Administração Pública. Aluno do Curso de Pós-Graduação em Logística na UNIS – MG. E-mail: machadommam@fab.mil.br

† Graduado em Ciências Náuticas. MBA em Logística Empresarial. Mestre em Logística. Professor Mestre Convidado do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS/MG. E-mail: abiaso@hotmail.com

‡ Graduado em Engenharia Aeronáutica. Mestre em Ciências e Tecnologias Espaciais. Consultor do Instituto de Logística da Aeronáutica - ILA. E-mail: jardeljfs@fab.mil.br

preventiva ineficiente, que devido ao excesso de manutenções simultâneas acaba sobrecarregando as oficinas. Essa metodologia utilizada atualmente pelos gestores reduz a disponibilidade das aeronaves e impossibilita o cumprimento das metas mensais de horas de voos, prejudicando o treinamento dos pilotos e diminuindo a capacidade operacional do esquadrão aéreo.

Tal abordagem se justifica como forma de otimizar o planejamento do momento exato que cada aeronave deverá realizar as inspeções programadas, causando o menor impacto possível na prontidão operacional da frota, bem como utilizando de forma racional a mão de obra necessária para a execução dos serviços de manutenção.

Conforme Diretriz do Comando da Aeronáutica (COMAER) sobre a Concepção Estratégica “Força Aérea 100”, sem o planejamento adequado é impossível que a Força Aérea seja capaz de cumprir sua missão de manter a soberania do espaço aéreo e integrar o território nacional, com vistas à defesa da pátria (BRASIL, 2016).

É importante ressaltar também a contribuição do trabalho para os gestores responsáveis pela elaboração da diagonal de manutenção dos demais esquadrões aéreos da Força Aérea Brasileira (FAB), pois o modelo desenvolvido servirá como alicerce para a solução do PPMP de qualquer frota de aeronaves.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão, tornando simples e precisa a elaboração da diagonal de manutenção das aeronaves F-5M, com o intuito de maximizar e adequar a disponibilidade da frota para o cumprimento do esforço aéreo mensal planejado, além de otimizar a utilização da mão de obra de manutenção.

Este propósito foi conseguido a partir da revisão bibliográfica dos estudos relacionados ao PPMP e, baseado nesses conhecimentos, com a sugestão de uma metodologia que possa ser utilizada no planejamento das manutenções preventivas das aeronaves do 1º GA vCa.

## **2 PANORAMA ATUAL**

O 1º GA vCa é um esquadrão aéreo que faz parte da estrutura organizacional da Ala 12 e opera uma versão modernizada dos caças americanos Northrop F-5. Possui uma frota de 11 aeronaves, sendo 10 do tipo monoposto (somente um tripulante) e uma biposto (dois tripulantes) utilizada nas instruções dos novos pilotos.

As Alas são organizações de Força Aérea responsáveis por realizar o preparo e emprego dos esquadrões aéreos, prover suporte logístico, bem como garantir a segurança e defesa de suas instalações. As Alas seguem uma numeração de acordo com sua localidade sede, o número 12 está associado com Santa Cruz na cidade do Rio de Janeiro (BRASIL, 2016).

Dentro da estrutura das Alas, os esquadrões aéreos são organizações essencialmente operacionais, responsáveis pelo adestramento dos pilotos e emprego das aeronaves como plataforma d'armas. Já as atividades logísticas são responsabilidades dos Grupos Logísticos (GLOG), estruturas responsáveis pela manutenção das aeronaves, bem como pela elaboração da diagonal de manutenção preventiva (BRASIL, 2016).

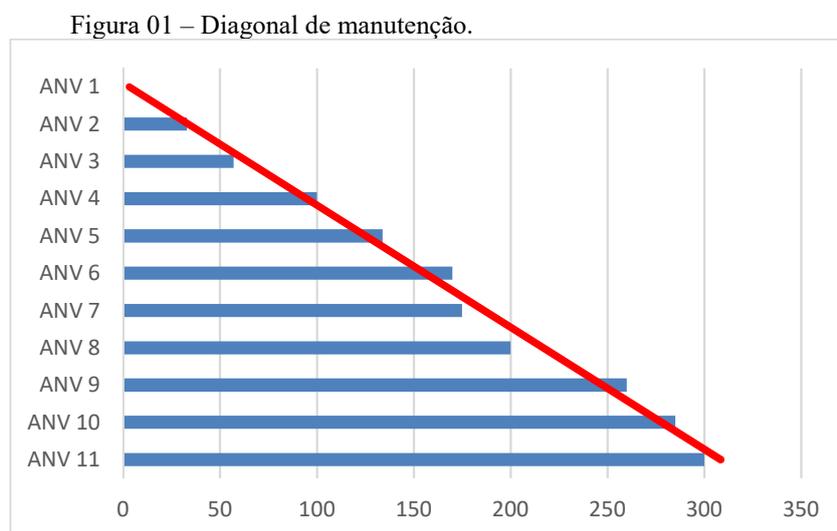
As Alas são subordinadas ao Comando de Preparo (COMPREP), que é o órgão de Direção Setorial do Comando da Aeronáutica responsável pelo planejamento e controle do preparo dos esquadrões aéreos. Esse grande comando, com base no orçamento anual da FAB, define o esforço aéreo de cada Esquadrão, que são as horas que a unidade irá voar durante o período de um ano (BRASIL, 2016).

O planejamento da diagonal de manutenção preventiva abrange um horizonte de um ano e é baseado na previsão de voo mensal do 1º GAvCa e na capacidade de apoio logístico do GLOG. O planejamento de horas de voo mensal do 1º GAvCa, por sua vez, é realizado pelo oficial de operações, que dilui o esforço aéreo pelos meses existente no ano, levando em consideração as missões idealizadas pelo COMPREP, quantidade de pilotos disponíveis em cada período e os voos necessários para a formação dos alunos. Historicamente, a distribuição das horas é crescente até os meses de julho e agosto, voltando a reduzir até o mês de dezembro.

No organograma de cada GLOG existe uma seção de Planejamento e Controle (PLACON), onde um oficial é responsável pelo planejamento da diagonal de manutenção preventiva e pelo acompanhamento do seu cumprimento no decorrer do ano. Atualmente, a diagonal de manutenção é elaborada de forma empírica, em que o responsável, através de tentativa e erro, busca encontrar uma solução satisfatória, aliando as necessidades do Setor de Operações do Esquadrão Aéreo com as limitações de material e recursos humanos da linha de manutenção do GLOG.

Com base na distribuição de horas mensais, o oficial do PLACON planeja o que cada aeronave F-5M irá voar por dia, tentando manter um intervalo constante de horas entre as mesmas, evitando que entrem em inspeção simultaneamente. A Figura 01

representa um exemplo hipotético de uma diagonal de manutenção para 10 aeronaves (ANV), sendo que no eixo x está localizado a quantidade de horas restantes para a próxima inspeção e no eixo y estão as aeronaves escalonadas em ordem crescente de horas disponíveis para o voo. A linha vermelha representa a diagonal de manutenção.



Fonte: Autor, 2018.

De acordo com Manual do Comando da Aeronáutica de Manutenção:

Compreende-se como Diagonal de Manutenção a programação do uso das aeronaves, deixando-as em uma linha diagonal quando colocadas em um gráfico como acima descrito, de modo a possibilitar o controle e cumprimento das inspeções programadas em épocas distintas e permitir tornar mais homogênea a carga de trabalho das Equipes de Manutenção (BRASIL, 2014, p. 121).

O trabalho do oficial responsável pelo PLACON é extremamente dependente de suas habilidades e, principalmente, de sua experiência na área. Diversos problemas podem ocorrer em consequência de um deficiente planejamento da diagonal de manutenção preventiva, por exemplo: baixa disponibilidade da frota em meses com uma grande quantidade horas alocadas, ocasionando o não cumprimento da meta de horas mensais; deficiente treinamento dos pilotos devido à incapacidade de realizar determinados tipos de missões, como missões de BVR\*; meses com uma grande quantidade de aeronaves disponíveis, porém com uma capacidade ociosa na linha de

---

\* BVR (*Beyond Visual Range*) - Sigla referente às missões de combate além do alcance visual. Em média, esse tipo de missão necessita no mínimo de três aeronaves, sendo a quantidade ideal de seis, para um treinamento eficaz.

manutenção; aeronaves em inspeções simultâneas, extrapolando a capacidade das oficinas e ocasionando um incremento no tempo de duração das inspeções; dificuldade no dimensionamento da mão de obra da linha de manutenção, devido à alternância entre períodos de ociosidade com de alta demanda de aeronaves em inspeções; e perda da prontidão operacional ocasionada pela baixa disponibilidade da frota.

Os tipos de inspeções realizadas pelas as aeronaves F-5M da FAB e os respectivos tempos de duração estão representados na Tabela 01.

Tabela 01 – Parâmetro de realização das inspeções programadas.

TIPOS DE INSPEÇÃO	NÍVEL	INTERVALO	Hxh	DIAS
PRÉ VOO	ORG	-	1	1H
INTER VOO	ORG	-	1	2H
PÓS VOO	ORG	-	1	3H
INSP 25H	ORG	25H	15	8H
INSP 150H	BASE	150H	84	2
INSP 300H	BASE	300H	2160	30
INSP 600H	BASE	600H	2448	35
INSP 900H	BASE	900H	2160	30
INSP CORROSÃO	BASE	150H	24	2
INPP – 1200H	PARQUE	1200h	8004	58

Fonte: (BRASIL, 2014, p. 34).

As inspeções múltiplas de 300 horas são nível base, ou seja, são inspeções mais simples, em que o próprio operador possui condições de realizá-las e demandam uma imobilização da aeronave por um período de tempo considerável. As inspeções múltiplas de 150 horas e de corrosão também são inspeções nível base, porém a quantidade de tarefas a serem cumpridas são menores, indisponibilizando a aeronave por, no máximo, dois dias. As inspeções múltiplas de 1200 horas requerem pessoal e ferramentas especializadas, além de demandarem uma grande quantidade de tempo, por isso são realizadas nos Parques. As inspeções de nível orgânico são manutenções necessárias para suportar diariamente a atividade aérea (BRASIL, 2014).

A elaboração da diagonal de manutenção preventiva das aeronaves do 1º GAvCa é baseada nas inspeções que causam um impacto maior na disponibilidade da frota, por isso são consideradas somente as inspeções múltiplas de 300 horas (300H, 600H, 900H e 1200H).

### **3 MATERIAL E MÉTODO**

Este trabalho é classificado como uma pesquisa exploratória, pois, segundo Gil (2002, p. 41), “pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições”. As pesquisas exploratórias são caracterizadas pela revisão da literatura e análises de exemplos que facilitem o entendimento do problema (GIL, 2002).

O trabalho está delimitado a estudar e propor melhorias à elaboração da diagonal de manutenção do 1º GAvCa. Neste sentido, será proposta uma alternativa para o PPMP baseada em possíveis soluções existentes na literatura.

Inicialmente, foi elaborado um modelo matemático, em seguida, através do auxílio de ferramentas computacionais, foi utilizado um método de otimização exato na resolução desse modelo e, por fim, os resultados obtidos foram avaliados de forma qualitativa, através da comparação com uma diagonal de manutenção ideal.

### **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos importantes para o entendimento do assunto, bem como a revisão de alguns trabalhos que tratam sobre a solução do PPMP.

#### **4.1 MANUTENÇÃO**

De acordo com o Manual de Manutenção da FAB:

Manutenção é o conjunto de ações ou medidas necessárias à preservação do material, para mantê-lo em serviço, restituir suas condições de utilização, prover a máxima segurança em sua operação e estender sua vida útil tanto quanto seja desejável e viável técnica e economicamente [...]. Uma definição mais simples, abrangente e atual relata ser o processo de assegurar que um sistema realiza continuamente sua função projetada no nível pretendido de confiabilidade e segurança (BRASIL, 2014, p. 18).

No contexto desse trabalho, manutenção pode ser resumida como a ação de restaurar um sistema às condições de operação para a qual ele foi projetado. Podendo ser dividida em Corretiva ou Preventiva (BLANCHARD, 2003).

- Manutenção Preventiva: São manutenções programadas que possuem o papel de garantir que o sistema mantenha seu nível de funcionamento através da prevenção de

falhas. São realizadas em intervalos definidos pelo fabricante ou por publicações do COMAER. Geralmente está associada a serviços de lubrificação, substituição de itens que estão próximos ao tempo limite da vida útil ou sofreram um desgaste, além de pequenos ajustes e calibrações (BRASIL, 2014).

- Manutenção Corretiva: São manutenções que ocorrem após ser detectada uma falha inesperada, com o intuito de reestabelecer o funcionamento de um sistema. Esse tipo de intervenção ocorre de forma não programada e somente depois que uma falha foi identificada ou quando existe uma suspeita de falha em algum componente da aeronave. Os serviços de manutenção corretiva geralmente estão relacionados às substituições ou reparos dos itens defeituosos (BRASIL, 2014).

O foco deste trabalho é o planejamento das manutenções preventivas, que podem estar relacionadas com o uso da aeronave ou com as inspeções calendáricas. As inspeções baseadas no uso são definidas pelo intervalo de horas de voo disponíveis entre duas inspeções consecutivas. As inspeções calendáricas são realizadas em um intervalo de tempo pré-determinado, independentemente do uso da aeronave.

## 4.2 DISPONIBILIDADE

Disponibilidade é uma métrica muito utilizada pelos gestores da FAB para medir a prontidão operacional de uma determinada frota. Por definição, está relacionada com a probabilidade de que um sistema esteja operativo quando for solicitado para o uso (BLANCHARD, 2003).

O cálculo de disponibilidade é realizado através da divisão do tempo que a aeronave permaneceu operante, pelo somatório deste com o tempo que aeronave sofreu manutenção, incluindo manutenções corretivas, preventivas e atrasos logísticos.

Durante esse estudo, para efeito do cálculo de disponibilidade, serão desconsiderados os tempos das manutenções corretivas e atrasos logísticos.

## 4.3 PESQUISA OPERACIONAL

A PO surgiu durante a guerra, através do estudo da utilização de recursos militares limitados e, com o passar do tempo, devido o surgimento de novas tecnologias, a PO

evoluiu, passando a ser amplamente utilizada como ferramenta de apoio à decisão nas diversas áreas do conhecimento (BELFIORE E FÁVERO, 2013).

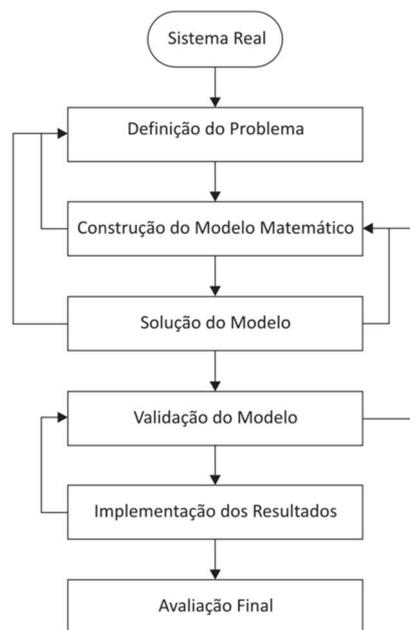
Belfiore e Fávero (2013, p. 2) definem Pesquisa Operacional como “a utilização de um método científico (modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais) para a tomada de decisões.”

Já a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO) define PO como “a área de conhecimento que estuda, desenvolve e aplica métodos analíticos avançados para auxiliar na tomada de melhores decisões nas mais diversas áreas de atuação humana” (SOBRAPO, 2018).

Pesquisa Operacional é uma área extremamente abrangente, voltada para solução de problemas complexos reais. No estudo da Pesquisa Operacional, encontramos diversos métodos de resolução de problemas, como por exemplo, simulação, programação linear, teoria dos grafos, heurísticas e meta-heurísticas.

Para que seja possível a resolução de um problema por meio de alguma ferramenta da PO o primeiro passo é a construção de um modelo matemático, que nada mais é do que a representação simplificada do mundo real, conforme exposto nas fases do estudo apresentadas na Figura 02 (BELFIORE E FÁVERO, 2013).

Figura 02 – Fases do estudo da Pesquisa Operacional



Fonte: (BELFIORE E FÁVERO, 2013, p. 06).

Modelos de otimização podem ser solucionados por métodos exatos ou aproximados. Os métodos exatos incluem os algoritmos *branch-and-bound*, plano de corte, *branch-and-cut*, entre outros. Para problemas de alta complexidade computacional (NP-completos), utiliza-se heurísticas e meta-heurísticas como alternativa aos métodos exatos, abandonando-se então a solução ótima a fim de encontrar apenas uma boa solução (TAHA, 2007).

O algoritmo utilizado nesse trabalho para a resolução do PPMP é o *branch-and-cut*, que é uma combinação do algoritmo *branch-and-bound* com o plano de cortes.

O *branch-and-bound*, idealizado por Land e Doig (1960) para solução de problemas de programação binária e inteira, consiste na ramificação de um problema maior em diversos subproblemas, gerando uma árvore. Os subproblemas são resolvidos produzindo limites superiores e inferiores e os que apresentaram soluções infactíveis são descartados. As demais soluções são combinadas gerando novos subproblemas até que se obtenha uma solução ótima para o problema original (BELFIORE E FÁVERO, 2013).

O algoritmo plano de corte foi introduzido por Gomory na década de 1950 com o intuito de solucionar problemas de programação inteira e problemas de programação inteira mista. Inicialmente, as restrições de integralidade do problema inicial são excluídas e, a cada interação, são adicionadas novas restrições (cortes), diminuindo a quantidade de soluções, até que a solução ótima seja encontrada (Id, 2013).

O *branch-and-cut* se inicia pelo método de *branch-and-bound*, ramificando o problema em dois novos subproblemas. Os subproblemas que possuem soluções infactíveis são eliminados (podados). A partir desse momento, utiliza-se o algoritmo plano de cortes em cada nó restante da árvore, adicionando restrições com o intuito de diminuir a quantidade de soluções viáveis. Novamente, as soluções infactíveis são podadas e cada nó da árvore gera mais dois filhos através do método de *branch-and-bound*, o processo é repetido até que todas as ramificações da árvore sejam eliminadas sobrando somente a solução ótima.

#### 4.4 ESTUDOS SOBRE A APLICAÇÃO DA PESQUISA OPERACIONAL NA SOLUÇÃO DO PPMP

Neste tópico, serão abordados alguns trabalhos relacionados ao planejamento das manutenções preventivas e à forma como cada autor tratou a solução do problema.

Abrahão (2006), em sua tese de doutoramento, sugeriu um modelo não linear para o problema da diagonal de manutenção de aeronaves e propôs a utilização da meta-heurística Colônia de Formigas para a solução de um caso prático na FAB.

Em seu trabalho, o autor definiu o que seria o Problema de Programação de Manutenção Preventiva (PPMP) e, através de uma meta-heurística inspirada no comportamento de uma colônia de formigas na busca pelo alimento, desenvolveu uma metodologia para planejar o momento que cada aeronave deve realizar a manutenção preventiva.

Em seu modelo, Abrahão considerou dois níveis de manutenção diferentes, além de ter permitido que determinadas restrições pudessem ser violadas, por exemplo, antecipar a data de início da inspeção das aeronaves em caso de necessidade.

O foco do autor foi maximizar a disponibilidade da frota, maximizar a utilização das horas disponíveis entre duas inspeções consecutivas e tornar eficiente a utilização das oficinas, não sobrecarregando com aeronaves paradas ao mesmo tempo e antecipando as inspeções para reduzir os períodos de ociosidade.

Por fim, Abrahão concluiu que seu modelo demonstrou ser eficaz para resolução do problema, encontrando boas soluções em um tempo de processamento aceitável.

Já Bartolomeu (2016), apresentou um modelo de programação linear bicritério para a solução do PPMP, contendo duas funções objetivo.

Suas pesquisas foram realizadas no âmbito da Empresa TAP Manutenção e Engenharia e analisou as aeronaves de transporte de passageiros, que possuem suas manutenções preventivas controladas por ciclos (um conjunto de decolagem e pouso da aeronave), tempo entre as inspeções e por horas de voo voadas.

Bartolomeu utilizou inicialmente a função objetivo para minimizar a diferença entre a data efetiva da imobilização da aeronave para a inspeção e a data máxima que a mesma poderia voar antes de realizar uma manutenção preventiva. Foi percebido que algumas das soluções encontradas poderiam ser melhoradas e, com isso, o autor considerou uma segunda função objetivo, minimizar a diferença entre o número de horas de voo permitidas entre duas inspeções consecutivas e o número de horas voadas pela aeronave no momento que entra em inspeção.

Neste trabalho, o autor conseguiu minimizar o número total de inspeções realizadas pelas aeronaves durante um período de cinco sememas, quando comparado com o planejamento realizado pela TAP Manutenção e Engenharia.

O estudo analisou a aviação comercial, onde o objetivo é sempre aumentar os lucros da empresa, por isso, o foco foi a contenção dos custos operacionais por meio da redução do número de inspeções realizadas, o que possibilitou ampliar a quantidade de aeronaves disponíveis para cumprir as rotas.

Cho (2011), em seus estudos, propôs a utilização de um modelo de programação linear inteira mista, com o intuito de otimizar o planejamento da diagonal de manutenção preventiva da frota de aeronaves da Força Aérea Americana. O autor buscou maximizar a utilização dos recursos de manutenção e ao mesmo tempo garantir uma disponibilidade elevada das aeronaves.

No desenvolvimento do problema, foram consideradas somente as inspeções preventivas baseadas no uso da aeronave, ou seja, horas de voo disponíveis entre duas inspeções consecutivas e o planejamento da distribuição do esforço aéreo foi baseado nas surtidas diárias planejadas pelo setor de operações do esquadrão.

O autor inter-relacionou duas decisões, definir quais aeronaves iriam cumprir as surtidas planejadas por dia e determinar o momento certo de realizar as inspeções. Como função objetivo, propôs minimizar a variabilidade da utilização das oficinas, mantendo constante a carga de trabalho e, conseqüentemente, o número de aviões disponíveis. Para encontrar a solução do problema de programação linear inteira mista, foi utilizado o algoritmo *branch-and-bound*.

Inicialmente, Cho (2011) obteve bons resultados, porém, ao expandir os dados do problema, o tempo computacional aumentou consideravelmente. Para resolver essa questão, o autor sugeriu dividir o problema em dois subproblemas, solucionando primeiramente o calendário de inspeções de cada aeronave e, após concluída essa fase, encontrando a quantidade de horas que cada aeronave deveria voar nos intervalos que estariam disponíveis. Dessa forma, foi possível reduzir a número de variáveis, pois, deixou de tratar os dois problemas de forma simultânea para tratá-los de forma sequencial.

Por fim, o autor conseguiu desenvolver uma metodologia automatizada que possibilita substituir a experiência e a expertise dos responsáveis pelo planejamento do calendário de inspeções das aeronaves.

Outra publicação que propõe uma solução ao PPMP é a de Silva (2018), que apresentou em sua dissertação de mestrado uma metodologia híbrida baseada no modelo proposto por Kozanis e Skipis (2006), associando uma meta-heurística a uma técnica exata.

O autor abordou o problema de planejamento de um único esquadrão da FAB, em que o objetivo pretendido era maximizar o número de aeronaves disponíveis, mantendo elevado o nível da prontidão operacional.

Silva utilizou a meta-heurística Algoritmo Genético (AG) em conjunto com a Programação de Metas (PM) na resolução do modelo, aplicando pesos às violações das restrições impostas ao PPMP quando o tempo computacional para se chegar a um resultado excedia ao considerado aceitável pelo autor. Para a aplicação de pesos às restrições, foi utilizado a PM, transformando as restrições não atendidas em metas a serem cumpridas.

Com sua metodologia, foi possível realizar a programação da manutenção preventiva nas aeronaves da FAB, bem como identificar possíveis gargalos no planejamento que impossibilitam o cumprimento do esforço aéreo planejado.

## **5 METODOLOGIA PROPOSTA PARA A OTIMIZAÇÃO DA DIAGONAL DE MANUTENÇÃO**

### **5.1 MODELO MATEMÁTICO**

Conforme explicado anteriormente, o objetivo deste artigo é sugerir um modelo matemático simples e eficiente, voltado para o planejamento da diagonal de manutenção das aeronaves do 1º GAvCa. O modelo sugerido abaixo foi inspirado nos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica. Para tal, foi proposto um modelo de programação linear inteira binária (PLIB) com o objetivo de maximizar a disponibilidade, respeitando o esforço aéreo mensal planejado.

Dados de entrada:

- A quantidade total de aeronaves da frota,  $a = 1, 2, \dots, A$ ;
- T quantidade total de períodos,  $t = 1, 2, \dots, T$ ;
- $h_{a0}$  quantidade de horas disponíveis da aeronave  $a$  no início do problema;
- $d_{a0}$  condição da disponibilidade da aeronave  $a$  no início do problema;
- $e_t$  esforço aéreo planejado para o período  $t$  (esforço planejado pelo setor de operações do Esquadrão Aéreo);

- $l_{max}$  tolerância superior do esforço aéreo planejado;
- $l_{min}$  tolerância inferior do esforço aéreo planejado;
- $s$  quantidade de horas disponíveis após a manutenção (intervalo entre manutenções programadas);
- $m_{max}$  máximo de horas que cada aeronave pode voar por mês;
- $m_{min}$  mínimo de horas que cada aeronave pode voar no somatório de todos os períodos;
- $c$  capacidade da linha de manutenção (representa o número de aeronaves que podem entrar em manutenção por mês);
- $k$  duração das inspeções;
- $i$  extensão ou adiantamento das inspeções.

O período  $t$  pode ser considerado como qualquer intervalo de tempo, para o problema proposto foi considerado como um mês. O valor de  $m_{max}$  e  $m_{min}$  são valores médios determinados através da experiência. O parâmetro  $m_{max}$  é importante para que as horas voadas por uma determinada aeronave não extrapole a capacidade real de voo mensal, englobando as abortivas, as folgas nos finais de semana, o tempo necessário para o reposicionamento da aeronave para cumprir uma nova missão e as manutenções não programadas mais simples. O valor de  $m_{min}$  impede que uma aeronave permaneça completamente inutilizada durante o período analisado. A capacidade da linha de manutenção, parâmetro  $c$ , auxilia na formação da diagonal de manutenção, impedindo a sobrecarga das oficinas com excesso de manutenções programadas, ressaltando que esse parâmetro é útil no caso específico da aeronave F-5M, onde foi considerado um mês de duração das inspeções e cada período também representa um mês. Em casos em que há inspeções de longa duração associadas a uma baixa capacidade da linha de manutenção, esse parâmetro pode não ser eficiente.

Variáveis de decisão:

- $d_{at}$   $\begin{cases} 1, \text{ se a aeronave está disponível} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
- $m_{at}$   $\begin{cases} 1, \text{ se a aeronave entra em manutenção no período } t \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$
- $x_{at}$  quantidade de horas que a aeronave  $a$  voa no período  $t$
- $h_{at}$  quantidade de horas disponíveis para a aeronave  $a$  voar no período  $t$

Função objetivo:

$$\text{Max } Z = \sum_{n=1}^A \sum_{n=1}^T d_{at}$$

A função objetivo Z, em conjunto com a restrição (13), visa maximizar a disponibilidade de aeronaves da frota.

Restrições:

$$h_{a1} = h_{a0}$$

(1)

$$h_{a(t+1)} = h_{at} + s * m_{at} - x_{at}$$

(2)

$$h_{at} - x_{at} \geq 0 - s * i$$

(3)

$$d_{a1} = d_{a0}$$

(4)

$$d_{a(t+1)} \leq h_{at} - x_{at} + s * i$$

(5)

$$d_{at} = 1 - \sum_{n=t-y}^t m_{at}, y = k - 1$$

(6)

$$\sum_{n=1}^A x_{at} \leq l_{max} * e_t$$

(7)

$$\sum_{n=1}^A x_{at} \geq l_{min} * e_t$$

(8)

$$s * d_{at} \geq x_{at}$$

(9)

$$x_{at} \leq m_{max}$$

(10)

$$h_{at} \leq s + s * i$$

(11)

$$\sum_{n=1}^T x_{at} \geq m_{min}$$

(12)

$$\sum_{n=1}^A m_{at} \leq c$$

(13)

$$d_{at} \in \{0, 1\}$$

(14)

$$m_{at} \in \{0, 1\}$$

(15)

$$x_{at} \geq 0$$

(16)

$$h_{at} \geq 0$$

(17)

$$x_{at} \in Z$$

(18)

$$h_{at} \in Z$$

(19)

As restrições (1) e (2) garantem a quantidade de horas disponíveis para uma determinada aeronave no início do período  $t$ . Caso a aeronave entre em manutenção, a restrição (2) assegura que a mesma reinicie o ciclo de inspeção, recebendo a quantidade de horas previstas entre duas inspeções consecutivas.

A restrição (3) assegura que a aeronave não voe mais do que a quantidade de horas disponíveis. Essa restrição também possui a função de permitir uma extensão, retardando a inspeção em casos de necessidade, voando mais horas do que o disponível.

A restrição (5) garante que a variável de decisão  $d$  receba o valor 0 quando a aeronave voar todas as horas disponíveis, incluído possíveis extensões.

A restrição (6) assegura que a variável de decisão  $m$  receba o valor 1 no período que entra em inspeção e a variável  $d$  receba o valor 0 pela quantidade de períodos necessários para realizar a manutenção programada.

As restrições (7) e (8) criam um limite superior e inferior no cumprimento do esforço aéreo planejado por período. A intenção destas restrições é possibilitar um melhor planejamento da distribuição do esforço aéreo.

A restrição (9) garante que a aeronave não voe quando estiver em manutenção.

A restrição (10) adiciona um limite máximo que cada aeronave poderá voar em um determinado período. Esse limite é estipulado pelo responsável por planejar a diagonal

de manutenção, levando em consideração os dados históricos e quantidade de dias de voo que engloba o período. A restrição permite a inserção no problema do tempo médio de reposicionamento da aeronave e manutenções não programadas corriqueiras.

A restrição (11) assegura que a aeronave não entre em inspeção enquanto ainda possuir horas de voo disponíveis, podendo ser adicionado uma tolerância para a imobilização prematura da aeronave.

A restrição (12) estipula um valor mínimo de horas que cada aeronave deve cumprir, somando todos os períodos. Essa restrição auxilia na elaboração da diagonal de manutenção, não permitindo que uma aeronave permaneça cem por cento do tempo subutilizada.

A restrição (13) está relacionada com a capacidade da linha de manutenção e indica a quantidade de aeronaves que podem iniciar a manutenção programada no período  $t$ , cadenciando as inspeções.

As restrições (18) e (19) estabelecem que as variáveis  $x_{at}$  e  $h_{at}$  sejam números inteiros.

## 5.2 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Para os experimentos foi utilizado o suplemento OpenSolver no Microsoft Excel 2016, que emprega o resolvidor de código aberto COIN-OR *branch-and-cut* (CBC) para a resolução dos problemas de otimização. Os experimentos foram executados em um microcomputador com processador Intel Core I5 de 2,6 GHz e 8 GB de memória RAM.

Nos experimentos realizados foram testados problemas com 2 aeronaves e 3 períodos, 3 aeronaves e 6 períodos e finalmente 10 aeronaves e 6 períodos. Em todas as instâncias testadas, quando utilizando valores aleatórios, foram obtidos resultados válidos, com exceção as ocasiões em que os valores de horas de voo alocados por mês excediam a capacidade das aeronaves, porém, com a utilização das tolerâncias relacionadas ao cumprimento das horas de voo mensais, adiantamento ou extensão das inspeções, por vezes, foi possível recalcular e obter um resultado factível.

Para o exemplo com os dados reais, foi utilizada a instância correspondente a 10 aeronaves e os dados testados foram extraídos do primeiro semestre de 2017 do 1º GAvCa, conforme consta na Tabela 02.

Tabela 02– Dados utilizados nos experimentos

DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	VALOR
Quantidade de aeronaves	A	10 aeronaves
Quantidade de períodos	T	6 meses
Tolerância superior do esforço aéreo planejado	$l_{max}$	10%
Tolerância inferior do esforço aéreo planejado	$l_{min}$	10%
Intervalo entre manutenções programadas	$s$	300 horas
Máximo de horas que cada aeronave pode voar por mês	$m_{max}$	30 horas
Mínimo de horas que cada aeronave pode voar no somatório de todos os períodos	$m_{min}$	30 horas
Capacidade da linha de manutenção	$c$	1 aeronave
Duração das inspeções	$k$	1 mês
Extensão ou adiantamento das inspeções	$i$	10%

Fonte: Autor, 2018.

A distribuição do esforço aéreo pelos meses do primeiro semestre de 2017 seguiu o seguinte planejamento: janeiro - 100 horas, fevereiro - 100 horas, março - 140 horas, abril - 130 horas, maio - 160 horas e junho - 180 horas.

As horas disponíveis de cada uma das 10 aeronaves no início do primeiro período foram as seguintes: 300 h (ANV 1), 198 h (ANV 2), 63 h (ANV 3), 2 h (ANV 4), 0 h (ANV 5), 0 h (ANV 6), 221 h (ANV 7), 157 h (ANV 8), 272 h (ANV 9) e 15 h (ANV 10). As aeronaves 5 e 6 já iniciaram o período de avaliação com a necessidade de realizar a manutenção programada, porém, com o intuito de cumprir a restrição da capacidade de manutenção de somente uma aeronave entrar em inspeção por vez, foi atribuído arbitrariamente o valor 1 para a variável de decisão  $d_{50}$  e 0 para  $d_{60}$ , adiando a inspeção da aeronave 5.

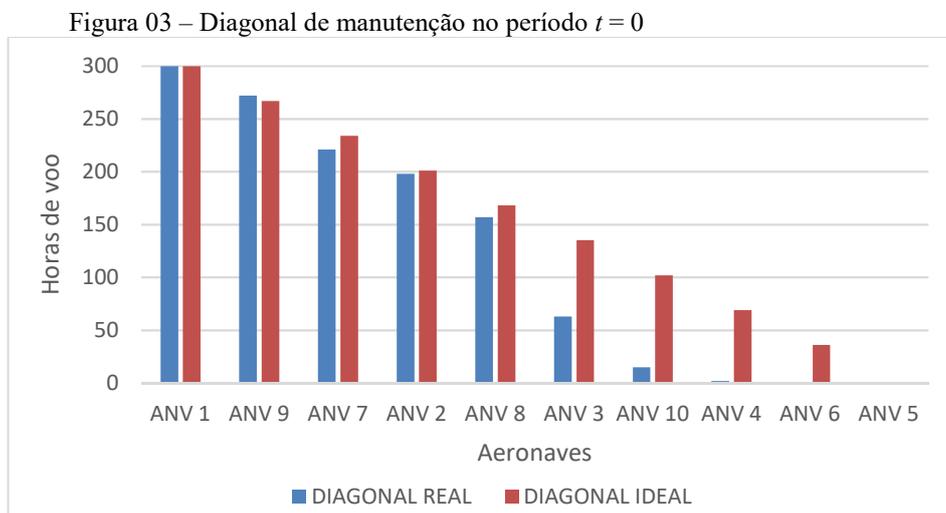
### 5.3 RESULTADOS

Inicialmente, identificou-se que o modelo matemático foi resolvido em um tempo computacional satisfatório e que a estruturação da diagonal de manutenção está diretamente ligada com a distribuição mensal do esforço aéreo. Para o problema com os dados reais do 1º GAvCa, em todos os testes realizados foi possível encontrar uma solução para o problema e o tempo computacional máximo foi de 0,05 segundos.

Em testes utilizando valores aleatórios, quando a distribuição de horas foi superior à capacidade da frota, o resolvidor não conseguiu obter um resultado viável. Nesses casos, a identificação exata de qual parâmetro deveria ser corrigido tornou-se complexa, com isso, as alterações na distribuição do esforço aéreo pelos meses foram feitas de forma manual por tentativa e erro. A restrição correspondente a tolerância máxima e mínima do cumprimento das horas de voo planejadas por mês demonstrou-se extremamente útil nos casos de uma má distribuição do esforço aéreo, pois auxiliou na redistribuição das horas de voo, possibilitando chegar a uma solução viável para o problema.

Nos gráficos abaixo, os dados em vermelho representam uma diagonal de manutenção hipotética e perfeita, enquanto os dados em azul representam a diagonal de manutenção em um determinado período. Nas tabelas encontram-se as horas que cada aeronave deveria voar por mês para cumprir o esforço aéreo planejado após a otimização e, marcado em amarelo, as aeronaves em manutenção programada.

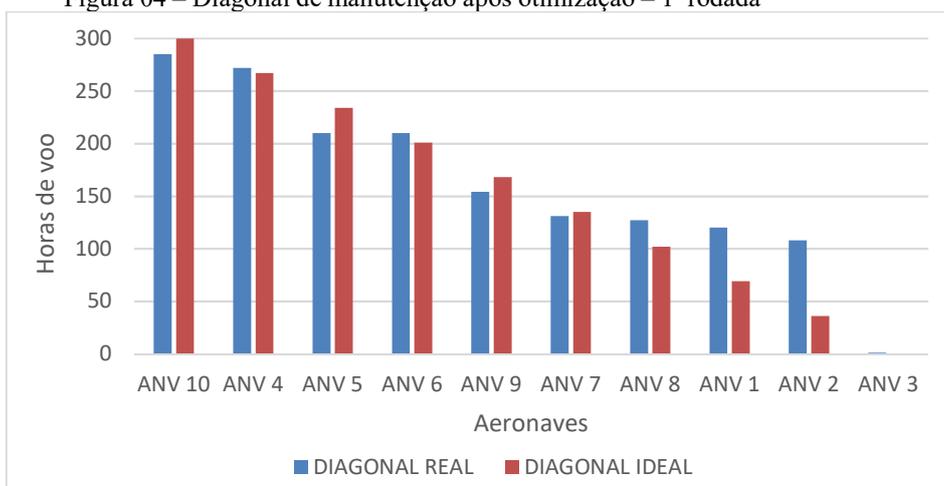
Antes de iniciar os testes com os dados reais, a diagonal de manutenção no início do período de avaliação ( $t = 0$ ) foi comparada com a diagonal de manutenção ideal, conforme está representada na Figura 03.



Fonte: Autor, 2018.

Na primeira rodada de teste realizados, os parâmetros  $i$  e  $l$  foram considerados iguais a 0 e como resultado encontrou-se  $Z = 56$  e uma disponibilidade de 93%. A diagonal de manutenção após a otimização, referente a situação que a frota se encontraria ao término do sexto período, está representada na Figura 04.

Figura 04 – Diagonal de manutenção após otimização – 1ª rodada



Fonte: Autor, 2018.

Na Tabela 03 é possível observar a distribuição de horas de voo para cada aeronave após a otimização.

Tabela 03 – Distribuição de horas por aeronaves – 1ª rodada

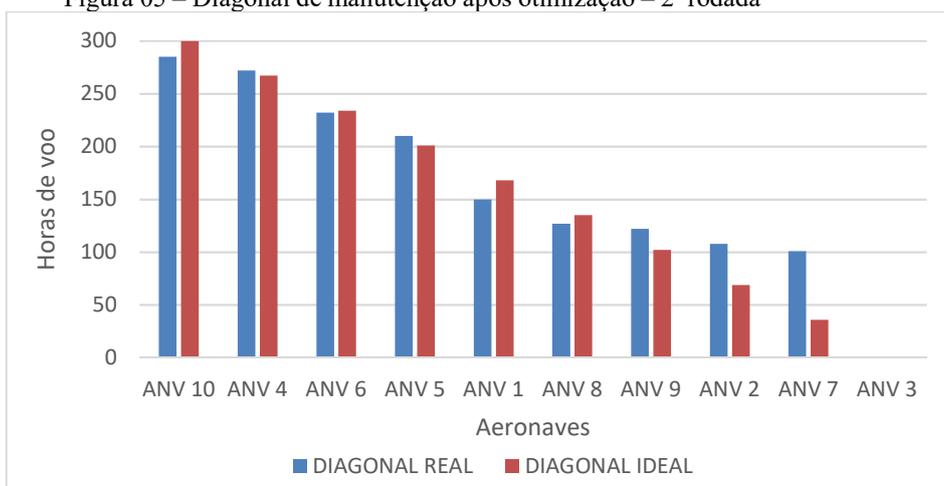
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
ANV 01	30	30	30	30	30	30
ANV 02	0	0	0	30	30	30
ANV 03	5	0	18	9	30	0
ANV 04	0	0	2	0	0	28
ANV 05	0	0	30	0	30	30
ANV 06	0	30	0	30	30	0
ANV 07	30	30	30	0	0	0
ANV 08	0	0	0	0	0	30
ANV 09	30	0	30	18	10	30
ANV 10	5	10	0	13	0	2

Fonte: Autor, 2018.

Foi possível notar, após a primeira rodada de testes, que a quantidade de aeronaves que irão voar em um determinado mês está associada a quantidade de horas distribuídas e a restrição (10). Ao alterar o valor do parâmetro  $m_{max}$  é possível aumentar ou diminuir a quantidade de aeronaves com horas alocadas por período, atendendo o requisito da quantidade de aeronaves necessárias para cumprir as missões de treinamento.

Na segunda rodada de teste, foi acrescentado o valor de 10% ao parâmetro  $l$ , encontrando  $Z = 56$  e atingindo 93% de disponibilidade. Os resultados, referente a situação que a frota se encontraria ao término do sexto período, podem ser observados na Figura 05 e Tabela 04.

Figura 05 – Diagonal de manutenção após otimização – 2ª rodada



Fonte: Autor, 2018.

Tabela 04 – Distribuição de horas por aeronaves – 2ª rodada

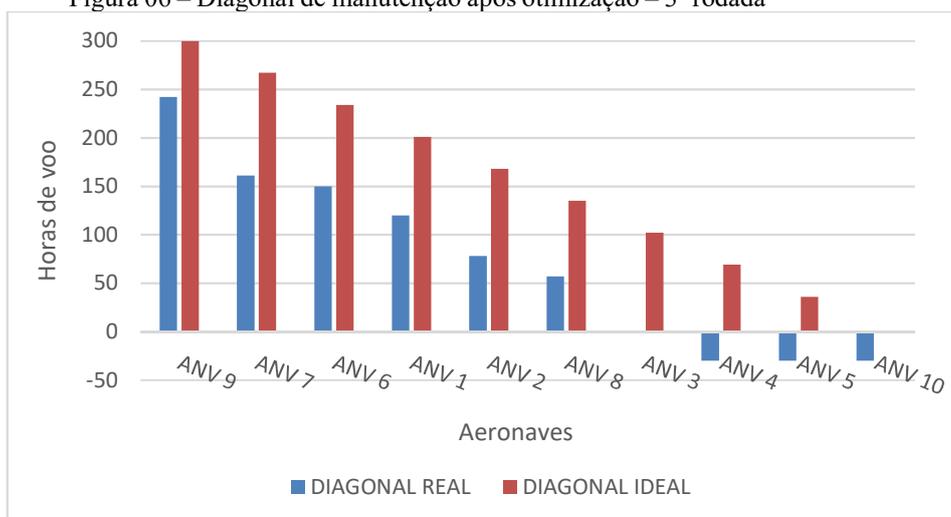
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
ANV 01	30	30	30	30	30	0
ANV 02	0	0	0	30	30	30
ANV 03	19	0	30	0	0	14
ANV 04	1	0	1	0	0	28
ANV 05	0	0	30	0	30	30
ANV 06	0	30	0	8	30	0
ANV 07	30	30	30	30	0	0
ANV 08	0	0	0	0	0	30
ANV 09	30	0	30	30	30	30
ANV 10	0	15	0	15	0	0

Fonte: Autor, 2018.

Após a segunda rodada de testes, utilizando o valor de 10% de tolerância no cumprimento do esforço aéreo planejado para cada período, observou-se que a diagonal de manutenção se manteve próxima à ideal e o valor de  $Z$  e da disponibilidade não se alteraram em relação a primeira rodada de testes, porém, o esforço planejado de 810 horas de voo para os seis meses foi superado em 11 horas. O parâmetro  $l$ , neste caso, indicou uma “folga” no planejamento e a possibilidade de aumentar o esforço aéreo de acordo com a necessidade do esquadrão aéreo.

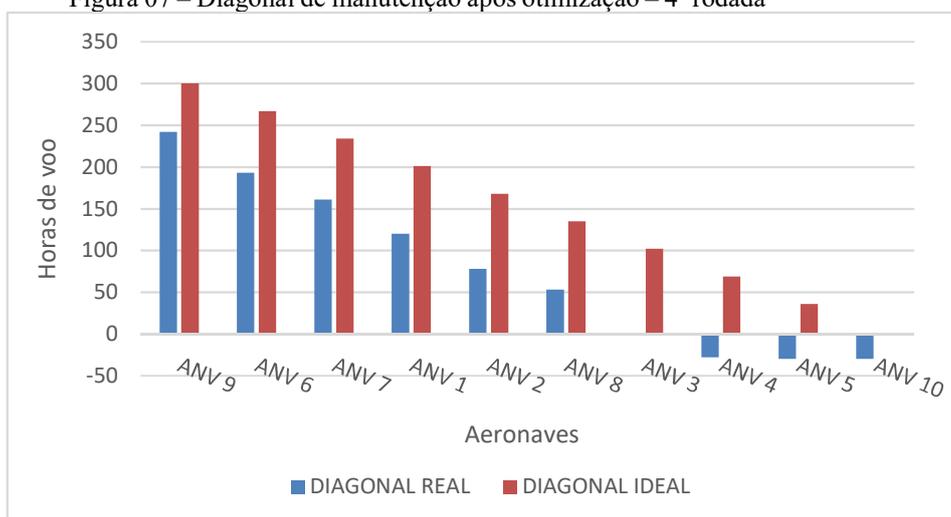
Por fim, na terceira rodada de testes foi acrescentado o parâmetro  $i$  e para quarta rodada foi implementado simultaneamente os parâmetros  $i$  e  $l$ . Nessas duas últimas rodadas, o valor encontrado foi  $Z = 59$  e 98% de disponibilidade.

Figura 06 – Diagonal de manutenção após otimização – 3º rodada



Fonte: Autor, 2018.

Figura 07 – Diagonal de manutenção após otimização – 4º rodada



Fonte: Autor, 2018.

Após a implementação do parâmetro  $i$ , as aeronaves 4, 5 e 10 desestabilizaram a diagonal de manutenção, pois as mesmas chegaram ao final do último período sem horas disponíveis para o voo, sendo necessária a realização da manutenção programada de três aeronaves ao mesmo tempo.

Em ambas as rodadas de testes foi possível observar que o recurso de estender uma inspeção só deve ser utilizado em último caso, pois, em períodos curtos de avaliação, por exemplo. Os seis meses utilizados, existe a tendência de retardar as inspeções para o limite máximo, Figura 06 e Figura 07, gerando um acúmulo para o último período e provocando um desajuste na diagonal de manutenção. Parte desse problema poderia ser

resolvido com a implementação de restrições que assegurassem um escalonamento das horas disponíveis das aeronaves ao término do período avaliado. Outra forma de amortizar o problema é ampliando a abrangência da quantidade de períodos avaliados.

Em todos os testes realizados, o parâmetro  $k$  possibilitou a conservação da diagonal de manutenção durante os períodos avaliados, cadenciando a quantidade de aeronaves entrando para as inspeções programadas. Para atender a capacidade das oficinas de manutenção do GLOG, características do ciclo de inspeção da aeronave F-5M e a quantidade de vetores que compõe a dotação do 1º GAvCa, foi considerado  $k = 1$ , porém este parâmetro deve ser alterado conforme a especificidade de cada projeto ou linha de manutenção.

## 6 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Neste trabalho foram desconsideradas as manutenções corretivas das aeronaves e os períodos em que as mesmas permanecem sem voar devido condições meteorológicas adversas, que, não raro, afetam todo o planejamento do calendário de inspeções, ocasionando atrasos em algumas aeronaves e adiantamentos em outras.

Foram consideradas, para a elaboração da diagonal, somente as inspeções múltiplas de 300 horas, arredondando para uma duração de 30 dias. As inspeções de 150 horas, 25 horas e corrosão foram desconsideradas devido à curta duração. A inspeção de 1200 horas (INPP\*), apesar de ser múltipla de 300 horas, também foi desconsiderada, pois a mesma acontece em média uma vez a cada cinco anos e são agendadas previamente pelo Parque responsável pelo projeto F-5M, saindo da gerência do oficial que elabora a diagonal de manutenção.

Os atrasos logísticos, como falta de suprimento ou mão de obra, também não foram considerados no modelo, pois, apesar de constantemente afetarem a duração das inspeções, são fatores que dependem de decisões gerenciais e estratégicas e estão diretamente relacionadas com o orçamento anual destinado para cada projeto da FAB, por isso tornariam o problema extremamente complexo. Outra forma de simplificar o problema foi considerar que todas as aeronaves da frota possuem a mesma capacidade operacional de cumprir as diversas missões do Esquadrão Aéreo.

---

\* INPP: Inspeção nível parque programada.

Uma outra limitação do modelo apresentado neste trabalho está relacionada com a projeção da diagonal de manutenção após o período avaliado. O modelo, apesar de cadenciar a entrada das aeronaves para as manutenções programadas, não possui uma restrição que assegure que as mesmas estejam com as horas disponíveis escalonadas ao final do último período, o que pode ocasionar um problema de disponibilidade no futuro.

Para pesquisas futuras, sugere-se a implementação, através de dados probabilísticos, das manutenções corretivas, bem como a capacidade de manutenção das oficinas. Existe também a possibilidade de utilizar o mesmo modelo proposto neste trabalho acrescentando somente as inspeções menores, que, apesar de possuírem curta duração, também impactam na disponibilidade das aeronaves.

Outra pesquisa interessante seria a mudança do ponto de vista e, ao invés de tentar cumprir o planejamento mensal que é repassado pelo Setor de Operações do Esquadrão, calcular, com base no esforço aéreo anual, a combinação ótima de horas que devem ser voadas em cada mês, minimizando a quantidade de aeronaves em inspeção ao mesmo tempo.

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O objetivo deste trabalho foi propor um método para auxiliar na elaboração da diagonal de manutenção das aeronaves F-5M do 1º GAvCa, utilizando ferramentas da Pesquisa Operacional. Desta forma, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteiro binário e para solucioná-lo foi utilizado o método exato *branch-and-cut*.

Conclui-se que, conforme demonstrando nos tópicos anteriores, por meio do modelo apresentado, foi possível planejar a quantidade de horas de voo que cada aeronave deveria voar em um determinado período, além de ter fornecido soluções em um baixo tempo de processamento computacional.

Observou-se também que a diagonal de manutenção resultante após a otimização se aproximou muito da diagonal ideal, corroborando para viabilidade da utilização do método proposto nesse estudo.

O emprego do Microsoft Excel e do suplemento OpenSolver cria a possibilidade, através do preenchimento de planilhas eletrônicas, que um usuário com noções básicas de informática e sem conhecimento em Pesquisa Operacional possa utilizar o método. Com isso, a metodologia apresentada propicia a implementação desta ferramenta no 1º

GAvCa, em que o responsável pela diagonal de manutenção conseguirá facilmente realizar o planejamento, bem como os eventuais ajustes necessários.

Outra vantagem deste estudo é que, apesar do modelo matemático ter sido desenvolvido de acordo com as necessidades do 1º GAvCa, as características de operação do F-5M se assemelham a realidade de diversos projetos da FAB, podendo ser facilmente adaptado.

Por fim, este trabalho propôs uma metodologia que demonstrou ser capaz de auxiliar no planejamento das manutenções programadas, porém devido suas limitações, ainda não é o suficiente para substituir completamente a expertise do oficial responsável pelo PLACON, necessitando que o mesmo realize ajustes manuais para atender as mudanças nas prioridades do esquadrão aéreo ou para superar possíveis imprevistos que possam ocasionar a imobilização de uma determinada aeronave por um longo período de tempo.

O processo descrito no trabalho diminui os erros cometidos pela atual metodologia utilizada na elaboração da diagonal de manutenção, acelerando o processo de confecção da mesma, proporcionando capacidade de replanejamento a qualquer tempo e, principalmente, aumentando a disponibilidade das aeronaves através da otimização do planejamento.

## **OPERATIONAL RESEARCH APPLIED IN THE OPTIMIZATION OF MAINTENANCE SCHEDULING PLANNING OF F-5M AIRCRAFT OF 1º GAVCA**

### **ABSTRACT**

This work deals with the problem related to the preventive maintenance scheduling planning through the application of the Operational Research tools. This approach is necessary in order to make efficient the maintenance scheduling planning of the 1st Group of Fighter Aviation (1st GAvCa), that still today is realized of manual form. The objective of this work is to propose a method that minimizes the number of aircraft that are in preventive maintenance simultaneously, maximizing fleet availability and optimizing the use of the available labor force. This attempt was achieved through the bibliographic review of research related to the subject and subsequent suggestion of a mathematical model adapted to the needs of the 1st GAvCa. With this study, it was possible to develop a method to assist managers in maintenance scheduling planning, reducing the errors associated with the current methodology used and making the process more efficient, with the ultimate goal of increasing operational capacity through maximization availability of the fleet.

**Keywords:** Branch-and-Cut. Operational Research. Maintenance Scheduling.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, Fernando Teixeira Mendes. **A Meta-Heurística Colônia de Formigas para a Solução do Problema de Programação de Manutenção Preventiva de uma Frota de Veículos com Múltiplas Restrições: Aplicação na Força Aérea Brasileira**. 2006. 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BARTOLOMEU, Daniel Cardoso Semedeiros. **Otimização do Planeamento das Inspeções de Aeronaves na TAP Manutenção e Engenharia**. 2016. 51f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Investigação Operacional) – Universidade de Lisboa, Lisboa.
- BELFIORE, Patrícia; FÁVERO, Luiz Paulo. **Pesquisa Operacional Para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- BLANCHARD, Benjamin S. **Logistics Engineering and Management**. 6. ed. Harlow: Pearson, 2003.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado Maior da Aeronáutica. **DCA 11- 45 Conceção Estratégica Força Aérea 100**. Brasília, DF, 2016.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado Maior da Aeronáutica. **DCA 11 - 63 Diretriz de Implantação das Alas no Força Aérea Brasileira**. Brasília, DF, 2016.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado Maior da Aeronáutica. **ICA 66 - 31 Parâmetros Básicos das Inspeções Programadas das Aeronaves da FAB**. Brasília, DF, 2014.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado Maior da Aeronáutica. **MCA 66 - 7 Manual de Manutenção Doutrina, Processos e Documentação de Manutenção**. Brasília, DF, 2014.
- CHO, Philip Y. **Optimal Scheduling of Fighter Aircraft Maintenance**. 2011. 106f. Thesis (M. Sc. in Operations Research) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- SILVA, Jardel Figueira. **Aplicação de Algoritmo Genético e Programação de Metas no Problema de Planejamento de Manutenção de Aeronaves Militares**. 2018. 95f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- SOBRAPO – Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional. Disponível em: <<http://www.sobrapo.org.br/o-que-e-pesquisa-operacional>>. Acesso em: 26 jun. 2018.
- TAHA, Hamdy A. **Pesquisa Operacional**. 8. ed. Pearson Education do Brasil, 2007.