Planejamento estratégico de programa de manutenção preventiva de aeronaves

Sergio Rebouças, Fernando Teixeira Mendes Abrahão
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

***Resumo* – As atividades de manutenção de aeronaves têm impacto significativo nos custos logísticos de uma frota. O planejamento adequado da manutenção preventiva é fundamental para a redução destes custos e aumento da disponibilidade da frota. Atualmente, não se realiza o planejamento dessas atividades em nível estratégico, ocorrendo apenas nos níveis táticos e operacionais, através do uso de planilhas e métodos empíricos. Este processo de planejamento aumenta o potencial de indisponibilidade da frota e de custo logístico, seja pela visão limitada propiciada por um horizonte temporal restrito de planejamento, seja pela solução encontrada, que não tem garantias a respeito da sua qualidade. O presente trabalho propõe uma abordagem de planejamento estratégico para programas de manutenção preventiva de aeronaves, baseado em método exato de otimização, englobando todo o ciclo de vida operacional de uma frota, visando minimizar os custos logísticos, em termos de tempo de manutenção, aumentando, por conseguinte, a disponibilidade da frota.**

***Palavras-chave* - Pesquisa Operacional, Otimização, Logística, Manutenção de Aeronaves e Operações Aéreas.**

I. INTRODUÇÃO

Os grandes desafios enfrentados pelos operadores de aeronaves, dada a complexidade no gerenciamento de todos os agentes e equipamentos envolvidos, exigem o emprego pesado de técnicas e ferramentas de planejamento e gestão, eficientes e robustas [1]. Nesse sentido, as empresas aéreas vêm utilizando, desde 1950, as técnicas de Pesquisa Operacional (PO), principalmente com o uso dos métodos exatos como Programação Linear e o *Branch-and-Bound* [2], apresentando soluções e resultados antes inimagináveis e inatingíveis.

Em virtude da grande escala dos problemas de planejamento e gerenciamento das operações aéreas, os problemas são tratados de forma separada e sequencial, divididos em subproblemas. Um desses subproblemas trata do planejamento das atividades de manutenção programada, ou preventiva, de uma frota, também conhecido como diagonal de manutenção. Busca-se a melhor forma de sequenciar as inspeções de uma frota de aeronaves, com base em uma capacidade de manutenção limitada e na demanda de utilização das aeronaves.

Em boa parte dos casos encontrados na literatura, este planejamento ocorre apenas no nível tático ou operacional, dentro de um horizonte temporal de no máximo três anos. São poucos os trabalhos que focam especificamente na diagonal de manutenção e, atualmente, os gerentes de manutenção de frotas, ainda utilizam métodos empíricos de planejamento, baseado em planilhas e "regras de bolso" ou melhores práticas, desenvolvidas a partir da experiência dos operadores.

A limitação imposta pela restrição do horizonte temporal proporcionada pelo planejamento em níveis táticos e operacionais, dificultam a visão sistêmica e global da frota, prejudicando a capacidade de orientação do decisor, dentro do processo de tomada de decisão de John Boyd, conhecido como OODA *Loop*, ou Ciclo OODA [3]. Isso significa que o decisor não consegue visualizar todas as oportunidades de decisão que possam conduzir ao aumento da pronta resposta. Associado a essa limitação, o uso de métodos empíricos não garante que a soluções encontradas sejam ótimas, nem mesmo boas, garantem apenas que encontraram uma solução viável.

A implementação de algoritmo de otimização para definição do programa de manutenção preventiva de uma frota de aeronaves, ao longo de todo o seu ciclo de vida operacional (longo prazo), permitiria o conhecimento da solução ótima global, em relação a minimização da indisponibilidade da frota e dos custos operacionais.

Outra área de contribuição, não menos importante, é a aplicação desse modelo no auxílio a definição de requisitos operacionais e logísticos de sistemas aeroespaciais complexos. Tanto o desenvolvimento de novas aeronaves, quanto o processo de aquisição exigem ferramentas cada vez mais precisas e objetivas no que tange à prospecção de requisitos.

Na área acadêmica, a abordagem do trabalho é inovadora, visto que não foram encontrados poucos trabalhos relacionados ao planejamento estratégico de programas de manutenção preventiva de aeronaves.

O trabalho apresenta a Seção II onde são relembrados alguns conceitos teóricos que suportam a metodologia aplicada e revisados alguns avanços científicos relacionados ao problema em tela. A Seção III detalha o material utilizado como estudo de caso e descreve a metodologia aplicada. Os resultados são apresentados na Seção IV e discutidos na Seção V. As conclusões estão comentadas na Seção VI, incluindo propostas de trabalhos futuros.

II. REVISÃO DE LITERATURA

A presente seção divide-se em duas partes. Na primeira serão explorados os métodos de otimização, com enfoque no que será implementado no presente trabalho. Em um segundo momento serão apresentados alguns conceitos relacionados ao ciclo de vida de sistemas aeroespaciais complexos e suporte logístico, com ênfase na manutenção preventiva de aeronaves, apresentando algumas aplicações relacionadas ao tema de interesse.

A. Métodos de Resolução de Problemas de Otimização

De uma maneira geral, os métodos de otimização podem ser divididos em exatos e aproximados (ou estocásticos). Os métodos exatos garantem a otimalidade da solução encontrada, enquanto os estocásticos podem gerar boas soluções mas sem garantia de ter atingido um resultado ótimo [4]. Os métodos aproximados ainda podem ser divididos em heurísticas e aproximações. As heurísticas, por sua vez, podem ser classificadas em duas

famílias distintas, a de heurísticas específicas e de meta-heurísticas.

Enquanto a heurística específica trata de um procedimento, ou conjunto de etapas, em busca de uma boa solução viável para um determinado problema, a meta-heurística é mais genérica, podendo ser aplicada em uma grande diversidade de problemas. Apesar da capacidade de resolução de problemas complexos de programação não linear e inteira, a sua aplicação é mais usual em problemas de otimização combinatória. Hillier [5] define meta-heurística como um método genérico de solução que busca, através de processos iterativos, incrementar a qualidade da solução, utilizando processos capazes de sair de ótimos locais, garantindo uma busca robusta dentro do espaço de soluções viáveis de um problema.

B. Programação Linear Inteira Binária

As raízes da PO remontam à Segunda Guerra Mundial, quando grande massa de pesquisadores e cientistas se concentraram em aplicar teorias científicas no gerenciamento de operações militares, ou seja, em conduzir pesquisas em operações, dando origem ao termo "Pesquisa Operacional" [5]. Dentre as diversas aplicações científicas empregadas em operações militares destaca-se a Programação Linear, que possibilitou a abertura de uma infinidade de linhas de pesquisa e desenvolvimento, solucionando de forma exata diversos problemas clássicos. Alguns desses problemas são os de maximização e minimização, caixeiro viajante, mistura, agendamento ou escalas ("*scheduling*"), transporte, investimento de capital, distribuição, dentre outros.

Programação Linear ou PL é uma ferramenta matemática utilizada na otimização, que pode ser minimização ou maximização, de uma função linear, satisfazendo um conjunto de condições de contorno representadas por equações ou inequações lineares. Foi concebida por George B. Dantzig, em 1947, quando trabalhava como conselheiro matemático para a Força Aérea Americana, implementando esta ferramenta durante o desenvolvimento de métodos de planejamento para o emprego, treinamento e programas logísticos de suporte ao combate [6].

A aplicação da PL na indústria aeronáutica e nas operações aéreas das grandes empresas de aviação civil do mundo tem se intensificado de forma exponencial desde a década de 50. Esta aplicação impactou significativamente o planejamento e gerenciamento das operações aéreas [1]. A formulação mais básica da PL, apresentada abaixo, trata de uma estrutura matemática composta de três partes: a) Função Objetivo (z), com seus coeficientes funcionais ($c_1, c_2, ..., c_n$); b) Variáveis de Decisão ($x_1, x_2, ..., x_n$) e as c) Restrições ($b_1, b_2, ..., b_m$), com seus coeficientes tecnológicos ($a_{11}, ..., a_{mn}$).

$$\text{MAX (ou MIN) } z = c_1x_1 + c_2x_2 + \ldots + c_nx_n$$
$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1n}x_n = b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2n}x_n = b_2$$
$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mn}x_n = b_m$$
$$x_i \leq 0, (i = 1,2, ..., n)$$

As variáveis de decisão são a descrição completa das decisões que devem ser tomadas. A função objetivo trata da decisão a ser maximizada ou minimizada, sendo uma função das variáveis de decisão, e as restrições, como o próprio nome já diz, é um conjunto de limites que não podem ser ultrapassados para o contexto de decisão definido.

A programação linear é chamada inteira (PLI) quando as variáveis de decisão são números inteiros. Se todas as variáveis forem números inteiros, é chamada de PLI pura e se apenas algumas das variáveis de decisão forem números inteiros, é chamada de PLI mista. Existe, ainda, a variante binária, quando as variáveis de decisão só podem assumir dois valores inteiros, ou 0 ou 1, sendo chamada de programação inteira 0-1 ou binária[7].

C. Logística e Ciclo de Vida de Sistemas Complexos

O termo "Logística" veio do grego "Logistikos", surgindo do conceito de lógica, significando habilidade de calcular [8]. O termo entrou na terminologia militar no século XVIII, referindo-se à atividade do *Marechal des logis*, do exército francês. Esta atividade envolvia todas as tarefas relacionadas ao suporte às tropas em campanha e aquarteladas. Posteriormente acrescentaram-se as atividades de gerenciamento de estoques e suprimentos de material bélico [9] e no século XIX o termo entrou para o léxico americano, alavancado pelo seu uso na *US Navy* [8].

Na área de defesa, a logística evoluiu através do conceito de suporte logístico integrado (SLI), que foi formalmente concebido em meados da década de 60, tratando das atividades de suporte e manutenção dos sistemas de defesa. Posteriormente, na década de 90, a definição foi expandida para abordar também a inserção do gerenciamento de atividades necessárias ao suporte para o desenvolvimento de requisitos de suporte. Mais recentemente, com o aumento da ênfase da logística e delineamento da suportabilidade nos estágios iniciais de concepção e desenvolvimento de sistemas complexos, foi introduzido o conceito de logística de aquisição [10].

O ciclo de vida de um sistema complexo é geralmente divido em cinco fases: a) Preparação, b) Desenvolvimento, c) Produção, d) Operação e Suporte e e) Descarte [11]. O custo para operar e suportar logisticamente o sistema gira em torno de 65% do custo total do sistema em toda a sua vida, desde a concepção até o descarte.

D. Logística e Suporte Logístico Integrado

O suporte logístico integrado é uma abordagem gerencial unificada, disciplinada, iterativa e interativa necessária a inserção de considerações de suporte ao delineamento de novos sistemas, ao desenvolvimento de requisitos de suporte compatíveis e integrados com os objetivos operacionais do sistema, à aquisição e implantação do referido suporte e para prover o necessário suporte durante toda a vida do sistema ao mínimo custo [12]. O objetivo do SLI é desenvolver soluções de suporte que otimizem a suportabilidade e custos enquanto atende aos requisitos operacionais de desempenho do Sistema.

A *Defense Acquisition University* [13] sugere a divisão do SLI em doze elementos, os quais abrangem todas as ramificações de suportabilidade de um sistema complexo de defesa, quais sejam: a) recursos de computação; b) influência do design; c) instalações e infraestrutura; d) manutenção; e) mão de obra e pessoal; f) embalagem, manuseio, armazenamento e transporte (PHS&T); g) gerenciamento de suporte ao produto; h) suprimento; i) equipamentos de apoio; j) engenharia de sustentação; k) publicações técnicas; e l) treinamento e treinamento do suporte.

E. Planejamento de Manutenção de Aeronaves

O custo do elemento manutenção é certamente um fator importante no gerenciamento de operações aéreas. Estudos estimam que as atividades de manutenção representam aproximadamente 20% dos custos de operação da aeronave [14].

A capacidade de prever e planejar as atividades de manutenção de aeronaves é crucial para a sobrevivência de empresas privadas do setor aéreo e sustentabilidade dos órgãos governamentais. Na literatura, os problemas relacionados à operações aéreas são em sua maioria de níveis táticos [15], envolvendo um futuro de um mês a um ano de planejamento. Não foram encontrados trabalhos científicos relacionados com planejamentos ou gerenciamento de frotas no nível estratégico, ou seja, em horizontes temporais superiores a cinco anos.

O problema de planejamento de manutenção, conhecido como problema de programação da manutenção preventiva, PPMP, envolve a busca do sequenciamento ótimo de aeronaves, denominado diagonal de manutenção, a serem manutenidas de maneira que as equipes e oficinas de manutenção não fiquem sobrecarregadas e nem ociosas, na medida em que uma aeronave só segue para manutenção se a equipe já tiver concluído um serviço anterior e esteja disponível para iniciar a próxima atividade. Desta forma, reduz-se o *downtime*, tempo que a aeronave permanece fora de serviço (ou indisponível), aumentando a disponibilidade da frota.

Dentre os trabalhos mais relevantes, Abrahão [16] implementou, em 2005, uma meta-heurística populacional de Colônia de Formigas em uma frota de 20 aeronaves de defesa da Força Aérea Brasileira, o F-5 Tiger, no espaço temporal de 2 anos, considerando duas inspeções programadas, das seis previstas para aquele projeto [17]. Mais recente, em 2015, Guedes [18] considerou quatro níveis de inspeção para uma frota de 50 aeronaves, para um horizonte de 5 anos, utilizando, no máximo 36.000 horas totais. Implementou programação linear por meta (*goal programming)* e usou o PPMP para dimensionar e distribuir o esforço aéreo total entre 4 esquadrões aéreos.

Observa-se, portanto, que a literatura desconsidera o efeito das atividades de manutenção durante o ciclo de vida ou de longo prazo, na fase de operação e suporte. As abordagens são limitadas a curtos períodos de utilização, o que pode causar um impacto muito negativo imediatamente após o período considerado. A otimização limitada em espaço temporal parcial pode "empurrar" grande parte das manutenções mais custosas, tanto em termos financeiros quanto temporais, para o período subsequente, acarretando custos e indisponibilidade muito elevados, que irão extrapolar a capacidade de recuperação.

Além disso, conforme observado por [16] em seu trabalho, o resultado da otimização do programa de manutenção preventiva proposta ainda gerou um desperdício de 2.820:00 horas, correspondente a 13,6% de um total de 20.731:00 horas disponíveis para voo, em virtude de antecipação forçada de manutenção preventiva, em busca da maximização da disponibilidade da frota.

Um dos motivos da escassez de estudos de longo prazo em relação ao tema é a grande incerteza existente em relação ao tempo de uso de uma aeronave e à demanda de esforço aéreo para a frota nesse período. No entanto, estudo recente demonstrou que para alguns casos específicos de operações aéreas, pode-se atingir um elevado grau de precisão na predição de esforço aéreo para longos períodos [19].

Por se tratar de planejamento estratégico, é mandatório o desenvolvimento de planejamentos de nível tático e operacional, que se basearão em previsões de menor horizonte temporal e consequentemente com maior grau de precisão de predição do esforço aéreo.

III. METODOLOGIA

O foco do presente trabalho trata do dimensionamento e planejamento, em nível estratégico, do programa de manutenção de aeronaves. Apresentará como resultado a indicação do esforço aéreo que cada aeronave de uma frota deverá voar durante todo o ciclo de vida operacional definido, bem como a sua disponibilidade e tempo total de indisponibilidade por manutenção, *downtime,* previsto, considerando-se apenas a manutenção preventiva.

A. Contexto de aplicação

A aquisição de aeronaves, na área de Defesa, pode ser realizada através da compra de equipamentos novos ou usados. Em ambos os casos, projeta-se um tempo de utilização, através de um cronograma de recebimento, de uso e de desativação (ou de modernização de meia vida) das mesmas. Pode-se receber as aeronaves em lotes com quantidades e em períodos variados, ou todas em um mesmo período.

Utilizou-se para aplicação o cenário e demanda de esforço aéreo apresentados por [19], com a previsão de consumo anual de 7.332:17 horas de voo. Foi definido um período fictício de 30 anos de operação (10.950 dias), para uma frota composta de 36 aeronaves T-25 Universal, totalizando uma demanda de 219.967:50 horas de voo. Considera-se que todas as aeronaves seriam novas e estariam disponíveis desde o primeiro ano de operação e a vida útil de cada aeronave é fictícia e fixada em 9.600:00 horas de voo.

O programa de manutenção do T-25 é baseado no ciclo de horas de voo. As atividades de manutenção preventiva são pré-estabelecidas, e ocorrem em intervalos de 50 horas. O tempo necessário para conclusão de cada inspeção varia de 1 a 60 dias de serviço (indisponível para a atividade aérea), de acordo com o intervalo de horas, conforme detalhado na Tabela I, adaptada de [17].

TABELA I: PROGRAMA DE INSPEÇÃO DO T-25.

Ciclo de Inspeção (horas de voo)	Tempo de Manutenção ou *Downtime* (Dias)
50	1
100	5
300	8
600	14
1200	21
2400	60

Fonte: Adaptado de [17]

B. Formulação

Apesar do tempo de voo residual disponível de cada aeronave ser um dos indicadores mais utilizados para monitorar o desempenho de uma frota e estar associado à sua disponibilidade, o que justificou [20] a incluí-lo em sua função objetivo, decidiu-se usar o tempo acumulado de parada para manutenção de cada aeronave (1). Dessa forma, minimizando o *downtime* acumulado, obtém-se a disponibilidade máxima da aeronave para o período (*downtime*/dias totais de disponibilidade), além de minimizar o custo associado à sua manutenção.

Função Objetivo:

$$\text{MIN } z = \sum X_{ij} C_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum X_j A_{ij} \leq 9600 \quad (2)$$

$$\sum X_{ij} A_{ij} \geq 219.967{,}67 \quad (3)$$

Restrições:

$$x_{ij} = \text{bin (1 se for usado, 0 se não)} \quad (4)$$

$$\sum X_j = 1 \quad (5)$$

$$\sum X_i C_i \geq 0 \quad (6)$$

As variáveis de decisão (x_{ij}) são variáveis binárias (4) e indicam se uma aeronave *j* deverá consumir a quantidade a_i de horas de voo, onde cada a_i possui um custo de *downtime* associado, c_i.

As restrições se referem ao esforço aéreo total, onde a somatória de todas as horas voadas por todas as aeronaves deverão ser maiores ou iguais à demanda prevista de 219.967:50 horas de voo (3). Além disso, cada aeronave deverá voar, no máximo, 9.600h (2), limite do projeto. Ainda, de forma a garantir que todas as aeronaves sejam usadas, temos (5) e para garantir a não negatividade fazemos (6).

O modelo foi implementado no OpenSolver e Engine CBC, manipulando 6.948 variáveis, através de um processador Intel core i7 2X 2Ghz com 8GB de RAM.

IV. RESULTADOS

O tempo consumido para resolução do problema foi de 50,68 segundos.

O resultado obtido para o modelo foi apresentado de forma direta e automática em forma tabular, conforme observado na Tabela II. Os resultados estão em ordem crescente da alocação de esforço aéreo total por aeronaves, ou seja, o quanto cada aeronave deverá voar em todo o seu ciclo de 30 anos de operação. Esta ordenação implica também a relação direta entre o crescimento do *downtime* (Dias de Manutenção) e do esforço aéreo mensal médio. No entanto, a disponibilidade da aeronave é inversamente proporcional ao esforço aéreo total.

TABELA II - DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇO AÉREO E DE MANUTENÇÃO POR AERONAVES - MÉTODO EXATO

QTD ANV	Esf. Ae.Total	Dias de Manutenção	Esf. Ae p/ano	Disp. Máx por Anv
1	1800	136	60	99%
1	2200	172	73	98%
5	2400	184	80	98%
9	4800	429	160	96%
13	7200	674	240	94%
7	9600	919	320	92%
36	**220.000**	**563 (Média)**	**7333**	**95%**

Fonte: Autor

A última linha da tabela apresenta o esforço aéreo total a ser voado, no valor de 220.000:00 horas. Baseado no delineamento do modelo, isso significa que existe uma folga de 32:10 horas para um mesmo esforço de manutenção. A média de *downtime* da frota é de 563 dias de indisponibilidade por manutenção preventiva, o que representa uma disponibilidade média aproximada de 95% dos dias totais do ciclo, variando de 92% a 99% entre as aeronaves.

A primeira observação importante, no entanto, trata da variação da distribuição do esforço aéreo, onde temos aeronaves que voarão apenas 1.800:00 enquanto outras (07) consumirão toda a sua vida útil. O planejamento e dimensionamento de manutenção convencional faz a divisão simples do esforço aéreo total pelo número de aeronaves da frota, ou seja, todas as aeronaves deveriam voar uma mesma quantidade de horas, o que daria algo em torno de 6.100 horas por aeronave, ou 204 horas por ano por aeronave.

A distribuição otimizada facilita a alocação de aeronaves para diferentes situações do cotidiano, por exemplo, definição de aeronaves reserva ou para outras atividades de menor consumo de esforço aéreo, como a necessidade de preservação (estocagem), aeronaves para ensaios em voo, demonstração aérea, exposição estática, dentre outros. A escolha de aeronaves para atualização de meia vida, também pode ser avaliada com base nessa distribuição. O resultado inicial apresenta, portanto, uma diretriz para o planejamento tático e operacional.

Observa-se, ainda na Tabela II, que 44% das aeronaves (16 das 36) voariam metade ou menos da metade de sua vida útil (menor ou igual a 4.800:00h). Este resultado levanta o questionamento quanto ao dimensionamento da frota, se ela estaria superdimensionada ou não. Foi necessário, portanto, rodar o modelo com outras opções de quantidade de aeronaves.

O ganho proporcionado pela implementação do modelo proposto, em relação ao método convencional utilizado, pode ser observado na Tabela III, com uma economia de até 1.500 dias de manutenção, o que representa 6,8% de redução do *downtime*.

TABELA III - AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE TEMPO DE INDISPONIBILIDADE DA FROTA (DOWNTIME)

Downtime (em dias)				
Frota	Convencional	Proposto	Ganho	Ganho (%)
23 Anv	21121	21077	44	0,2%
25 Anv	21475	20955	520	2,4%
30 Anv	22150	20650	1500	6,8%
36 Anv	21388	20284	1104	5,2%

Fonte: Autor

Já na Tabela IV, pode-se avaliar o resultado percentual da disponibilidade média da frota. Da mesma forma que na tabela anterior, temos o acréscimo não linear da disponibilidade da frota com o aumento da quantidade de aeronaves. A melhoria atingida pelo modelo proposto também ocorre em todos os cenários apresentados, sendo o maior ganho no cenário de 30 aeronaves, atingindo 0,46 pontos percentuais de aumento.

TABELA IV - AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE DISPONIBILIDADE MÉDIA DA FROTA

Disponibilidade Média			
Frota	Convencional	Proposto	Ganho
23 Anv	91,61%	91,63%	0,02 pp
25 Anv	92,16%	92,35%	0,19 pp
30 Anv	93,26%	93,71%	0,46 pp
36 Anv	94,57%	94,85%	0,28 pp

Fonte: Autor

O uso da função objetivo de minimizar o *downtime* total da frota e da discretização do esforço aéreo em pontos críticos diminuiu a granularidade do resultado, sendo necessária a aplicação de um filtro para que fosse possível fazer uma análise da variação de esforço aéreo para um mesmo valor final de *downtime*. Na Fig. 1 pode-se observar essa variação, que permite uma pequena flexibilização de erro no planejamento, correspondente a 104 horas de esforço aéreo por ano, em média, no caso de uma frota de 36 aeronaves (de 1.372 horas a menos a 1.764 horas a mais que o planejamento de 220.000 horas totais).

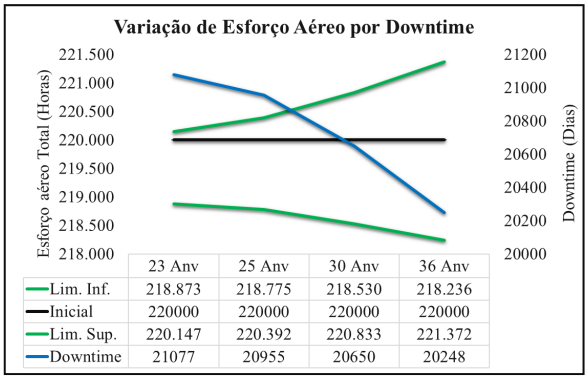

Fig. 1. Variação do Esforço Aéreo para um mesmo esforço de manutenção (*Downtime)*

V. DISCUSSÃO

O modelo contribuiu para uma melhoria teórica significativa no processo de planejamento estratégico do programa de manutenção preventiva de aeronaves e dimensionamento de frota. A complexidade computacional foi significativamente reduzida com a introdução da abordagem de delineamento do modelo baseado no uso de pontos críticos da relação esforço aéreo *versus* manutenção preventiva. Colaborou ainda com essa redução o uso do esforço cumulativo de horas de voo e de atividade de manutenção, representado pelo *downtime*.

Esta melhoria permitiu a visão sistêmica da frota e fornece maior capacidade e flexibilidade ao tomador de decisão, seja para um gerente de frota, seja para uma equipe de formulação de requisitos para desenvolvimento de projeto ou aquisição de sistemas aeroespaciais complexos. A possibilidade de analisar várias alternativas, fornecendo pontos de referências significativos e exatos, a baixo custo computacional e tempo de processamento, representam ganhos significativos nos processos de tomada de decisão sobre as necessidades de gerenciamento da frota e de desenvolvimento de aeronaves.

As soluções apresentadas pelo modelo, que servirão de referências para definição do esforço aéreo que cada aeronave poderá voar individualmente em todo o seu ciclo de vida operacional, permitirá melhor previsão, precisão e gerenciamento da manutenção nos níveis tático e operacional, onde serão inseridas as incertezas relacionadas a manutenção corretiva, preditiva e variações pontuais de demanda de esforço aéreo. Este planejamento de mais baixo nível, tendo o estratégico como diretriz, pode incluir o dimensionamento de equipes e das oficinas de manutenção. O cronograma ou programa de manutenção preventiva deverá ser o elo entre o planejamento estratégico de manutenção e a demanda operacional do dia a dia, a escala de voo.

O modelo possibilitou, ainda, a realização de análise de sensibilidade global no que tange ao dimensionamento da frota, sendo necessário, no entanto, o desenvolvimento de modelos de planejamento de nível tático e operacional, integrado ao de nível estratégico apresentado, para analisar de forma mais precisa o impacto da distribuição de esforço aéreo com base no dimensionamento da frota.

Considerando uma frota de aeronaves militares, distribuída em localidades diferentes, por exemplo, pode-se acompanhar a distribuição do esforço aéreo entre as unidades e ao longo de períodos menores (nível tático, variando de um a cinco anos). O planejamento estratégico, nesse caso, pode facilitar a tomada de decisão relacionada ao rodízio das aeronaves entre as unidades e ao longo de períodos específicos, de maneira a cumprir o planejamento inicial, mesmo que se alterem as quantidades de aeronaves em cada unidade, temporariamente, com base na demanda no referido período. Este rodízio pode levar em consideração, ainda, a localização e capacidade das oficinas e equipes de manutenção em cada localidade.

O modelo pode ser adaptado, ainda, para apresentar, além do *downtime*, os custos relacionados às atividades de manutenção preventiva, incluindo peças, componentes, ferramentas, estruturas de manutenção, entre outros. A

demanda de recursos humanos de manutenção também pode ser facilmente implementada no modelo, incluindo a quantidade de pessoal total e de cada especialidade, necessária para cada inspeção, bem como o esforço de carga de trabalho (*manpower)* com seus respectivos custos.

As dificuldades de compatibilização do modelo com a realidade estão associadas às incertezas relacionadas aos acidentes aeronáuticos e falhas imprevistas, as quais demandam manutenção corretiva. Estes eventos podem extrapolar a capacidade de recuperação e restabelecimento do planejamento.

Outro ponto a ser destacado é que o resultado apresentado trata da máxima disponibilidade possível de ser atingida para frotas dessa aeronave, dentro das condições de contorno estabelecidas (demanda de esforço aéreo, ciclo de vida e quantidade de aeronaves).

VI. CONCLUSÃO

Foi apresentada uma abordagem para o planejamento do longo prazo de programa de manutenção preventiva de aeronaves, baseada em algoritmo exato de otimização, reduzindo o *downtime* de uma frota de 36 aeronaves consumindo aproximadamente 220.000 h de voo em 30 anos de operação, em 5,2%.

O modelo pode ser utilizado tanto para o gerenciamento de uma frota já existente quanto para a análise e prospecção de requisitos para o desenvolvimento ou aquisição de aeronaves. Quando se tratando do gerenciamento de manutenção de uma frota, o planejamento estratégico deverá ser a diretriz para a confecção do plano de manutenção preventiva, que, por sua vez, deverá ser o elo entre o planejamento estratégico e a demanda operacional do dia a dia. Esta demanda, no nível operacional é representada pela alocação diária de aeronaves, baseada na disponibilidade ou vida útil remanescente, em atendimento à escala de voo.

Esta nova abordagem de planejamento, demanda, no entanto, o desenvolvimento de outras ferramentas capazes de dar sequenciamento ao processo. O desenvolvimento de algoritmos que possam realizar a integração entre o planejamento estratégico os planejamentos tático e operacional. Também, algoritmos de otimização para alocação de aeronaves que permitam determinar qual aeronave deverá ser alocada para cada rota ou missão dentro de um planejamento semanal ou diário de operações aéreas. Outra possibilidade de trabalho futuro, trata da adaptação do modelo a uma frota já em operação, levando em consideração o fato de que as aeronaves não possuem a mesma quantidade de horas de voo remanescente.

Na área de suportabilidade, a inclusão no modelo dos demais custos logísticos relacionados às atividades de manutenção preventiva, como as peças, componentes, mão de obra etc. Além disso, variar o tamanho da frota para avaliar o impacto na disponibilidade e *downtime.*

REFERÊNCIAS

[1] M. Bazargan, *Airline Operations and Scheduling*, 2nd ed. Surrey: as, 2010.

[2] K. K. H. Ng, C. K. M. Lee, F. T. S. Chan, and Y. Lv, “Review on meta-heuristics approaches for airside operation research,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 66, pp. 104–133, May 2018.

[3] J. Roy and E. Bosse, “Conflict Management in the Shipboard Integration of Multiple Sensors,” in *Multisource-multisensor information fusion*, 1998, pp. 381–387.

[4] E.-G. Talbi, *Metaheuristic: from design to implementation*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009.

[5] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introduction To Operations Research*, 9th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2010.

[6] M. Bazaraa, J. J. Jarvis, and H. D. Sherali, *Linear Programming and Network Flows*, 4th ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1977.

[7] W. L. Winston, *Operations Research: Applications and Algorithms*, 4th ed. Toronto: Brooks/Cole, 2004.

[8] S. H. Russell, “Growing World of Logistics,” *Air Force J. Logist.*, 2000.

[9] J. I. Alger, *Definitions and doctrine of the military art : past and present*. Avery Pub. Group, 1985.

[10] B. S. Blanchard and J. E. Blyler, *System Engineering Management*, 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2016.

[11] *International guide for the use of the S-Series Integrated Logistic Support (ILS) specifications*. Brussels, Belgium: Aerospace and Defence Industries Association of Europe, Aerospace Industries Association, 2016, p. 174.

[12] M. Fantasia, S. Artzer, and C. Gardner, *Acquisition Logistics Guide*, 3rd ed. Fort Belvoir, VA: Defense Systems Management College, 1997.

[13] U.S. Department of Defense, *Performance Based Logistics Guidebook: A Guide to Developing Performance-Based Arrangements*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.

[14] S. Ferreiro, A. Arnaiz, B. Sierra, and I. Irigoien, “Application of Bayesian networks in prognostics for a new Integrated Vehicle Health Management concept,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 7, pp. 6402–6418, Jun. 2012.

[15] M. Başdere and Ü. Bilge, “Operational aircraft maintenance routing problem with remaining time consideration,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 235, no. 1, pp. 315–328, May 2014.

[16] F. T. M. Abrahão, “A meta-heurística colônia de formigas para solução do problema de programação de manutenção preventiva de uma frota de veículos com múltiplas restrições: Aplicação na Força Aérea Brasileira,” Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

[17] BRASIL, *Parâmetros Básicos das Inspeções Programadas das Aeronaves da FAB*. Brasil, 2018, p. 73.

[18] F. B. Guedes, “Management of the Brazilian Air Force’s F-5M Fleet,” George Mason University, 2015.

[19] S. Rebouças, T. A. Silva, and F. T. M. Abrahão, “Modelagem de Programa de Treinamento de Pilotos para Predição de Esforço Aéreo,” in *Simpósio de Aplicações Operacionais em área de Defesa*, 2018, pp. 61–66.

[20] A. Gavranis and G. Kozanidis, “An exact solution algorithm for maximizing the fleet availability of a unit of aircraft subject to flight and maintenance requirements,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 242, no. 2, pp. 631–643, 2015.