

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica.

Sergio Rebouças

**UMA ABORDAGEM DE GERENCIAMENTO DA
MANUTENÇÃO DE FROTA DE AERONAVES DE
DEFESA BASEADA EM MODELO DE OTIMIZAÇÃO
DE DUAS ETAPAS**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:

Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão
Orientador

Prof^ª. Dr^ª. Emília Villani
Pró-Reitora de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Rebouças, Sergio

Uma abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas / Sergio Rebouças.

São José dos Campos, 2022.

118f.

Tese de doutorado – Curso de Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2022. Orientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão

1. Otimização. 2. Gerenciamento de frota de aeronaves. 3. Planejamento de manutenção. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Uma abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REBOUÇAS, Sergio. Uma abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas. 2022. 118f. Tese de Doutorado em Gestão Tecnológica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Sergio Rebouças

TÍTULO DO TRABALHO: Uma abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2022

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação ou tese pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

Sergio Rebouças

Rua H17C, 106, Campus do CTA

CEP: 12.228-520, São José dos Campos - SP

UMA ABORDAGEM DE GERENCIAMENTO DA MANUTENÇÃO DE FROTA DE AERONAVES DE DEFESA BASEADA EM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE DUAS ETAPAS

Sergio Rebouças

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Olympio Lucchini Coutinho	Presidente	- ITA
Prof. Dr.	Fernando Teixeira Mendes Abrahão	Orientador	- ITA
Prof ^a . Dr ^a .	Mischel Carmen Neyra Belderrain	Membro Interno	- ITA
Dr ^a .	Leandra Isabel de Abreu	Membro Externo	- UNESP
Dr.	Márcio Cardoso Machado	Membro Externo	- UNIP

ITA

Dedico este trabalho à minha família que sempre tem me apoiado nas mais diversas fases da minha carreira e que incentiva continuamente meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Agradecimentos

A Deus, que sabiamente me guiou nos tortuosos caminhos desta jornada, concedendo-me serenidade, força, paciência e perseverança.

Aos meus Pais, Heldo e Rosa, pelo incentivo, pelo carinho e, principalmente pelo exemplo.

Ao meu irmão, pela amizade, pela compreensão e pelo companheirismo.

À minha amada esposa Lídia, por simplesmente tudo.

Aos meus amados filhos, Pietro e Lorenzo, por preencherem meu coração de luz e de amor.

À toda minha família, que direta e indiretamente me apoiou.

Ao meu orientador, Cel Abrahão, pela amizade, paciência, honestidade e pela valiosa orientação.

Aos amigos, Professores Carmen, Ângelo e Cel Marques, pelas reiteradas provas de amizade e pelos brilhantes exemplos acadêmicos, que me serviram de inspiração.

À equipe do PPGAO, Cel Olympio e TCel Duncan pelo inestimável apoio pessoal, profissional e acadêmico.

Aos amigos do Comando Geral de Apoio (COMGAP), meus sinceros agradecimentos pelo suporte essencial e irrestrito.

A todos os amigos que me apoiaram durante essa árdua caminhada, meus sinceros agradecimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e pelo Projeto Pró-defesa IV “Desenvolvimento do Suporte Logístico Integrado para Aeronaves de Defesa Embraer KC-390 e Saab Gripen”, processo 88887.286171/2018-00.

Escreva alguma coisa específica para a Systecon!

Por fim, à Força Aérea Brasileira, por ter confiado a mim essa importante missão.

Resumo

O trabalho trata do problema do gerenciamento de frotas de aeronaves de defesa, mais especificamente do planejamento de manutenção e de uso da frota. Busca-se sequenciar as inspeções de uma quantidade limitada de aeronaves dada uma capacidade limitada de oficinas de maneira que a demanda de esforço aéreo (missões) seja atendida. O sequenciamento e alocação desordenados podem reduzir significativamente ou até mesmo paralisar as atividades aéreas em virtude da indisponibilidade das aeronaves, seja por excesso de atividades de manutenção preventiva e corretiva seja pelo excesso de filas nas oficinas. O trabalho desenvolve uma abordagem inovadora no que tange ao tratamento do problema de forma holística ao modelar toda a frota de aeronaves em todo o seu período de uso, conhecido como fase de operação e suporte, dentro do ciclo de vida de um sistema. Outra contribuição adicional trata da inserção no modelo das manutenções corretivas, as quais não costumam ser tratadas na literatura. A literatura trata o problema apenas nos espaços temporais nos níveis operacional e tático e utilizam apenas a manutenção física (preventiva por hora de voo) parcial (apenas as de maior impacto na disponibilidade). A nova abordagem propõe a otimização em duas etapas do programa de manutenção e plano de uso. Em uma primeira etapa utiliza-se um método exato de programação linear inteira binária para minimizar o *downtime* da frota, buscando o dimensionamento ótimo da manutenção e do uso das aeronaves. A segunda etapa usa uma metaheurística para alocação das inspeções. Para avaliação dos resultados em termos de disponibilidade e confiabilidade da programação, são realizadas simulações, comparando a nova abordagem com a abordagem convencional de planejamento. O resultado dos testes demonstra a validade da utilização dos métodos dentro do escopo verificado e apresenta boas perspectivas de utilização prática. O modelo pode ser utilizado para o planejamento da manutenção e designação de aeronaves, bem como instrumento de avaliação de aeronaves dentro de um processo de aquisição, ou, até mesmo, no desenvolvimento de uma nova aeronave. Com as devidas adaptações, pode ser aplicado a qualquer sistema complexo ou equipamentos (industriais, laboratoriais, navais, espaciais etc.) nos quais o tempo de manutenção impacte de forma significativa na sua disponibilidade ou confiabilidade da programação. Vale mencionar, ainda, que a nova abordagem demonstra ter utilidade para problemas de dimensionamento de frota e de recursos. A partir do momento que se estabelecem referências de uso e de manutenção, bem como de seus indicadores, ficam evidentes e de fácil análise a eficiência no uso tanto da frota quanto da manutenção.

Abstract

This research addresses the problem of defense aircraft fleet management, more precisely the planning of maintenance and fleet utilization. It seeks to sequence the inspections of a limited number of aircraft within a limited workshop capacity so that the demand for air effort (missions) is met. Disordered sequencing and allocation can significantly reduce or even paralyze air activities due to aircraft unavailability, either by excessive preventive and corrective maintenance activities or by excessive queues at the repair shops. This work develops an innovative approach to address the problem in a holistic way by modeling the entire fleet of aircraft throughout its period of use, known as the operation and support phase, within a system's life cycle. Another additional contribution is the inclusion in the model of corrective maintenance, which is not usually addressed in the literature. The literature deals with the problem only in the temporal spaces at the tactical and operational levels and uses only partial phasic maintenance (preventive per flight hour) (only those with the greatest impact on availability). The new approach develops a two-stage optimization of the maintenance program and usage plan. In a first step, an exact binary integer linear programming method is used to minimize the fleet downtime, seeking the optimal dimensioning of maintenance and aircraft use. The second stage uses a metaheuristic to allocate the inspections. To evaluate the results in terms of availability and reliability of the schedule, simulations are performed, comparing the new approach with the conventional one. The test results demonstrate the value of using the methods within the verified scope and present good perspectives for practical use. The model can be used for aircraft maintenance planning and assignment, as well as an aircraft evaluation tool within an acquisition process, or even in the development of a new aircraft. With the proper adaptations, it can be applied to any complex system or equipment (industrial, laboratory, naval, space, etc.) in which downtime significantly impacts its availability or schedule reliability. It is also worth mentioning that the new approach proves to be very useful for fleet and resource sizing problems. Once usage and maintenance references are established, as well as their indicators, the efficiency in the use of both fleet and maintenance become evident and easy to analyze.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Exemplo de sequenciamento gerando paralisação total da frota (ABRAHÃO, 2006).....	17
Figura 2.1 - Número de vezes que a frota de aeronaves atingiu sua meta de capacidade de cumprimento de missão no período de 2011 a 2019. U.S. Government Accountability Office (2020).....	23
Figura 2.2 - Exemplo de diagonal de manutenção adequado. Adaptado de DoA (2017).....	29
Figura 2.3 - Exemplo de diagonal de manutenção desbalanceada.....	30
Figura 2.4 - Tipo de problema e solução de compromisso (SILVA, 2018).....	36
Figura 2.5 - Processo de destruição e reparo de partes da solução. Adaptado de Gendreau e Potvin (2010).....	40
Figura 2.6 – Pseudo-código de Busca em Vizinhança de Grande Porte. Adaptado de (GENDREAU; POTVIN, 2010).....	40
Figura 3.1 - Exemplo de solução inicial do programa de manutenção preventiva e das horas de voo diárias previstas necessárias.....	60
Figura 3.2 - Exemplo do programa de manutenção preventiva otimizado e das horas de voo diárias previstas necessárias.....	60
Figura 4.1 – Distribuição de probabilidade de quantidade de aeronaves por missão.....	66
Figura 4.2 - Distribuição de probabilidade de duração da missão.....	67
Figura 4.3 - Panorama de operação da aeronave e manutenção preventiva.....	70
Figura 4.4 - Comparação entre o calendário de manutenção preventiva da solução inicial e o otimizado.....	79
Figura 4.5 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 1 a 765.....	81
Figura 4.6 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 435 a 1277.....	82
Figura 4.7 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 1278 a 2121.....	83

Figura 4.8 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 2957 a 3809.....	84
Figura 4.9 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 2113 a 2965.....	85
Figura 4.10 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 3801 a 4655...	86
Figura 4.11 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 4655 a 5479...	87
Figura 4.12 - Otimização da solução em relação ao tempo de processamento, em milissegundos.....	88
Figura 4.13 - Otimização da solução em relação ao número de iterações.....	89
Figura 4.14 - Comparação da disponibilidade entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado.....	90
Figura 4.15 - Comparação de Confiabilidade da Programação entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado.....	90
Figura 4.16 - Boxplot para comparação de disponibilidade (A_o) e confiabilidade de programação (SR) entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado.....	91
Figura 4.17 – Disponibilidade das frotas com diferentes dimensões.....	98
Figura 4.18 – Disponibilidade e Confiabilidade da Programação das frotas com diferentes dimensões.....	99

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Quadro resumo da revisão de literatura.....	52
Tabela 3.1 - Parâmetros e variáveis de decisão da primeira etapa.....	56
Tabela 3.2 - Parâmetros e variáveis de decisão da segunda etapa.....	58
Tabela 4.1 - Distribuição de esforço aéreo durante o ano (valores médios em horas de voo). 63	
Tabela 4.2 - Exemplo de tabela consumo de esforço aéreo mensal.....	65
Tabela 4.3 - Parâmetros individuais de manutenção corretiva.....	66
Tabela 4.4 - Resumo dos resultados do planejamento de longo prazo da manutenção preventiva.....	68
Tabela 4.5 - Resultados da otimização da primeira etapa considerando parâmetros de manutenção preventiva e corretiva individual.....	71
Tabela 4.6 - Resultados do método convencional considerando parâmetros de manutenção preventiva e corretiva individual.....	72
Tabela 4.7 - Resultados da otimização da primeira etapa considerando parâmetros de manutenção preventiva, corretiva individual e restrição de esforço aéreo mínimo de 700:00 h por aeronave.....	73
Tabela 4.8 - Resumo dos resultados do planejamento de longo prazo incluindo manutenção preventiva e corretiva.....	74
Tabela 4.9 - Comparação entre o modelo de planejamento convencional e o modelo de planejamento proposto para cada contexto operacional.....	75
Tabela 4.10 – Comparação de <i>downtime</i> total previsto entre o modelo de planejamento convencional e o modelo de planejamento proposto.....	76
Tabela 4.11 - Comparação da disponibilidade entre o modelo de planejamento convencional e o modelo de planejamento desenvolvido.....	76

Tabela 4.12 – Comparação de <i>downtime</i> total previsto entre o modelo de planejamento convencional e o novo modelo de planejamento (36 aeronaves, 30 anos).....	77
Tabela 4.13 - Comparação entre o modelo de planejamento convencional e o novo modelo de planejamento (36 aeronaves, 30 anos).....	77
Tabela 4.14 - Comparação entre o modelo de planejamento convencional e o novo modelo de planejamento para cada contexto operacional (36 aeronaves, 30 anos).....	77
Tabela 4.15 - Redução de filas de manutenção para os diferentes cenários (frota de helicópteros).....	92
Tabela 4.16 - Comparação entre a disponibilidade calculada e alcançada.....	93
Tabela 4.17 - Resumo dos resultados e indicadores das simulações.....	95
Tabela 4.18 – Resultados das simulações com frotas de diferentes dimensões.....	97

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMRP	Problema de Roteamento de Manutenção de Aeronaves (<i>Aircraft Maintenance Routing Problem</i>)
B&B	<i>Branch and Bound</i> – método de otimização
C2	Comando e Controle
DAU	Universidade de Aquisições em Defesa (<i>Defense Acquisition University</i>)
DoD	Departamento de Defesa dos USA (<i>Department of Defense</i>)
FAB	Força Aérea Brasileira
FIFO	Primeiro a entrar, primeiro a sair (<i>First In First Out</i>)
FPM	<i>Flight and Maintenance Planning (Problem)</i>
GAO	Escritório de governança do governo americano (<i>United States Government Accountability Office</i>)
IATA	Associação Internacional de Transporte Aéreo (<i>International Air Transport Association</i>)
KBM	Manutenção baseada no conhecimento (<i>Knowledge-Based Maintenance</i>)
LIP	Programação Linear Inteira (<i>Linear Integer Programming</i>)
LNS	Busca em Grande Vizinhança (<i>Large Neighborhood Search</i>)
MB	Marinha Brasileira
MDT	Tempo total de parada por manutenção (<i>Mean Maintenance Downtime</i>)
MILP/MIP	Programação Linear Inteira Mista (<i>Mixed Integer Linear Programming</i>)
MS	Ciências do Gerenciamento (<i>Management Science</i>)
MTBM	Tempo médio entre manutenções (<i>Mean Time Between Maintenance</i>)
MTBUMA	Tempo médio entre manutenções não programadas (<i>Mean Time Between Unscheduled Maintenance</i>)
OE	Objetivo Específico

O&S	Fase de Operação e Suporte dentro do Ciclo de Vida (<i>Operation and Support</i>)
ONU	Organização das Nações Unidas
OR	Pesquisa Operacional (<i>Operations Research</i>)
PBL	Logística Baseada em Performance (<i>Performance Based Logistics</i>)
PL	Programação Linear
PLIB	Programação Linear Inteira Binária
PO	Pesquisa Operacional
PPMP	Problema do Planejamento da Manutenção Preventiva
PPVM	Problema de Planejamento de Voo e da Manutenção
PSM	Métodos de Estruturação de Problemas (<i>problem structuring methods</i>)
QN	Questão Norteadora
SIP	Suporte Integrado do Produto
SR	Confiabilidade da programação (<i>Schedule Reliability</i>)
SSSM	Método da Diagonal de Manutenção (<i>Slide Scale Scheduled Method</i>)
TAAL	Tempo Total Atraso Administrativo e Logístico
TAP	Problema de Designação de Matrícula (<i>Tail Assignment Problem</i>)
TE	Tempo de Espera (parado, porém disponível para uso)
TMC	Tempo Total de Manutenção Corretiva
TMP	Tempo Total de Manutenção Preventiva
TO	Tempo de Operação
TPM	Manutenção Produtiva Total (<i>Total Productive Maintenance</i>)
VFT	Pensamento Focado em Valores (<i>Value-Focused Thinking</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	.....
1.1	Problema de pesquisa.....	.....
1.2	Objetivo.....	.....
1.3	Estruturação do trabalho.....	.....
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA.....	.....
2.1	Manutenção de Aeronaves e Indicadores de Pronto Resposta.....	.....
2.1.1	Manutenção de Aeronaves.....	.....
2.1.2	Planejamento da Manutenção.....	.....
2.1.3	O método clássico de planejamento da manutenção (SSSM).....	.....
2.1.4	Indicadores de pronta resposta.....	.....
2.2	Métodos de otimização.....	.....
2.2.1	Programação Linear Inteira Binária.....	.....
2.2.2	Meta-heurística Busca em Vizinhança de Grande Porte.....	.....
2.3	Revisão de Literatura.....	.....
2.3.1	Operações Aéreas Militares.....	.....
2.3.2	Planejamento da manutenção de aeronaves militares.....	.....
2.4	Resumo do capítulo.....	.....
3	METODOLOGIA.....	.....
3.1	Aplicação da Metodologia.....	.....
3.1.1	Primeira etapa - Otimização de longo prazo da manutenção e uso da frota.....	.....
3.1.2	Segunda etapa - Otimização de médio e curto prazo de manutenção.....	.....
3.1.3	Simulação e avaliação dos resultados.....	.....
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	.....
4.1	Contexto de Aplicação.....	.....
4.1.1	A frota 64	
4.1.2	Considerações de manutenção.....	.....
4.1.3	Considerações sobre as operações aéreas.....	.....
4.2	Otimização.....	.....
4.2.1	Primeira etapa – BIP.....	.....
4.2.2	Segunda etapa - LNS.....	.....
4.3	Simulação.....	.....
4.3.1	Indicadores de pronta resposta.....	.....
4.3.2	Dimensionamento da frota.....	.....

4.4	Discussão final.....	100
5	CONCLUSÃO.....	102
5.1	Problema de pesquisa.....	102
5.2	Abordagem do problema.....	103
5.3	Descobertas.....	103
5.4	Contribuições.....	104
5.5	Limitações.....	106
5.6	Recomendações para trabalhos futuros.....	106
6	REFERÊNCIAS.....	108

1 Introdução

O gerenciamento de frotas está relacionado a todas as ações necessárias para manter e operar uma frota sob uma relação custo-benefício esperada favorável durante a sua fase de operação e suporte (O&S). As atividades de manutenção e suporte têm um impacto significativo nos custos e na capacidade de operar das frotas.

Em sistemas aeroespaciais complexo de defesa (aeronaves), a fase de operação e suporte responde por 60% a 75% dos custos totais do seu ciclo de vida (BLANCHARD; VERMA; PETERSON, 1995). No Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD), por exemplo, esta fase representa historicamente aproximadamente 70% do custo total de um sistema complexo de armas (do inglês *Major Weapon System*). No ano fiscal de 2018 o DoD gastou USD 49 bilhões em atividades de O&S de aeronaves (U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, 2020).

As atividades de manutenção de aeronaves exigem grande aporte de recursos financeiros, humanos e de tempo. As equipes e oficinas de manutenção precisam ser altamente especializadas, logo, custosas. As inspeções são constantes e podem variar de pequenas intervenções de um dia até grandes intervenções com duração superior a cento e oitenta dias.

O grande desafio é definir qual aeronave deve parar quando para realizar qual atividade de manutenção, de maneira que possa ser mantida uma quantidade necessária de aeronaves disponíveis para cumprir a demanda das operações aéreas.

Dependendo da forma como o sequenciamento dessas atividades é planejado, pode-se seguir uma paralização parcial ou total da frota por grande período. Por exemplo, se uma aeronave sofre uma falha que exija intervenção de manutenção corretiva e não há oficinas disponíveis para executar o serviço, ela fica indisponível e entra em fila de espera. Uma alternativa seria parar o serviço de uma outra aeronave que já esteja em manutenção, permanecendo, no entanto, as duas indisponíveis.

Ocorre o mesmo se as horas de voo disponíveis até a próxima manutenção preventiva forem consumidas sem ter oficina livre para executar a manutenção. Na medida em que as aeronaves forem entrando na condição de falha ou vencimento das horas (indisponíveis) e não houver oficinas disponíveis, pode-se atingir a situação crítica de não haver nenhuma aeronave disponível para atender a demanda, consequência das filas nas oficinas de manutenção. Esta situação pode perdurar por longos períodos, até que as aeronaves saiam da oficina e retornem para a condição de disponíveis para o voo.

A Figura 1.1 apresenta um exemplo de planejamento inadequado da manutenção preventiva causando paralisação total da frota, em uma versão bastante simples. Não estão representadas as restrições do modelo, apenas o relacionamento das horas de voo disponíveis para cada aeronave do período 0 ao período 10 e o consumo de 100 horas de voo por período. Ao completar suas horas de voo (500 horas no exemplo dado), ou seja, esgotar o número de horas disponíveis, cada aeronave precisa ser recolhida para efetuar sua revisão de 500 horas.

Para o caso representado na Figura 1.1, a aeronave 2, no período 0, acabou de sair de uma revisão e, portanto, possui 500 horas de voo disponíveis. A aeronave 1 possui apenas 200 horas de voo disponíveis e, depois de completadas suas 200 horas de voo, passa a condição de indisponível. A aeronave 1 somente poderá voar esse quantitativo de horas até sua próxima revisão e segue, assim por diante, com as demais aeronaves. Observa-se que ao chegar no período 6, não há mais aeronaves disponíveis na frota.

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

Figura 1.1 – Exemplo de sequenciamento gerando paralisação total da frota (ABRAHÃO, 2006).

Portanto, a capacidade de prever e planejar atividades de manutenção de aeronaves é crucial para a sobrevivência das companhias aéreas (SCHULTE, 2013), para a sustentabilidade das agências governamentais (i.e., Defesa) e para a manutenção da capacidade de combate e pronta resposta das aeronaves militares (CHO, 2011).

Estes 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 (BAZARGAN, 2010).

Em virtude da grande escala dos problemas de planejamento e de gerenciamento para frotas de aeronaves, estes geralmente são tratados de forma separada (KENAN; JEBALI; DIABAT, 2018), divididos em subproblemas.

Recentemente começaram a surgir pesquisas no intuito de otimizar de forma integrada o conjunto desses subproblemas, surgindo os conceitos dos problemas de designação de matrículas de aeronaves e os problemas de roteirização de manutenção de aeronaves, do inglês *Tail Assignment Problem (TAP)* e *Aircraft Maintenance Routing Problem (AMRP)* (BASDERE; BILGE, 2014; KOWALSKI et al., 2021; PEREIRA BARRETO; ABRAHÃO; OLIVARES LOESCH VIANNA, 2021; SAFAEI; JARDINE, 2018; SHAHMORADI-MOGHADAM; SAFAEI; SADJADI, 2021; TEMUCIN; TUZKAYA; VAYVAY, 2021).

De forma similar, na área de defesa, surgiu o conceito do problema de planejamento de voo e da manutenção (PPVM), do inglês *Flight and Maintenance Planning (FMP)*, também conhecido como problema do planejamento da manutenção preventiva (PPMP) (ABRAHÃO, 2006; BALAKRISHNAN et al., 2021; GAVRANIS; KOZANIDIS, 2015; KOZANIDIS; GAVRANIS; LIBEROPOULOS, 2014; PESCHIERA et al., 2020; VERHOEFF; VERHAGEN; CURRAN, 2015).

Existe um grande volume de trabalhos e pesquisas recentes nessa área, que tratam, em sua maioria, de operações aéreas relacionadas à aviação civil, mais precisamente das grandes linhas de transportes aéreos (BASDERE; BILGE, 2014; DENG; SANTOS, 2022; KEYSAN; NEMHAUSER; SAVELSBERGH, 2010; LV; WANG; SUN, 2021; PAPAKOSTAS et al., 2010; QIN et al., 2020b; SHAHMORADI-MOGHADAM; SAFAEI; SADJADI, 2021; WITTEMAN; DENG; SANTOS, 2021). Proporcionalmente a estes, são poucos os trabalhos que abordam as operações aéreas militares e de defesa, que podem possuir características distintas das civis, tanto no contexto operacional quanto no logístico (BALAKRISHNAN et al., 2021; PESCHIERA et al., 2020; SHAHMORADI-MOGHADAM; SAFAEI; SADJADI, 2021).

Em menor escala, mas também compartilhando algumas das características das operações aéreas de defesa, temos outras atividades como operações de apoio à desastres de grandes proporções, frotas de outras forças de segurança (guarda costeira, polícias e bombeiros, entre outras), operações *offshore* (helicópteros) e até mesmo algumas empresas privadas, geralmente associadas à aviação executiva (PEREIRA BARRETO; ABRAHÃO; OLIVARES LOESCH VIANNA, 2021).

No entanto, apesar do avanço nas pesquisas relacionadas ao gerenciamento de frotas, Forças Aéreas de vários países ainda utilizam métodos empíricos para o planejamento da manutenção e alocação de aeronaves, baseado em planilhas e “regras de bolso”, ou melhores práticas, desenvolvidas a partir da experiência dos operadores (CHO, 2011; GAVRANIS; KOZANIDIS, 2015; SILVA, 2018; VERHOEFF; VERHAGEN; CURRAN, 2015). A análise dos trabalhos relacionados ao planejamento da manutenção, aponta para alguns pontos pouco ou não explorados pela literatura.

O primeiro aspecto trata do horizonte temporal do planejamento, que é restrito ao curto e médio prazo, desconsiderando o impacto da manutenção no período imediatamente após o analisado. O trabalho de Kozanidis *et al.* (2014) aponta para o benefício em utilizar horizontes temporais mais largos, sem, no entanto, mencionar o uso de todo o período da fase de O&S.

Outro ponto é o tipo de manutenção abordada, restrita à preventiva cíclica de maior impacto, ou seja, não contemplam toda a gama de manutenções preventivas (BALAKRISHNAN *et al.*, 2021; GAVRANIS; KOZANIDIS, 2017; LV; WANG; SUN, 2021; MARLOW; DELL, 2017; SILVA, 2018) e tampouco as corretivas da frota (SHAHMORADI-MOGHADAM; SAFAEI; SADIJADI, 2021). Diversos trabalhos sugerem a inclusão da manutenção corretiva quando tratando do planejamento da manutenção (SAFAEI; JARDINE, 2018; SILVA, 2018).

Finalmente, não são considerados os parâmetros individuais de manutenção corretiva, por matrícula (por aeronave). A literatura geralmente trata as características de manutenção corretiva de forma homogênea, desconsiderando, por exemplo, que algumas aeronaves tendem a ter piores indicadores de confiabilidade e manutenibilidade que outras, conhecidas como “rainhas de hangar”, do inglês, “*Hangar Queen*” (AIR COMBAT COMMAND, 2018).

1.1 Problema de pesquisa

De forma mais objetiva, o presente trabalho trata do planejamento da manutenção e de uso de aeronaves de defesa. O problema consiste em definir o sequenciamento de execução de atividades de manutenção de uma frota de aeronaves (programa de manutenção) de uma Organização com capacidade limitada de oficinas. Este sequenciamento deve levar em consideração a demanda de esforço aéreo abrangendo toda a fase de O&S, dentro do ciclo de vida do sistema.

Para que o planejamento de parada das aeronaves para a execução das atividades de manutenção possa ser cumprido em conformidade com o cronograma, a alocação, ou designação das aeronaves para as missões, também deve ser criteriosamente analisada. Aeronaves com poucas horas remanescentes que têm sua parada programada em tempo mais distante devem voar menos. Aeronaves próximas ao dia de parada, com muitas horas remanescentes, devem voar mais.

O sequenciamento inadequado das atividades de manutenção, a alocação descoordenada das aeronaves e a abordagem temporal limitada a um curto período podem conduzir a um excesso de indisponibilidade da frota e de atividades de manutenção, degradando o cumprimento da missão e os indicadores de suportabilidade.

O uso de métodos e algoritmos de otimização podem contribuir para a definição da programação das atividades de manutenção e plano de uso da frota que minimizem ou maximizem uma relação custo-benefício desejada, como a capacidade de pronta-resposta, a disponibilidade, ou os custos de manutenção por exemplo.

A programação da manutenção envolve, principalmente, as atividades de manutenção preventiva e corretiva, as quais estão diretamente relacionadas ao esforço aéreo. Quanto mais se voa com uma aeronave, mais manutenção preventiva será realizada, uma relação diretamente proporcional.

Já a manutenção corretiva, depende não só do esforço aéreo, mas também das características individuais de confiabilidade e manutenibilidade da aeronave. Dessa forma, a distribuição do esforço aéreo na frota deve ser bem avaliada.

A existência de filas está associada, basicamente, à limitação de capacidade de manutenção, envolvendo, principalmente, ferramentas, equipamentos, recursos humanos e espaço físico. Para efeito deste trabalho estes fatores foram agregados às oficinas. Quanto menos oficinas, maiores as chances de ocorrência de filas.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma nova abordagem para tratar o problema de planejamento da manutenção e de uso da frota por meio da otimização das atividades de manutenção de aeronaves de defesa, minimizando o tempo de parada por manutenção (*downtime*). Esta abordagem visa ao incremento da capacidade de pronta-resposta da frota, diante de um contexto operacional específico, considerando toda a fase de O&S.

O principal motivador para este estudo foi a aquisição das aeronaves F-39 Saab Gripen pela Força Aérea Brasileira.

Levando em consideração características do problema, são estabelecidas questões mais específicas para nortear o desenvolvimento do trabalho, quais sejam:

- QN1.** Como distribuir o esforço aéreo de uma frota, dada uma capacidade de manutenção específica?
- QN2.** É possível estabelecer a disponibilidade operacional máxima para uma frota de aeronaves, dado um cenário operacional específico?
- QN3.** É possível atingir a disponibilidade operacional máxima e planejar a manutenção preventiva de maneira a atender a demanda de esforço aéreo?
- QN4.** Como avaliar a capacidade de pronta-resposta de uma frota de aeronaves de defesa?

Em consonância com as questões norteadoras e no intuito de facilitar o desenvolvimento e compreensão do trabalho, etapas intermediárias são necessárias, definidas na forma de objetivos específicos, quais sejam:

- OE1.** Desenvolver modelo de distribuição de esforço aéreo da frota e dimensionamento de manutenção (QN1);
- OE2.** Desenvolver modelo de otimização de planejamento de manutenção de aeronaves de longo-prazo (QN2);
- OE3.** Desenvolver modelo de otimização de planejamento de manutenção de aeronaves de médio/curto-prazo integrado ao de longo-prazo (QN3);
- OE4.** Simular cenários para análise e avaliação dos resultados, da aplicabilidade e robustez do modelo, quando expostos a incertezas (QN4), comparando o novo modelo ao modelo convencional de planejamento da manutenção.

1.3 Estruturação do trabalho

Este estudo está organizado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta o contexto, a definição do problema e o objetivo do estudo; o Capítulo 2 analisa o problema de gerenciamento de frota/manutenção e algumas abordagens de solução, incluindo a modelagem e simulação; o Capítulo 3 descreve as estratégias para os testes; o Capítulo 4 descreve a aplicação das rotinas de teste, apresenta os resultados e discute as principais conclusões; o Capítulo 5 resume o estudo, contextualizando sua contribuição e apresentando a conclusão.

2 Fundamentação teórica e revisão de literatura

Neste capítulo serão apresentados conceitos fundamentais para a compreensão do problema envolvido no gerenciamento de frotas e manutenção de aeronaves de defesa na fase de O&S do ciclo de vida, bem como a apresentação dos métodos de otimização utilizados no presente trabalho. Em um segundo momento, serão discutidas as principais produções científicas com suas respectivas metodologias e ferramentas para a solução de problemas de planejamento de voo e manutenção de aeronaves. O foco da revisão de literatura são os trabalhos relacionados à otimização da manutenção e do plano de uso da frota de aeronaves em operações aéreas de defesa.

2.1 Manutenção de Aeronaves e Indicadores de Pronta Resposta

2.1.1 Manutenção de Aeronaves

O custo do elemento manutenção é certamente um fator importante no gerenciamento de operações aéreas. Em 2016 as divisões técnicas das 49 companhias aéreas cobertas pela análise da Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), gastou um total de USD 18,2 bilhões, com um custo de manutenção direta de USD 15,57 bilhões (MILLER; MARTIN, 2017). No ano fiscal de 2018 o DoD gastou USD 49 bilhões em atividades de O&S de aeronaves (U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, 2020).

Em auditoria realizada pelo GAO (2020), foi observado que no período de 2011 a 2019, dos 46 tipos de aeronaves analisadas, somente um tipo conseguiu manter as metas de capacidade de cumprimento de missão em todos os nove anos. Apenas dois tipos atingiram a meta em mais de quatro anos e 24 tipos (52%) não cumpriram a meta em nenhum dos anos analisados, conforme apresentado na Figura 2.2.

No eixo y estão listadas as aeronaves e no eixo x os anos fiscais avaliados. As barras verdes indicam que a frota de aeronaves cumpriu a meta em mais da metade do período. Em âmbar a frota que cumpriu a meta em mais de um terço do período, em vermelho menos de um terço e a barra toda azul as que não cumpriram a meta em nenhum dos anos avaliados.

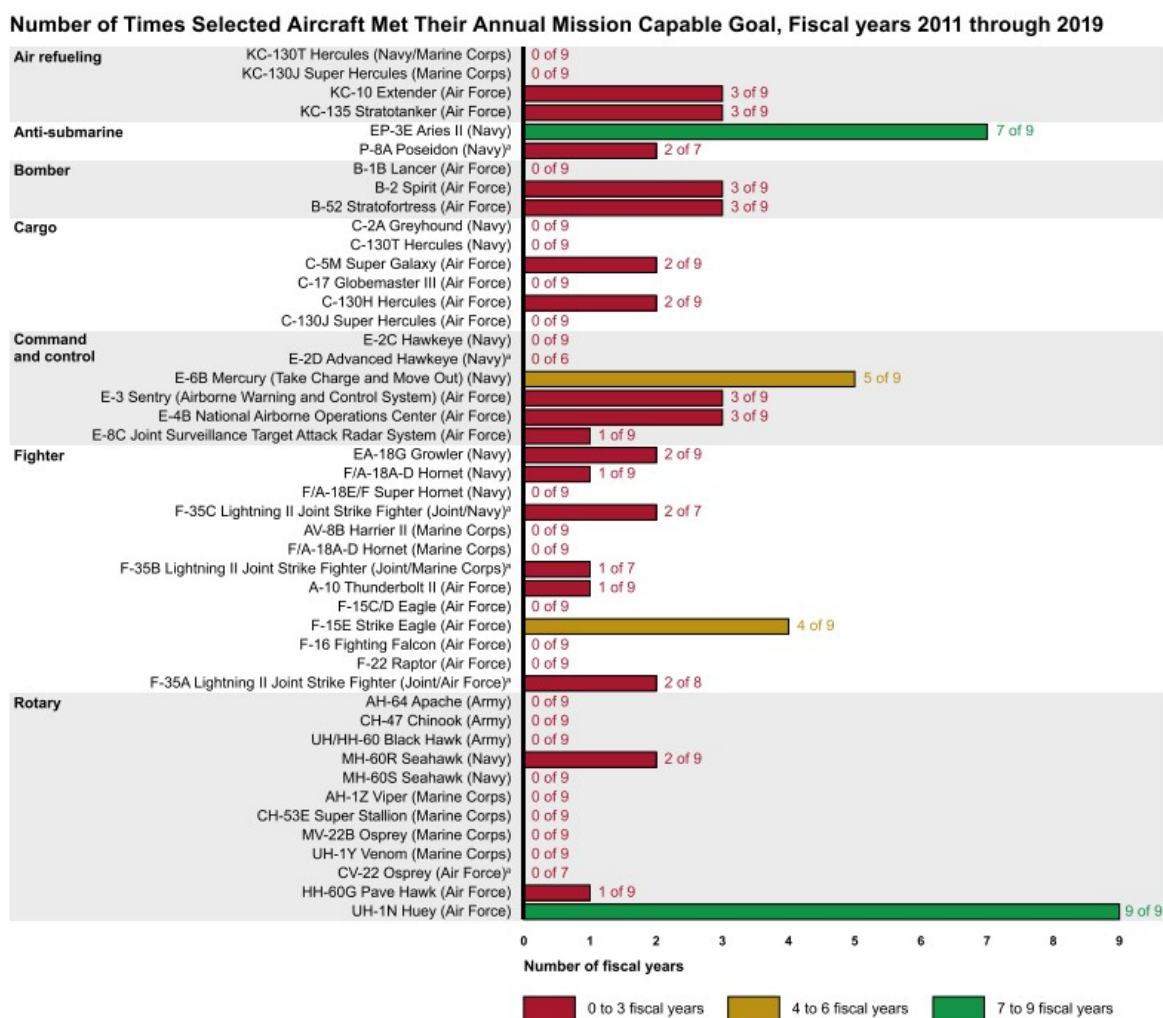


Figura 2.2 - Número de vezes que a frota de aeronaves atingiu sua meta de capacidade de cumprimento de missão no período de 2011 a 2019. U.S. Government Accountability Office (2020).

A auditoria cita diversas razões para o resultado como o envelhecimento da frota, desafios de manutenção e questões relacionadas ao suporte de suprimento.

Assim como o custo elevado, o tempo necessário para a execução das atividades de manutenção de aeronaves, que podem chegar a 180 dias ou mais de duração, é característica que distingue e ressalta a importância do planejamento da manutenção. Apesar de haver diversos tipos de manutenção, o presente trabalho utiliza a divisão clássica de Blanchard (BLANCHARD; BLYLER, 2016), com as seguintes definições:

a) Manutenção preventiva – envolve todas as ações programadas necessárias para que um sistema retorne a uma determinada condição de uso ou desempenho. Estão incluídos neste conceito as manutenções por horas de voo (por intervalos regulares, ou física, do inglês *phase inspection*), por ciclos de uso e por calendário (calendárias); e

b) Manutenção corretiva – envolve todas as ações não programadas ou inopinadas, originadas por uma falha ou percepção de falha, necessárias para que um sistema retorne a uma determinada condição de uso ou desempenho.

Mais recentemente, surgiram os conceitos de manutenção preditiva, manutenção prescritiva e manutenção produtiva total. A primeira trata basicamente da medida da condição de um equipamento, determinando se irá falhar em um período futuro definido (KUMAR; SHANKAR; THAKUR, 2017). Faz parte da estratégia de manutenção baseada na condição (CBM, do inglês *Condition Based Maintenance*), onde as decisões de manutenção são tomadas baseadas no monitoramento das condições do respectivo sistema (MEISSNER; MEYER; WICKE, 2021).

A manutenção preditiva tem caráter preventivo, pois tem como finalidade prevenir uma falha iminente que poderia comprometer a capacidade operacional de uma aeronave ou até mesmo da frota (ALBERTO FONTE SILVA LIMA; DA GRAÇA TAVARES ÁLVARES SERRÃO; MARTINS ABRANTES LEITE, 2017).

Apesar do caráter preventivo, o momento em que um determinado componente vai indicar a degradação é aleatório, tal qual na manutenção corretiva. Portanto, a manutenção preditiva pode ser embutida nos parâmetros de manutenção corretiva.

A manutenção prescritiva é considerada como nível máximo de maturidade e complexidade da manutenção baseada no conhecimento (KBM), do inglês *Knowledge-Based Maintenance* (NEMETH et al., 2018). É definida como uma abordagem que utiliza informações sobre as projeções de degradação de um equipamento no intuito de expandir o conhecimento no âmbito do processo de tomada de decisão.

As oportunidades de decisão resultantes da projeção temporal das demandas de manutenção permitem o desconflito de atividades de manutenção por meio de algoritmos, reduzindo o tempo de espera dos serviços (MEISSNER; MEYER; WICKE, 2021). Dessa forma, ao considerar todos os demais aspectos envolvidos, uma estratégia de manutenção prescritiva permitirá uma análise holística e otimização da manutenção (MEISSNER; RAHN; WICKE, 2021).

Associado ainda à capacidade de predição da manutenção, surgiu o conceito da Manutenção Produtiva Total (MPT), do inglês *Total Productive Maintenance* (TPM), que busca simplesmente minimizar o tempo de parada das máquinas, procurando melhorar a eficácia global do equipamento. Essa estratégia foi bastante popularizada em virtude do uso massivo de sistemas inteligentes, conectados e integrados, inserindo algum tipo de inteligência nas máquinas (GRIJALVO MARTÍN et al., 2020).

Quando se trata de frotas de defesa, é necessária a aquisição de uma quantidade de aeronaves que seja suficiente para garantir a capacidade de defesa diante de uma ameaça definida. Frotas comerciais também podem trabalhar com aeronaves sobressalentes para garantir a operação em contingências, mas geralmente em menor escala que as de defesa.

No entanto, em condições de paz, essa quantidade pode ser bem acima do necessário para a manutenção da capacidade das tripulações. Isto pode gerar um excedente de aeronaves e conseqüentemente um esforço aéreo abaixo do ideal de uso da frota, entrando na condição de baixa utilização da frota.

A baixa utilização implica a necessidade da aplicação de procedimento específico de manutenção, conhecido como estocagem de aeronaves. Este procedimento possui custo de material e pessoal, variando de acordo com as características de manutenção da própria frota. Incluir ou não uma aeronave estocada nos índices de disponibilidade também é objeto de discussão entre os operadores.

A título de ilustração, determinada aeronave de treinamento da FAB tem como requisito de estocagem a expectativa de indisponibilidade superior a sessenta dias. Realizando um voo de duração superior a 10 minutos a cada sessenta dias (aproximadamente 1 hora de voo por ano), isenta o procedimento de estocagem prolongada, restringindo-se à necessidade de realizar uma partida com aquecimento do motor por semana. Nesse caso a aeronave permanece disponível.

Outro conceito importante relacionado à manutenção de aeronaves diz respeito aos níveis de manutenção, referente à capacidade e infraestrutura necessária para a execução de atividades de manutenção, que variam de simples à complexidade extrema. A Força Aérea Brasileira utiliza a definição de Blanchard (2016):

O 1º nível de manutenção, Nível Organizacional (Orgânico), executa ações simples de manutenção, que não exigem equipamentos sofisticados, também denominado manutenção de linha, chegando a realizar pequenos reparos ou substituição de peças.

O 2º nível de manutenção, Nível Intermediário (Base), tem condições de executar ações que demandam equipamentos maiores e mais sofisticados, além de recursos humanos mais especializados. Podem ser realizados reparos maiores, desmontagens, substituição de componentes internos, dentre outros. Na FAB, geralmente se situam na mesma base que a de nível orgânico, mas em espaços físicos diferentes.

No 3º nível de manutenção, Nível de Fabricante (Parque de Material), último nível, são executadas ações de manutenção de grande complexidade, geralmente relacionadas às revisões que podem demandar desmontagem total da aeronave, reconstrução, adaptações etc. Geralmente se situam em grandes complexos de manutenção, não necessariamente na mesma base que a de níveis inferiores.

Para efeito do presente estudo, não serão diferenciados os níveis de manutenção. Considera-se que uma oficina tem capacidade de executar qualquer tipo de intervenção de manutenção de qualquer nível.

Quando se trata de uma frota de aeronaves que está concentrada em uma única localidade, é comum que as oficinas tenham condições de executar todos os níveis de manutenção.

2.1.2 Planejamento da Manutenção

O planejamento da manutenção deve especificar quando, onde, e quais as tarefas de manutenção devem ser realizadas em cada aeronave da frota. O seu objetivo é assegurar que a frota possa ser mantida eficaz e economicamente ao nível de prontidão desejado (AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE, 2018) ou uma relação custo-benefício favorável.

As complexidades envolvidas no planejamento da manutenção de aeronaves de defesa estão relacionadas, em sua maioria, na demanda de utilização destas, as quais variam em frequência e em intensidade de uso, o que dificulta a modelagem do problema. Esta complexidade faz com que o planejamento seja dividido em níveis, conforme detalhado a seguir.

2.1.2.1 Níveis de planejamento da manutenção

O presente trabalho usa as definições de “operacional” e “tático” em conformidade com os preceitos industriais e acadêmicos, que são invertidos em relação aos preceitos militares. Na doutrina militar, o operacional é um nível superior ao tático (nível execução, conhecido como a “ponta da linha” no jargão militar ou “chão de fábrica” na indústria), enquanto na indústria e academia, o operacional é o nível execução.

Geralmente o planejamento é realizado em três níveis: 1) estratégico, ou de longo prazo; 2) tático, ou de médio prazo; e 3) operacional, ou de curto prazo.

2.1.2.1.1 Planejamento estratégico

A abordagem de nível estratégico ou de longo prazo, extensamente analisada na etapa de dimensionamento da frota, pode ser considerada como o “grande” planejamento da manutenção. Este balizará todas as demais atividades de suporte integrado do produto (SIP) e seus respectivos dimensionamentos e planejamentos táticos e operacionais. Alguns autores restringem-na a períodos fixos (por exemplo, 5 a 10 anos (PESCHIERA et al., 2020)) e outros a um período mínimo (por exemplo, maior que cinco anos).

A *Defense Acquisition University* (DAU, [s.d.]) sugere a divisão do SIP 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 (“SX000i – International specification for Integrated Product Support (IPS)”, [s.d.]).

Em conformidade com as teorias de suporte integrado do produto– SIP - (AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE, 2016; DAU, [s.d.]; DOD, 1986, 2013, 2015; FANTASIA; ARTZER; GARDNER, 1997), as quais preconizam a visão global e sistêmica do gerenciamento de uma frota, o planejamento de longo prazo deve considerar todo o período previsto de operação da aeronave ou até o ponto previsto para realização da modernização da frota, geralmente superior a 15 anos.

É neste planejamento que deve ser dimensionada a capacidade da manutenção necessária para a operação, baseado na capacidade operacional desejada e levando em consideração todos os elementos do SIP.

A literatura sobre o planejamento de manutenção de longo prazo é relativamente escassa (ANDRADE et al., 2021; DENG; SANTOS, 2022; SHAUKAT et al., 2020; TEMUCIN; TUZKAYA; VAYVAY, 2021). Alguns trabalhos sobre processo de aquisição de aeronaves de defesa chegam a definir parâmetros genéricos para tempo de operação e uso das aeronaves.

Por exemplo, no intuito de analisar custos do ciclo de vida e auxiliar vinte e nove nações amigas a definirem requisitos para aquisição de helicópteros militares, Mouton (2015) trabalha com um horizonte temporal de 20 anos e define como parâmetro de planejamento de esforço aéreo e custo de manutenção a demanda de 300 horas de voo por aeronave por ano.

Já a Força Aérea Tcheca, de acordo com estudo realizado por Novotný, define como parâmetros para análise de aquisição de helicópteros de múltiplo emprego (*multirole*) um horizonte temporal de 25 anos de operação e um consumo de 250 horas de voo por aeronave por ano (NOVOTNÝ; PROCHÁZKA, 2017).

Também disponíveis em documentos oficiais de auditoria, a Índia previa 15 anos de vida útil para helicópteros militares de médio porte e 20 anos para helicópteros de grande porte e de ataque. Posteriormente estenderam para 35, 25 e 30 anos, respectivamente, com a expectativa de voar entre 45 e 50 horas/ano por aeronave (SUPREME AUDIT INSTITUTION OF INDIA, 2010).

Já na Força Aérea Australiana, previa-se a aquisição de 47 helicópteros (MRH90) a uma taxa de uso de 10.300h por ano (219,15 horas por aeronave), aproximadamente 4,2 horas por semana (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2014).

Observa-se, portanto, que o planejamento de estratégico, de alto nível, presume o uso uniformemente distribuído das horas de voo para o planejamento de longo prazo e análise de requisitos de frota, assim como se pratica em diversas Forças Aéreas.

2.1.2.1.2 Planejamento tático

A abordagem de médio prazo (tático) está associada aos programas de manutenção preventiva das aeronaves, estabelecendo, ainda, a conexão entre o plano estratégico (longo) e o operacional (curto). Geralmente é analisado no período de 1 a 3 anos, desde que haja uma previsão de demanda de esforço aéreo com certa precisão, podendo ser referenciado, ainda, pelo limite temporal de revisão geral (do inglês, *overhaul*) do projeto, quando aplicável.

2.1.2.1.3 Planejamento operacional

O planejamento de curto prazo (nível operacional) está associado à operação corrente, geralmente em um horizonte temporal diário, semanal ou mensal, variando de acordo com o volume de uso da frota. O maior volume de trabalhos científicos está relacionado a este nível e é justificável, dado que a demanda de esforço aéreo neste horizonte temporal geralmente já está definida e pouco sujeita a alterações significativas.

Além disso, é este planejamento que estabelece a conexão entre a operação propriamente dita - a escala de voo - e a manutenção. É neste nível, ainda, que serão realizadas as flexibilizações necessárias ao gerenciamento da manutenção no seu amplo aspecto, incluindo as atividades de manutenção preventiva cíclica e corretiva.

Tratando especificamente do planejamento e gerenciamento da manutenção, foram encontrados apenas trabalhos relativos aos planejamentos de médio e curto prazos, conforme detalhado na revisão de literatura específica em 2.3.2.

2.1.3 O método clássico de planejamento da manutenção (SSSM)

Modelos empíricos, baseados na experiência dos operadores, são frequentemente utilizados pelas forças armadas ao redor do mundo para o planejamento da manutenção (GAVRANIS; KOZANIDIS, 2017; SILVA, 2018; VERHOEFF; VERHAGEN; CURRAN, 2015).

Um método empírico bastante difundido, conhecido como diagonal de manutenção, busca manter o valor de horas de voo residuais de cada aeronave próximo de uma linha diagonal, que representa o sequenciamento de atividades de manutenção dentro de uma capacidade definida de espaço e de equipes de manutenção. Quando colocados em ordem decrescente, esta linha se assemelha a uma diagonal, origem do nome.

Este método, apresentado na Figura 2.3, conhecido também como *Sliding Scale Scheduling Method* (SSSM), é descrito no Apêndice D do Manual de Campo do Exército Americano (DOA, 2017) e referenciado em Abraão (2006) e Silva (2018). No entanto o referido manual não diz como usar este método de forma eficiente (VERHOEFF; VERHAGEN; CURRAN, 2015). É baseada no consumo gradativo e equitativo de horas de voo das aeronaves disponíveis.

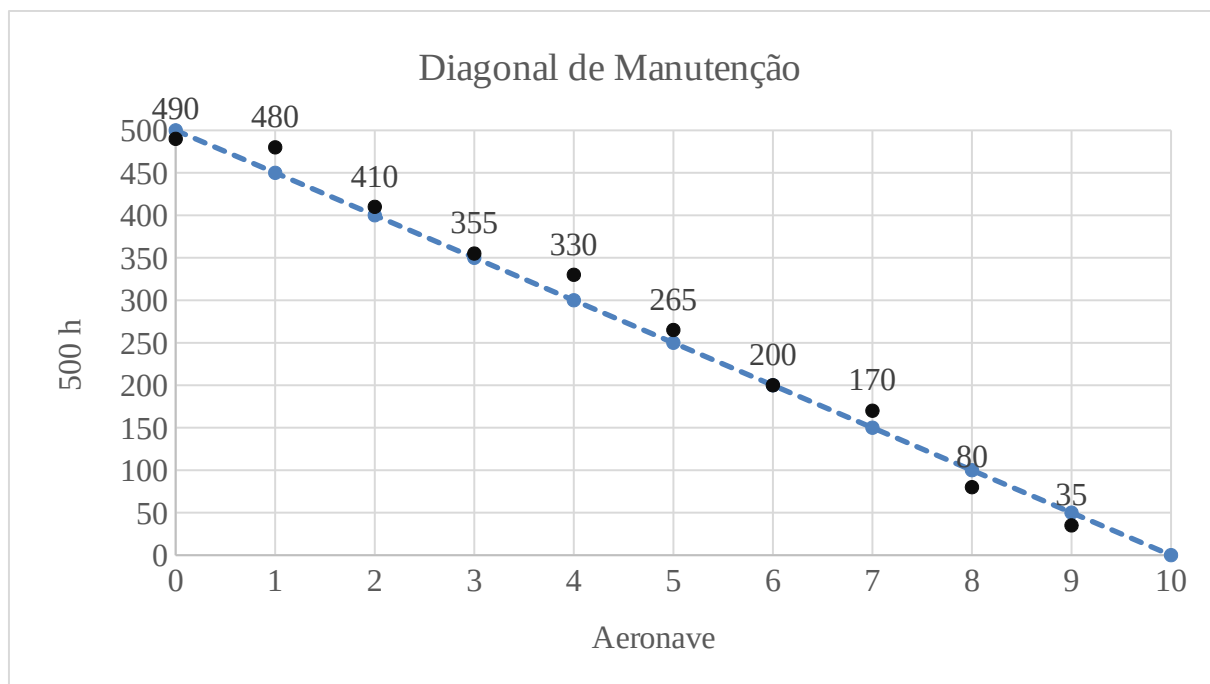


Figura 2.3 - Exemplo de diagonal de manutenção adequado. Adaptado de DoA (2017).

O eixo x representa as aeronaves, o eixo y a quantidade de horas de voo que a aeronave possui até a próxima manutenção programada. A linha pontilhada representa a diagonal de manutenção ideal, a ser perseguida.

As aeronaves que se encontram acima da diagonal são as prioridades para voar, enquanto as que permanecem abaixo devem ser poupadas, de modo que retornem à linha de referência. A alocação das aeronaves para o voo segue essas prioridades, mas as atividades de manutenção, apesar de sequenciadas, não possuem uma programação (data) definida.

Quando a aeronave esgota as horas disponíveis, é excluída do gráfico, permanecendo indisponível para o voo. Quando retorna da manutenção, entra na posição mais alta no início do eixo x, pois terá mais um ciclo completo de horas de voo disponíveis até a próxima inspeção, no nosso exemplo, 500 h. O gráfico deve ser atualizado ao menos uma vez por dia de voo.

A Figura 2.4 mostra uma diagonal de manutenção desbalanceada, onde se observa boa parte das aeronaves significativamente descoladas da linha de referência, tanto para cima quanto para baixo.

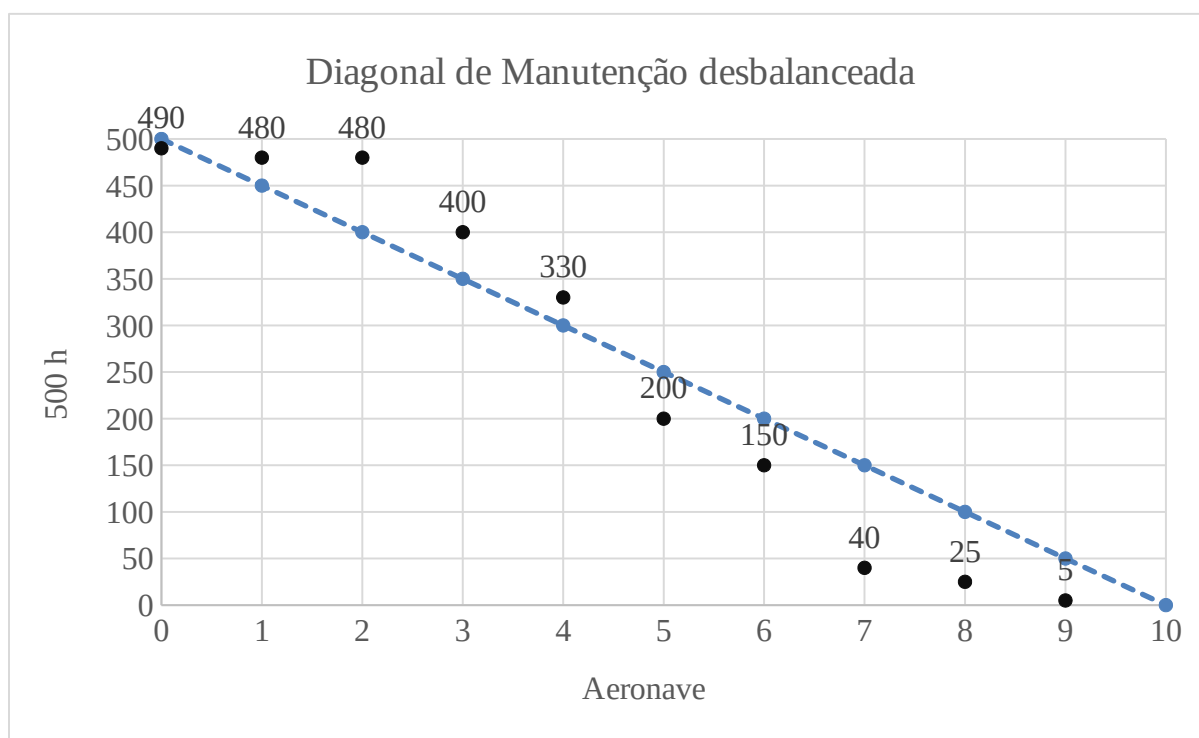


Figura 2.4 - Exemplo de diagonal de manutenção desbalanceada.

Na Figura 2.4, a linha azul pontilhada representa a diagonal de manutenção perfeita, na qual a diferença entre as horas de voo disponíveis entre duas aeronaves adjacentes é uma constante.

A diagonal de manutenção perfeita é o objetivo dos setores de planejamento. No entanto, é possível observar que na situação apresentada há desvios em relação a referência para uma quantidade considerável de aeronaves.

Esses desvios, por sua vez, podem resultar em problemas tais como filas de aeronaves sem condições de voo e aguardando a liberação de estações de manutenção, situação indesejável para um esquadrão que requer a máxima quantidade de aeronaves em condições de operar.

Resumindo, o SSSM tem como vantagem a simplicidade de uso tanto para a manutenção quanto para a alocação de aeronaves. No entanto, funciona apenas com a manutenção preventiva por horas de voo, não diferencia o tipo de manutenção e gera apenas uma visualização da sequência de parada da aeronave relativamente ao respectivo tempo residual de voo para a inspeção seguinte. Não gera um planejamento de manutenção, apenas um sequenciamento de parada.

Desta forma, o método aborda apenas inspeções imediatas relativas a um nível de manutenção preventiva. Por conseguinte, o SSSM é um método clássico que não considera um horizonte temporal de longo prazo, tampouco os demais níveis de manutenção preventiva nem a manutenção corretiva.

2.1.4 Indicadores de pronta resposta

A importância da pronta resposta no emprego de aeronaves, tanto comerciais quanto de defesa é inquestionável, visto que todas as estratégias de manutenção visam a otimizar esta capacidade. O próprio conceito de Logística Baseada em Desempenho, PBL (do inglês *Performance Based Logistics*), foi adotado pelo DoD Americano para otimizar a pronta resposta das aeronaves furtivas de ataque ao solo, F-117 *Nighthawk* (DOD, 2014). Diversos outros documentos e artigos buscam explicitamente a otimização deste indicador (BERTEAU, 2016; U.K. MINISTRY OF DEFENCE, 2016; ZHOU; BO; WEI, 2013).

A busca por indicadores que permitam quantificar a capacidade de cumprir missões no momento e na intensidade que forem demandadas ainda é objeto de estudos, principalmente na área de engenharia de sistemas, o que significa que ainda existem muitas divergências e dúvidas quanto a utilização de um ou de outro indicador.

Diversos indicadores ou métricas estão disponíveis para avaliação e medição da capacidade de uma frota em atender sua demanda, ou seja, de pronta resposta (prontidão). A aviação de defesa, cujo objetivo principal é responder a ameaças externas e apoiar várias atividades, desde busca e salvamento e apoio humanitário até à garantia da lei e da ordem em território nacional, procura manter elevados índices de prontidão.

Verhoeff define prontidão como a capacidade de uma organização de executar as missões aéreas designadas a ela, sempre mantendo uma quantidade suficiente de aeronaves disponíveis para executá-las e permanecerem nesse estado por determinado período (VERHOEFF; VERHAGEN; CURRAN, 2015). Ele avalia a prontidão operacional como um conjunto de três métricas: a) disponibilidade, b) capacidade de serviço e c) sustentabilidade.

A Força Aérea, Marinha e Exército dos EUA possuem três métricas em comum: a) taxa de capacidade de missão; b) taxa de indisponibilidade para missão por manutenção, do inglês “*not mission capable maintenance (NMCM) rate*”; e c) taxa de indisponibilidade para missão por falta de suprimento, “*not mission capable supply (NMCS) rate*”.

Existem também outras métricas específicas utilizadas por cada Força, tais como a disponibilidade, a taxa de indisponibilidade por falta de suprimento e manutenção, “*not mission capable for both supply and maintenance (NMCB)*”, e a taxa de indisponibilidade por falta de oficina, “*not mission capable depot (NMCD)*” (AIR COMBAT COMMAND, 2018; U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, 2020).

O DoD australiano utiliza o termo despachabilidade de aeronaves para operações de voo e define a confiabilidade e a manutenibilidade como critérios críticos para os processos de seleção (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2014).

Zhan (2016) cita, por exemplo, a confiabilidade de aeronaves e a confiabilidade do despacho, dentre outras, no intuito de redefinir e consolidar o próprio termo “confiabilidade do despacho”. Outros indicadores como taxa de missões completadas (*completion rate*), pronta resposta e disponibilidade (com suas diversas variantes) também são empregados.

As companhias aéreas e os aeroportos utilizam a métrica de confiabilidade de programação (do inglês “*sechedule reliability*”, SR), também conhecida como “robustez da programação” (WU, 2016), muito semelhante ao conceito de despachabilidade, definição mais próxima da capacidade de pronta resposta.

O conceito de pronta resposta de uma frota de aeronaves está associado à sua capacidade de atender as demandas de operações aéreas presentes e futuras.

Para se manter um nível mínimo de pronta resposta, deve-se garantir uma quantidade de aeronaves capazes de cumprir as missões em vigor e continuar nesse estado durante um determinado período. Ainda neste contexto, deve-se possuir tripulações capacitadas e treinadas em quantidade suficiente que permitam a execução das operações neste mesmo período.

A seguir, serão detalhados os conceitos de disponibilidade e confiabilidade da programação.

2.1.4.1 Disponibilidade de Aeronaves

O termo “disponibilidade” na engenharia foi inicialmente desenvolvido e aplicado nas áreas de defesa e aeroespacial (CONLON; LILIUS; FRANK, 1982), definida como uma medida do grau em que um sistema se encontra em estado operável no início de uma missão, quando ela é acionada, em qualquer ponto aleatório no tempo (CONLON; LILIUS; FRANK, 1982; STAPELBERG, 2009).

Atualmente existem diferentes definições para disponibilidade. Alguns autores consideram a disponibilidade como sendo a medida da capacidade de um sistema de estar disponível para uso. Outros autores afirmam que, além de estar disponível, tem que estar pronto e apto para completar a missão à qual será designado.

Independente da definição, a disponibilidade é uma função de relação entre tempo de operação e tempo de indisponibilidade (PEPPARD, 2010), devendo ser definida de acordo com a característica do sistema e da missão, ou seja, cada cenário de operação deverá possuir sua medida própria de disponibilidade (BLANCHARD, 2014).

Blanchard (2014) apresenta as três medidas mais usuais no cálculo de disponibilidade, baseadas nas medidas de confiabilidade e manutenibilidade. A disponibilidade inerente ao projeto (A_i) é baseada na taxa de falhas (MTBF) e na manutenção corretiva (Mct), excluindo a manutenção preventiva e atrasos logísticos. A disponibilidade possível (A_a), inclui todas as atividades de manutenção, e a disponibilidade operacional (A_o), considera o tempo entre manutenções (MTBM) e o tempo total de atividades de manutenção (MDT).

O MTBM refere-se ao tempo que a aeronave se encontra disponível para o voo, independente se está em operação ou parada. Já o MDT envolve todo o período em que a aeronave se encontra indisponível por atividade de manutenção, incluindo manutenção preventiva, corretiva, atrasos logísticos e atrasos administrativos.

Quando se trata especificamente da manutenção corretiva ou não programada, existe ainda o conceito de tempo médio entre as atividades de manutenção não programada MTBUMA, do inglês, *Mean Time Between Unscheduled Maintenance Actions* (CONLON; LILIUS; FRANK, 1982).

A A_o é a mais representativa quando se trata da representação real da disponibilidade de uma aeronave em seu cenário operacional (BLANCHARD; VERMA; PETERSON, 1995; CONLON; LILIUS; FRANK, 1982; SHERBROOKE, 2004) e utilizada para avaliação operacional de ensaios e cálculo dos custos do ciclo de vida (STAPELBERG, 2009)

Ainda, pelo fato de ser um indicador baseado em eficácia, a A_o é ponto de partida para praticamente todas as análises de dimensionamento e efetividade da força.

Portanto, dentro do contexto do presente trabalho, será utilizado o termo disponibilidade, referindo-se à disponibilidade operacional.

A formulação mais simples da medida de disponibilidade operacional (A_o) está descrita na Equação 2.1.

$$A_o = \frac{\text{Tempo Disponível}}{\text{Tempo Disponível} + \text{Tempo Indisponível}} = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} = \frac{\zeta + TE}{\zeta + TE + TMP + TMC + TAAL}, \text{ onde:} \quad (2.1)$$

MTBM = tempo médio entre manutenções (*mean time between maintenance*)

MDT = tempo total de parada por manutenção (*mean maintenance downtime*)

TO = Tempo de Operação

TE = Tempo de Espera (parado, porém disponível para uso)

TMP = Tempo Total de Manutenção Preventiva

TMC = Tempo Total de Manutenção Corretiva

TAAL = Tempo Total Atraso Administrativo e Logístico

Logo, quando se diz que a disponibilidade de uma aeronave em um ano (365 dias) é de 90%, significa que permaneceu 328,5 dias disponível para operação e 36,5 dias parada por manutenção, o que não significa que estará voando ou voará em todos os 328,5 dias.

2.1.4.2 Confiabilidade da Programação

A confiabilidade da programação, "*Schedule Reliability – SR*", é uma medida que descreve o "grau" de desempenho de uma programação de voo em comparação a uma programação original (WU, 2016). Embora amplamente utilizado na aviação civil, é um

indicador que, pela sua definição, mede a capacidade real de pronta-resposta de uma organização ou unidade aérea.

Diferentemente dos conceitos de disponibilidade, a definição de SR só faz sentido para avaliação do passado (eventos reais ou simulados) uma vez que o seu conceito é baseado em “eventos” planejados e realizados (ou não realizados).

Os critérios de comparação podem variar em função dos objetivos. Para as companhias aéreas e aeroportos, por exemplo, qualquer atraso na decolagem superior a 15 minutos ou cancelamento de um voo pode ser considerado uma missão perdida.

Para o presente trabalho, uma missão é considerada perdida (“*missed mission*” - MM) quando não houver aeronave disponível para cumprir a missão na hora prevista para a decolagem (missão programada, “*scheduled mission*” - SM) independentemente do motivo. O cálculo do SR é definido pela Equação 2.2:

$$SR(\%) = \frac{SM - MM}{SM} \quad (2.2)$$

Portanto, para efeito de avaliação do modelo de otimização desenvolvido no presente trabalho serão utilizadas as métricas de disponibilidade (A_o) e confiabilidade da programação (SR) como indicadores da capacidade de pronta resposta de uma frota. Entende-se a A_o é o indicador mais adequado para efeito de planejamento, enquanto o SR trata do indicador mais adequado para avaliar a capacidade de pronta-resposta de uma frota de aeronaves de defesa (QN4).

2.2 Métodos de otimização

As raízes da pesquisa operacional (PO) remontam à Segunda Guerra Mundial, quando grande massa de pesquisadores e cientistas se concentraram em aplicar teorias científicas no gerenciamento de operações de defesa, ou seja, em conduzir pesquisas em operações, dando origem ao termo “Pesquisa Operacional” (HILLIER; LIEBERMAN, 2010).

A PO utiliza métodos científicos para lidar com problemas de tomada de decisão por meio do desenvolvimento e solução de modelos matemáticos (POLER; MULA; DÍAZ-MADROÑERO, 2014). “Os modelos são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada” (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Um modelo prescritivo ou de otimização "prescreve" um comportamento para uma organização ou sistema que lhe permitirá melhor atingir seu(s) objetivo(s). Ou seja, procura encontrar valores das variáveis de decisão que otimize (maximizar ou minimizar) uma função objetivo entre o conjunto de todos os valores para as variáveis de decisão que satisfazem as restrições dadas (WINSTON, 2004). Para a solução dos modelos, podem ser aplicados diversos métodos de otimização.

O uso de métodos de otimização deve ser balanceado levando em consideração principalmente duas medidas de desempenho, a qualidade da solução e o tempo de busca. As características do problema vão definir qual medida deve ser priorizada. A Figura 2.5 mostra a relação entre essas medidas de desempenho em cada nível de planejamento.

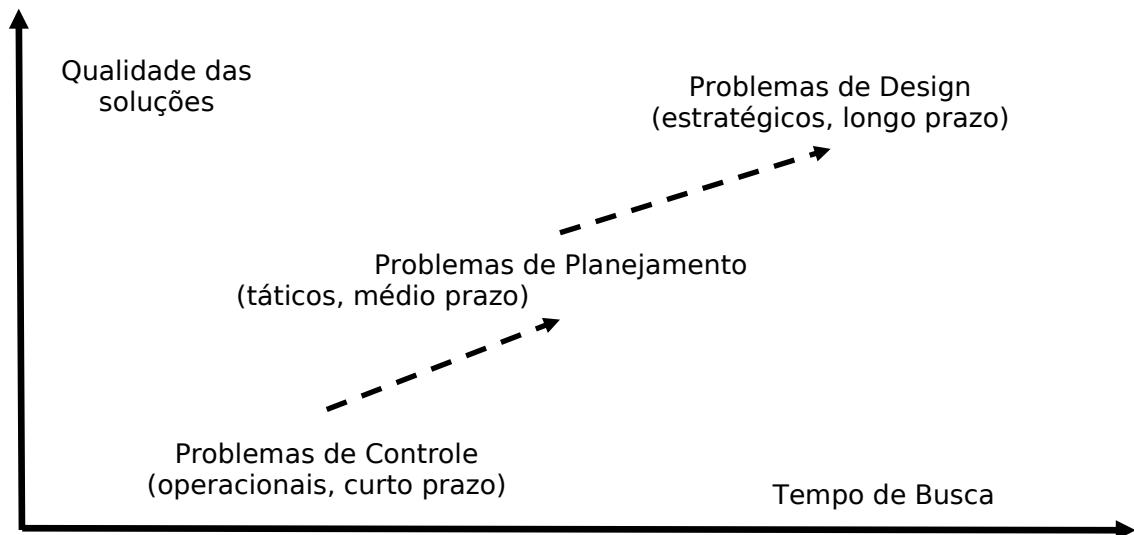


Figura 2.5 - Tipo de problema e solução de compromisso (SILVA, 2018).

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 (TALBI, 2009).

Os métodos aproximados ainda podem ser divididos em procedimentos heurísticos e aproximações. As heurísticas, por sua vez, podem ser classificadas em duas famílias distintas, a de heurísticas e de meta-heurísticas.

Enquanto a heurística trata de um procedimento, ou conjunto de etapas, em busca de uma boa solução viável para um problema específico, a meta-heurística é um método de solução geral que fornece tanto uma estrutura geral como diretrizes estratégicas para o desenvolvimento de um método heurístico específico para atender a um tipo particular de problema (HILLIER; LIEBERMAN, 2010).

2.2.1 Programação Linear Inteira Binária

Dentre as diversas aplicações científicas empregadas em PO 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 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 a PL durante o desenvolvimento de métodos de planejamento para o emprego, treinamento e programas logísticos de suporte ao combate (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 1977).

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 (BAZARGAN, 2010). A formulação mais básica da PL, apresentada no conjunto de Equações 2.3, trata de uma estrutura matemática composta de três partes: a) Função Objetivo (z , Equação 2.3), com seus coeficientes funcionais (c_1, c_2, \dots, c_n); b) Variáveis de Decisão (x_1, x_2, \dots, x_n) e as c) Restrições (b_1, b_2, \dots, b_m), com seus coeficientes tecnológicos (a_{11}, \dots, a_{mn}).

$$\text{MAX (ou MIN) } z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (2.3)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (2.4)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \quad (2.5)$$

$$\begin{array}{ccc} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \quad (2.6)$$

$$x_i \geq 0, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.7)$$

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 (Equações 2.4 a 2.6).

A programação linear é chamada inteira (PLI) quando as variáveis de decisão são números inteiros (Equação 2.7). 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 (WINSTON, 2004).

2.2.2 Meta-heurística Busca em Vizinhança de Grande Porte

Hillier (2010) 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.

É importante sempre ter em mente os conceitos de diversificação e intensificação. A diversificação se refere à capacidade de realizar uma exploração mais ampla no espaço de busca, identificando as regiões com melhores possibilidades de obter resultados ótimos através da busca randômica ou aleatória. Já a intensificação trata da exploração mais intensa e focada nas regiões mais “promissoras”, a busca local.

As meta-heurísticas, podem ser classificadas por diversos critérios, dentre eles, se são baseadas em soluções únicas ou em população, dependendo da característica exploratória de busca, ou seja, se é mais orientada à diversificação ou à intensificação (TALBI, 2009). Enquanto as de solução única são orientadas à intensificação, ou seja, focam mais na busca centrada em regiões específicas (busca local), as populacionais são orientadas à diversificação, ou seja, focam na busca ampla em todo espaço de soluções viáveis (busca global).

Meta-heurísticas baseadas em solução única (s-meta-heurísticas) têm essa denominação em virtude de buscarem uma solução a partir da melhoria de uma solução inicial. Processos iterativos são realizados de maneira que o espaço de busca do problema seja percorrido através de trajetórias pré-configuradas pelo algoritmo.

De uma maneira geral, estes processos iterativos das s-meta-heurísticas envolvem a a) definição de uma vizinhança, b) uma função de avaliação do incremento e c) a escolha da solução inicial.

A definição da vizinhança é crucial para o delineamento de qualquer s-meta-heurística. Trata-se de definir uma direção e uma dimensão de busca, o que varia de acordo com o tipo do problema em estudo. Formalmente, a vizinhança $N(s)$ de uma solução s no espaço contínuo é uma bola aberta $B(s, \epsilon)$ de centro em s e raio $\epsilon > 0$.

Já no espaço discreto, $N(s)$ é representado pelo conjunto $\{s' \mid d(s, s') \leq \epsilon\}$, onde d representa uma distância dada que está relacionada com o operador de movimento m e $\epsilon > 0$. O “movimento” de busca é executado por um operador de movimento, o qual vai gerar uma perturbação na solução.

O efeito dessa perturbação recebe o nome de “localidade” e pode ser forte se implicar em pequena variação na solução, ou fraca, se resultar em grande variação na solução. No caso extremo de localidade fraca o movimento convergirá para uma trajetória aleatória no espaço de busca.

A escolha da solução inicial é uma etapa que não exige muitos cuidados, dado que não existe uma estratégia específica para essa escolha, nem mesmo um indicador de desempenho das estratégias usualmente empregadas.

Apesar disso, é sabido que dependendo da estratégia escolhida, a relação entre qualidade da solução obtida e tempo computacional gasto pode sofrer alterações.

As mais conhecidas são as escolhas estocásticas e as gulosas (TALBI, 2009), no entanto o uso de outras heurísticas ou meta-heurísticas, análises determinísticas e até mesmo outros métodos exatos podem ser empregados para a escolha da solução inicial.

A meta-heurística de Busca em Vizinhança de Grande Porte, do inglês, *Large Neighborhood Search* (LNS), pertence a uma classe de heurística conhecida como *Very Large Neighborhood Search* (VLSN). Tem como característica uma elevada capacidade de encontrar ótimos locais, apresentando, de uma maneira geral, boas soluções.

Um algoritmo de busca de vizinhança é considerado da classe VLSN se sua vizinhança de busca cresce exponencialmente em relação ao tamanho da instância ou se a vizinhança é extremamente grande para ser explorado de maneira explícita, na prática. É classificada como metaheurística de solução única.

A LNS foi proposta em 1998 (SHAW, 1998) e apresentou resultados excepcionais para a solução de problemas de alocação de recursos e de roteirização (transportes) (GENDREAU; POTVIN, 2010), através do uso de heurísticas para a exploração de

vizinhanças complexas e incremento gradual da solução inicial pela alternância entre destruir e reparar a solução.

Schrimpf (2000) propõe estrutura bem similar ao LNS, denominada Ruína e Recriação (do inglês *Ruin and Recreate*). O método de destruição contém elementos estocásticos, de maneira que partes diferentes da solução são destruídos em cada iteração.

A vizinhança $N(s)$ de uma solução s é, então, definida como um conjunto de soluções que podem ser encontradas pela destruição e posterior reparação, conforme observado Figura 2.6. O nome da heurística vem do fato de que, como grande parte da solução é destruída a sua vizinhança contém grande quantidade de soluções.



Figura 2.6 - Processo de destruição e reparo de partes da solução. Adaptado de Gendreau e Potvin (2010).

O algoritmo LNS, descrito na Figura 2.6, é constituído por 3 variáveis e 3 funções. A variável x^b é a melhor solução observada durante a busca, x é a solução corrente e x^t a solução temporária que será descartada ou atualizada para solução corrente.

Busca em Vizinhança de Grande Porte (LNS)

```

1  $x =$  Gerar solução inicial viável  $s$ ;
2  $x^b = x$  ;
3 repita
4      $x^t =$  Perturbação  $r(d(x))$ ;
5     se aceitar  $(x^t, x)$  então;
6          $x = x^t$ ;
7     fim se
8     se  $c(x^t) < c(x^b)$  então:
9          $x^b = x^t$ 
10    fim se
11 até atingir critério de parada;
12 retorna:  $x^b$ 

```

Figura 2.7 – Pseudo-código de Busca em Vizinhança de Grande Porte. Adaptado de (GENDREAU; POTVIN, 2010)

A linha 1 é a inicialização, através da inserção de uma solução inicial e a linha 2 aloca a melhor solução global já observada para análise. Na linha 4 são realizados os processos de destruição ($d(x)$) e reparo ($r(x)$) da solução alocada para obter a nova solução x^t , que será avaliada na linha 5, quando a heurística deverá determinar se essa solução se tornará a nova solução corrente (linha 6) ou ser descartada. A função *aceitar* pode ser implementada de diferentes maneiras, sendo a mais simples a aceitação somente de soluções de melhoria.

Sendo selecionada como nova solução corrente (x), a linha 8 confere se a nova é melhor que a melhor já existente, sendo atualizada na linha 9, se necessário. O processo ocorre até ser atingido o critério de parada (linha 11), geralmente por número de iterações ou por limitação temporal. Finalmente, a linha 12 retorna a melhor solução encontrada.

O ponto principal da heurística LNS é que vizinhanças grandes facilitam a navegação no espaço de busca, mesmo em instâncias com elevado grau de restrições, diferentemente de vizinhanças pequenas. Shaw (1998) propôs que a função *aceitar* só permitisse melhoria nas soluções. Posteriormente, outros trabalhos usaram o mesmo critério do recozimento simulado, permitindo uma solução deteriorada, em alguns casos.

A função de destruição tem papel importante na LNS, sendo a definição do grau de destruição a escolha mais importante. Se a parte a ser destruída for muito pequena, a heurística pode ficar presa em torno de ótimos locais, prejudicando a característica de exploração do espaço de busca.

Em contrapartida, uma destruição muito grande pode degradar a solução, através do aumento da possibilidade de otimizações repetidas, dada a incapacidade de buscar mais vizinhanças. Para contornar estes problemas, pode-se lançar mão de variações no grau de destruição dentro da própria função, alterando-o a cada iteração ou sequência de iterações, dependendo do tamanho da instância.

Portanto, o método de destruição dever ser escolhido de maneira que todo ou pelo menos as partes mais promissoras do espaço de busca possa ser investigado, ou seja, onde se espera que o ótimo global esteja.

O LNS permite uma grande flexibilidade no método de reparo. A primeira decisão é se o método deve reconstruir a solução a partir de um ótimo para aquela destruição parcial ou alguma outra heurística para tal. A primeira pode ser mais demorada, mas tem o potencial de escolher melhores soluções em poucas iterações.

No entanto, do ponto de vista da diversificação, a operação de reparo a partir do ótimo pode não ser atrativa, produzindo soluções idênticas ou somente de melhoria, reduzindo a possibilidade de fugir de vales no espaço de busca, a não ser que o grau de destruição seja elevado, em cada iteração.

2.3 Revisão de Literatura

A busca na literatura de trabalhos relacionados ao planejamento da manutenção e da alocação de aeronaves ressalta a importância do tema. Pesquisa com os termos *Maintenance Planning* (MP) ou *Fleet Assignmet* (FA) retornaram 44.522 produções científicas. Produções científicas que citam os dois temas conjuntamente somam 1.475 trabalhos.

Observa-se, no entanto, a escassez de trabalhos na área de defesa (824 artigos) e que tratam de otimização (153 trabalhos). Ainda, dentre estes últimos, somente 23 se mostraram relevantes para o presente trabalho. As pesquisas foram realizadas principalmente nas bases de dados da SCOPUS, Web Of Science e Portal de Periódicos da CAPES.

Em comparação à grande variedade de livros, artigos e outras publicações versando sobre métodos de otimização em operações aéreas comerciais, poucas aplicações diretas destas metodologias em operações aéreas militares estão disponíveis na literatura científica.

A PO, desde suas origens, trabalha intensamente na modelagem e na busca de soluções otimizadas para os problemas de operações aéreas (BELOBABA; ODONI; BARNHART, 2009). Em virtude desses problemas serem, por natureza, considerados de grande escala e de elevada complexidade computacional, NP-Duro (do inglês *NP-Hard*), geralmente são tratados na literatura de forma segmentada.

Luenberger (2016) define problemas de pequena escala os que possuem até 5 variáveis ou restrições, de escala intermediária de 5 até 1.000 variáveis e de larga escala os que possuem mais de 1.000 variáveis ou restrições.

Portanto, os subproblemas de operações aéreas (BARNHART; BELOBABA; ODONI, 2003), geralmente são divididos em: (a) problemas de programação de voo (FS – *flight scheduling*); (b) problema de alocação de aeronaves (FA – *fleet assignment*); (c) problemas de escala de tripulantes (CP – *crew pairing* ou *rostering*); (d) problemas de roteirização de manutenção de aeronaves (AMRP – *aircraft maintenance routing problem*); (e) problemas de recuperação de interrupção de escala (*disruption/recovery*) (BELOBABA; ODONI; BARNHART, 2009) ou operações irregulares (ABDELGHANY; ABDELGHANY, 2016); e (f) planejamento de pessoal de manutenção e suporte (BAZARGAN, 2010).

Em operações aéreas de defesa, predominam os problemas de Planejamento de Manutenção de aeronaves (MP – *maintenance planning* ou AMCS – *aircraft maintenance check scheduling*) (ABRAHÃO, 2006; SILVA, 2018) ou (ANDRADE et al., 2021; DENG; SANTOS, 2022; DENG; SANTOS; VERHAGEN, 2021; SHAHMORADI-MOGHADAM; SAFAEI; SADJADI, 2021; SRIRAM; HAGHANI, 2003), também conhecido como Planejamento de Manutenção e de Voo (FMP – *flight and maintenance planning*) (BALAKRISHNAN et al., 2021; CHO, 2011; GAVRANIS; KOZANIDIS, 2017; KOZANIDIS; GAVRANIS; LIBEROPOULOS, 2014; PESCHIERA et al., 2020). O MP e o FMP são variantes da AMRP, geralmente aplicados nas operações aéreas de defesa.

As atividades de manutenção implicam uma série de problemas interligados. A literatura disponibiliza várias obras que procuram otimizar, por exemplo, a programação e planejamento da mão-de-obra de manutenção (ALFARES, 1999; ERTOGRAL; ÖZTÜRK, 2019; SAFAEI; BANJEVIC; JARDINE, 2009, 2011) e a programação da manutenção do hangar (QIN et al., 2019, 2020a). Outros estudos abordam vários aspectos do planejamento e da programação de atividades, materiais e recursos (ALFARES, 1999; CHEUNG; IP; LU, 2005; DIJKSTRA et al., 1991; KILPI; TÖYLI; VEPSÄLÄINEN, 2009).

Mais especificamente, o presente trabalho trata do planejamento de manutenção e programação de voo (ANDRADE et al., 2021; DENG; SANTOS, 2022; GAVRANIS; KOZANIDIS, 2015; KOWALSKI et al., 2021; LV; WANG; SUN, 2021; OKUNADE; OBUSEH; CHARLES-OWABA, 2021; PESCHIERA et al., 2020; SANCHEZ; BOYACI; ZOGRAFOS, 2020; SHAHMORADI-MOGHADAM; SAFAEI; SADJADI, 2021; VERHOEFF; VERHAGEN; CURRAN, 2015; WITTEMAN; DENG; SANTOS, 2021), abordando o problema de decidir quanto tempo quais aeronaves disponíveis irão voar e

quando é que as aeronaves irão parar para executar as atividades de manutenção preventiva. O objetivo é otimizar uma relação custo-benefício definida.

Apesar dos avanços das técnicas de otimização, da capacidade computacional e das teorias de alocação de recursos, os subproblemas acima são usualmente resolvidos em sequência com fluxo unidirecional. As decisões tomadas a partir da solução do subproblema anterior são usadas para orientar a resolução do seguinte.

Esta abordagem pode conduzir para soluções ótimas locais ou sub ótimas, com perdas econômicas e operacionais significativas (BELOBABA; ODoni; BARNHART, 2009). O grande desafio ainda está na forma de modelagem do problema, no sentido de reduzir a complexidade computacional e aumentar a capacidade de busca de ótimos globais.

2.3.1 Operações Aéreas de Defesa

A principal diferença entre as operações aéreas de defesa e comerciais está relacionada ao tipo de missão. Nas linhas aéreas as aeronaves realizam transporte de passageiros e carga, o que implica decolagens e pousos em vários aeródromos diferentes a longo do dia, com pernoites e atividades de manutenção fora da localidade de onde iniciou a operação.

As tripulações e demais envolvidos na operação encontram-se espalhados em pontos chave para apoiar a atividade.

No que tange à rotina, os intervalos de operação das linhas aéreas são fixos e constantes, ou seja, tem-se o mesmo consumo de esforço aéreo em períodos repetitivos, facilitando o planejamento da manutenção e definição do local de pernoite das aeronaves.

Na aviação de defesa (DANTAS; SILVESTRE, 2020; NEGRÃO COSTA et al., 2021; REBOUÇAS et al., 2022), em linhas gerais, as aeronaves encontram-se sediadas em um aeródromo específico, decolam para suas surtidas (missões) das mais variadas (ataque e bombardeio, defesa aérea, busca e salvamento, apoio aéreo aproximado, dentre outras) e retornam para a sede, onde pernoitam e executam suas atividades de manutenção e suporte.

Toda a tripulação e pessoal envolvido na operação, geralmente, também se encontra na mesma localidade. Diferentemente das linhas aéreas, o consumo de esforço aéreo não é totalmente previsível, variando em frequência e volume de um período para outro, o que exige uma maior flexibilidade em termos de gerenciamento da manutenção.

Em tempos de paz, a maior parcela de uso da frota restringe-se a operações de treinamento (SILVA; REBOUÇAS, 2020). Estas operações variam de intensidade com considerável grau de imprevisibilidade de demanda no nível operacional, ou seja, semanal e diário. No entanto, estas missões possuem certa flexibilidade, o que permite realocá-las de maneira a se manter um plano de uso previsível no nível tático (mensal ou anual).

Para ilustrar a situação, supondo que já exista o planejamento de várias missões de treinamento para serem cumpridas no dia d , e em $d - 1$ (dia anterior) a unidade aérea recebe ordens superiores para executar um conjunto de missões “reais” em d . Caso não haja aeronaves para atender todas as demandas, as “reais” serão priorizadas e as de treinamento serão realocadas para outro período, sem prejuízo do planejamento da instrução para aquele mês ou ano.

Neste caso, o esforço aéreo foi alterado de forma imprevisível, podendo impactar significativamente no esforço aéreo do dia d ou daquela semana. No entanto, com a realocação das missões de treinamento para outros períodos, pode-se conseguir, ainda, cumprir o planejamento de consumo de esforço aéreo para aquele mês.

A capacidade de manter uma frota de aeronaves é crucial para o cumprimento da missão. O planejamento e gerenciamento das atividades e cronogramas de manutenção é a chave para manter a pronta-resposta necessária para a sustentação ao combate, medida de forma antecipada, geralmente, pela disponibilidade das aeronaves.

Portanto, o primeiro ponto a ser otimizado, quando se trata de operações aéreas de defesa, é a otimização do uso dos recursos de manutenção, para garantir a disponibilidade máxima da frota (CHO, 2011). No entanto, não é possível maximizar o uso dos recursos de manutenção sem a existência de uma previsão de consumo de esforço aéreo para a frota em questão.

Na Força Aérea Brasileira, os Comandos Superiores informam a previsão de consumo do esforço aéreo anualmente para suas frotas. De posse dessa informação os Esquadrões Aéreos planejam como distribuirão as horas durante o ano, levando em consideração as condições ambientais (meteorologia, restrições de pistas, operações específicas de treinamento fora de sede etc.) e de pessoal (planejamento de férias, de cursos e outros fatores que vão restringir a quantidade de tripulantes em determinados períodos do ano).

A partir desse planejamento das operações aéreas surge o desafio de montar o planejamento da manutenção (programação) de forma a atender a demanda.

2.3.2 Planejamento da manutenção de aeronaves de defesa

O crescimento da importância acadêmica dos estudos relacionados a efetividade e otimização das atividades de manutenção de aeronaves de defesa foi reconhecida pela comunidade de pesquisa operacional e ciências do gerenciamento (HORNER, 2006).

A capacidade de prever e planejar as atividades de manutenção de aeronaves é crucial para a sobrevivência de empresas privadas do setor aéreo (SCHULTE, 2013) e sustentabilidade dos órgãos governamentais.

Na literatura, os problemas relacionados à operações aéreas são em sua maioria de níveis operacionais (BASDERE; BILGE, 2014) e táticos, ou seja de curto e médio prazos, envolvendo um futuro de um mês a um ano de planejamento (AL THANI; BEN AHMED; HAOUARI, 2016). Trabalhos envolvendo o planejamento de longo prazo ou de nível estratégico são escassos (SHAUKAT et al., 2020).

O problema de planejamento de manutenção possui algumas abordagens distintas. O problema de programação da manutenção preventiva, PPMP, envolve a busca do sequenciamento ótimo de aeronaves a serem mantidas, conhecido como diagonal de manutenção, de maneira que as equipes e oficinas de manutenção não fiquem sobrecarregadas e nem ociosas.

Uma aeronave só deve parar para manutenção se a equipe já tiver concluído um serviço anterior e esteja disponível para iniciar a próxima atividade. Desta forma, busca-se a redução do *downtime*, tempo que a aeronave permanece fora de serviço (indisponível), aumentando a disponibilidade da frota. Determina-se, portanto, o melhor intervalo de manutenção de acordo com um conjunto de medidas de desempenho, geralmente relacionados ao custo, disponibilidade e confiabilidade.

Outra abordagem integra o planejamento da manutenção à escala de voo, onde programa-se a manutenção e a partir de então as aeronaves são alocadas. É conhecida na literatura como *Aircraft Maintenance Routing Problem* (AMRP). O AMRP determina rotas individualizadas para aeronaves de maneira que cada rota ofereça oportunidades para que a ação de manutenção seja executada, minimizando o impacto da indisponibilidade da aeronave (SAFAEI; JARDINE, 2018). Nesta abordagem, parte-se da roteirização, buscando a melhor janela para a atividade de manutenção.

O problema do planejamento da manutenção e da alocação de aeronaves (PPMAA), do inglês *Flight and Maintenance Planning*, trata do problema de decisão relacionado à definição de quais aeronaves de uma determinada frota deverão estar disponíveis para voar e quais deverão estar indisponíveis para que executem atividades de manutenção e em que períodos.

O FMP é uma variante do AMRP, quando se trata da definição do escopo do problema. No entanto dada as diferenças e peculiaridades operacionais entre as operações das grandes linhas aéreas e as operações aéreas militares, podem ser considerados problemas distintos, pois enquanto o AMRP foca em rotas, o FMP foca em escala de voo (horas voadas).

Apesar de ser originalmente uma aplicação militar, o modelo pode ser estendido para qualquer operação aérea que envolva pronta resposta e disponibilidade, como operações de combate a incêndio, missões humanitárias, de resgate etc.

O primeiro estudo relevante para o presente trabalho, que trata da integração entre manutenção e operação de aeronaves, foi conduzido por Sgaslik (1994). Ele implementou dois modelos lineares inteiros mistos sequenciais (MIP). O primeiro para o planejamento, que chamou de longo prazo (um ano) e o segundo para o curto prazo, restrito à atribuição de aeronaves.

Pippin também utilizou um modelo linear inteiro misto além de um modelo quadrático para alocação de aeronaves, comparando seus resultados com a diagonal de manutenção (SSSM). Utilizou a manutenção preventiva apenas como restrição dentro de seu modelo, também limitado a um ano de funcionamento. Ele considerou apenas a inspeção com maior impacto na disponibilidade (PIPPIN; DELL; HALWACHS, 1998).

Em sua primeira abordagem sobre o tema, Kozanidis (2006a) introduziu o *Flight and Maintenance Problem*, propondo um modelo de otimização biobjetivo de programação linear inteira mista que busca maximizar a capacidade de pronta resposta. O objetivo é maximizar a disponibilidade da frota durante o horizonte temporal analisado (KOZANIDIS; SKIPIS, 2006b), satisfazendo certas condições operacionais e logísticas, ou seja, uma determinada demanda de horas de voo e os requisitos de manutenção das aeronaves.

Ele estabelece como condições de contorno o horizonte temporal de 6 meses, uma quantidade de 24 aeronaves, com demanda mensal total de horas de voo por conjunto de 8 aeronaves (3 esquadrões aéreos), com capacidade de manutenção definida também por período mensal e tempo de voo residual total no início do período por esquadrão.

O problema da programação de manutenção preventiva (PMPP), similar ao FMP, foi apresentado por Abrahão (2006), visando maximizar a disponibilidade por meio da minimização dos problemas de capacidade da oficina e do desperdício de horas de voo das aeronaves que são retiradas para manutenção preventiva antes de consumirem todas as horas disponíveis.

Por se tratar de um problema não linear, utilizou meta-heurísticas baseadas em colônias de formigas para resolver o problema. O modelo considerou uma frota de 20 aeronaves de defesa da Força Aérea Brasileira, o F-5 Tiger, no espaço temporal de 2 anos, estabelecendo uma média de 50 horas de voo por aeronave por mês. Considerou dois níveis de manutenção e duas inspeções programadas, das seis previstas para aquele projeto (BRASIL, 2018).

Papakostas (2010) faz uso de métodos estocásticos para gerar alternativas para o planejamento da manutenção em curto prazo (nível operacional). As alternativas são avaliadas seguindo funções multicritério (Função Utilidade), baseadas em custo e disponibilidade, para cada voo.

A decisão final a ser selecionada diz respeito sobre se as tarefas de manutenção deverão ser executadas pela manutenção de linha, ou pista (local) ou poderão ser postergadas para a próxima estação com serviço de manutenção de nível superior. O tempo de voo remanescente do componente ou sistema (*remaining useful life* – RUL) é utilizado como restrição condicional da função.

A programação inteira mista foi utilizada por Cho (2011). Ele propôs um modelo de dois estágios denominado PM-MIP (*phase maintenance – mixed integer programming*) onde primeiramente busca equilibrar os requisitos de manutenção e operacionais, resultando em um cronograma de manutenção.

Em seguida, desagrega o problema de alocação e manutenção de aeronaves em vários subproblemas, aplicando o MIP para resolvê-los. Da mesma forma, considera apenas um nível de manutenção preventiva em um horizonte temporal de um ano em um cenário com 14 aeronaves.

Ele usa como função objetivo a minimização da quantidade de aeronaves em manutenção no período. O uso de apenas um nível de inspeção não representa a realidade da manutenção preventiva, visto que, geralmente, as aeronaves possuem mais de um nível de inspeção com diferentes durações de manutenção, além da manutenção corretiva.

Portanto, este modelo ignora a proximidade de uma inspeção de maior custo, o que vai impactar diretamente na indisponibilidade da frota além do período otimizado, conforme observado pelo próprio autor. Posteriormente sugere o uso da minimização do número total de eventos de manutenção no período (*downtime*) como função objetivo.

Em virtude da complexidade computacional do problema, Kozanidis sugere duas heurísticas para a resolução do FMP. A primeira, baseada no método de programação de manutenção (SSSM), e a segunda uma heurística de divisão de períodos, do inglês, *Horizon Split Heuristic* (HSH) (KOZANIDIS; GAVRANIS; LIBEROPOULOS, 2014).

A HSH apresenta um comportamento bastante míope. Ela se concentra em maximizar a disponibilidade da frota primeiro nos períodos iniciais, o que pode resultar em baixa disponibilidade nos próximos períodos.

Em geral, o número de períodos de cada horizonte tem um forte efeito na qualidade da solução obtida pelo HSH. Uma conclusão interessante que decorre desta observação é que, uma vez que este é um problema contínuo e repetidamente resolvido em horizontes sucessivos, a extensão do horizonte para os quais o comando emite as demandas de voo tem um forte impacto na disponibilidade a longo prazo da unidade.

À medida que o número de períodos durante os quais o comando emite a demanda de voo aumenta, espera-se que a disponibilidade da frota da unidade também aumente. Esta observação revela os benefícios potenciais do alargamento do horizonte de planejamento para os quais estão disponíveis as informações de demanda de esforço aéreo.

Basdere (2014) também comprime os programas de manutenção em tempo de voo remanescente e compara o resultado entre uma LIP (B&B) e uma meta-heurística, conhecida como *Compressed Annealing* (CA). Como esperado, o método exato apresenta melhor resultado, mas com maior custo computacional, em comparação ao CA, que apresenta boas soluções para problemas de grande escala em aproximadamente dois minutos de processamento.

Tem como horizonte temporal o período de uma semana, para uma frota de 8 aeronaves em uma rede de 354 voos. No entanto, a restrição de manutenção engloba apenas um tipo de manutenção preventiva. Deixa, ainda, como trabalhos futuros, a integração da escala de tripulação ao seu modelo, que chama de OAMRP, do inglês *Operational Aircraft Maintenance Routing*.

Novamente o MIP foi utilizado por Verhoeff (2015) para atacar o FMP, contrapondo ao SSSM. Considerou a distribuição de horas residuais da frota na função objetivo, utilizou apenas um nível de manutenção e a restrição da capacidade de manutenção simultânea de apenas uma aeronave. O modelo, assim como os anteriores, não assume uma abordagem de número de cauda ao atribuir o tempo de voo, nem considera explicitamente fenômenos estocásticos no ambiente da aviação militar (por exemplo, manutenção corretiva).

Guedes (2015) considerou quatro níveis de inspeção para uma frota de 50 aeronaves. Limitou a capacidade de manutenção a uma proporção fixa de 0,5 aeronave por mês, independentemente do nível de manutenção, desconsiderando a localização da oficina, para um horizonte de 5 anos, limitando o consumo de esforço aéreo da frota em 36.000 horas. Implementou o modelo de programação linear por meta (*goal programming*).

Utilizou como referência o consumo de 15 horas de voo por aeronave por mês. Em seu trabalho, usou o PPMP para dimensionar e distribuir o esforço aéreo total entre 4 esquadrões aéreos, levando em consideração uma função de valor baseada no pensamento focado em valores, VFT (do inglês, *Value Focused Thinking*) (KEENEY, 1996a, 1996b, 2012; REBOUÇAS et al., 2021).

Gavranis (2017) propõe uma programação linear inteira mista (MILP – do inglês *mixed integer linear programming*) e distingue o FMP do AMRP, onde o primeiro restringe a alocação da aeronave em períodos e o segundo em rotas específicas. Com o objetivo de otimizar a disponibilidade de aeronaves da frota, usa como função objetivo a maximização das horas residuais acumuladas disponíveis.

A implementação é realizada em uma frota de 60-80 aeronaves (Força Aérea Grega) no espaço temporal de 6 meses, ou 6 períodos, com capacidade de manutenção de 6-8 aeronaves por período. Não leva em consideração, no entanto, os diferentes níveis de manutenção da aeronave. A otimização é global, colocando esforço aéreo mínimo em períodos individuais como restrição.

Ainda em 2017, Marlow (2017) propôs um planejamento de curto prazo (diário) de alocação e manutenção de aeronaves militares, levando em consideração dois tipos de manutenção física, sem variação de *downtime* entre elas, e com capacidade restrita de manutenção simultânea de aeronaves.

No primeiro trabalho a tratar AMRP e TAP de forma integrada, considerando todas as restrições de manutenção preventiva, Safaei (2018) propôs um modelo de programação linear inteira para uma escala semanal com frotas homogêneas de 13 a 18 aeronaves, com aproximadamente 600 a 800 voos semanais durante 30 semanas consecutivas.

As restrições de manutenção foram as revisões de 36, 50, 200, 300, 400, 500 e de 600 horas de voo (FH) do Bombardier Q400. No entanto, não obteve sucesso no modelo, sendo necessário lançar mão de métodos não exatos. Foi utilizada uma heurística baseada em simulação de monte-carlo, derivando de um método exato de otimização para um estocástico.

Sugeri utilizar como função objetivo a minimização do acúmulo das atividades de manutenção (filas), através de um mecanismo (algoritmo) iterativo de busca local entre a roteirização e o programa de manutenção, se encaixando nos conceitos fundamentais das meta-heurísticas. Deixa como trabalhos futuros a extensão da abordagem para a manutenção corretiva e uso de outras meta-heurísticas guiadas ou evolutivas.

Jardel (2018) propôs o uso combinado de uma meta-heurística evolucionária, o algoritmo genético, e um método exato, a programação de metas. Os resultados obtidos mostraram que o método híbrido é capaz de fornecer soluções de planejamento de voo e de manutenção viáveis. Além de implementar o modelo em apenas um nível de inspeção, o próprio autor evidencia a não inclusão da manutenção corretiva e a possibilidade de replanejamento de voo. Não contemplou, também, a escala diária de voo e nem decisões estratégicas, ou de longo prazo.

Reforça ainda, que o planejamento manual atualmente realizado é incapaz de atender no médio ou longo prazo as metas estabelecidas, fortalecendo a necessidade de tornar estes planejamentos menos subjetivos. Restringindo-se ao planejamento de médio prazo e não contemplando as demandas táticas diárias nem de longo prazo, deixa como sugestão, a inclusão da manutenção corretiva no modelo.

Restrições de programação de manutenção preventiva foram adicionadas no MIP para a solução do FMP exclusivamente em longo prazo e missões com mais de uma aeronave voando simultaneamente (PESCHIERA et al., 2020). Trata a capacidade de manutenção como uma porcentagem da frota e sugere o uso de meta-heurísticas em trabalhos futuros como uma melhor opção para integrar o planejamento de longo prazo com os de médio e curto prazo.

Mais recentemente, Balakrishnan *et al.* (2021) tentou incluir alguns dos aspectos abordados nos trabalhos anteriores em um único modelo, implementado por meio das meta-heurísticas Algoritmo Genético (AG) e Colônia Artificial de Abelhas (CAA) modificada.

Implementaram um cenário de um ano com oito aeronaves. No entanto, desconsideraram a manutenção corretiva e assumem que as aeronaves são homogêneas em idade, tipo, histórico de serviço e parâmetros de manutenção.

Finalmente, Deng *et al.* (2021;2022) buscam minimizar o somatório do esforço aéreo não utilizado por antecipação de intervenção de manutenção calendária em toda a frota ao longo de todo o horizonte temporal planejado. Utiliza o termo *Aircraft Maintenance Check Scheduling* (AMCS) para se referir ao problema de planejamento da manutenção preventiva.

Focando na apresentação de um sistema de suporte à decisão de planejamento da manutenção, propõe uma programação dinâmica (PD) utilizando apenas inspeções programadas calendárias sobre uma frota de 51 aeronaves da família A320 em um cenário de 3 anos. Desconsidera a manutenção preventiva por horas de voo e a corretiva.

Apesar de focar em outros aspectos do planejamento da manutenção, outros trabalhos recentes também têm utilizado métodos de otimização em duas (QIN *et al.*, 2020b; SHAHMORADI-MOGHADAM; SAFAEI; SADJADI, 2021; SHAUKAT *et al.*, 2020) ou mais etapas (DENG; SANTOS, 2022; DENG; SANTOS; VERHAGEN, 2021; WITTEMAN; DENG; SANTOS, 2021).

A Tabela 2.1 apresenta o quadro resumo dos principais trabalhos relacionados ao presente estudo encontrados na literatura.

Evidenciam-se, na última linha, as principais contribuições buscadas por este estudo no que tange à abordagem completa do plano de manutenção preventiva por ciclo de horas de voo (Inspeções FH – Check A, B, C e D) e a inclusão da manutenção corretiva no modelo, considerando tanto valores médios (MCF) quanto individuais (MCI) dos parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade da frota. Destaca-se, ainda, a abordagem temporal de todo o período de operação e suporte da frota (O&S).

As hipóteses a serem investigadas no presente estudo tratam, portanto, de uma possível melhoria no planejamento da manutenção e do uso da frota com o uso da nova abordagem em comparação ao método convencional, que considera a distribuição uniforme das horas de voo na frota.

A otimização considerando todo o período de O&S pode gerar um plano ótimo de uso, minimizando o *downtime*, incrementando a disponibilidade ou a confiabilidade da programação, ou otimizando uma outra relação custo-benefício definida.

PM – Planejamento da Manutenção. MCF – Manutenção Corretiva com valores médios da Frota. FA – Alocação de aeronaves.
MCI - Manutenção Corretiva com valores Individuais. D – Diário. S – Semanal. M – Mensal. A – Anual.
O&S – Toda a fase de operação e suporte. 1 a 10 - quantidade de períodos abordados

A inclusão dos demais elementos do plano de manutenção (preventiva física completa e corretiva, da frota e individual) pode produzir soluções e resultados mais próximos da realidade, tornando o planejamento mais preciso e viável.

Finalmente, essa nova abordagem pode contribuir, ainda, para auxiliar o processo de aquisição ou desenvolvimento de sistemas aeroespaciais complexos, principalmente no que tange aos requisitos de suportabilidade (confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade).

2.4 Resumo do capítulo

Este capítulo apresentou inicialmente o impacto da manutenção no orçamento e na capacidade de cumprimento das missões das organizações que possuem frotas de aeronaves, tanto comerciais quanto militares.

Foram descritas as características dos tipos de manutenção e suas abordagens, bem como o desafio do planejamento, tanto da manutenção quanto do uso da frota, em seus diversos níveis. Os principais indicadores de capacidade de cumprimento da missão foram discutidos, bem como foram apresentados alguns métodos de otimização.

Na revisão de literatura verifica-se que o problema é relevante, mas, dada a sua complexidade, é tratado de forma pontual e restrita, tanto no aspecto da temporalidade quanto da cobertura dos diversos tipos de manutenção.

Os estudos não abordam todo período de uso da frota, não levam em consideração a manutenção corretiva e tampouco as características individuais de manutenção das aeronaves. Os benefícios do alargamento do horizonte temporal foram evidenciados por Kozanidis *et al.* (2014) e a inclusão da manutenção corretiva sugerida por Safaei e Jardine (2018) e Silva e Abrahão (2018)

Apesar da utilização de métodos exatos para a resolução do problema de planejamento de manutenção e de uso da frota, mesmo que restrito em suas condições de contorno, o problema realmente não pode ser resolvido facilmente de modo direto e pode apresentar características não lineares, dependendo de sua formulação. O problema apresenta complexidade combinatória exponencial e sugere a utilização, ora de métodos exatos, ora de procedimentos aproximados.

Tendo em vista o que foi apresentado, conclui-se que a modelagem para a solução do problema em tela deva ser feita com o uso combinado de métodos exatos e procedimentos meta-heurísticos, utilizando as vantagens de cada um de acordo com a sua aplicabilidade.

3 Metodologia

Neste capítulo, são formalizados o contexto de aplicação do modelo (delimitação do trabalho) e as etapas da implementação. O estudo será limitado a um sistema aeroespacial complexo, uma frota específica de aeronaves de defesa. O escopo do trabalho está relacionado à fase de operação e suporte, considerada a mais importante dentro do ciclo de vida de um sistema complexo.

Dentro da fase de operação e suporte, serão consideradas as atividades associadas ao planejamento de manutenção preventiva e corretiva de uma frota de aeronaves, em atendimento à uma demanda específica de esforço aéreo e sua distribuição dentro das escalas ou programações de voo (plano de uso).

O contexto de aplicação apresenta a frota de aeronaves e suas características de manutenção, além das características operacionais, ambiente de operação, horizonte temporal, premissas e condições de contorno.

Para este trabalho, o planejamento estratégico ou de longo prazo abrange toda fase de O&S. Dessa forma, garante-se que o estado ou custo da frota após esse horizonte temporal não constitui fator de impacto significativo para a gerência da organização ou empresa.

A metodologia consiste em uma otimização de duas etapas, seguida de uma simulação para complementar a avaliação da disponibilidade (A_o) e confiabilidade da programação (SR).

Na primeira etapa, é aplicado um método exato de otimização, a programação linear inteira binária (PLIB). Os parâmetros e restrições de manutenção e de utilização da frota são modelados em alto nível. O ótimo global é obtido em relação ao dimensionamento da manutenção e à utilização individual da frota para todo o período de O&S, o planejamento de longo prazo ou estratégico, assegurando a melhor distribuição do esforço aéreo para as aeronaves em todo o período de uso.

A redução do tempo de parada conduz ao aumento da A_o e da SR. Esta etapa refere-se ao planejamento estratégico ou de longo prazo e pode ser considerado um dimensionamento de manutenção e da utilização da frota. A utilização do método exato, nesse momento, vai garantir que a solução represente a referência de uso ótimo da frota em toda fase de O&S.

Posteriormente, é aplicada uma meta-heurística. Será utilizada a Busca em Vizinhança de Grande Porte (LNS) para adaptar o planejamento estratégico às variações e restrições dos níveis tático e operacional (sazonalidades).

Esta fase verifica a viabilidade ou quão perto do ótimo global se pode chegar, por meio do ajuste do programa de manutenção e utilização da frota.

Busca-se priorizar as atividades de manutenção em períodos de menor demanda de esforço aéreo levando em consideração o planejamento estratégico da manutenção e o plano de uso.

A implementação dos algoritmos 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), permitirá o conhecimento da solução ótima global, em relação à minimização da indisponibilidade (*downtime*) da frota por manutenção.

Finalmente, para complementar a avaliação dos resultados, são realizados testes estatísticos em ambiente simulado. As simulações comparam a disponibilidade e a confiabilidade da programação entre o novo modelo e o método de planejamento convencional, o SSSM/FIFO com distribuição uniforme das horas de voo na frota. As simulações são realizadas baseadas no histórico operacional de uma unidade aérea real de helicópteros de médio-porte, com as distribuições de probabilidade associadas.

3.1 Aplicação da Metodologia

3.1.1 Primeira etapa - Otimização de longo prazo da manutenção e uso da frota

A primeira etapa do modelo trata do dimensionamento da manutenção preventiva e corretiva (estimada) em termos de *downtime*, onde será possível a identificação da solução ótima global (QN1) que minimize o tempo total de parada por manutenção, apresentando a disponibilidade máxima atingível dentro do contexto operacional definido (QN2).

A nova abordagem utilizada, cobrindo todo o período de operação da frota, exige a reestruturação do modelo de solução em relação à literatura. A otimização nessa nova formulação deve envolver condições de contorno de nível estratégico e não mais de nível tático ou operacional.

Portanto, apesar do uso recorrente na literatura da programação linear inteira mista para resolução desse tipo de problema, utilizar-se-á a programação linear inteira binária. Dessa forma, foi possível desenvolver uma formulação mais simplificada e, ao mesmo tempo, gerando uma solução ótima global.

Esta etapa terá como resultado (*output*) a distribuição de esforço aéreo para cada aeronave ao longo do seu ciclo de vida operacional (QN1), bem como a quantidade de intervenções de manutenção que deverão ser executadas (preventivas e estimativa para as corretivas) para cada matrícula.

Os parâmetros de entrada e variáveis de decisão estão disponíveis na Tabela 3.2 e o modelo descrito a seguir.

Tabela 3.2 - Parâmetros e variáveis de decisão da primeira etapa.

Índices e Parâmetros	Variáveis
A quantidade de aeronaves de uma frota	h hora de voo acumulada designada, em horas
T quantidade total de dias (horizonte de planejamento)	d <i>downtime</i> acumulado previsto, em dias
FHR esforço aéreo total requerido para a frota no horizonte de planejamento	x_{ah} variável binária (1 se a aeronave foi designada para voar h horas de voo, 0 caso negativo)
$FHR_{a_{\min}}$ esforço aéreo mínimo requerido para uma aeronave a	d_{ah} <i>downtime</i> total acumulado previsto para a aeronave a voar h horas de voo
W quantidade de oficinas (w) – capacidade máxima de manutenção simultânea	h_a horas de voo totais designadas para aeronave a voar
I quantidade de dias de folga para a oficina w	
TL vida útil da aeronave, em dias	
H vida útil da aeronave, em horas de voo	

A Equação 3.1 define a função objetivo, com vistas a minimizar o *downtime* total da frota para suportar a demanda de esforço aéreo. A Equação 3.2 assegura que a frota irá voar pelo menos a quantidade total de horas previstas para o período de O&S. O total de *downtime* previsto acumulado não pode exceder a capacidade das oficinas (Equação 3.3).

A cada aeronave será atribuído um único valor de horas de voo totais a serem voadas, com sua respectiva previsão de *downtime* acumulado (Equação 3.4). O valor total de horas atribuídas à cada aeronave não poderá ultrapassar seu limite de vida em horas de voo (Equação 3.5). A variável binária x_{ah} indica que a quantidade de horas de voo h será atribuída à aeronave a (Equação 3.6).

$$\text{minimize } \sum_{a=1}^A \sum_{h=0}^H x_{ah} d_{ah} \quad (3.8)$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{h=0}^H x_{ah} h_a \geq FHR \quad (3.9)$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{h=0}^H x_{ah} d_{ah} \leq TW - \sum_{w=1}^W I_w, \quad (3.10)$$

$$\sum_{h=0}^H x_{ah} = 1, \forall a \in [1, A] \quad (3.11)$$

$$\sum_{h=0}^H x_{ah} h_a \leq H, \forall a \in [1, A] \quad (3.12)$$

$$x_{ah} \in [0, 1] \quad (3.13)$$

Pode-se omitir a Equação 3.3 no caso de necessitar dimensionar a demanda de oficinas. Se necessário, para evitar a condição de baixa utilização e consequente estocagem de aeronaves, pode-se acrescentar a restrição de esforço aéreo mínimo a ser voado por cada aeronave (Equação 3.7)

$$x_{ah} h_a \geq FHRa_{min} \forall a \in [1, A] \quad (3.14)$$

O *downtime* acumulado d abrange todas as ações de manutenção previstas para que uma aeronave da frota possa cumprir o esforço aéreo solicitado. Pode ser calculado utilizando somente a manutenção preventiva, ou acrescentando as demais atividades de manutenção corretiva, com base nos parâmetros médios de MTBUMA e MTTR da frota ou individual.

Como resultado da primeira etapa, o esforço aéreo total demandado no período será distribuído entre as aeronaves, com suas respectivas necessidades de manutenção preventiva e previsão de tempo de parada totais por manutenção corretiva.

Tem como resultado, ainda, a disponibilidade máxima possível de ser obtida para o contexto operacional analisado. Trata do planejamento de longo prazo e dimensionamento do uso e da manutenção da frota em toda sua fase de O&S.

Portanto, a primeira etapa visa atender às Questões Norteadoras (QN) e Objetivos Específicos (OE) 1 e 2.

3.1.2 Segunda etapa - Otimização de médio e curto prazo de manutenção

A segunda etapa trata da otimização da programação da manutenção. Busca distribuir as atividades de manutenção preventiva nas oficinas, definindo o melhor sequenciamento das inspeções que permita atender a demanda de esforço aéreo prevista para o período. Leva em consideração a sazonalidade da demanda e o planejamento estratégico da manutenção e do uso da frota (resultados da primeira etapa).

Conforme descrito anteriormente trata-se do problema da programação da manutenção preventiva. Nessa etapa, aplica-se a metaheurística LNS. Os parâmetros e variáveis de decisão estão disponíveis na Tabela 3.2.

Tabela 3.3 - Parâmetros e variáveis de decisão da segunda etapa.

Índices e Parâmetros	Variáveis
n quantidade total de inspeções	h_{ik} início de inspeção na posição j na oficina k
m quantidade total de oficinas	s_{ik} início da inspeção i na oficina k
i inspeção i	C_{max} término da última inspeção (término da operação)
j posição da inspeção (dia) j	X_{hjl} horas de voo esperada para a aeronave l voar no dia j
k oficina k	X_{ijk} variável binária que indica se a inspeção i é realizada na posição j da oficina k (1 se realizada, 0 caso negativo).
l aeronave l	
t_{ilk} define se a inspeção i da aeronave l requer a oficina k	I_{1k} tempo ocioso na oficina k entre o início das operações a início da primeira inspeção na primeira posição da oficina k
p_{ik} duração da inspeção i na oficina k	
M um número grande	I_{jk} tempo ocioso da oficina k entre o término da inspeção na posição $(j - 1)$ e início da inspeção na posição j para $j = 2, 3, \dots, m$
r_{ilk} indica se a inspeção i da aeronave l requer a oficina k	

O modelo, adaptado de Morales (MORALES; RONCONI, 2015), busca minimizar o esforço aéreo previsto e não voado nos dias em que determinada aeronave se encontra parada por manutenção, conforme Equação 3.8. Dessa forma, as aeronaves com maior volume de esforço aéreo distribuído serão forçadas a parar para manutenção em períodos de menor demanda. A Equação 3.9 garante que cada inspeção poderá ser alocada somente uma vez.

A Equação 3.10 define que apenas uma inspeção pode ser executada por dia em cada oficina. A Equação 3.11 assegura o correto sequenciamento das inspeções, onde o início da inspeção no dia $j + 1$ é maior ou igual dia de início da inspeção anterior j mais o tempo de execução da inspeção i iniciada no dia j .

A Equação 3.12 estabelece para uma determinada inspeção i a sequência do instante inicial de duas inspeções consecutivas. O início do processamento da operação $l + 1$ da inspeção i na estação de trabalho indicada para esta operação só pode acontecer quando a operação anterior l da inspeção i na estação de trabalho corresponde ao fim desta operação.

As Equações do tipo 3.13 e 3.14 indicam que para cada inspeção i e aeronave l , deve haver uma posição j estabelecida na estação de trabalho k que corresponda a essa operação. O instante inicial h dessa posição deve ser igual ao instante inicial s da inspeção i na mesma estação de trabalho, ou seja, $X_{ijk} = 1 \rightarrow h_{jk} = s_{ik}$. A Equação 3.15 calcula o instante de término da última posição de cada estação de trabalho. Finalmente, as Equações 3.16, 3.17 e 3.18 definem as variáveis como não-negativas e binárias.

$$\text{minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L Xh_{jl} \quad (3.15)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n X_{ijk} = 1, \forall i \in [1, n], \forall k \in [1, m] \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ijk} = 1, \forall j \in [1, n], \forall k \in [1, m] \quad (3.17)$$

$$h_{jk} + \sum_{i=1}^n p_{ik} X_{ijk} \leq h_{j+1,k}, \forall j \in [1, n-1], \forall k \in [1, m] \quad (3.18)$$

$$\sum_{k=1}^m r_{i,l+1,k} s_{ik} \geq \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} (s_{ik} + p_{ik}), \forall i \in [1, n], \forall l \in [1, m-1] \quad (3.19)$$

$$M \left(1 - \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} x_{ijk} \right) \geq \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} (s_{ik} + h_{jk}), \forall i, j \in [1, n], \forall l \in [1, m] \quad (3.20)$$

$$M \left(1 - \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} x_{ijk} \right) \geq \sum_{k=1}^m r_{i,l,k} (h_{jk} - s_{ik}), \forall i, j \in [1, n], \forall l \in [1, m] \quad (3.21)$$

$$h_{nk} + \sum_{i=1}^n p_{i,k} X_{ink} \leq Cmax, \forall k \in [1, m] \quad (3.22)$$

$$h_{jk} \geq 0, \forall j \in [1, n], \forall k \in [1, m] \quad (3.23)$$

$$s_{ik} \geq 0, \forall i \in [1, n], \forall k \in [1, m] \quad (3.24)$$

$$X_{ijk} \in [0, 1], \forall i, j \in [1, n], \forall k \in [1, m] \quad (3.25)$$

O valor do esforço aéreo diário de cada aeronave é proporcional à sua contribuição total em relação à frota e à sazonalidade mensal. Para efeito de ilustração da dinâmica da metaheurística, observa-se na Figura 3.8 que a aeronave 1 tem como expectativa de voar uma hora nos dias um a três, meia hora no dia dezoito e três horas nos dias dezenove e vinte, totalizando nove hora e meia que deixaria de voar por estar em manutenção nesses dias.

ACFT1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3	3	9.5
ACFT2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3	3	11
ACFT3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	4	4	6
ACFT4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	5	5	16.5
ACFT5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	5	5	11.5
Total																					54.5

Figura 3.8 - Exemplo de solução inicial do programa de manutenção preventiva e das horas de voo diárias previstas necessárias.

A solução inicial é gerada a partir da designação da aeronave para atender as demandas diárias com suas respectivas paradas para manutenção preventiva ao atingir o limite de horas de voo, conforme o plano de manutenção preventiva.

Na Figura 3.8, por exemplo, a aeronave 1 pararia para manutenção por seis dias, sendo três iniciando no dia um e posteriormente mais três dias iniciando no dia dezoito.

A função objetivo é minimizar o total de horas de voo que foram “deixadas de voar” nos períodos em que as aeronaves da frota permaneceram paradas por manutenção, apresentadas na última linha da última coluna das Figura 3.8 e Figura 3.9.

ACFT1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3	3	4.5
ACFT2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3	3	8
ACFT3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	4	4	6
ACFT4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	5	5	13.5
ACFT5	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	5	5	4.5
Total																					36.5

Figura 3.9 - Exemplo do programa de manutenção preventiva otimizado e das horas de voo diárias previstas necessárias.

A busca local vai agir no deslocamento da inspeção em alguma direção, limitado à uma quantidade mínima e máxima de intervalo entre as inspeções da mesma aeronave. A perturbação, que consiste na “destruição” de uma inspeção de uma aeronave e posterior “reparo” com o reposicionamento desta (completando uma iteração), forçará a mudança de posição da inspeção de um número aleatório de aeronaves a partir da solução anterior.

Após a primeira iteração, com a busca local, perturbação e nova busca local, uma possível solução melhor é representada na Figura 3.9. Pequenos movimentos no período da manutenção preventiva das aeronaves podem reduzir de forma viável a "hora perdida" por parada de manutenção, ou seja, a hora de voo que a aeronave deveria voar naquele período.

No exemplo das Figura 3.8 e Figura 3.9, houve uma redução de 54,5 para 36,5 horas perdidas respectivamente. Desta forma, as aeronaves com maior volume de horas de voo designadas tenderão a ter suas intervenções de manutenção preventiva em períodos de menor demanda, o que é desejado.

3.1.3 Simulação de cenários e avaliação dos resultados

Como resultado do primeiro passo de otimização, temos um planejamento de longo prazo, onde o plano de utilização da frota está disponível. Indica quantas FH cada aeronave deve voar para minimizar o tempo de parada para manutenção, aumentar a disponibilidade, e satisfazer a demanda total de FH da frota.

A partir da segunda etapa, é estabelecido um programa de manutenção preventiva, com as datas previstas para o calendário de manutenção preventiva de cada aeronave, seguindo a demanda de FH projetada.

Uma centena de cenários foram simulados aleatoriamente para todo o período de utilização da frota (15 anos) para avaliar o método. Cada cenário simulado com a programação de voo (escala de voo) é executado utilizando o SSSM e o novo método. Os resultados são comparados por meio das métricas de disponibilidade e confiabilidade de programação.

Cada cenário foi construído a partir de uma demanda fixa de FHR_T , utilizando a frota e os seus respectivos parâmetros de manutenção durante um determinado período. A FHR_T varia anualmente, e com base neste valor anual, a demanda varia mensalmente.

A variação anual é gerada aleatoriamente com média igual à razão entre o FHR_T e a duração da fase de O&S (em anos). O desvio padrão considerado corresponde a dez por cento da média. A diferença entre o FHR_T e o FHR_T sorteado é igualmente redistribuído a cada ano do período, de modo que o FHR_T seja completamente distribuído.

Da mesma forma, o FHR mensal é gerado aleatoriamente a partir da média da proporção do respectivo mês. O desvio padrão corresponde a dez por cento da média e o valor obtido é multiplicado pelo FHR do ano. A diferença entre o FHR anual e o FHR sorteado também é igualmente redistribuído para cada mês.

Dentro de cada mês, o FHR diário é obtido pela divisão simples entre o FHR mensal e a quantidade total de dias no respectivo mês.

A escala de voo varia diariamente em duração e número de aeronaves para cada missão. Todos os parâmetros foram obtidos de valores históricos de um esquadrão operacional real, apresentados em forma de uma distribuição de probabilidade.

O planejamento de médio e curto prazo, deverão permitir um grau de flexibilidade suficiente para garantir a alocação e possíveis remanejamentos das aeronaves nas escalas diárias, de maneira a ser possível absorver e contornar as falhas e necessidades de manutenção corretiva, cíclica, que serão simuladas de forma aleatória.

4 Resultados e discussão

Todos os testes apresentados neste trabalho são executados num ambiente de trabalho Intel i7-9700 3.0 GHz com 16 GB de RAM, executando o sistema operacional Windows 10 Professional 64 bits. O OpenSolver 2.9.0 resolve as instâncias BIP sem tempo de execução ou limites de iteração. O LNS e a simulação dos cenários são um código baseado em Java com um critério de parada de cinco mil iterações, dez minutos, ou estabilizar em um valor (melhoria inferior a 1 % da melhoria anterior) por mais de quinhentas iterações.

4.1 Contexto de Aplicação

Diferentemente das operações aéreas da aviação regular (linhas aéreas) que possuem programações de voo rotineiras e repetitivas, as operações aéreas na área de defesa são, por natureza, aleatórias e incertas. Desastres naturais e catástrofes, atividades de apoio e ajuda humanitária, atividades de busca e salvamento, operações de garantia da lei e da ordem e conflitos armados são eventos imprevisíveis que exigirão o emprego da aviação de defesa, em maior ou menor intensidade.

No entanto, em tempos de paz, a maior parcela de uso da frota restringe-se a operações de treinamento, para desenvolver e manter a capacidade cumprimento das missões, tanto por parte da tripulação quanto das condições das aeronaves. Estas operações variam de intensidade, com considerável grau de imprevisibilidade de demanda no nível operacional, ou seja, semanal e diário.

Por outro lado, quando se trata do nível tático, observa-se uma certa sazonalidade mensal e pouca variação na demanda anual. Observa-se na Tabela 4.4 os valores médios de distribuição de esforço aéreo ao longo de um ano, extraídos dos dados históricos de uma unidade aérea real. Existem períodos que normalmente demandam maior esforço aéreo (Junho e Setembro, por exemplo) e outros com menor demanda (Dezembro, Janeiro e Fevereiro).

Tabela 4.4 - Distribuição de esforço aéreo durante o ano (valores médios em horas de voo)

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média FHR	378	401	569	507	746	828	668	756	786	711	614	362

Estas variações são características individuais de cada unidade aérea, pois são influenciadas por condições meteorológicas (estações do ano com maior nebulosidade e condições meteorológicas adversas reduzem significativamente o volume de atividade aérea, por exemplo), períodos de férias, transferência de efetivo, cursos de formação da tripulação, entre outros fatores.

Outra característica da aviação de defesa, no que concerne ao uso das aeronaves, é que não se pode considerar a utilização dos equipamentos até a completa exaustão de sua vida útil. Deve-se prever uma quantidade de hora de voo suficiente que garanta a disponibilidade da frota em condições de conflitos e crises prolongadas, momento em que a demanda atinge os maiores níveis de intensidade.

Finalmente, é importante ressaltar que a A_o , quando se trata de planejamento e avaliação, é calculada para um contexto operacional ou cenário definido. No caso de operações aéreas de defesa, este contexto envolve uma previsão de demanda de esforço aéreo, um período de uso e as características de manutenção das aeronaves. Portanto, qualquer variação nesses fatores, os resultados serão diferentes e não poderão servir como base de comparação de forma antecipada.

4.1.1 A frota

O cenário definido para avaliação da implementação considera uma frota hipotética de 12 aeronaves. A previsão de utilização da frota é de 15 anos (O&S), o limite técnico de vida de um helicóptero de combate de médio porte (SUPREME AUDIT INSTITUTION OF INDIA, 2010). Guaracy *et al.* (2022) também utiliza o mesmo período para em um estudo de caso de dimensionamento de frota.

A demanda de esforço aéreo prevê o consumo médio aproximado de 950:00 horas de voo por ano (“Polish Special Forces To Be Involved In Mi-17 Simulator Trainings? - Defence24.com”, [s.d.]; REBOUÇAS; SILVA; ABRAHÃO, 2018; SILVA; REBOUÇAS, 2020), totalizando aproximadamente 14.250:00. O plano de manutenção preventiva deve ser realizado conforme descrito em (BRASIL, 2018).

A sazonalidade mensal média, proporção mensal de consumo de horas de voo, segue a distribuição da demanda de esforço aéreo conforme apresentada na Tabela 4.2, compilada a partir de dados de 10 anos de operação de um esquadrão de voo real.

Serão utilizadas ainda, uma frota homogênea de 36 aeronaves de asa fixa para um período de 30 anos, variando a demanda de esforço aéreo entre a máxima possível e 50% da máxima.

No entanto, em virtude da inexistência de dados de manutenção corretiva individual, serão analisados apenas com os dados de manutenção preventiva e corretiva com valores médios da frota. Será utilizada a mesma sazonalidade apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.5 - Exemplo de tabela consumo de esforço aéreo mensal.

	Média de Esforço Aéreo												
	5%	5%	8%	7%	10%	11%	9%	10%	11%	10%	8%	5%	
Média	49	51	73	65	97	107	87	97	101	91	79	46	950:00
	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	

4.1.2 Considerações de manutenção

Da mesma forma que nos demais trabalhos disponíveis na literatura, assume-se que as características de manutenção da frota são determinísticas, definidas e fixas, baseadas em seus valores médios. Não serão tratadas as condições e consequências de possível estocagem de aeronaves.

A duração da parada para execução das inspeções é conhecida. Todas as oficinas de reparo estão disponíveis durante todo a fase de O&S. Os parâmetros de confiabilidade (MTBUMA) manutenibilidade (MTTR) são utilizados para previsão de tempo de parada para realização das manutenções corretivas, baseadas no esforço aéreo atribuído para cada aeronave.

Cada inspeção possui um tempo determinístico de parada para realização das atividades de manutenção (MTTR) que inclui o ALDT (valor médio). Outras assunções e condições consideradas para a aplicação do modelo seguem abaixo.

Assunções sobre a aeronave (helicóptero): a) o plano de manutenção preventiva prevê a realização de inspeções a cada 50, 100, 200 e 1.000 horas de voo, consumindo 21, 28, 105 e 180 dias de manutenção, respectivamente (BRASIL, 2018), b) o limite de vida da aeronave é de 4.000:00 horas de voo (KLIMASZEWSKI et al., 2009), c) o intervalo mínimo entre manutenções preventivas de uma mesma aeronave é de cinco dias, e d) não há intervalo máximo entre manutenções preventivas de uma mesma aeronave.

Assunções sobre os parâmetros de manutenção corretiva (MTBUMA e MTTR): a) a média de tempo de parada para manutenção corretiva é de uma a cada 13:52 horas de voo, com tempo de reparo médio de 5,3 dias, b) os valores médios individuais dos parâmetros de manutenção corretiva estão apresentados na Tabela 4.3, extraídos de uma unidade aérea real, e c) não haverá restrições de estocagem, ou seja, o procedimento de estocagem e retorno para a condição operacional tem duração igual ao tempo de preparação da aeronave, permanecendo na condição disponível.

Tabela 4.6 - Parâmetros individuais de manutenção corretiva

Aeronave	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MTTR (Dias)	9,11	3,71	4,42	5,80	5,18	8,28	5,26	4,21	5,53	7,57	3,06	4,47
MTBUMA(FH)	5:37	7:24	10:19	12:34	10:25	14:40	20:01	17:44	11:51	30:48	20:37	37:25

Assunções sobre as oficinas: a) cada oficina executa apenas uma inspeção por vez; b) cada inspeção, uma vez iniciada em uma oficina, deve ser completada sem interrupção; e c) existe um total de três oficinas e cada uma é capaz de executar qualquer tipo de inspeção, totalizando uma capacidade de manter três aeronaves simultaneamente.

Assunções sobre a aeronave de treinamento: a) o plano de manutenção preventiva prevê a realização de inspeções a cada 50, 100, 300, 600, 1.200 e 2.400 horas de voo, consumindo 1, 5, 8, 14, 21 e 60 dias de manutenção, respectivamente (BRASIL, 2018), e b) o limite de vida da aeronave é de 9.600:00 horas de voo.

Para as aeronaves de treinamento, serão utilizados indicadores genéricos de MTBUMA e MTTR. Para o MTBUMA considera-se o intervalo de 20,11 horas entre manutenções (WOCH; ZIEJA; TOMASZEWSKA, 2017) e será considerado o MTTR de 5,3 dias.

4.1.3 Considerações sobre as operações aéreas

As operações têm como origem e destino a sede das aeronaves (Base). Cada missão, também chamada de saída, pode exigir entre uma e cinco aeronaves, decolando e pousando no mesmo horário, ou seja, consumindo a mesma quantidade de horas de voo.

A Figura 4.10 mostra a distribuição de probabilidade da quantidade de aeronaves por missão, extraído do histórico de nove mil seiscentos e dezoito missões reais, com média $\mu=1,8284$ aeronaves por saída e desvio padrão da amostra $\sigma = 0,6948$. Os valores sorteados são arredondados para o inteiro mais próximo.



A duração de cada missão varia de vinte minutos a três horas de voo (cento e oitenta minutos), computadas para cada aeronave da formação. As missões são sorteadas aleatoriamente a cada dia, até atingir um consumo previsto igual ou maior ao esforço aéreo previsto para voar no dia.

A Figura 4.11 mostra a distribuição de probabilidade de duração da missão, extraído do histórico de nove mil seiscientos e dezoito missões reais, com média $\mu = 65,27$ minutos e desvio padrão da amostra $\sigma = 24,8317$. Os valores sorteados são arredondados para o inteiro mais próximo.

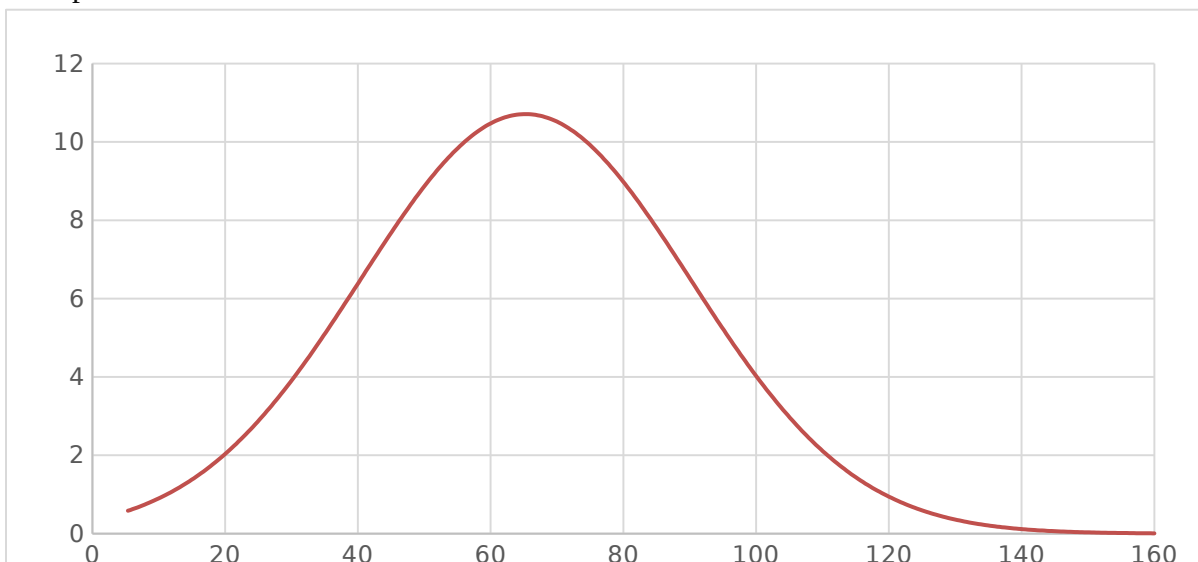


Figura 4.11 - Distribuição de probabilidade de duração da missão.

A título de ilustração, se a previsão inicial de esforço aéreo para um determinado dia d é de cinco horas e a primeira missão sorteada é composta por cinco aeronaves com duas horas de duração, a nova previsão de demanda (planejamento da escala de voo) será de dez horas de

voo no dia d . Por haver ultrapassado o tempo de voo previsto, não haverá nova surtida em d , iniciando a confecção da escala do dia $d + 1$.

As horas planejadas são debitadas do FHR_T e a diferença entre o FHR previsto inicialmente e o planejamento da escala é redistribuído em partes iguais nos dias restantes de operação, de forma a buscar atingir o FHR_T ao término da fase de O&S.

No caso oposto, se ao escalar a missão e a diferença entre o total de horas escaladas e o previsto para o dia for menor ou igual a sessenta minutos, o “crédito” de horas será redistribuído da mesma forma.

Na execução da simulação (alocação da aeronave), caso não seja possível atender à missão (aeronaves indisponíveis), a hora deixada de voar não é realocada. Desta forma, o FHR_T só será igual ao inicial se alcançar SR máxima, com todas as missões atendidas.

Assunções sobre os parâmetros de operação: a) o tempo mínimo de reposicionamento, intervalo entre um pouso e uma decolagem de uma mesma aeronave é de sessenta minutos, b) não há falha em voo, ou seja, a aeronave que decolar cumprirá o tempo previsto na escala de voo, c) a primeira de decolagem pode iniciar as 06:00 h da manhã e o último pouso não poderá ocorrer após as 23:55 horas, e d) a aeronave entra em manutenção (ou em fila) no dia seguinte em que atingir ou ultrapassar as horas remanescentes para a próxima inspeção.

4.2 Otimização

4.2.1 Primeira etapa – BIP

4.1.1.1 Dimensionamento da frota e da manutenção

Como resultado da primeira etapa têm-se o dimensionamento do esforço aéreo que cada aeronave deverá consumir, bem como a previsão do tempo total de *downtime* e inspeções a serem realizadas para cumprir o respectivo esforço aéreo. É o planejamento estratégico, de longo prazo, com o dimensionamento ótimo do uso e da manutenção da frota.

Na Tabela 4.4 pode-se comparar o *downtime* total calculado a partir do planejamento convencional e o novo modelo otimizado, considerando apenas a manutenção preventiva. O planejamento convencional prevê a distribuição uniforme de esforço aéreo para todas as aeronaves, o que gera um total de 12240 dias de atividades de manutenção preventiva, garantindo no máximo 81,37% de disponibilidade média da frota.

Tabela 4.7 - Resumo dos resultados do planejamento de longo prazo da manutenção preventiva.

Downtime (Dias)

Frota	Convencional	Proposto	Ganho	Ganho (%)
12 Anv	12.240	11.495	745	6,09%
	Disponibilidade Média			
	81,37%	82,50%	1,13 pp	

Já no planejamento otimizado, com uma distribuição heterogênea do esforço aéreo, são necessários 11.495 dias de atividades de manutenção, garantindo no máximo 82,50% de disponibilidade.

Observa-se, portanto, uma economia total de 745 dias (mais de dois anos) de manutenção ao longo dos 15 anos de operação, em torno de 50 dias (um mês e meio) a menos de manutenção por ano de operação, ou 6,09% de redução do *downtime* da frota. Dividindo pelo número de aeronaves, seriam 4 dias de economia por ano por aeronave ou uma oficina trabalhando por pouco mais de dois anos de forma ininterrupta.

Considerando outras possibilidades de operação com a frota de helicópteros, baseado nas suas restrições e características de manutenção preventiva pode ser observada na Figura 4.12 a variação do *downtime* em relação à variação de esforço aéreo.

A escala primária (à esquerda) representa o esforço aéreo acumulado da frota ao longo dos anos de operação. A escala secundária (à direita) representa o *downtime* acumulado. A cor verde indica o esforço aéreo enquanto a azul está associada ao *downtime*. As legendas referem-se à quatro possibilidades de operação selecionadas.

A primeira trata do uso do esforço máximo possível da aeronave independente do tempo de operação, distribuído em 15 anos. A segunda considera o uso dentro da demanda prevista “real” de esforço aéreo (14.250:00h) nos 15 anos de operação, ambas considerando tanto o planejamento convencional da manutenção preventiva (Mnt R. Conv) e com planejamento otimizado (Mnt R. Otm), completando a terceira e quarta possibilidade.

O uso do esforço máximo possível da aeronave, supondo recursos irrestritos, tanto de manutenção quanto de pessoal, implica voar 50 horas por semana de disponibilidade por aeronave. Nestas condições seriam necessários aproximadamente 11 anos e 6 meses para voar 48.000:00 horas de voo (4.000 x 12 aeronaves) e consumir aproximadamente 45.000 dias de manutenção. A disponibilidade da frota giraria em torno de 13%.

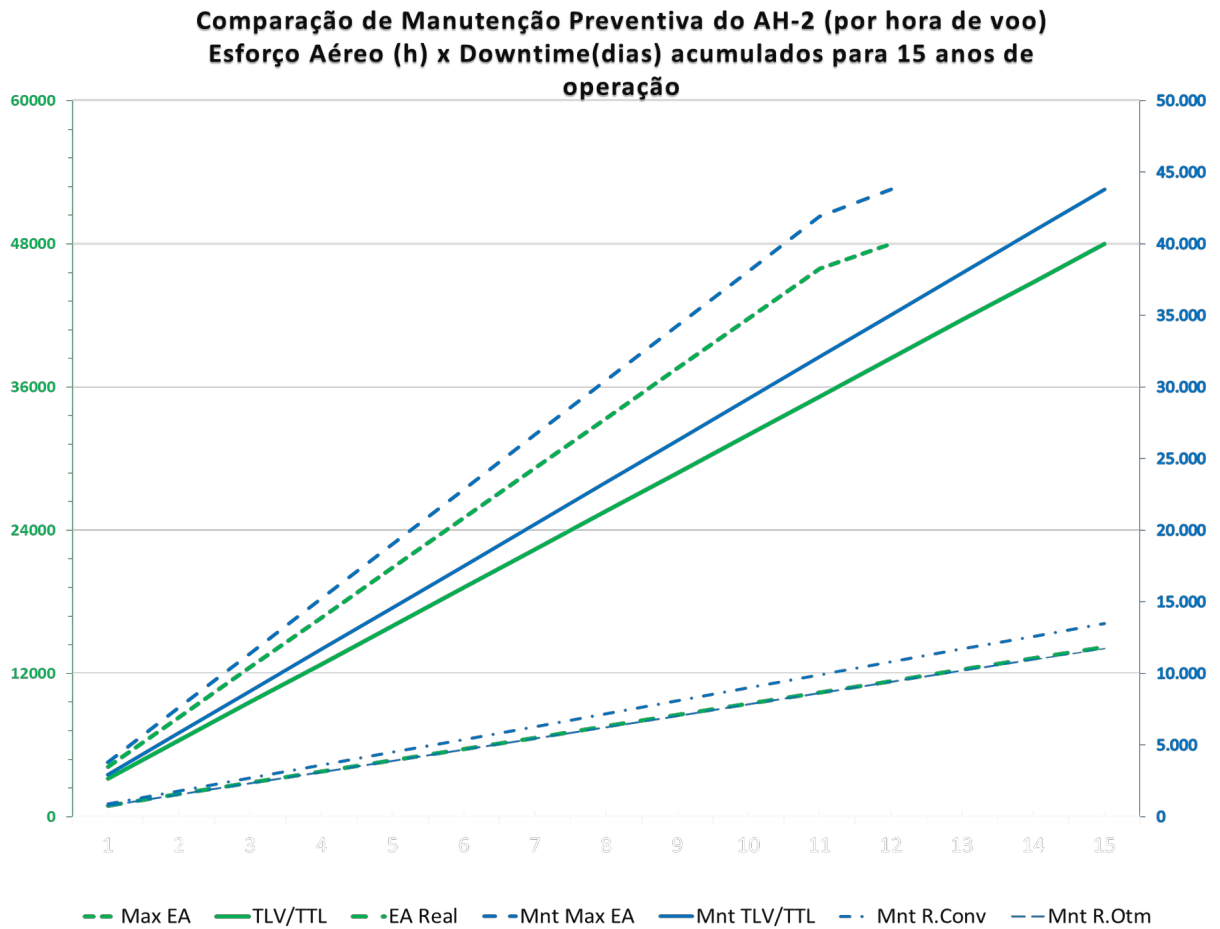


Figura 4.12 - Panorama de operação da aeronave e manutenção preventiva.

Outra possibilidade seria distribuir as mesmas 48.000:00 horas de voo durante os 15 anos de operação, o que implica voar aproximadamente 17 horas por semana de disponibilidade por aeronave, consumindo os mesmos 45.000 dias de manutenção. Nesta condição é possível atingir a disponibilidade de 32% da frota.

Já nas condições “reais” de uso da frota, onde se estimam voar 14.250:00 horas ao longo dos 15 anos de operação, observamos a diferença no volume de manutenção entre o uso do planejamento convencional (12.240 dias – 81,37% de disponibilidade) e o otimizado (11.495 – 82,50 %), conforme já apresentado na Tabela 4.4.

4.1.1.2 Distribuição do esforço aéreo e da manutenção

Além do dimensionamento da manutenção necessária para o cumprimento da demanda, a primeira etapa gera a distribuição de esforço aéreo da frota e de manutenção, cumprindo o **OE1** e **OE2**, e, conseqüentemente, respondendo à **QN1** e **QN2**.

A Tabela 4.5 mostra de forma detalhada o resultado tratado da primeira etapa, já considerando também a manutenção corretiva individual. Nota-se a distribuição heterogênea do esforço aéreo (FHR), com seu respectivo *downtime* acumulado (T.D), média de esforço aéreo a ser voado por ano (FHR/Ano), disponibilidade (A_o) e quantidade de inspeções de 50, 100, 200 e 1000 horas.

Observa-se que a ACFT1 foi alocada com o mínimo de esforço aéreo possível (50h). Mesmo não realizando nenhuma manutenção preventiva teria um acumulado de 440 dias de manutenção, referente à manutenção corretiva. No extremo oposto temos as ACFT8, ACFT11 e ACFT12 voando 2600, 3000 e 3000 respectivamente.

Essa distribuição faz sentido em virtude da relação MTTR/MTBUMA. A otimização vai alocar menos horas para as aeronaves com os piores indicadores de manutenção corretiva e mais horas para as aeronaves com os melhores indicadores.

Tabela 4.8 - Resultados da otimização da primeira etapa considerando parâmetros de manutenção preventiva e corretiva individual.

Aeronave	FHR	T. D	FHR/ Ano	A_o	IN50	IN100	IN200	IN1000
ACFT1	50	440	3	92%	0	0	0	0
ACFT2	200	532	13	90%	2	1	0	0
ACFT3	200	516	13	91%	2	1	0	0
ACFT4	200	523	13	90%	2	1	0	0
ACFT5	200	532	13	90%	2	1	0	0
ACFT6	200	543	13	90%	2	1	0	0
ACFT7	2200	2548	147	53%	22	11	8	2
ACFT8	2600	2937	173	46%	26	13	10	2
ACFT9	200	524	13	90%	2	1	0	0
ACFT10	2200	2511	147	54%	22	11	8	2
ACFT11	3000	3113	200	43%	30	15	12	2
ACFT12	3000	3030	200	45%	30	15	12	2
	14250	17747	950	73%	142	71	50	10

A programação e dimensionamento da manutenção convencional (a nível estratégico, tático e operacional) procuram equalizar a distribuição de FH entre as aeronaves da frota. Ou seja, todas as aeronaves devem voar o mesmo número de horas, o que daria algo em torno de 1.187,50 (1.188) horas por aeronave, ou 79,17 horas por ano por aeronave.

Pode-se observar na Tabela 4.6 a distribuição baseada no método convencional, com distribuição uniforme de esforço aéreo. A ACFT1 teria um *downtime* acumulado extremamente elevado, dada a sua característica individual de manutenção corretiva (relação MTTR/MTBUMA).

Tabela 4.9 - Resultados do método convencional considerando parâmetros de manutenção preventiva e corretiva individual.

Aeronave	FHR	T. D	FHR/Ano	A _o	IN50	IN100	IN200	IN1000
ACFT1	1188	3040	79	44%	12	6	4	1
ACFT2	1188	1785	79	67%	12	6	4	1
ACFT3	1188	1693	79	69%	12	6	4	1
ACFT4	1188	1734	79	68%	12	6	4	1
ACFT5	1188	1787	79	67%	12	6	4	1
ACFT6	1188	1849	79	66%	12	6	4	1
ACFT7	1188	1503	79	73%	12	6	4	1
ACFT8	1188	1473	79	73%	12	6	4	1
ACFT9	1188	1739	79	68%	12	6	4	1
ACFT10	1188	1483	79	73%	12	6	4	1
ACFT11	1188	1370	79	75%	12	6	4	1
ACFT12	1188	1338	79	76%	12	6	4	1
	14250	20793	950	68%	144	72	48	12

Portanto, a primeira observação importante diz respeito à distribuição do esforço aéreo da frota. Para uma FHR de 14.250:00 h (Manutenção completa com parâmetros individuais da frota), observa-se na

que enquanto uma aeronave voará apenas 50:00 h outras consumirão até 3.000:00 h (02 aeronaves).

Voar 50:00 h em um período de 15 anos implica uma série de medidas do ponto de vista de manutenção. A aeronave entra na condição de baixa utilização, sendo necessária a intervenção conhecida como estocagem. A estocagem pode gerar custos extras de recurso humano, de material e pode tornar a aeronave indisponível, visto que os procedimentos para a retornar às condições operacionais podem extrapolar o tempo de pronta-resposta exigido, dependendo das características próprias da frota.

Outra grande vantagem proporcionada pela distribuição não homogênea do esforço aéreo na frota trata da curva de aprendizagem e maturidade logística e operacional. Na medida que algumas aeronaves são selecionadas para consumir grande quantidade de horas de voo, estas tornam-se “pilotos”, como no caso das ACFT11 e 12, com uma média de 200h por ano.

Estas aeronaves podem antecipar problemas de operação e suportabilidade não previstos inicialmente no projeto. Desta forma, pode-se corrigir estes problemas no restante da frota antes que aconteçam, minimizando o seu impacto.

Neste sentido, indicadores logísticos e operacionais, aspectos de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança de voo podem ser observados e analisados de forma antecipada.

Os resultados destas análises podem gerar melhorias a serem implementadas no restante da frota antes que cheguem em uma possível situação crítica, minimizando ou eliminando riscos em tempo hábil.

A solução apresentada é uma de várias outras possíveis soluções ótimas para o problema. As condições de estocagem não foram consideradas no presente trabalho, visto que se pode ajustar o esforço aéreo mínimo a ser voado por cada aeronave. Por exemplo, na Tabela 4.10, foi inserida a restrição de esforço aéreo mínimo a ser voado por aeronave de 700:00 h.

Tabela 4.10 - Resultados da otimização da primeira etapa considerando parâmetros de manutenção preventiva, corretiva individual e restrição de esforço aéreo mínimo de 700:00 h por aeronave.

Aeronave	FHR	T. D	FHR/ Ano	A _o	IN50	IN100	IN200	IN1000
ACFT1	700	2025	47	63%	7	3	3	0
ACFT2	800	1362	53	75%	8	4	3	0
ACFT3	800	1298	53	76%	8	4	3	0
ACFT4	800	1326	53	76%	8	4	3	0
ACFT5	800	1363	53	75%	8	4	3	0
ACFT6	750	1357	50	75%	7	4	3	0
ACFT7	1200	1515	80	72%	12	6	4	1
ACFT8	1200	1485	80	73%	12	6	4	1
ACFT9	800	1330	53	76%	8	4	3	0
ACFT10	1200	1495	80	73%	12	6	4	1
ACFT11	2200	2295	147	58%	22	11	8	2
ACFT12	3000	3030	200	45%	30	15	12	2
	14250	19880	950	70%	142	71	53	7

A A_o máxima atingível, quando se considera também a manutenção corretiva, passa para 72,99% no método otimizado, 69,74% com a restrição de 700:00h, contra 68,35%, calculado pelo método convencional.

A Tabela 4.8 compara o planejamento convencional com o novo modelo. Observa-se a redução de 14,65% de downtime (6,09% considerando apenas a preventiva) e incremento de 4,64 pontos percentuais (1,13 pp considerando apenas a preventiva) na disponibilidade da frota. Fica evidente o impacto não só da inserção da manutenção corretiva no modelo, mas também do tratamento das características individuais de manutenção.

Tabela 4.11 - Resumo dos resultados do planejamento de longo prazo incluindo manutenção preventiva e corretiva.

<i>Downtime (Dias)</i>				
Frota	Convencional	Proposto	Ganho	Ganho (%)
12 Anv	20.793	17.747	3.046	14,65%
	Disponibilidade Média			
	68,35%	72,99%	4,64 pp	

Desta forma, a distribuição otimizada define quais as aeronaves devem ser mais voadas e quais devem ser menos voadas. As últimas poderiam ser alocadas, por exemplo, como aeronaves de reserva, em modo de espera, ou para outras atividades com menor consumo de esforço aéreo. Este resultado inicial permite também uma melhor previsão, precisão e gestão da manutenção a um nível tático e, conseqüentemente, a um nível operacional.

Planejar utilizando somente a manutenção preventiva gera disponibilidade em torno de 80%, consumindo entre 11k e 12k dias de manutenção, ante resultados mais precisos de disponibilidades em torno de 70% e 17k a 20k dias de manutenção, quando se inclui a manutenção corretiva individualizada.

Além disso, a exclusão da restrição da estação de trabalho (Equação 3.3) permite dimensioná-la, ou seja, indicar quantas oficinas seriam necessárias para suportar o cenário definido.

A Tabela 4.12 compara os modelos de planejamento convencional e o novo para cada contexto operacional, variando entre 7.000 e 42.000 FH demandados para a frota, disponíveis na primeira coluna. A segunda e terceira colunas apresentam a redução do tempo de parada da frota e o aumento da disponibilidade, respectivamente. Os modelos planejamento de manutenção existentes na literatura consideraram apenas o plano de manutenção preventiva.

As duas colunas seguintes mostram os resultados obtidos com a introdução da projeção do tempo de parada para manutenção corretiva com base nas métricas genéricas da frota MTBUMA e MTTR. Este modelo é aplicável para aeronaves novas, de uma versão já existente e que já possua estes indicadores disponíveis, ou valores estimados quando se trata do desenvolvimento de uma nova aeronave.

Finalmente, as últimas colunas apresentam os resultados do tratamento individual das aeronaves, cada uma com métricas específicas de MTBUMA e MTTR. Tanto quanto é do conhecimento deste autor, esta última abordagem é também nova na literatura, constituindo uma outra contribuição deste trabalho. Este modelo é aplicável quando da aquisição de aeronaves usadas, as quais já possuem histórico individual desses indicadores.

Tabela 4.12 - Comparação entre o modelo de planejamento convencional e o modelo de planejamento proposto para cada contexto operacional.

FHR	Manutenção Preventiva		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros médios da frota		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros individuais da frota	
	D.Redução	Ao.Aumento	D. Redução	Ao.Aumento	D. Redução	Ao.Aumento
7100	4.88%	0.80%	3.72%	0.83%	16.92%	3.84%
14250	0.05%	0.01%	0.04%	0.02%	14.65%	6.35%
21000	4.42%	1.96%	3.17%	2,37%	15.57%	11.67%
28000	1.32%	0.83%	0.93%	1.12%	CONVENCIONAL INVIÁVEL	
35000	1.26%	1.16%	0.89%	1.89%	CONVENCIONAL INVIÁVEL	
42000	2.36%	3.26%	1.12%	5.28%	AMBOS INVIÁVEIS	
Average	2.67%	0.90%	1.97%	1.09%	15.71%	7.29%

O modelo otimizado desenvolvido atingiu uma redução de até 16,92% no *downtime* e 11,67% de incremento na disponibilidade. Os resultados foram mais significativos na configuração de manutenção que considera os parâmetros individuais de manutenção da aeronave. Esta condição está mais próxima da realidade de uma frota operacional.

É notório o impacto do uso do novo modelo quando se consideram as características individuais de confiabilidade e manutenibilidade das aeronaves, nas duas últimas colunas da Tabela 4.12. Apesar de aparentemente desproporcional, este resultado se justifica, visto que com o conhecimento das características individuais e existência de diferenças significativas de confiabilidade e manutenibilidade entre elas, fica evidente que aeronaves de baixa confiabilidade devem voar menos que as de maior confiabilidade.

Na Tabela 4.10, detalha-se o *downtime* total previsto para a frota voar a respectiva FHR. Em números absolutos, cada 600 dias de *downtime* significam 40 dias a menos de manutenção por ano de operação ou 50 dias a menos de manutenção por aeronave.

Observa-se que a variação de *downtime* entre o planejamento considerando somente a manutenção preventiva e considerando um maior espectro de manutenção pode gerar erros superiores a 30% no dimensionamento da manutenção. Pode-se inclusive dimensionar um esforço aéreo inviável para a frota, como no caso do cenário prevendo voar mais que 28.000:00 de voo.

Nesse caso, o uso da frota seria viável apenas no nível ótimo de distribuição de esforço aéreo. Evidencia-se, portanto, a importância da inclusão dos parâmetros de manutenção corretiva nos modelos de planejamento de manutenção para um correto dimensionamento dos recursos.

Tabela 4.13 – Comparação de *downtime* total previsto entre o modelo de planejamento convencional e o modelo de planejamento proposto.

FHR	Manutenção Preventiva		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros médios da frota		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros individuais da frota	
FHR	<i>Downtime</i> Conv	<i>Downtime</i> Otm	<i>Downtime</i> Conv	<i>Downtime</i> Otm	<i>Downtime</i> Conv	<i>Downtime</i> Otm
7100	9318	8863	12028	11580	12545	10423
14250	14337	14330	19790	19783	20793	17747
21000	20448	19545	28484	27581	30169	25472
28000	25376	25040	36091	35755	INVIÁVEL	34098
35000	31564	31165	44958	44559	INVIÁVEL	34098
42000	38652	37740	54724	54112	INVIÁVEL	INVIÁVEL

Da mesma forma, a Tabela 4.14 detalha a variação da disponibilidade da frota. Para uma mesma demanda de esforço aéreo pode-se chegar a erros superiores a 10 pontos percentuais na disponibilidade ao desconsiderar os parâmetros de manutenção corretiva.

Tabela 4.14 - Comparação da disponibilidade entre o modelo de planejamento convencional e o modelo de planejamento desenvolvido.

FHR	Manutenção Preventiva		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros médios da frota		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros individuais da frota	
FHR	Disponibilidade Conv	Disponibilidade e Otm	Disponibilidade e Conv	Disponibilidade e Otm	Disponibilidade e Conv	Disponibilidade e Otm
7100	85,82%	86,51%	81,69%	82,37%	80,90%	84,14%
14250	81,37%	82,50%	69,88%	69,89%	68,35%	72,99%
21000	68,88%	70,25%	56,65%	58,02%	54,08%	61,23%
28000	61,38%	61,89%	45,07%	45,58%	INVIÁVEL	48,10%
35000	51,96%	52,56%	31,57%	32,18%	INVIÁVEL	34,21%
42000	41,17%	42,56%	16,71%	17,64%	INVIÁVEL	INVIÁVEL

Finalmente, as últimas colunas apresentam os resultados do tratamento individual das aeronaves, cada uma com métricas específicas de MTBUMA e MTTR.

As Tabelas 4.12 e 4.13 apresentam os resultados de *downtime* e disponibilidade, respectivamente, para a frota de trinta e seis aeronaves de treinamento no período de trinta anos. Por falta de parâmetros individuais de manutenção, foram considerados apenas a manutenção preventiva e corretiva com base nos parâmetros médios da frota, conforme definido em 4.1.2.

Tabela 4.15 – Comparação de *downtime* total previsto entre o modelo de planejamento convencional e o novo modelo de planejamento (36 aeronaves, 30 anos).

FHR	Manutenção Preventiva		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros médios da frota	
	<i>Downtime</i> Conv	<i>Downtime</i> Otm	<i>Downtime</i> Conv	<i>Downtime</i> Otm
311.050	30600	29620	112670	111597
293.800	28980	27860	106780	105291
259.200	24300	24300	92612	92513
224.650	21780	20800	81079	80007
190.080	18648	17283	68933	67384
172.800	15480	15480	61022	61022
155.550	14472	13737	55744	54732

Tabela 4.16 - Comparação entre o modelo de planejamento convencional e o novo modelo de planejamento (36 aeronaves, 30 anos).

FHR	Manutenção Preventiva		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros médios da frota	
	Disponibilidade Conv	Disponibilidade Otm	Disponibilidade Conv	Disponibilidade Otm
311.050	92,24%	92,41%	71,42%	71,43%
293.800	92,65%	92,87%	72,91%	72,93%
259.200	93,84%	93,94%	76,51%	76,50%
224.650	94,47%	94,71%	79,43%	79,89%
190.080	95,27%	95,95%	82,51%	83,18%
172.800	96,07%	96,57%	84,52%	86,08%
155.550	96,33%	96,45%	85,86%	87,23%

Pode-se observar que para nesse novo contexto operacional também houve a redução de *downtime* e incremento de A_o . A Tabela 4.14 mostra estes valores em porcentagem, tanto para os cenários considerando apenas a manutenção preventiva quanto a corretiva com parâmetros médios da frota.

Tabela 4.17 - Comparação entre o modelo de planejamento convencional e o novo modelo de planejamento para cada contexto operacional (36 aeronaves, 30 anos).

FHR	Manutenção Preventiva		Manutenção preventiva e corretiva com parâmetros médios da frota	
	Redução de <i>Downtime</i>	Incremento de A_o	Redução de <i>Downtime</i>	Incremento de A_o
311.050	3,20%	0,18%	0,95%	0,02%
293.800	3,86%	0,24%	1,39%	0,02%
259.200	0,09%	0,11%	0,11%	0,01%
224.650	4,50%	0,24%	1,32%	0,58%
190.080	7,32%	0,71%	2,25%	0,81%
172.800	0,10%	0,52%	0,15%	1,84%
155.550	5,08%	0,12%	1,81%	1,59%

4.1.1.3 Discussão final sobre a primeira etapa

As melhorias apresentadas permitiram uma visão sistêmica da frota. Proporcionou maior capacidade e flexibilidade ao decisor, quer para um gestor de frota, para uma formulação de requisitos para o desenvolvimento de projetos, quer para a aquisição de sistemas aeroespaciais complexos.

Além disso, a potencialidade de analisar várias alternativas, fornecendo pontos de referência significativos e precisos a baixos custos computacionais e tempo de processamento, representa ganhos significativos nos processos de tomada de decisão sobre as necessidades de gestão da frota ou no desenvolvimento do projeto de apoio logístico de aeronaves.

Considerando uma frota de aeronaves de defesa distribuídas em diferentes localidades, por exemplo, pode-se seguir a distribuição do esforço de voo entre unidades e em períodos mais curtos.

O planejamento estratégico, neste caso, pode facilitar a tomada de decisões relacionadas com a distribuição de aeronaves entre unidades e ao longo de períodos específicos para cumprir o planejamento inicial, mesmo que alterem temporariamente as quantidades de aeronaves em cada unidade, com base na demanda específica no período especificado. Esta rotação pode também considerar a localização e a capacidade das oficinas e das equipes de manutenção em cada localidade.

O modelo também pode ser adaptado para mostrar, além do tempo de parada, os custos relacionados com atividades de manutenção preventiva, incluindo peças, componentes, ferramentas e estruturas de manutenção, entre outros. Além disso, a demanda de recursos humanos também pode ser agregada ao modelo, incluindo o pessoal e as respectivas especialidades necessárias para cada inspeção e o esforço de carga de trabalho (mão-de-obra) com os seus respectivos custos, oferta e orçamentos.

Questões sobre modelo e aproximação da realidade estão associadas a incertezas relacionadas com acidentes aeronáuticos e falhas imprevistas. Estes eventos podem extrapolar a capacidade de recuperar e restaurar o planejamento estratégico. Por exemplo, no caso da parada prolongada e não planejada de uma aeronave que deveria voar uma quantidade muito elevada de esforço de voo, a nova taxa de utilização necessária para "recuperar" o esforço de voo pode ser impossível de ser alcançada.

Em termos práticos, uma aeronave, em um contexto operacional, que não deveria voar mais de 320:00h por ano ou 27:00h/mês, se permanecer mais de um mês em reparo não planejado, não poderá voar acima dessa capacidade para recuperar as 27:00h que restariam para voar.

Outro ponto a salientar é que o resultado apresentado é a disponibilidade máxima possível para uma frota desta aeronave dentro das condições limite estabelecidas (demanda de esforço aéreo, ciclo de vida, características de manutenção e quantidade de aeronaves). Desta forma, o novo modelo estabelece a disponibilidade operacional máxima possível para uma frota de aeronaves, dado um cenário operacional específico, cumprindo o **OE2**, respondendo à **QN2**.

Qualquer melhoria depende de inovações processuais, doutrinárias ou tecnológicas, que possam contribuir com a redução do tempo de processamento da manutenção planejada ou o prolongamento do ciclo de inspeção.

4.2.2 Segunda etapa - LNS

A segunda etapa cumpre o **OE3**, dado que trata de um modelo de otimização de planejamento de manutenção de aeronaves de médio/curto-prazo integrado ao de longo-prazo.

Os *outputs* da primeira etapa se tornam *inputs* da segunda, juntamente com os valores médios históricos de demanda de esforço aéreo com as sazonalidades mensais. A demanda de esforço aéreo mensal é calculada multiplicando-se a demanda anual pelo percentual representativo da sazonalidade de cada mês. A demanda diária é calculada dividindo-se a demanda mensal pela quantidade de dias do respectivo mês.

Por exemplo, para um esforço anual de 950:00h e o mês de janeiro com sua sazonalidade média de 5%, implica que a demanda desse mês seria de 47,5 horas de voo. Dividindo por 31 dias, a demanda diária seria de 1,53 horas.

Para calcular o esforço aéreo previsto para cada aeronave multiplica-se a demanda diária pelo percentual representativo do esforço aéreo calculado na primeira etapa da otimização. Por exemplo, a aeronave que deveria voar 50 horas representa 50/14.250 do esforço aéreo total, ou seja, 0,35%, enquanto a que deveria voar 3.000 horas representa aproximadamente 21%. Dessa forma, a aeronave de 50 horas teria a demanda diária prevista de $1,53 \times 0,0035$ e a de 3000 horas, $1,53 \times 0,21$ horas de demanda diária prevista no mês de janeiro.

Para construir a solução inicial, soma-se o esforço aéreo diário de cada aeronave até completar o ciclo de manutenção física. Aloca-se a aeronave para manutenção no período correspondente ao tempo de duração da respectiva inspeção e, ao término, retorna com todas as horas disponíveis até o próximo ciclo de inspeção. Repete-se o ciclo até atingir o esforço aéreo previsto para a aeronave voar até o final da fase de operação e suporte, conforme definido na otimização da primeira etapa.

Após a construção da solução inicial obtêm-se o programa de manutenção definido para toda a fase de operação e suporte, baseado na demanda sazonal mensal do esforço aéreo e distribuição do esforço aéreo de cada aeronave (resultado da primeira etapa). Posteriormente inicia-se a otimização da segunda etapa, conforme já detalhado na metodologia.

Como resultado da segunda etapa, obtêm-se o calendário de manutenção preventiva. A Figura 4.13 ilustra o ajuste final do calendário, que procurou concentrar as inspeções em períodos de menor demanda de esforço aéreo.

No eixo x temos os dias de operação e no eixo y, cada linha representa o cronograma de paradas de manutenção de uma aeronave. As elipses hachuradas mostram que a atribuição inicial (solução inicial) de uma inspeção específica (barras vermelhas), foi deslocada (barras verdes) para um período de menor demanda de esforço aéreo (linha azul).

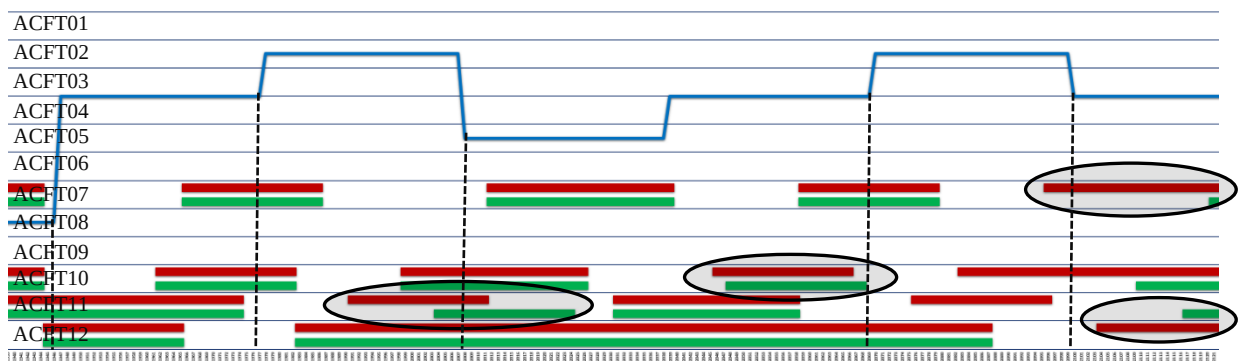


Figura 4.13 - Comparação entre o calendário de manutenção preventiva da solução inicial e o otimizado.

4.1.2.1 Programação da manutenção

Os resultados da a otimização da frota de helicópteros com doze aeronaves, voando 14.250 h em quinze anos de operação e considerando somente as manutenções preventivas, estão apresentados nas Figura 4.14 à Figura 4.20.

Pode-se observar os recortes temporais comparando o resultado do planejamento convencional da manutenção com o planejamento otimizado da segunda etapa, na perspectiva das oficinas.

As três primeiras linhas dos gráficos, representando uma oficina cada, tratam do planejamento convencional, enquanto as últimas três, o planejamento otimizado. Cada bloco representa uma atividade de inspeção e sua largura representa o tempo de duração da atividade, sendo de 21, 28, 105 e 180 dias para essa frota.

As aeronaves estão diferenciadas por cores. Portanto, a ACFT12 na cor verde, por exemplo, está alocada de forma distribuída nas três primeiras oficinas, no planejamento convencional. A mesma aeronave mantendo a cor verde (ACFT12M, “M” de melhorada), teve sua alocação alterada pela otimização, já redistribuída nas três últimas linhas.

Da mesma forma que ilustrado na Figura 4.13, pode-se observar que as inspeções foram “deslocadas” para os períodos de menor demanda de esforço aéreo, também representados pelos “vales” na linha azul.

Outro ponto interessante é a visão holística do planejamento abrangendo todo o período de O&S. Os métodos atuais, conforme já apresentado, limitam-se à no máximo um dos recortes (até dois anos). Isso implica uma visão míope e limitada, visto que a otimização de um único período pode gerar impactos irrecuperáveis em momento posterior.

Na Figura 4.17, por exemplo, o planejamento otimizado gera uma concentração de atividades de manutenção no pico da demanda de esforço aéreo, representada pela área hachurada. Aparentemente essa concentração é maior que o planejamento convencional, com resultados melhores que o otimizado, ao analisar somente esse recorte. No entanto, ao analisar o recorte anterior na Figura 4.16 (área hachurada), verifica-se que a economia global aparentemente foi obtida em outros períodos.

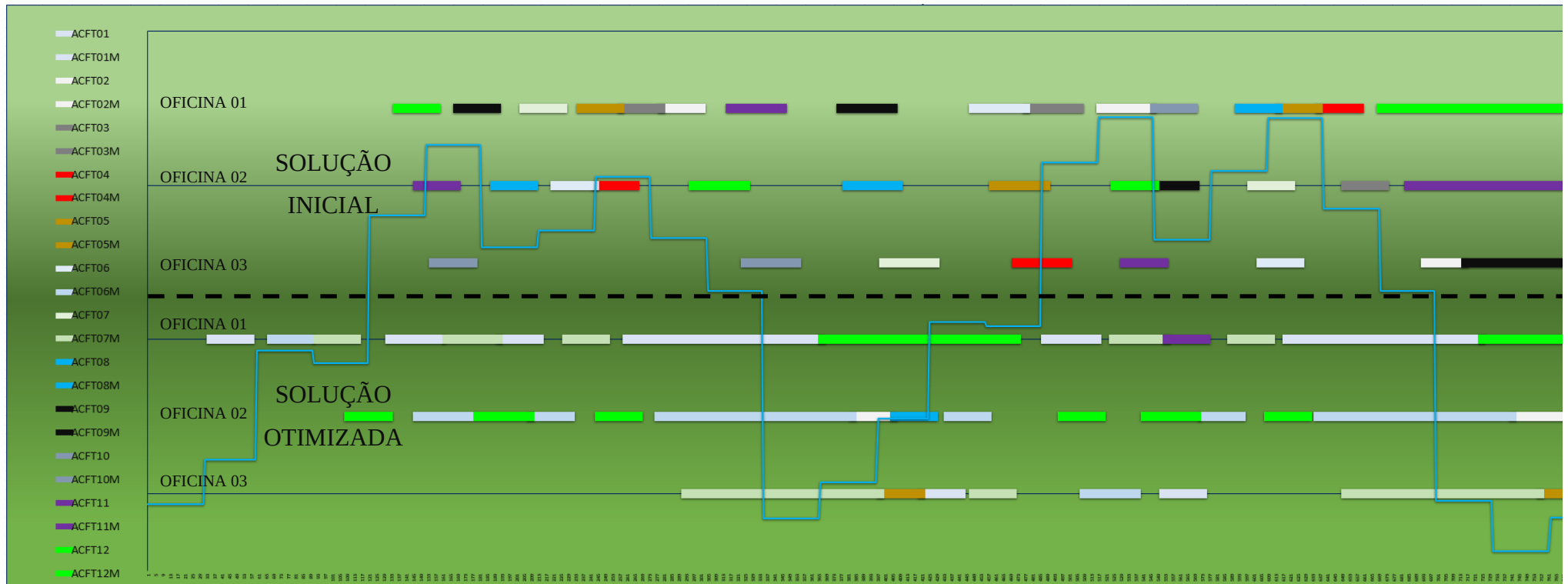


Figura 4.14 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 1 a 765.

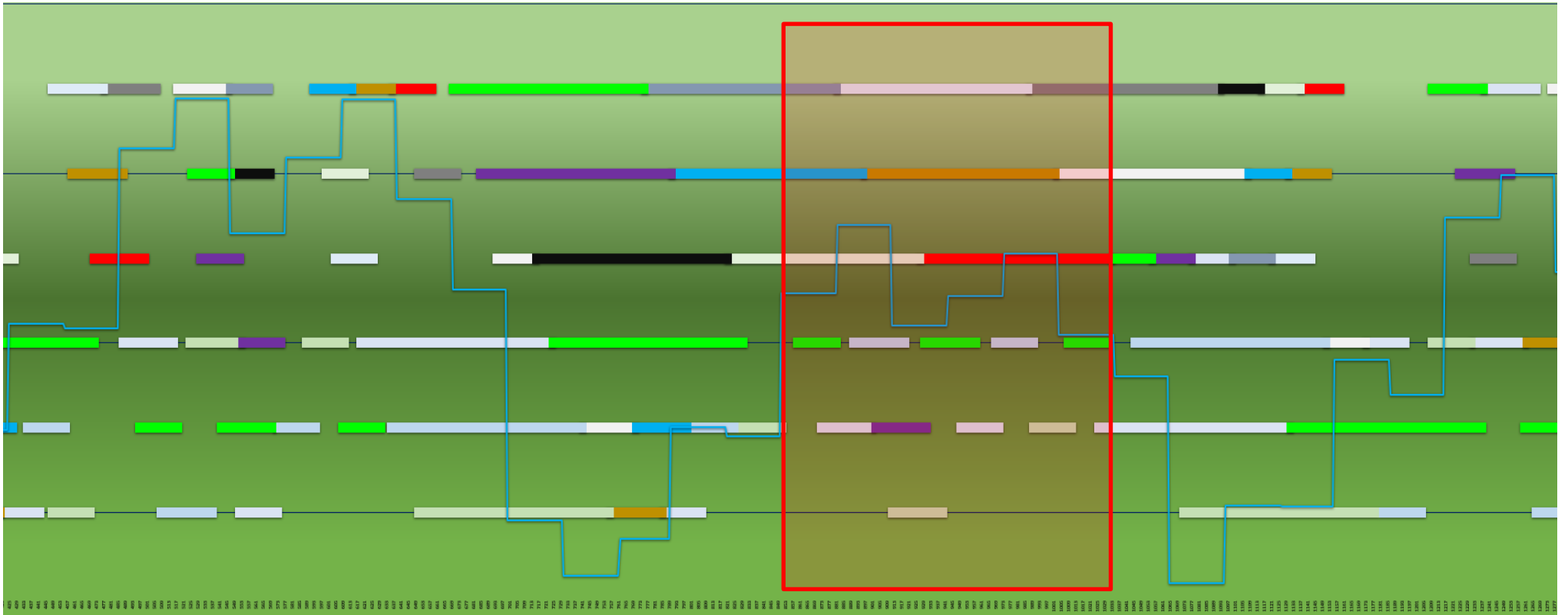


Figura 4.15 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 435 a 1277.

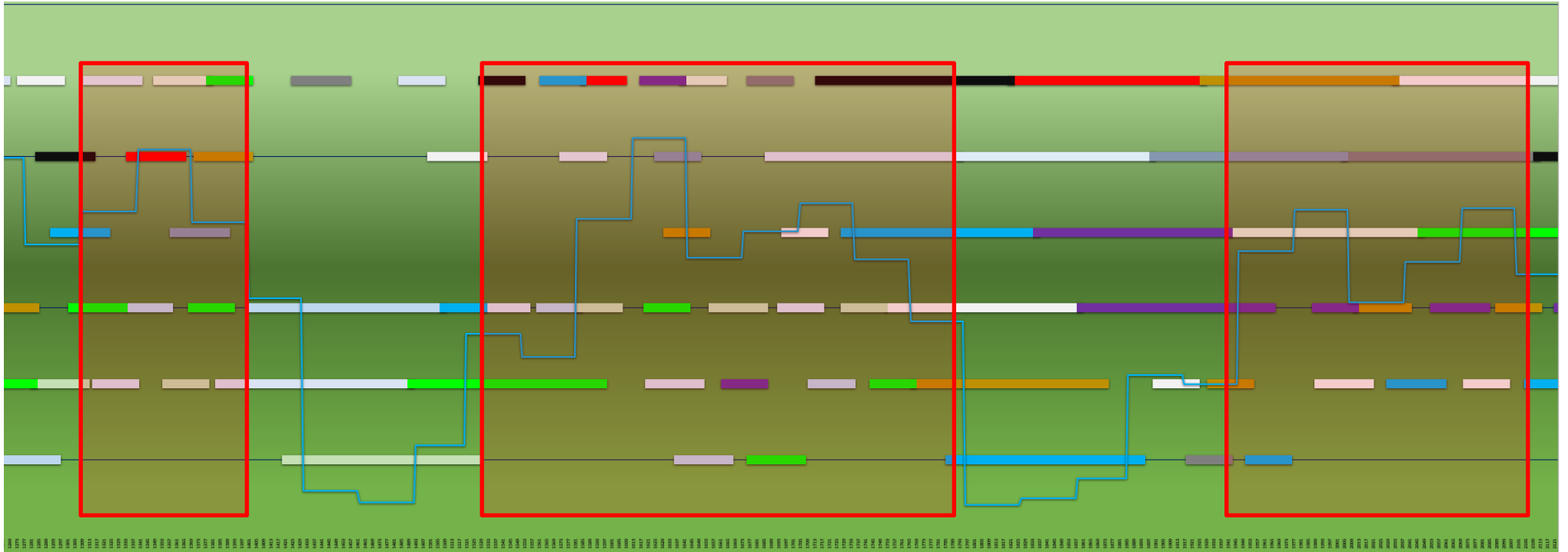


Figura 4.16 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 1278 a 2121.

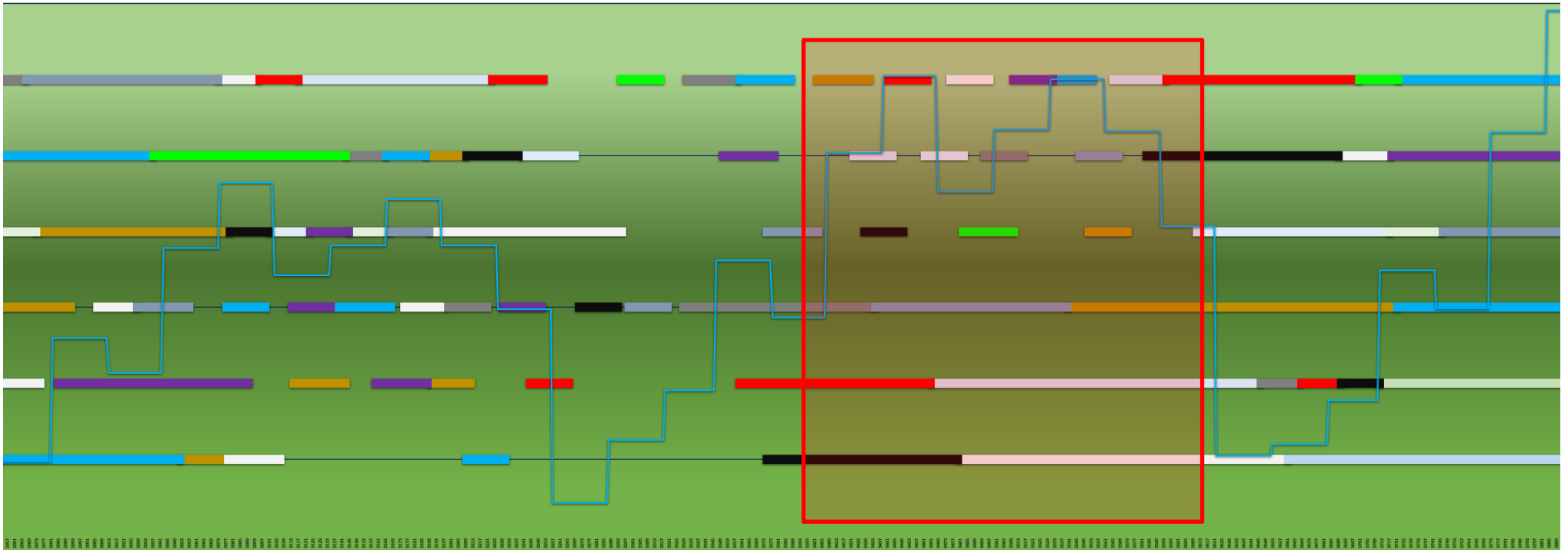


Figura 4.17 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 2957 a 3809.

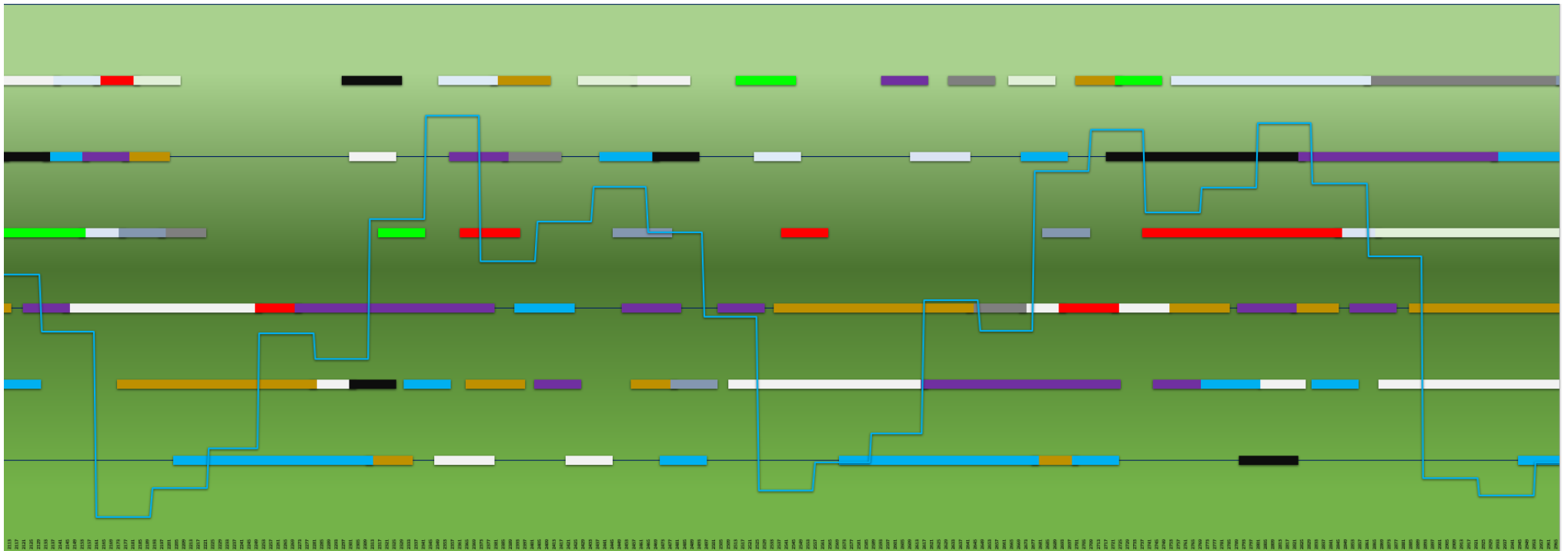


Figura 4.18 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 2113 a 2965.

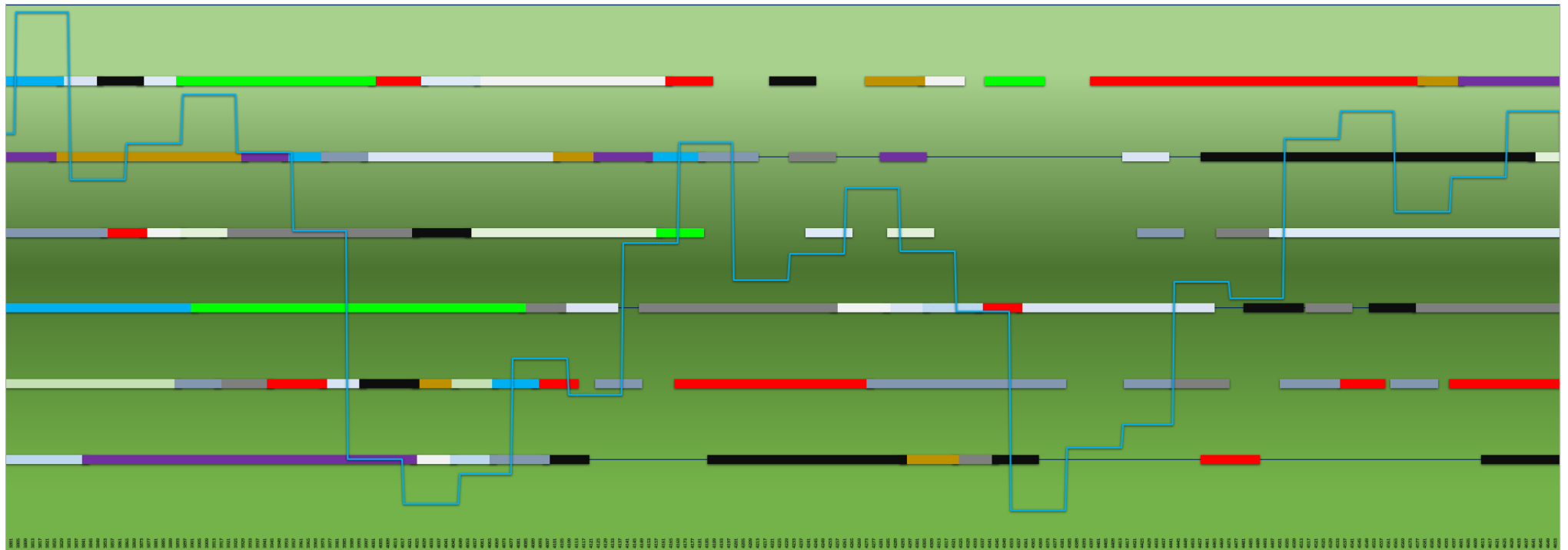


Figura 4.19 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 3801 a 4655.

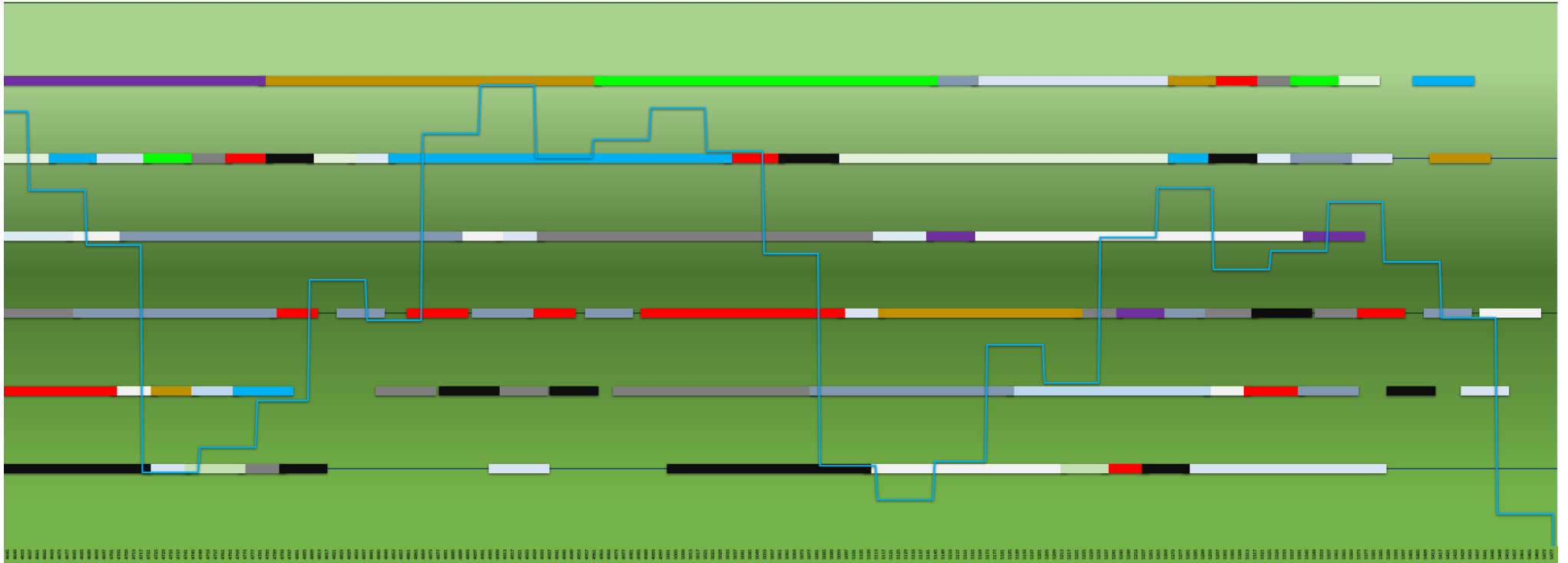


Figura 4.20 - Planejamento Convencional da Manutenção X Otimizado - Dia 4655 a 5479.

A programação da manutenção apresentada como resultado da otimização da segunda etapa altera a sistemática de alocação de aeronaves na escala de voo. O SSSM busca priorizar o uso das aeronaves que estão mais acima da “diagonal de manutenção”. Já com a programação (data fixa) da parada das aeronaves definida, a priorização de alocação é da aeronave com maior taxa de esforço aéreo a ser consumido.

Essa taxa é obtida por meio da relação entre dias e horas remanescentes até a próxima parada. Esta nova sistemática gera inclusive maior flexibilidade para o operador, visto que este terá, de forma antecipada, a informação do quanto ele pode voar com cada aeronave e até quando. E sabe, ainda, que conseguindo cumprir aquela programação, utilizará os seus recursos com a máxima eficiência.

4.1.2.2 Desempenho do algoritmo

Pode ser visto na Figura 4.21 que a melhoria da solução estabilizou após cerca de um segundo de processamento. Embora o foco do trabalho não seja o desempenho do algoritmo, o tempo de processamento foi mínimo, tendo em conta as características e complexidades do modelo.

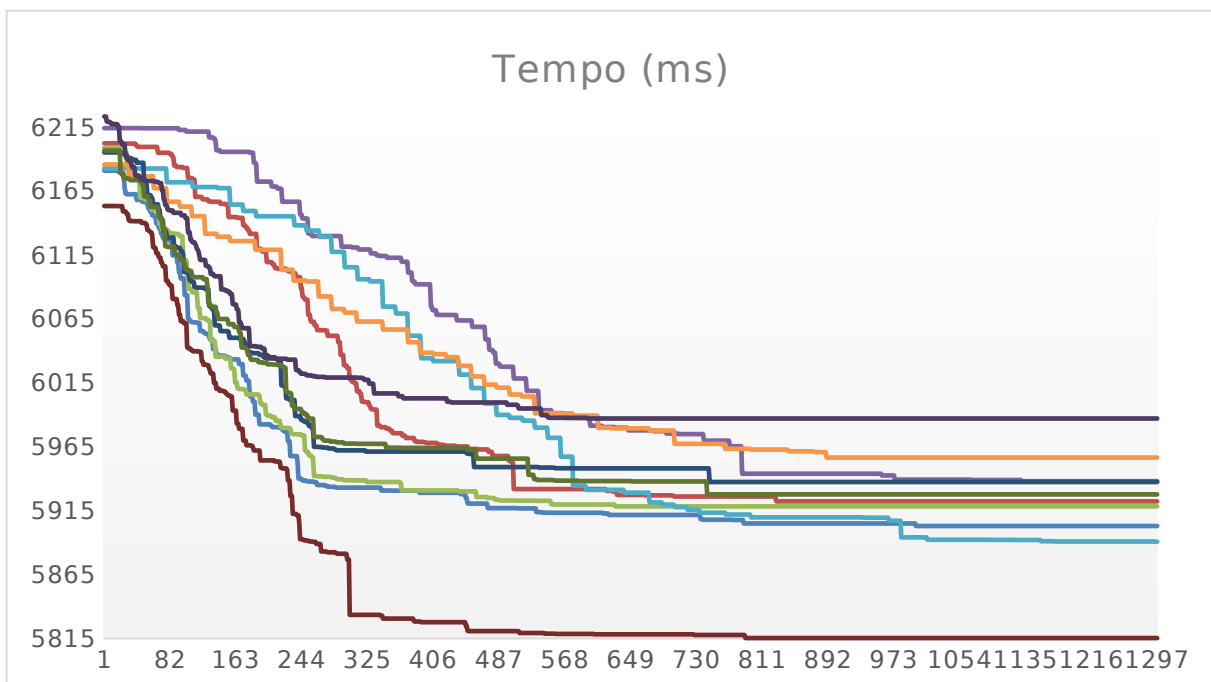


Figura 4.21 - Otimização da solução em relação ao tempo de processamento, em milissegundos.

Da mesma forma, pode observar-se na Figura 4.22 que foram necessárias cerca de 780 iterações para estabilizar em uma solução otimizada. Como resultado, observa-se uma rápida convergência para uma solução ótima local.

No entanto, não foi possível estabelecer o ótimo global. Por conseguinte, em trabalho futuro, pode-se concentrar na proposição de algoritmos com melhores desempenhos.

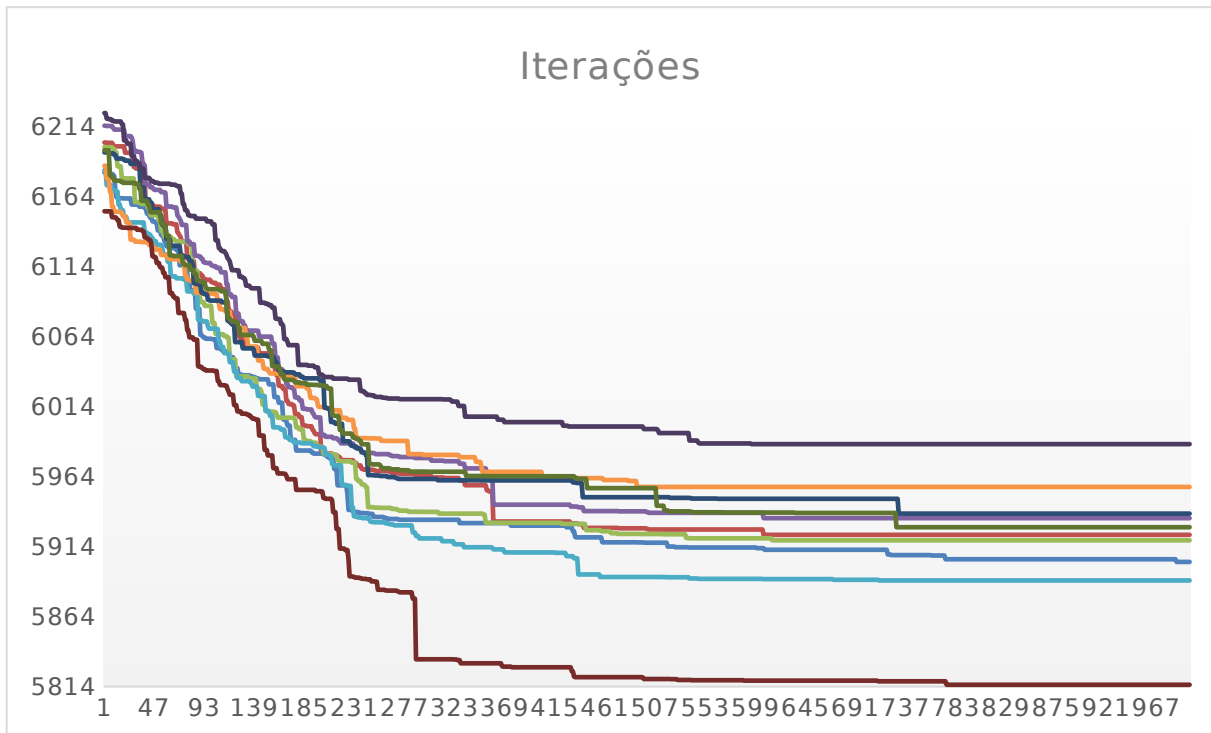


Figura 4.22 - Otimização da solução em relação ao número de iterações.

4.3 Simulação de cenários para os testes

O resultado da simulação de cenários para os testes visa responder a **QN3**, dado que busca verificar a possibilidade de execução do planejamento obtido nas etapas anteriores, ou se é possível atingir a disponibilidade operacional máxima de maneira a atender a demanda de esforço aéreo.

4.3.1 Indicadores de pronta resposta

Notável nas Figura 4.23 e 4.15, o novo método foi superior em todos os cenários, tanto em disponibilidade como na confiabilidade da programação. Por exemplo, a disponibilidade média da frota para o método convencional de planejamento da manutenção (MCPM) foi de 62,72% contra 69,83 % para o novo método, sendo significativamente diferente um do outro, como se observa no gráfico tipo *boxplot* da Figura 4.25.

Como esperado, a disponibilidade ótima resultante da primeira etapa de otimização não foi alcançada em nenhuma das simulações. Das cem simulações, a A_0 máxima alcançada foi de 74,4% contra 82,50% na primeira etapa para o novo modelo (máxima possível).

Para o SSSM, a maior disponibilidade alcançada foi de 68,8%, contra 81,37% do cálculo inicial (máxima possível).

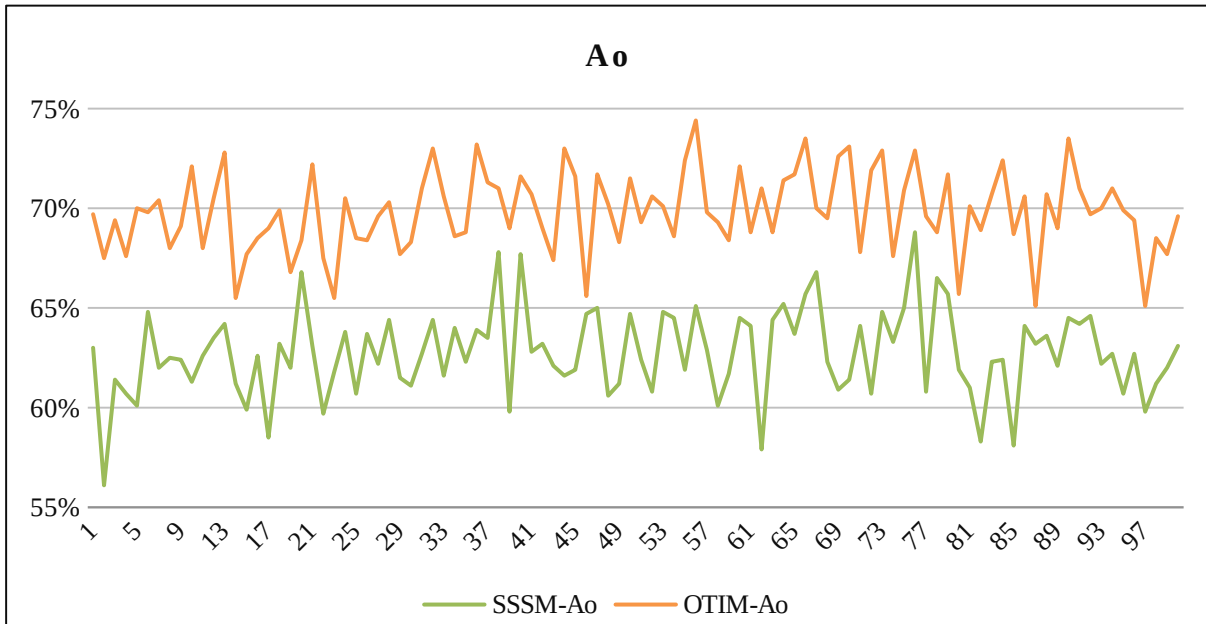
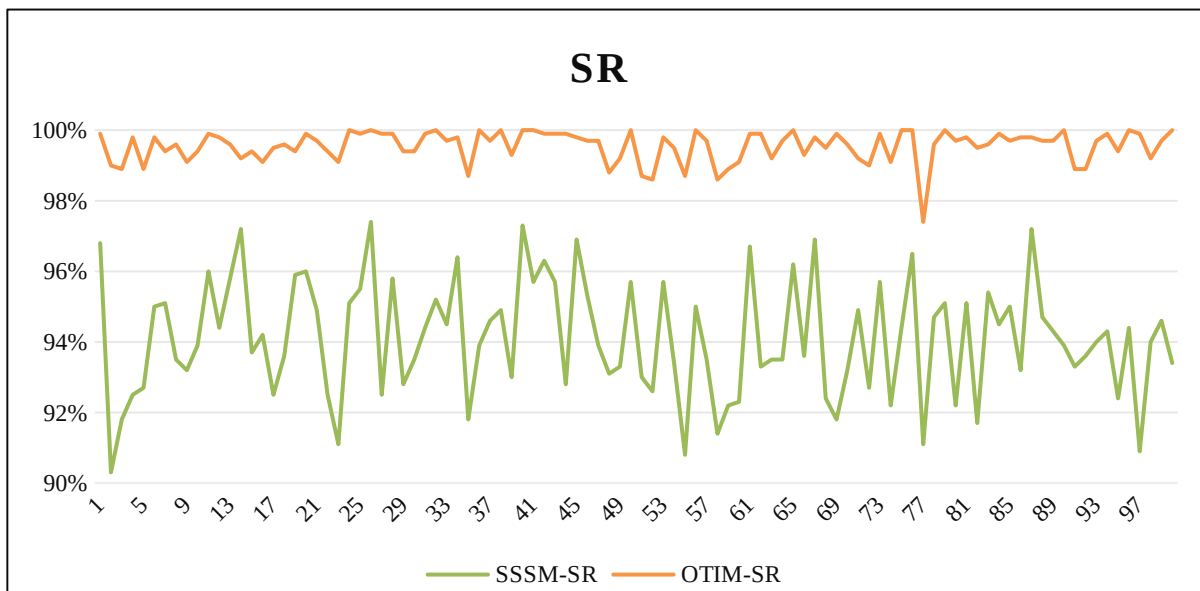


Figura 4.23 - Comparação da disponibilidade entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado.

Da mesma forma, o SR médio aumentou de 94,1 % para 99,55 % (SSSM e o novo método). Para fins ilustrativos, a Australian Aerospace incluiu uma classificação de SR de 97,5% como critério crítico para seleção e aquisição de helicópteros multipropósitos (AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE, 2014).

Nesse caso o planejamento convencional apontaria para um indeferimento do projeto, enquanto o resultado por meio do planejamento otimizado aprovaria este requisito de



aquisição.

Figura 4.24 - Comparação de Confiabilidade da Programação entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado.

Fica claro, portanto, a importância da abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas no processo de aquisição de aeronaves.

O teste t realizado para comparar os valores médios dos resultados obtidos para a disponibilidade operacional mostrou um valor p de $1,319 \times 10^{-50}$, indicando que a hipótese nula de que as médias são iguais é rejeitada. Portanto, houve uma diferença estatisticamente significativa entre os resultados.

Do mesmo modo, para SR, foi obtido um valor p de $8,27 \times 10^{-61}$. Portanto, a hipótese nula de que as médias são iguais é rejeitada. Ambos para um nível de confiança de 95%.

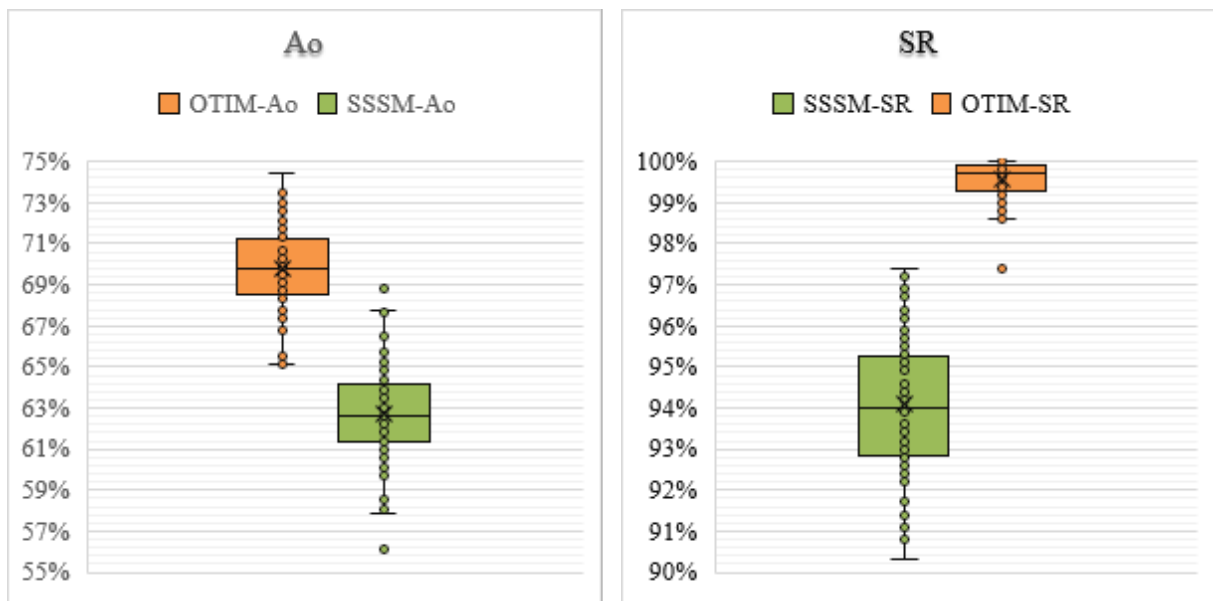


Figura 4.25 - Boxplot para comparação de disponibilidade (A_o) e confiabilidade de programação (SR) entre o modelo convencional (SSSM) e o novo modelo – simulado.

Além da redução do *downtime* por manutenção preventiva, observa-se o impacto das filas na indisponibilidade da frota. A diferença entre os resultados do SSSM e do novo modelo reside na ocorrência de filas de manutenção são expressivos, chegando próximo aos 50% de redução.

O resultado é justificável, visto que, como o novo modelo define quando cada aeronave vai parar, minimiza-se a aleatoriedade na parada das aeronaves por manutenção preventiva, e, conseqüentemente, a possibilidade de ocorrência de fila.

Pode-se observar na Tabela 4.18 a redução das filas de manutenção nos diferentes cenários. A definição prévia do momento de parada para manutenção reduziu significativamente as filas nas oficinas, que não deixaram, no entanto, de existir. A existência

das filas no cenário com o planejamento otimizado são fruto das variações aleatórias da demanda de esforço aéreo no nível operacional (escala diária de voo).

Tabela 4.18 - Redução de filas de manutenção para os diferentes cenários (frota de helicópteros).

Cenário Manutenção	Horas Voadas		Em Fila (Dias)		Total de Indisponibilidade		Redução de Filas	% da Fila na Indisponibilidade	
	FHR	Oficinas	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM		SSSM	OTIM
Prev	14250	Irrestrito	-	-	12.921,95	12.634,01	0,00%	0,0%	0,0%
Prev	14250	3	11.943,03	7.702,65	23.930,40	19.952,15	35,51%	49,9%	38,6%
Prev + Corr Frota	14250	3	11.723,21	6.765,39	28.557,37	25.727,28	42,29%	41,1%	26,3%
Prev + Corr Ind	14250	3	11.302,78	5.685,81	28.982,99	23.118,63	49,70%	39,0%	24,6%
Prev	21000	4	11.799,53	10.553,52	29.186,05	28.101,87	10,56%	40,4%	37,6%
Prev + Corr Frota	21000	6	6.446,43	3.801,78	31.400,09	29.479,15	41,03%	20,5%	12,9%
Prev + Corr Ind	21000	6	6.797,84	3.664,53	32.447,46	29.276,32	46,09%	21,0%	12,5%
Prev	28000	5	10.811,87	9.637,52	33.577,48	32.968,88	10,86%	32,2%	29,2%
Prev + Corr Frota	28000	8	2.945,46	2.041,57	36.312,41	35.639,01	30,69%	8,1%	5,7%
Prev + Corr Ind	28000	8	1.126,20	619,41	35.837,86	34.218,41	45,00%	3,1%	1,8%
Prev	35000	8	2.038,95	1.343,62	32.467,78	32.015,64	34,10%	6,3%	4,2%
Prev + Corr Fro	35000	9	1.765,47	1.441,78	41.788,76	41.216,88	18,33%	4,2%	3,5%

Uma possível forma de reduzir as filas, seria a atualização diária do planejamento, assim como é feito no SSSM. Nessa atualização, o modelo de otimização seria novamente aplicado, gerando um novo planejamento de manutenção, levando em consideração o novo cenário. Dessa forma, poderia se aproximar da disponibilidade calculada na primeira etapa do novo modelo.

A indisponibilidade por filas não pode ser modelada de forma determinística, muito menos incluída na primeira etapa do planejamento, dado que o modelo é estático e a ocorrência da fila é dinâmica. Portanto é natural que não seja possível atingir a disponibilidade calculada nas etapas um e dois, exceto na condição de capacidade irrestrita de manutenção.

A Tabela 4.19 compara a disponibilidade calculada na primeira etapa e a alcançada nos diversos cenários simulados para a frota de helicópteros. Observa-se que somente na simulação com manutenção irrestrita alcança-se, em média, valores próximos à disponibilidade calculada. As colunas com “-1” se referem à disponibilidade calculada na primeira etapa, as com “-S” se referem à disponibilidade média das simulações e as com “-dif” apresentam a diferença entre as duas, em porcentagem.

Tabela 4.19 - Comparação entre a disponibilidade calculada e alcançada.

Manutenção	FHR	SSSM-1	SSSM-S	SSSM-dif	OTIM-1	OTIM-S	OTIM-dif
Prev (mnt irrestrita)	14.250	81,37%	79,79%	1,58%	82,50%	80,44%	2,06%
Prev	14.250	81,37%	62,72%	18,65%	82,50%	69,83%	12,67%
Prev + Corr Frota	14.250	75,82%	42,60%	33,22%	76,77%	40,20%	36,57%
Prev + Corr Ind	14.250	70,99%	54,58%	16,41%	77,13%	64,03%	13,11%
Prev	21.000	72,16%	55,32%	16,84%	72,92%	56,62%	16,30%
Prev + Corr Frota	21.000	63,72%	51,41%	12,31%	64,48%	54,92%	9,56%
Prev + Corr Ind	21.000	56,38%	49,73%	6,65%	64,57%	55,11%	9,46%
Prev	28.000	61,38%	48,74%	12,64%	62,80%	49,98%	12,82%
Prev + Corr Frota	28.000	50,12%	44,32%	5,80%	51,54%	45,62%	5,92%
Prev + Corr Ind	28.000	40,26%	45,11%	-4,85%	49,80%	47,78%	2,02%
Prev	35.000	51,96%	52,26%	-0,30%	52,68%	51,58%	1,10%
Prev + Corr Frota	35.000	37,88%	37,02%	0,86%	38,60%	37,12%	1,48%

A Tabela 4.20 mostra o resumo das simulações realizadas nos diversos cenários para a frota de helicópteros (doze aeronaves). Nas colunas pertencentes ao grupo “Cenário” estão as informações da frota com os tipos de manutenção considerados (Manutenção), quantidade de horas demandadas (FHR) e capacidade de manutenção (Oficinas), definidas pela quantidade de oficinas. Cada linha apresenta os valores médios obtidos em aproximadamente uma centena de simulações.

No grupo “Horas Voadas”, observa-se o quanto realmente se conseguiu voar. A diferença representa a quantidade de horas que deixaram de ser voadas por não haver aeronaves disponíveis para cumprir a missão (em manutenção ou em fila). A SR representa a porcentagem da diferença entre a quantidade de missões solicitadas (escaladas) e a quantidade de missões atendidas.

Um dos fatores que mais contribuíram para a redução da disponibilidade foram as filas. Este fator está diretamente ligado à capacidade das oficinas, ficando à critério do operador analisar o *trade-off* entre o custo de incrementar sua capacidade de manutenção ante a uma melhora na disponibilidade.

Nota-se, no entanto, uma diferença considerável entre os indicadores de SR e A_o . Mesmo com disponibilidades abaixo de 50% pode-se alcançar índices superiores a 90% de atendimento da demanda (SR), que, em última análise, é o indicador que aponta a capacidade de prontidão do operador.

Portanto, ao se dimensionar a capacidade de manutenção, deve-se levar em consideração se o efeito final desejado é manter uma A_o alta, uma SR alta, ou ambos os indicadores elevados. Pode-se aceitar uma baixa taxa de disponibilidade desde que se mantenha elevado índice de SR, dependendo da necessidade do operador. Esta relação trata de um outro ponto com potencial de ser explorado em trabalhos futuros.

A coluna “Redução de Filas” apresenta o quanto o novo modelo proporcionou na redução das filas em relação ao convencional, em porcentagem dos dias totais. As duas últimas colunas mostram o quanto as filas representam, em porcentagem, na indisponibilidade total da frota.

Nota-se o impacto da quantidade de oficinas na redução das filas. Nas últimas linhas, com 8 e 9 oficinas, as filas caíram para valores inferiores a 6,5% do total da indisponibilidade da frota.

Tabela 4.20 - Resumo dos resultados e indicadores das simulações.

Cenário	Horas Voadas		SR		Em Fila (Dias)		Em Mnt. Preventiva (Dias)		Em Mnt. Corretiva (Dias)		Total de Indisponibilidade		% da Fila na Indisponibilidade				
	Manutenção	FHR	Oficinas	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM	Redução de Filas	SSSM	OTIM	
Prev	14250	Irrestrito	14.229,12	14.249,31	99,86%	100,00%	-	-	12.921,95	12.634,01	-	-	12.921,95	12.634,01	0,00%	0,0%	0,0%
Prev	14250	3	13.393,70	13.885,50	94,10%	99,55%	11.943,03	7.702,65	11.987,37	12.249,50	-	-	23.930,40	19.952,15	35,51%	49,9%	38,6%
Prev + Corr Frota	14250	3	12.202,15	12.789,43	85,88%	96,55%	22.723,21	20.765,39	11.160,92	10.495,37	4.673,24	4.466,52	38.557,37	35.727,28	9,43%	58,1%	58,9%
Prev + Corr Ind	14250	3	13.409,62	14.122,73	94,23%	99,74%	11.302,78	5.685,81	11.979,50	12.447,38	5.700,71	4.985,44	28.982,99	23.118,63	49,70%	39,0%	24,6%
Prev	21000	4	19.203,77	19.750,39	91,52%	98,57%	11.799,53	10.553,52	17.386,52	17.548,35	-	-	29.186,05	28.101,87	10,56%	40,4%	37,6%
Prev + Corr Frota	21000	6	19.508,89	20.361,90	92,99%	99,36%	6.446,43	3.801,78	17.664,88	18.155,65	7.288,78	7.521,72	31.400,09	29.479,15	41,03%	20,5%	12,9%
Prev + Corr Ind	21000	6	19.450,72	20.471,66	92,73%	99,22%	6.797,84	3.664,53	17.566,00	18.409,69	8.083,62	7.202,10	32.447,46	29.276,32	46,09%	21,0%	12,5%
Prev	28000	5	24.756,31	25.399,42	88,52%	97,44%	10.811,87	9.637,52	22.765,61	23.331,37	-	-	33.577,48	32.968,88	10,86%	32,2%	29,2%
Prev + Corr Frota	28000	8	25.515,35	26.109,33	91,22%	97,90%	2.945,46	2.041,57	23.805,01	23.897,56	9.561,94	9.699,88	36.312,41	35.639,01	30,69%	8,1%	5,7%
Prev + Corr Ind	28000	8	25.911,35	26.614,16	92,64%	98,31%	1.126,20	619,41	24.152,32	24.225,85	10.559,35	9.373,15	35.837,86	34.218,41	45,00%	3,1%	1,8%
Prev	35000	8	32.929,18	32.987,50	94,13%	98,89%	2.038,95	1.343,62	30.428,83	30.672,02	-	-	32.467,78	32.015,64	34,10%	6,3%	4,2%
Prev + Corr Frota	35000	9	30.724,96	30.806,96	87,86%	95,25%	1.765,47	1.441,78	28.492,28	28.320,11	11.531,00	11.455,00	41.788,76	41.216,88	18,33%	4,2%	3,5%

4.3.2 Dimensionamento da frota

Na Tabela 4.21 estão apresentados os resultados da simulação ao se variar a dimensão da frota, de 20 a 5 aeronaves. Permaneceram as condições de 15 anos de operação, voando 14.250:00 horas, considerando apenas a manutenção preventiva e capacidade de manutenção restrita à três oficinas. Cada linha representa uma dimensão de frota (quantidade de aeronaves) e mostra a média dos valores encontrados em cem simulações.

Nas colunas dois e três estão os valores médios de SR para o modelo convencional (SSSM) e o modelo otimizado (OTIM), respectivamente. Observa-se uma variação da diferença entre cinco e sete pontos percentuais em favor do modelo otimizado.

A terceira e quarta colunas mostram a A_0 e as próximas duas as missões atendidas, que correspondem à porcentagem de SR em relação ao total de missões demandadas. As colunas seguintes representam a quantidade de dias de indisponibilidade da frota por fila, por manutenção preventiva e total em todo o período.

A coluna “Redução de filas” indica a porcentagem de redução das filas proporcionadas pelo novo método, em relação ao método convencional. Esta redução é impactada diretamente pela segunda etapa do modelo, momento no qual as paradas de manutenção são definidas, buscando alocar estas atividades nos períodos de menor demanda de esforço aéreo.

Observa-se que no caso de elevado esforço aéreo relativo, ou seja, quando todas as aeronaves da frota voarão próximas ao seu TTL, a simulação do modelo convencional apresentou menor quantidade de filas (com sete, seis e cinco aeronaves). No entanto, a indisponibilidade por manutenção preventiva ainda compensou o total de indisponibilidade da frota, permanecendo superior ao modelo convencional, apesar de muito próximo na A_0 .

Ressalta-se, ainda, que mesmo nesses últimos casos, a SR permaneceu consideravelmente superior à convencional, demonstrando a robustez do modelo. Ressalta-se que o modelo não indica o dimensionamento ideal da frota, apresenta, apenas, os indicadores simulados de A_0 e SR após a otimização e simulação dos cenários.

Tabela 4.21 – Resultados das simulações com frotas de diferentes dimensões.

Qtd. Anv	SR		A _o		Missões Atendidas		Fila (Dias)		Mnt. Preventiva (Dias)		Total de Indisponibilidade		Redução de filas	% da Fila na Indisponibilidade	
	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM	SSSM	OTIM		SSSM	OTIM
20	93,90%	99,56%	62,26%	69,50%	18.165	19.258	12.315	7.862	11.961	12.252	24.275	20.114	36,15%	50,7%	39,1%
19	93,99%	99,51%	62,45%	69,69%	18.196	19.263	12.154	7.743	11.950	12.257	24.104	20.000	36,29%	50,4%	38,7%
18	93,80%	99,50%	62,43%	69,61%	18.150	19.252	12.250	7.799	11.930	12.260	24.180	20.059	36,33%	50,7%	38,9%
17	94,08%	99,57%	62,43%	69,65%	18.184	19.247	12.082	7.760	11.993	12.265	24.075	20.025	35,77%	50,2%	38,8%
16	94,07%	99,54%	62,41%	69,84%	18.203	19.261	12.191	7.653	11.983	12.257	24.174	19.910	37,22%	50,4%	38,4%
15	93,94%	99,55%	62,39%	69,54%	18.184	19.269	12.227	7.829	11.934	12.262	24.161	20.091	35,97%	50,6%	39,0%
14	93,89%	99,57%	62,61%	69,78%	18.158	19.253	12.075	7.728	11.944	12.259	24.019	19.987	36,00%	50,3%	38,7%
13	93,95%	99,52%	62,53%	69,54%	18.171	19.246	12.107	7.843	11.950	12.240	24.057	20.082	35,22%	50,3%	39,1%
12	94,10%	99,55%	62,72%	69,83%	18.210	19.264	11.943	7.703	11.987	12.250	23.930	19.952	35,51%	49,9%	38,6%
11	93,40%	99,59%	61,39%	67,60%	18.066	19.262	10.723	7.806	12.054	12.122	22.776	19.929	27,20%	47,1%	39,2%
10	93,44%	99,61%	61,14%	65,11%	18.074	19.267	8.791	7.197	12.036	11.932	20.827	19.129	18,14%	42,2%	37,6%
9	93,55%	99,01%	60,61%	63,54%	18.109	19.167	7.047	6.275	12.041	11.860	19.088	18.135	10,97%	36,9%	34,6%
8	91,82%	98,85%	58,90%	62,27%	17.771	19.130	5.605	5.480	11.816	11.878	17.421	17.359	2,22%	32,2%	31,6%
7	90,97%	97,93%	57,66%	59,02%	17.592	18.940	3.992	4.365	11.677	11.717	15.669	16.082	-9,34%	25,5%	27,1%
6	88,34%	96,28%	54,29%	54,72%	17.090	18.629	2.767	2.899	11.633	11.347	14.400	14.246	-4,79%	19,2%	20,4%
5	87,90%	95,37%	52,63%	53,84%	17.017	18.465	1.238	1.368	11.572	11.344	12.810	12.712	-10,50%	9,7%	10,8%

Nas Figura 4.26 e Figura 4.27 vemos em destaque os indicadores de A_o e SR. No eixo x está representada a dimensão da frota, de vinte a cinco aeronaves. No eixo y , à esquerda, estão os valores de A_o , enquanto à direita (Figura 4.27) os de SR. As linhas contínuas representam a A_o , enquanto as pontilhadas a SR. A cor laranja indica os resultados otimizados (OTIM).

Observa-se uma estabilidade na diferença na A_o de aproximadamente sete pontos percentuais em favor do modelo otimizado. Quando se reduz a frota para menos de onze aeronaves, inicia uma queda mais acentuada, bem como a aproximação dos indicadores.

A redução da diferença se justifica, visto que quanto maior o esforço aéreo relativo, mais a distribuição de horas individuais se aproxima da equidade, ou seja, da distribuição uniforme das horas.

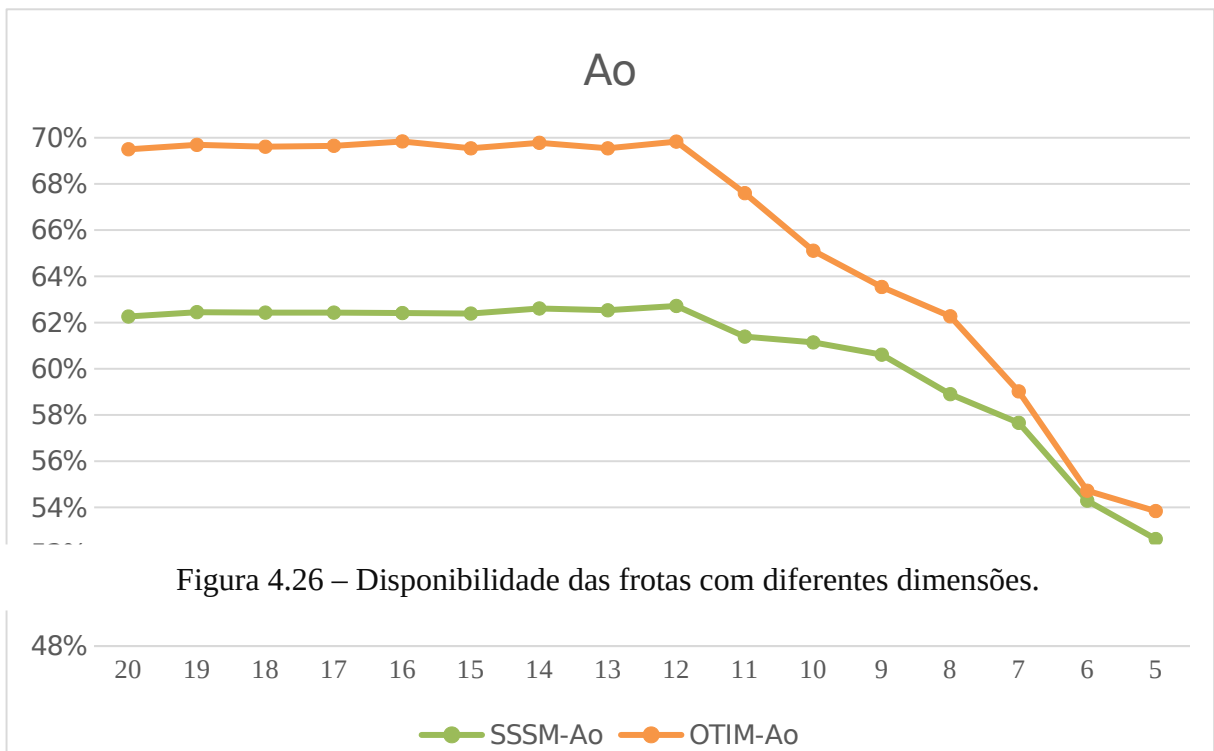
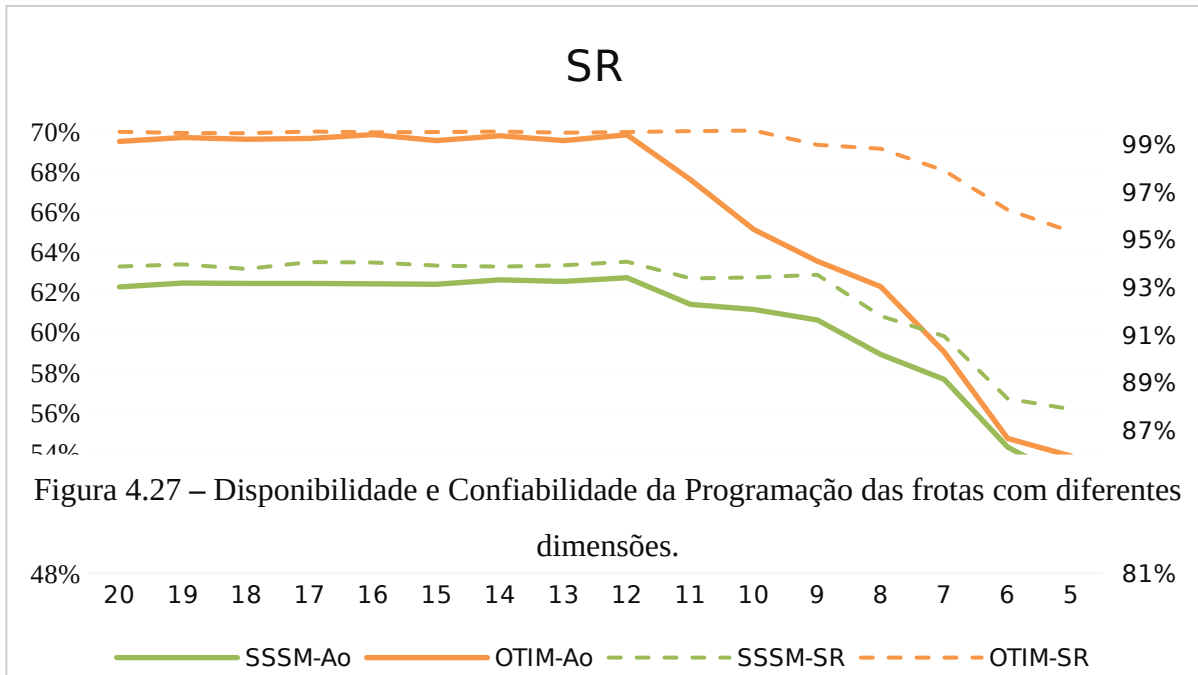


Figura 4.26 – Disponibilidade das frotas com diferentes dimensões.

A Figura 4.27 compara a evolução da SR e A_o em um mesmo gráfico. Observa-se a SR (linhas contínuas, com valores à esquerda do gráfico, laranja para o modelo otimizado e azuis para o SSSM) estabilizada em torno de 99% até a frota de 10 aeronaves no modelo otimizado contra aproximadamente 95% para as simulações no SSM até a frota de 12 aeronaves.

Apesar da queda na disponibilidade a partir de doze aeronaves ser mais acentuada no modelo otimizado, a queda da SR é mais suave, atingindo um mínimo de 95,37% com cinco aeronaves e diferença de 3,8 pontos percentuais em relação ao máximo de 99,56% com vinte aeronaves.



Já no SSSM, a queda da SR acompanha a A_o de forma mais aproximada, atingindo 87,9% com cinco aeronaves, 6 pontos percentuais em relação ao máximo de 93,9 % com vinte aeronaves. Tal situação evidencia que o modelo otimizado é mais robusto em relação à capacidade de cumprimento da missão (SR).

Para efeito de ilustração da aplicabilidade prática do modelo no dimensionamento da frota, retomando o critério crítico de 97,5% de SR, qualquer frota superior a sete aeronaves conseguiria cumprir o requisito imposto pela Australian Aerospace em seu uso ótimo. Este critério não seria atingido em nenhum cenário se o planejamento fosse realizado pelo método convencional.

4.4 Discussão final

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 em alto nível. Colaborou ainda com essa redução o uso do esforço cumulativo de horas de voo e de atividade de manutenção, representado pelo *downtime*.

A otimização da manutenção preventiva não conflita com o paradigma da manutenção preditiva, em evidência nas pesquisas recentes, quando se trata de abordagens e estratégias de manutenção. O resultado apresentando como planejamento e dimensionamento ótimo das atividades de manutenção preventiva levam em consideração apenas as condições de previsibilidade, servindo como referência mínima para o dimensionamento de oficinas e equipes de manutenção necessárias ao suporte da frota.

Assim como a manutenção corretiva, a manutenção preditiva não ocorre em períodos cíclicos fixos e dependem de uma série de fatores, devendo ser tratadas de forma similar, do ponto de vista estocástico. Portanto, outras análises e estudos poderão ser desenvolvidos para dimensionar as incertezas de manutenção envolvidas na operação.

Da mesma forma que as incertezas da manutenção preventiva e preditiva, existe a incerteza relacionada à demanda de esforço aéreo, que pode variar significativamente em caso de beligerância, por exemplo.

O modelo, conforme apresentado, possibilita uma certa flexibilidade em relação ao esforço aéreo, para um mesmo custo de manutenção preventiva (*downtime*). Caso ocorra alguma alteração significativa no cenário operacional, que conduza à extrapolação dos limites, seja pela redução ou pelo incremento de demanda de esforço aéreo, o algoritmo deverá ser executado novamente, para otimização dentro do novo contexto.

A abordagem desenvolvida permitiu a visão sistêmica da frota, com um melhor entendimento da dinâmica do problema 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 aos 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, permitem uma melhor previsão, precisão e gerenciamento da manutenção em nível operacional e conseqüentemente em nível tático.

Este planejamento de mais baixo nível, tendo o estratégico como diretriz, pode incluir o dimensionamento de equipes e das oficinas de manutenção, sendo necessário, nesse caso, levar em consideração a manutenção corretiva e preditiva. 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 do dimensionamento da frota, sendo necessário, no entanto, o desenvolvimento de modelos que permitam a realização de análise de sensibilidade. Esta análise pode facilitar a visualização do impacto da variação na dimensão da frota, na demanda de esforço aéreo, no período de uso e outros fatores de interesse.

Considerando uma frota de aeronaves de defesa, distribuída em localidades diferentes, por exemplo, pode-se acompanhar a distribuição do esforço aéreo entre as unidades e ao longo de períodos menores.

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 do 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, ao longo do período, 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 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.

5 Conclusão

O planejamento da manutenção de aeronaves é crucial para a sobrevivência das companhias aéreas, para a sustentabilidade das agências governamentais e para a manutenção da capacidade de combate e pronta resposta de aeronaves de defesa.

A literatura trata o problema principalmente por meio do uso de métodos de otimização, buscando minimizar ou maximizar diferentes indicadores e métricas, de acordo com as especificidades do cenário apresentado em um horizonte temporal de curto a médio prazo.

Foi desenvolvida uma abordagem inovadora, incluindo lacunas pontuadas em diversos trabalhos pesquisados e outras questões que não foram anteriormente vislumbradas. A abordagem baseou-se em um modelo de otimização de duas etapas para definir a programação da manutenção preventiva e a utilização de uma frota de aeronaves, considerando todo o período de O&S.

Tal abordagem estabeleceu referências de soluções globais ótimas para incrementar a capacidade de pronta-resposta, ajustando a programação da manutenção preventiva e a utilização da frota por meio da minimização do *downtime*.

Os resultados apresentados demonstraram, além da melhoria dos indicadores de disponibilidade e confiabilidade da programação, que a não inclusão desses fatores no modelo podem gerar distorções significativas nas métricas e indicadores.

Vislumbrou-se a possibilidade de implementação do modelo e da metodologia empregados no presente trabalho em diversos outros tipos de aplicações e equipamentos.

5.1 Problema de pesquisa

Decidir qual aeronave parar para manutenção e quando parar, estabelecendo um sequenciamento que otimize um custo-benefício em atendimento a uma demanda específica é um grande desafio. Os métodos clássicos são empíricos e restritos, geralmente, a somente um nível de manutenção preventiva.

A literatura trata o problema também restrito no nível de manutenção preventiva e nos planejamentos de curto e médio prazos. Não é usual a inclusão da manutenção corretiva nos modelos, menos ainda tratá-la de forma individualizada entre as aeronaves da frota.

Notou-se, ainda, que a limitação do horizonte temporal inferior ao período de O&S pode gerar impactos negativos além da capacidade de recuperação da organização ou

empresa, como a parada total da frota por filas ou falta de material no período imediatamente posterior ao analisado.

5.2 Abordagem do problema

Foi apresentada uma abordagem inovadora para o gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas. Utilizou-se um método exato de otimização para a geração do planejamento estratégico e um método estocástico para os planejamentos de médio e curto prazos.

As principais inovações foram a abordagem holística da frota em todo o seu período de O&S e a inserção dos efeitos da manutenção corretiva no modelo, incluindo o tratamento individualizado por matrículas dos indicadores de MTBUMA e MTTR.

5.3 Descobertas

Os resultados foram avaliados por meio de simulação, comparando o método clássico e o novo modelo, à luz dos indicadores de disponibilidade operacional e confiabilidade da programação.

A inclusão dos efeitos da manutenção corretiva e análise de todo o período de operação das aeronaves na modelagem propiciou uma visão mais holística do problema.

Esta lacuna da manutenção corretiva, evidenciada em (SAFAEI; JARDINE, 2018; SILVA, 2018; VERHOEFF; VERHAGEN; CURRAN, 2015) e pouco explorada na literatura apresentada, demonstrou ter impacto relevante no gerenciamento e planejamento de manutenção da frota.

Demonstrou-se, ainda, a importância de buscar tratar as características de manutenção da frota de forma individualizada, visto que podem existir aeronaves, que por motivos diversos, sejam significativamente diferentes entre si no que tange à confiabilidade, mesmo quando se trata de uma frota homogênea (aeronaves do mesmo tipo, modelo e versão).

A distribuição heterogênea de esforço aéreo contribui para o processo de aprendizagem do sistema em uso, visto que as aeronaves a serem mais voadas poderão antecipar problemas futuros para o restante da frota. Facilita, ainda, o processo de distribuição e alocação das aeronaves para unidades, organizações, ou missões com menor ou maior demanda de esforço aéreo.

O uso do PLIB em detrimento à PLIM utilizada por diversos autores (CHO, 2011; PESCHIERA et al., 2020; SGASLIK, 1994; VERHOEFF; VERHAGEN; CURRAN, 2015), facilitou a modelagem do problema de planejamento da manutenção no nível estratégico.

A inserção da metaheurística para integração do planejamento de longo prazo com os de médio e curto prazo conforme sugerido por Peschiera (2020) no modelo de duas etapas demonstrou ser uma alternativa promissora para tratar esse tipo de problema.

O modelo demonstrou bom desempenho e aderência aos cenários apresentados. A minimização do *downtime*, conforme preconizado no conceito da Manutenção Produtiva Total (MPT) (GRIJALVO MARTÍN et al., 2020) e otimização do sequenciamento da manutenção propiciaram um incremento significativo da A_o e da S_R a um nível de credibilidade de 95%.

5.4 Contribuições

A análise minuciosa de trabalhos científicos que versam sobre modelos de otimização do programa de manutenção e/ou de plano de uso de aeronaves, em um contexto de operações aéreas, levantou questionamentos importantes em relação à supressão de algumas condições de contorno relevantes.

Em todos esses casos analisados na literatura, a programação da manutenção ocorre apenas no nível tático ou operacional (BASDERE; BILGE, 2014). Estes trabalhos geralmente desconsideram, em suas generalizações, toda a amplitude do plano de manutenção preventiva, considerando apenas as inspeções de maior impacto na programação.

Além disso, as características de manutenção e utilização das aeronaves dentro de uma frota homogênea também são tratadas como homogêneas, quando, na prática, pode haver aeronaves com taxas de confiabilidade, de manutenibilidade e de utilização significativamente diferentes das outras.

A limitação imposta pela restrição do horizonte temporal proporcionada pelo planejamento a nível tático e operacional, e a não consideração de todos os tipos de manutenção e características individuais das aeronaves, podem dificultar a visão sistêmica e global da frota.

Desta forma, o decisor pode não ter à sua disposição oportunidades de decisão que possam contribuir para o incremento das taxas de capacidade de cumprimento de missão ou prontidão da frota, por meio do ajuste das atividades de manutenção e utilização. Associada a esta limitação, a utilização de métodos empíricos ou convencionais atuais não garante que as soluções encontradas sejam ótimas, nem mesmo que sejam boas. Garantem apenas que encontraram uma solução viável.

Outro aspecto de grande importância é o fato de que otimização limitada em um espaço temporal parcial pode "empurrar" grande parte da manutenção mais pesada para o período subsequente. Dessa forma pode-se chegar à paralização parcial ou total da frota, após o período analisado, por falta de peças ou por falta de vagas nas oficinas (filas), extrapolando a capacidade de recuperação da operadora das aeronaves.

Uma contribuição adicional trata da inserção no modelo de toda a gama de tipos de manutenção preventiva, da manutenção corretiva e dos parâmetros de manutenção e de uso individual de aeronaves, conhecida como análise por matrícula (por aeronave). Em inglês, usa-se o termo *tail number* (número de cauda), em virtude de a posição padrão de localização da matrícula da aeronave ser no estabilizador vertical (cauda).

Além do planejamento da manutenção e plano de uso da frota, o modelo pode ser utilizado como instrumento de avaliação de aeronaves dentro de um processo de aquisição ou no desenvolvimento de uma nova aeronave, incluindo a prospecção de requisitos operacionais e logísticos de sistemas aeroespaciais complexos.

Com as devidas adaptações, o modelo pode ser aplicado a qualquer sistema complexo ou equipamentos (industriais, laboratoriais, navais, espaciais etc.) nos quais o tempo de manutenção impacte de forma significativa na sua disponibilidade ou confiabilidade da programação.

A inclusão de custos de materiais, peças, equipamentos e mão de obra da manutenção também podem ser agregados ao modelo, gerando não só o programa de manutenção e plano de uso, mas também os custos estimados ao longo do período.

Vale mencionar, ainda, que a nova abordagem demonstrou ser de grande utilidade para problemas de dimensionamento de frota e de recursos. A partir do momento que se estabelecem referências de uso e de manutenção, bem como de seus indicadores, ficam evidentes e de fácil análise os níveis de uso tanto da frota quanto da manutenção.

A relação entre SR e A_o , mostrando que é possível atender a demanda operacional com elevados níveis, mesmo com baixos índices de disponibilidade, trouxeram questões novas e relevantes para o dimensionamento da manutenção.

5.5 Limitações

Por questões técnicas e limitações temporais, não foi possível a inclusão de outros elementos relevantes relacionados ao suporte integrado do produto e às operações aéreas. O trabalho foi restrito à análise dos indicadores de A_o e da S_R por meio da minimização do *downtime* acumulado da frota. Não considerou aspectos relacionados a custos nem a dimensionamento de recursos humanos, modelados apenas em alto nível, dentro da capacidade de manutenção.

Portanto, na dimensão da suportabilidade, foi focado apenas o aspecto manutenção, um entre os doze elementos preconizados pelo (“SX000i – *International specification for Integrated Product Support (IPS)*”, [s.d.]).

Ainda dentro da manutenção, as inspeções do tipo calendárica não foram inseridas no modelo. O impacto da estocagem foi considerado não significativo e a manutenção preditiva foi tratada como parcela da corretiva.

Na dimensão operações aéreas, não foram considerados os impactos da inclusão de novas matrículas (aquisições) nem das perdas totais ou parciais de aeronaves (por acidente aeronáutico, por exemplo) no decorrer do período. A inserção destes eventos, mesmo que aleatórios, poderiam conferir maior fidelidade ao modelo.

Finalmente, o estudo limitou-se à uma frota de aeronaves novas, sendo recebidas em um mesmo lote, o que geralmente só ocorre quando da compra de aeronaves já usadas.

5.6 Recomendações para trabalhos futuros

Dadas as limitações do presente estudo, várias possibilidades de melhoria podem ser levantadas, tanto no aspecto de desempenho computacional quanto de incremento da fidelidade do modelo em relação ao mundo real.

O uso de outros métodos de otimização, exatos ou não exatos podem melhorar tanto o desempenho computacional quanto o resultado.

Desenvolver modelos que considerem os aspectos da manutenção calendárica, de estocagem, de inclusão e perda de aeronaves ao longo do período e do uso de frotas já usadas podem gerar modelos de maior fidelidade.

Incluir na modelagem os custos financeiros, demanda de recursos humanos, material de suprimento e apoio de solo, bem como dos demais elementos do SIP, vão garantir uma maior precisão dos resultados.

Finalmente, incluir a abordagem de otimização na própria simulação (otimização evolutiva em ambientes dinâmicos ou otimização dinâmica evolucionária), no intuito de que possa analisar o comportamento do modelo em ambiente simulado, ou seja, na medida em que a escala de voo seja criada e as aeronaves alocadas, o próprio sistema analisaria se teria condições de manter o planejamento inicial. No caso de não ser viável o cumprimento do planejamento da manutenção, nova rodada de otimização seria executada para gerar o novo programa de manutenção, dado o novo cenário apresentado.

6 Referências

ABDELGHANY, A.; ABDELGHANY, K. **Modeling Applications in the Airline Industry**. [s.l.] Taylor and Francis, 2016.

ABRAHÃO, F. T. M. **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**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE. **International specification for Integrated Product Support (IPS)**. Brussels, Belgium: Aerospace and Defence Industries Association of Europe, Aerospace Industries Association, 2016. Disponível em: <http://www.sx000i.org/docs/SX000i_Issue_3.0.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2022.

AEROSPACE AND DEFENCE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE. **International specification for developing and continuously improving preventive maintenance**. Brussels, Belgium: Aerospace and Defence Industries Association of Europe, Aerospace Industries Association, , 2018. Disponível em: <www.s4000p.org>. Acesso em: 31 jan. 2019

AIR COMBAT COMMAND. **Logistics Maintenance Performance Indicators Reporting Procedures**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://static.e-publishing.af.mil/production/1/acc/publication/acc21-118/acc21-118.pdf>>.

AL THANI, N. A.; BEN AHMED, M.; HAOUARI, M. A model and optimization-based heuristic for the operational aircraft maintenance routing problem. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 72, p. 29–44, nov. 2016.

ALBERTO FONTE SILVA LIMA, N.; DA GRAÇA TAVARES ÁLVARES SERRÃO, P.; MARTINS ABRANTES LEITE, A. **Development of an Aircraft Health Monitoring Program for Predictive Maintenance Aerospace Engineering Examination Committee**. [s.l.] Instituto Superior Técnico, 2017.

ALFARES, H. K. Aircraft maintenance workforce scheduling: A case study. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 5, n. 2, p. 78–88, 1999.

ANDRADE, P. et al. Aircraft Maintenance Check Scheduling Using Reinforcement Learning. **Aerospace**, v. 8, n. 4, p. 113, 17 abr. 2021.

AUSTRALIAN NATIONAL AUDIT OFFICE. **Multi-Role Helicopter Program**. Canberra: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.itsanhonour.gov.au/>>. Acesso em: 24 fev. 2022.

BALAKRISHNAN, N. et al. Optimisation of flight and maintenance planning for defence aviation with modified artificial bee colony algorithm. **Defence Science Journal**, v. 71, n. 1, p. 3–11, 1 fev. 2021.

BARNHART, C.; BELOBABA, P.; ODONI, A. R. Applications of Operations Research in the Air Transport Industry. **Transportation Science**, v. 37, n. 4, p. 368–391, nov. 2003.

BASDERE, M.; BILGE, Ü. Operational aircraft maintenance routing problem with remaining time consideration. **European Journal of Operational Research**, v. 235, n. 1, p. 315–328, maio 2014.

BAZARAA, M.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear Programming and Network Flows**. 4. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1977.

BAZARGAN, M. **Airline Operations and Scheduling**. 2. ed. Surrey: [s.n.].

BELOBABA, P.; ODONI, A.; BARNHART, C. **The Global Airline Industry**. 1. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.

BERTEAU, D. J. **Product Support Manager Guidebook**. USADoD, , 2016.

BLANCHARD, B. S. **Logistics engineering and management**. 6. ed. Essex: Pearson Education, 2014.

BLANCHARD, B. S.; BLYLER, J. E. **System Engineering Management**. 5. ed. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc., 2016.

BLANCHARD, B. S.; VERMA, D. C.; PETERSON, E. L. **Maintainability: A key to effective serviceability and maintenance management**. [s.l.] Wiley, 1995.

BRASIL. **Parâmetros Básicos das Inspeções Programadas das Aeronaves da FAB. Ministério da Defesa Comando da Aeronáutica**Brasil, 2018.

CHEUNG, A.; IP, W. H.; LU, D. Expert system for aircraft maintenance services industry. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 11, n. 4, p. 348–358, 2005.

CHO, P. Y. **Optimal scheduling of fighter aircraft maintenance**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2011.

CONLON, J.; LILIUS, W.; FRANK, T. **Test and Evaluation of System Reliability of System Reliability Availability and Maintainability: A Primer**Department of Defence. Washington, DC: [s.n.].

DANTAS, J. P. DE A.; SILVESTRE, C. A. DE M. Simulation model applied to transportation missions in the amazon region. **Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**, v. 21, p. 10–15, 21 jul. 2020.

DAU. **DAU - Defense Acquisition University**. Disponível em: <<https://www.dau.mil/>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

DENG, Q.; SANTOS, B. F. Lookahead approximate dynamic programming for stochastic aircraft maintenance check scheduling optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 299, n. 3, p. 814–833, 16 jun. 2022.

DENG, Q.; SANTOS, B. F.; VERHAGEN, W. J. C. A novel decision support system for optimizing aircraft maintenance check schedule and task allocation. **Decision Support Systems**, v. 146, 1 jul. 2021.

DIJKSTRA, M. C. et al. A DSS for capacity planning of aircraft maintenance personnel. **International Journal of Production Economics**, v. 23, n. 1–3, p. 69–78, 1 out. 1991.

DOA. **Army Aviation Maintenance** U.S. Department of Army. Washington, DC, USA: [s.n.].

DOD. **Integrated Logistics Support Guide**. 1. ed. Fort Belvoir, VA: Defense Systems Management College, 1986.

DOD. Defense Acquisition Guidebook. **DoD Defense Acquisition Guidebook**, p. 1248, 2013.

DOD. **Performance Based Logistics**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.

DOD. **Operation of the Defense Acquisition System. Department of Defense Instruction DoD**, , 2015. Disponível em: <<https://www.dau.mil/guidebooks/Shared Documents/DoDI 5000.02.pdf>>. Acesso em: 9 maio. 2018

ERTOGRAL, K.; ÖZTÜRK, F. S. An integrated production scheduling and workforce capacity planning model for the maintenance and repair operations in airline industry. **Computers and Industrial Engineering**, v. 127, p. 832–840, 1 jan. 2019.

FANTASIA, M.; ARTZER, S.; GARDNER, C. **Acquisition Logistics Guide**. 3. ed. Fort Belvoir, VA: Defense Systems Management College, 1997.

GAVRANIS, A.; KOZANIDIS, G. An exact solution algorithm for maximizing the fleet availability of a unit of aircraft subject to flight and maintenance requirements. **European Journal of Operational Research**, v. 242, n. 2, p. 631–643, 2015.

GAVRANIS, A.; KOZANIDIS, G. Mixed integer biobjective quadratic programming for maximum-value minimum-variability fleet availability of a unit of mission aircraft. **Computers and Industrial Engineering**, v. 110, p. 13–29, ago. 2017.

GENDREAU, M.; POTVIN, J.-YVES. **Handbook of Metaheuristics**. 2. ed. Boston, MA: Springer US, 2010. v. 146

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GRIJALVO MARTÍN, M. et al. New Business Models from Prescriptive Maintenance Strategies Aligned with Sustainable Development Goals. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 216, 28 dez. 2020.

GUARACY, L. et al. **Disponibilidade Versus Custos: Um estudo de caso de dimensionamento de frota para operações aéreas à luz sistêmica do Suporte Integrado do Produto**. Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa de Defesa. **Anais...2022**.

GUEDES, F. B. **Management of the Brazilian Air Force's F-5M Fleet**. [s.l.] George Mason University, 2015.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction To Operations Research**. 9. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2010.

HORNER, P. **Edelman Award Well Worth the Wait for Warner Robins - INFORMS**. Disponível em: <<https://www.informs.org/ORMS-Today/Archived-Issues/2006/orms-6-06/Edelman-Award-Well-Worth-the-Wait-for-Warner-Robins>>. Acesso em: 3 out. 2018.

KEENEY, R. L. **Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decisionmaking**. Cambridge: Harvard University Press, 1996a.

KEENEY, R. L. Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives. **European Journal of Operational Research**, v. 92, n. 3, p. 537–549, ago. 1996b.

KEENEY, R. L. Value-Focused Brainstorming. **Decision Analysis**, p. 303–313, 8 out. 2012.

KENAN, N.; JEBALI, A.; DIABAT, A. An integrated flight scheduling and fleet assignment problem under uncertainty. **Computers and Operations Research**, v. 100, p. 333–342, 1 dez. 2018.

KEYSAN, G.; NEMHAUSER, G. L.; SAVELSBERGH, M. W. P. Tactical and Operational Planning of Scheduled Maintenance for Per-Seat, On-Demand Air Transportation. **Transportation Science**, v. 44, n. 3, p. 291–306, ago. 2010.

KILPI, J.; TÖYLI, J.; VEPSÄLÄINEN, A. Cooperative strategies for the availability service of repairable aircraft components. **International Journal of Production Economics**, v. 117, n. 2, p. 360–370, 1 fev. 2009.

KLIMASZEWSKI, S. et al. **Helicopter structural integrity program of Polish Mi-24 Hind helicopters**. 25th ICAF Symposium. **Anais...**Rotterdam: 2009. Disponível em: <http://icaf2009.fyper.com/uploads/File/Presentations/Presentation_Kurdelski.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2019

KOWALSKI, M. et al. Planning and management of aircraft maintenance using a genetic algorithm. **Eksploatacja i Niezawodnosc**, v. 23, n. 1, p. 143–153, 2021.

KOZANIDIS, G.; GAVRANIS, A.; LIBEROPOULOS, G. Heuristics for flight and maintenance planning of mission aircraft. **Annals of Operations Research**, v. 221, n. 1, p. 211–238, 25 out. 2014.

KOZANIDIS, G.; SKIPIS, A. **Flight and Maintenance Planning of Military Aircraft for Maximum Fleet Availability**. MCDM 2006, Chania, Greece; Military Operations Research. **Anais...**Chania: 2006a. Disponível em: <http://papers.uth.gr/files/FMP_Kozanidis_Skipis.pdf>. Acesso em: 21 maio. 2018

KOZANIDIS, G.; SKIPIS, A. **Flight and Maintenance Planning of Military Aircraft for Maximum Fleet Availability: A Biobjective Model**. International Conference on Multiple Criteria Decision Making, Chania, Greece. **Anais...**Chania: 2006b. Disponível em: <http://papers.uth.gr/files/FMP_Kozanidis_Skipis.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2019

KUMAR, A.; SHANKAR, R.; THAKUR, L. S. A big data driven sustainable manufacturing framework for condition-based maintenance prediction. **Journal of Computational Science**, v. 27, p. 428–439, 1 jul. 2017.

LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 4. ed. London: Springer International Publishing, 2016. v. 228

LV, S.; WANG, H.; SUN, W. **Research on optimization model and algorithm of aircraft maintenance plan based on Improved Genetic algorithm**. 2021 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education. **Anais...**New York, NY, USA: ACM, 24 set. 2021. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/10.1145/3482632.3484014>>. Acesso em: 7 ago. 2022

MARLOW, D. O.; DELL, R. F. Optimal short-term military aircraft fleet planning. **Journal of Applied Operational Research**, v. 9, n. 1, p. 38–53, 2017.

MEISSNER, R.; MEYER, H.; WICKE, K. Concept and Economic Evaluation of Prescriptive Maintenance Strategies for an Automated Condition Monitoring System. **International Journal of Prognostics and Health Management**, v. 12, n. 3, p. 1–17, 24 mar. 2021.

MEISSNER, R.; RAHN, A.; WICKE, K. Developing prescriptive maintenance strategies in the aviation industry based on a discrete-event simulation framework for post-prognostics decision making. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 214, p. 107812, 1 out. 2021.

MILLER, R. A.; MARTIN, J. F. **Airline maintenance**. SAE Technical Papers. **Anais...1** jan. 2017. Disponível em: <<http://www.iata.org/whatwedo/workgroups/Documents/MCTF/MCTF-FY2016-Report-Public.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2018

MORALES, S. G.; RONCONI, D. P. Formulações matemáticas e estratégias de resolução para o problema job shop clássico. **Production**, v. 26, n. 3, p. 614–625, 22 dez. 2015.

NEGRÃO COSTA, A. et al. Scenario analysis as a decision-support tool: a maritime patrol case study. **Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**, v. 22, p. 30–34, 30 set. 2021.

NEMETH, T. et al. PriMa-X: A reference model for realizing prescriptive maintenance and assessing its maturity enhanced by machine learning. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 1039–1044, 2018.

NOVOTNÝ, A.; PROCHÁZKA, D. Czech Armed Forces and Some Aspects of Helicopters Acquisition. **International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION**, v. 23, n. 2, p. 107–112, 25 jun. 2017.

OKUNADE, O. S.; OBUSEH, M. N.; CHARLES-OWABA, O. E. Preventive maintenance scheduling of fleet of aircraft using contiguous-cells transportation model: A case study. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 39, n. 2, p. 247–269, 2021.

PAPAKOSTAS, N. et al. An approach to operational aircraft maintenance planning. **Decision Support Systems**, v. 48, n. 4, p. 604–612, mar. 2010.

PEPPARD, J. **Building the Business Case for Integrated Vehicle Health Management**. [s.l.: s.n.].

PEREIRA BARRETO, E. A.; ABRAHÃO, F. T. M. T. M.; OLIVARES LOESCH VIANNA, W. Aircraft routing problem model for fractional fleets using fault prognostics. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 27, n. 3, p. 517–536, 12 jul. 2021.

PESCHIERA, F. et al. **Long term planning of military aircraft flight and maintenance operations**. , 27 jan. 2020. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2001.09856v1>>. Acesso em: 8 ago. 2021

PIPPIN, B. W.; DELL, R. F.; HALWACHS, T. **Allocating flight hours to army helicopters**. [s.l.] Naval Postgraduate School, 1998.

POLER, R.; MULA, J.; DÍAZ-MADROÑERO, M. **Operations research problems: Statements and solutions**. [s.l.] Springer-Verlag London Ltd, 2014.

Polish Special Forces To Be Involved In Mi-17 Simulator Trainings? - Defence24.com. Disponível em: <<https://www.defence24.com/polish-special-forces-to-be-involved-in-mi-17-simulator-trainings>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

QIN, Y. et al. A mathematical model and algorithms for the aircraft hangar maintenance scheduling problem. **Applied Mathematical Modelling**, v. 67, p. 491–509, 1 mar. 2019.

QIN, Y. et al. A two-stage optimization approach for aircraft hangar maintenance planning and staff assignment problems under MRO outsourcing mode. **Computers and Industrial Engineering**, v. 146, 1 ago. 2020a.

QIN, Y. et al. A two-stage optimization approach for aircraft hangar maintenance planning and staff assignment problems under MRO outsourcing mode. **Computers & Industrial Engineering**, v. 146, 1 ago. 2020b.

REBOUÇAS, S. et al. Structuring the resource allocation in response natural disaster phase using the Value-Focused Thinking (VFT). **Spectrum - Aplicações Operacionais Áreas de Defesa**, v. 1, p. 35–41, 2021.

REBOUÇAS, S. et al. Disaster Logistics: Route Optimization for Air Rescue Units. **Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**, v. 23, n. 1, p. 44, 31 ago. 2022.

REBOUÇAS, S.; SILVA, T. A.; ABRAHÃO, F. T. M. **Modelagem de Programa de Treinamento de Pilotos para Predição de Esforço Aéreo**. Simpósio de Aplicações Operacionais em área de Defesa. **Anais...**São José dos Campos: 2018.

SAFAEI, N.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. **Multi-objective maintenance workforce scheduling in a steel company**. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). **Anais...Elsevier**, 1 jan. 2009. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016339337>>. Acesso em: 4 ago. 2019

SAFAEI, N.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. S. **Workforce-constrained maintenance scheduling for military aircraft fleet: a case study**. *Annals of Operations Research*. **Anais...Springer**, 17 jun. 2011. Disponível em: <<http://eds.a.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=84885fa8-1b4e-45aa-a7b4-7716385c53d3%40sdc-v-sessmgr01>>. Acesso em: 7 fev. 2019

SAFAEI, N.; JARDINE, A. K. S. Aircraft routing with generalized maintenance constraints. **Omega**, v. 80, p. 111–122, 1 out. 2018.

SANCHEZ, D. T.; BOYACI, B.; ZOGRAFOS, K. G. An optimisation framework for airline fleet maintenance scheduling with tail assignment considerations. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 133, p. 142–164, 1 mar. 2020.

SCHRIMPF, G. et al. Record Breaking Optimization Results Using the Ruin and Recreate Principle. **Journal of Computational Physics**, v. 159, n. 2, p. 139–171, 10 abr. 2000.

SCHULTE, D. Estimating Maintenance Reserves. **Boeing Aero**, p. 4–11, 2013.

SGASLIK, A. **Planning German army helicopter maintenance and mission assignment**. Master's Thesis—[s.l.] Naval Postgraduate School, 1994.

SHAHMORADI-MOGHADAM, H.; SAFAEI, N.; SADIJADI, S. J. Robust Maintenance Scheduling of Aircraft Fleet: A Hybrid Simulation-Optimization Approach. **IEEE Access**, v. 9, p. 17854–17865, 2021.

SHAUKAT, S. et al. Aircraft line maintenance scheduling and optimisation. **Journal of Air Transport Management**, v. 89, 1 out. 2020.

SHAW, P. Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems. **Computer**, Lecture Notes in Computer Science. v. 1520, n. Springer, p. 417–431, 1998.

SHERBROOKE, C. C. **Optimal inventory modeling of systems Multi-Echelon Techniques**. Second ed. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2004.

SILVA, J. F. DA. **Aplicação de Algoritmo Genético e programação de metas no problema de planejamento de manutenção de aeronaves militares**. [s.l.] Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018.

SILVA, T. A.; REBOUÇAS, S. Modelagem de dimensionamento de esforço aéreo da instrução básica de cadetes. **Spectrum - Aplicações Operacionais Áreas de Defesa**, v. 1, 2020.

SRIRAM, C.; HAGHANI, A. An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 37, n. 1, p. 29–48, jan. 2003.

STAPELBERG, R. F. **Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design**. London: Springer London, 2009.

SUPREME AUDIT INSTITUTION OF INDIA. **Operation and Maintenance of Mi series Helicopters in IAF**. New Delhi, India: [s.n.]. Disponível em: <https://saiindia.gov.in/sites/default/files/audit_report_files/Union_Performance_Defence_Union_Government_Air_Force_and_Navy_7_2010_chapter_1.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2019.

SX000i – International specification for Integrated Product Support (IPS). Disponível em: <<http://www.sx000i.org/>>. Acesso em: 19 jun. 2022.

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

TEMUCIN, T.; TUZKAYA, G.; VAYVAY, O. Aircraft Maintenance Routing Problem – A Literature Survey. **Promet - Traffic&Transportation**, v. 33, n. 4, p. 491–503, 5 ago. 2021.

U.K. MINISTRY OF DEFENCE. **Acquisition System Guidance**. Disponível em: <https://www.aof.mod.uk/aofcontent/atoz_index.htm#checklist>. Acesso em: 19 jun. 2018.

U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. **Weapon System Sustainment: Aircraft Mission Capable Rates Generally Did Not Meet Goals and Cost of Sustaining Selected Weapon Systems Varied Widely**. Washington, DC: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.gao.gov/assets/720/710794.pdf>>.

VERHOEFF, M.; VERHAGEN, W. J. C.; CURRAN, R. Maximizing Operational Readiness in Military Aviation by Optimizing Flight and Maintenance Planning. **Transportation Research Procedia**, v. 10, p. 941–950, 2015.

WINSTON, W. L. **Operations Research: Applications and Algorithms**. 4. ed. Toronto: Brooks/Cole, 2004.

WITTEMAN, M.; DENG, Q.; SANTOS, B. F. A bin packing approach to solve the aircraft maintenance task allocation problem. **European Journal of Operational Research**, v. 294, n. 1, p. 365–376, 1 out. 2021.

WOCH, M.; ZIEJA, M.; TOMASZEWSKA, J. **Analysis of the time between failures of aircrafts**. 2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS). **Anais...IEEE**, dez. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8272805/>>

WU, C.-L. **Airline Operations and Delay Management**. 1. ed. Surrey: Ashgate Publishing Limited, 2016.

ZHAN, W.; JIAO, J. Redefinition of dispatch reliability along with dispatch modeling and simulation. **Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium**, v. 2016- April, p. 1–6, 2016.

ZHOU, Y.; BO, J.; WEI, T. A review of current prognostics and health management system related standards. **Chemical Engineering Transactions**, v. 33, p. 277–282, 2013.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TD	2. DATA 13 de dezembro de 2022	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TD-049/2022	4. N° DE PÁGINAS 118
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Uma abordagem de gerenciamento da manutenção de frota de aeronaves de defesa baseada em modelo de otimização de duas etapas.			
6. AUTOR(ES): Sergio Rebouças			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Otimização; Gerenciamento de frota de aeronaves; Planejamento de manutenção			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Logística (administração); Manutenção de aeronaves; Otimização; Planejamento; Consciência situacional; Frotas aéreas; Pesquisa operacional.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais. Área de Gestão Tecnológica. Orientador: Fernando Teixeira Mendes Abrahão. Defesa em 07/12/2022. Publicada em 2022.			
11. RESUMO: O trabalho trata do problema do gerenciamento de frotas de aeronaves de defesa, mais especificamente do planejamento de manutenção e de uso da frota. Busca-se sequenciar as inspeções de uma quantidade limitada de aeronaves dada uma capacidade limitada de oficinas de maneira que a demanda de esforço aéreo (missões) seja atendida. O sequenciamento e alocação desordenados podem reduzir significativamente ou até mesmo paralisar as atividades aéreas em virtude da indisponibilidade das aeronaves, seja por excesso de atividades de manutenção preventiva e corretiva seja pelo excesso de filas nas oficinas. O trabalho desenvolve uma abordagem inovadora no que tange ao tratamento do problema de forma holística ao modelar toda a frota de aeronaves em todo o seu período de uso, conhecido como fase de operação e suporte, dentro do ciclo de vida de um sistema. Outra contribuição adicional trata da inserção no modelo das manutenções corretivas, as quais não costumam ser tratadas na literatura. A literatura trata o problema apenas nos espaços temporais nos níveis operacional e tático e utilizam apenas a manutenção fásica (preventiva por hora de voo) parcial (apenas as de maior impacto na disponibilidade). A nova abordagem propõe a otimização em duas etapas do programa de manutenção e plano de uso. Em uma primeira etapa utiliza-se um método exato de programação linear inteira binária para minimizar o <i>downtime</i> da frota, buscando o dimensionamento ótimo da manutenção e do uso das aeronaves. A segunda etapa usa uma meta-heurística para alocação das inspeções. Para avaliação dos resultados em termos de disponibilidade e confiabilidade da programação, são realizadas simulações, comparando a nova abordagem com a abordagem convencional de planejamento. O resultado dos testes demonstra a validade da utilização dos métodos dentro do escopo verificado e apresenta boas perspectivas de utilização prática. O modelo pode ser utilizado para o planejamento da manutenção e designação de aeronaves, bem como instrumento de avaliação de aeronaves dentro de um processo de aquisição, ou, até mesmo, no desenvolvimento de uma nova aeronave. Com as devidas adaptações, pode ser aplicado a qualquer sistema complexo ou equipamentos (industriais, laboratoriais, navais, espaciais etc.) nos quais o tempo de manutenção impacte de forma significativa na sua disponibilidade ou confiabilidade da programação. Vale mencionar, ainda, que a nova abordagem demonstra ter utilidade para problemas de dimensionamento de frota e de recursos. A partir do momento que se estabelecem referências de uso e de manutenção, bem como de seus indicadores, ficam evidentes e de fácil análise a eficiência no uso tanto da frota quanto da manutenção.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			

