

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Transporte Aéreo e Aeroportos.

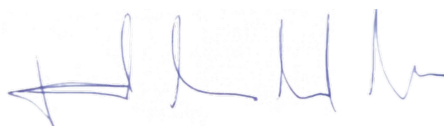
Diego Sodré de Souza

**OTIMIZAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE DISPONIBILIDADE
OPERACIONAL DE UMA FROTA DE AERONAVES E
INVESTIMENTO EM ESTOQUE, UTILIZANDO
INFORMAÇÕES LOGÍSTICAS INDIVIDUALIZADAS DE
CADA AERONAVE**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Anderson Ribeiro Correia
Orientador



Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão
Coorientador

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

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Souza, Diego Sodré de
Otimização Da Relação Entre Disponibilidade Operacional De Uma Frota De Aeronaves e Investimento Em Estoque, Utilizando Informações Logísticas Individualizadas De Cada Aeronave / Diego Sodré de Souza.

São José dos Campos, 2021.
113 f.

Dissertação de mestrado – Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Transporte Aéreo e Aeroportos – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2021. Orientador: Prof. Dr. Anderson Ribeiro Correia. Coorientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão.

1. Disponibilidade Operacional. 2. Multi-escalão. 3. Engenharia Logística. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Otimização Da Relação Entre Disponibilidade Operacional De Uma Frota De Aeronaves e Investimento Em Estoque, Utilizando Informações Logísticas Individualizadas De Cada Aeronave.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, Diego Sodré de. **Otimização Da Relação Entre Disponibilidade Operacional De Uma Frota De Aeronaves e Investimento Em Estoque, Utilizando Informações Logísticas Individualizadas De Cada Aeronave**. 2021. 113 f. Dissertação de mestrado em Transporte Aéreo e Aeroportos – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Diego Sodré de Souza

TÍTULO DO TRABALHO: Otimização Da Relação Entre Disponibilidade Operacional De Uma Frota De Aeronaves e Investimento Em Estoque, Utilizando Informações Logísticas Individualizadas De Cada Aeronave.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2021

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

Diego Sodré de Souza

Avenida Prof.^a Edith Ortiz, nº 170 – apto. 21. Portal da Mantiqueira
CEP: 12040-804, Taubaté - SP

**OTIMIZAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE DISPONIBILIDADE
OPERACIONAL DE UMA FROTA DE AERONAVES E
INVESTIMENTO EM ESTOQUE, UTILIZANDO
INFORMAÇÕES LOGÍSTICAS INDIVIDUALIZADAS DE
CADA AERONAVE**

Diego Sodré de Souza

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres	Presidente	- ITA
Prof. Dr. Anderson Ribeiro Correia	Orientador	- ITA
Prof. Dr. Fernando Teixeira M. Abrahão	Coorientador	- ITA
Prof. Dr. Guilherme Conceição Rocha	Membro	- ITA
Prof. Dr. Renato Telles	Membro Externo	- UNIP

ITA

À minha amada esposa Flávia,
e à minha amada filha Aurora.
Todos os momentos em minha vida
são melhores porque tenho vocês.

Agradecimentos

À Deus por iluminar meus caminhos, por toda proteção em minha vida e pelas bênçãos dadas à minha família.

À minha esposa Flávia, minha melhor amiga, quem fez todos meus sonhos possíveis e por todo seu amor. À minha filha Aurora, por todo seu amor e por compartilhar as alegrias de suas descobertas diárias.

À minha mãe Maria Cláudia e ao meu pai Amauri por todo amor incondicional e por serem exemplos de dedicação aos filhos, sempre nos apoiando e orientando em persistir nos nossos sonhos.

À minha irmã Lívia por toda amizade, amor e incentivo, sua coragem em desbravar sempre traz entusiasmo.

Ao meu avô José Benedicto (*in memoriam*) e à minha avó Maria Aparecida (*in memoriam*), ao meu avô José Francisco e à minha avó Ruth por serem exemplos de humildade, generosidade e sabedoria, seus esforços servem de inspiração.

Aos professores Anderson Correia e Fernando Abrahão por serem meus mentores durante a minha vida acadêmica no ITA, pelos valiosos conselhos, compartilhamento de conhecimentos e contribuições para este trabalho.

À minha sogra Graça e ao meu sogro Nilo por todo o amparo, incentivo e carinho dado à minha família.

Aos amigos Thomás e Vinícius por toda amizade e incentivo, companheiros incansáveis de todos os momentos.

À amiga Lilian por todo incentivo e confiança, bem como pelo exemplo de liderança e resiliência.

À Embraer, ao AeroLogLab-ITA, à CAPES e à Systecon por todas oportunidades de me aprimorar como profissional e pesquisador.

Por fim, a todos que contribuíram para construção deste trabalho direta ou indiretamente.

“A felicidade de sua vida depende da qualidade de seus pensamentos”.

Marco Aurélio

Resumo

O problema de gerenciamento dos desempenhos de suportabilidade tem trazido vários desafios para a indústria e academia. O desafio é grande, pois envolve conjuntos de variáveis associadas às características técnicas da aeronave, suas condições de operação e manutenção, e também à sua estrutura de suporte logístico. Com isso, a métrica de disponibilidade operacional ganha ênfase por tratar-se de um indicador de desempenho que permite o inter-relacionamento de variáveis envolvidas no gerenciamento de suportabilidade como um todo. Este trabalho apresenta uma abordagem para o problema de alocação de aeronaves à luz do desempenho individualizado em termos de confiabilidade de cada aeronave. Inicialmente, é feita a identificação de aeronaves com comportamento de confiabilidade destoante em uma frota específica. Em seguida, é estudado um modelo multi-escalão que gera como resultado uma curva de custo-benefício relacionando a disponibilidade operacional e o investimento necessário para suporte à frota. Os parâmetros são utilizados no modelo básico em sua forma tradicional com valores médios da frota. Também, propõe-se um modelo de estimativa de custos e de disponibilidade operacional onde é feita a utilização dos parâmetros individuais de cada aeronave, considerando a existência de aeronaves destoantes em diferentes instâncias e tamanhos de frota. Com a utilização do modelo proposto, os resultados mostraram possíveis reduções nos investimentos e possíveis ampliações dos níveis de disponibilidade operacional nas diferentes instâncias com as melhores alocações possíveis estabelecidas. Além disso, o modelo proposto apresentou resultados satisfatório com sua aplicação nas diferentes instâncias de aeronaves destoantes, bem como no estudo de caso inspirado na estrutura de suporte logístico do programa A-29 Super Tucano operado pela Força Aérea Brasileira. Este modelo traz sua contribuição em utilizar as informações de manutenção e operação a favor das análises de suprimentos, podendo apoiar as decisões dos gerentes de frota quanto à melhor alternativa de alocação da frota para ampliação da disponibilidade operacional e/ou redução dos investimentos em estoque.

Abstract

The management of supportability performances has brought several challenges to industry and academia. The challenge is paramount, as it involves sets of variables associated with the technical characteristics of the aircraft, its operating and maintenance conditions, and also its organization support structure. By this, the operational availability metric gains emphasis because it is a performance indicator that allows the interrelationship of variables involved in supportability management problem as a whole. This work presents an approach to the aircraft allocation problem in light of the individualized performance in terms of reliability of each aircraft. Initially, aircraft with conflicting reliability behavior in a specific fleet is identified. Then, a multi-echelon model is studied, which generates, as a result, a cost-benefit curve relating operational availability and the investment needed to support the fleet. The parameters are used in the basic model in its traditional form with fleet average values. Also, it proposes a model for estimating costs and operational availability where the individual parameters of each aircraft are used, considering the existence of dissonant aircraft in different instances and fleet sizes. The proposed model showed possible reductions in investments and possible expansion of operational availability levels in different instances with the best possible allocations established. Furthermore, the proposed model presented satisfactory results with its application in different instances of dissonant aircraft and the case study inspired by the logistic support structure of the A-29 Super Tucano program operated by the Brazilian Air Force. The model brings its contribution in using maintenance and operation information in favor of supply analysis, being able to support fleet managers' decisions regarding the best fleet allocation alternative to increase operational availability and/or reduce investments in stock.

Lista de Figuras

Figura 1 - Detalhamento da disponibilidade com suas influências (Fonte: AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE, 2014).....	26
Figura 2 - Representação da estrutura de um sistema complexo (Fonte: O autor).....	28
Figura 3 - Organização contendo dois escalões (Fonte: adaptado de Costantino, Gravio e Tronci, 2013).....	41
Figura 4 - Curva de custo-benefício entre o EBO e o investimento (Fonte: O autor).....	45
Figura 5 - Curva de custo-benefício entre disponibilidade e investimento (Fonte: O autor) ..	46
Figura 6 - Entradas e resultado gerado pelo <i>software</i> OPUS10 (Fonte: Autor).....	52
Figura 7 - Etapas metodológicas (Fonte: Adaptada de Banks <i>et al.</i> , 2010)	60
Figura 8 - Etapas de análise dos dados coletados (Fonte: O autor).....	66
Figura 9 - Etapas de entrada do modelo básico (Fonte: O autor).....	67
Figura 10 - Etapas de entrada do modelo proposto (Fonte: O autor).....	69
Figura 11 - Representação das três abordagens propostas (Fonte: O autor).....	71
Figura 12 - Resultado da taxa de falha de cada aeronave (Fonte: O autor).....	73
Figura 13 - Resultado da taxa de falha de cada aeronave por operador (Fonte: O autor).....	74
Figura 14 - Estrutura de suporte logístico (Fonte: O autor).....	75
Figura 15 - Aplicação das frotas nos modelos básico e proposto (Fonte: O autor).....	78
Figura 16 - Estrutura logística e alocação da frota do estudo de caso (Fonte: O autor).....	79
Figura 17 - Resultados do modelo para uma frota de 31 aeronaves (Fonte: O autor).....	81
Figura 18 - Segmentos das curvas dos modelos básico e proposto (Fonte: O autor).....	82
Figura 19 - Resultados de acordo com disponibilidade operacional (Fonte: O autor).....	84
Figura 20 - Resultados para uma frota de 67 aeronaves (Fonte: O autor).....	86
Figura 21 - Resultados para uma frota de 113 aeronaves (Fonte: O autor).....	87

Figura 22 - Resultados por disponibilidade da frota de 67 aeronaves (Fonte: O autor).....	88
Figura 23 - Resultados por disponibilidade da frota de 113 aeronaves (Fonte: O autor).....	89
Figura 24 - Alternativas de análise da curva de custo-benefício (Fonte: O autor).....	91
Figura 25 - Curvas de custo-benefício do estudo de caso (Fonte: O autor).	93
Figura 26 - Curvas de custo-benefício consolidadas (Fonte: O autor).....	94
Figura 27 - Potenciais ganhos de custo-benefício consolidadas (Fonte: O autor).....	94

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Entradas no modelo utilizadas pelos autores (Fonte: O autor).	57
Tabela 4.1 – Dados coletados para verificação de aeronave destoante (Fonte: O autor).	72
Tabela 4.2 – Parâmetros de entrada da estrutura de dois escalões (Fonte: O autor).	75
Tabela 4.3 – Parâmetros de manutenção e operação da frota (Fonte: O autor).	76
Tabela 4.4 – Parâmetros dos equipamentos instalados por aeronave (Fonte: O autor).	76
Tabela 4.5 – Parâmetros das 31 aeronaves (Fonte: O autor).	77
Tabela 4.6 – Aeronaves destoantes adotadas no modelo proposto (Fonte: O autor).	80
Tabela 4.7 - Resultados em diversos níveis de disponibilidade operacional (Fonte: O autor).	83
Tabela 4.8 – Aeronaves destoantes adotadas no modelo proposto (Fonte: O autor).	85
Tabela 4.9 – Investimentos da frota de 67 aeronaves (Fonte: O autor).	90
Tabela 4.10 – Investimentos da frota de 113 aeronaves (Fonte: O autor).	90

Lista de Abreviaturas e Siglas

AMRP	<i>Aircraft Maintenance Routing Problem</i>
ASD	<i>Aerospace and Defense Industries Association of Europe</i>
ASP	<i>Artificial Stocking Policy</i>
BO	<i>Backorder</i>
DAU	<i>Defense Acquisition University</i>
DI	<i>Due in</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
EBO	<i>Expected Backorder</i>
FAB	Força Aérea Brasileira
FDARP	<i>Flight Delay-Based Aircraft Routing Problem</i>
FMP	<i>Flight and Maintenance Planning</i>
IPS	<i>Integrated Product Support</i>
KSA	<i>Key System Attributes</i>
KPP	<i>Key Performance Parameters</i>
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
LRU	<i>Line Replaceable Unit</i>
MDT	<i>Mean Maintenance Downtime</i>
METRIC	<i>Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control</i>
MFOF	<i>Maintenance Free Operating Period</i>
MINLP	<i>Mixed-Integer Nonlinear Programming</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTBM	<i>Mean Time Between Maintenance</i>
OARP	<i>Operational Aircraft Routing Problem</i>

OH	<i>On Hand</i>
OPUS10	<i>Software de otimização de estoques da empresa sueca Systecon AB</i>
OTAN	<i>Organização do Tratado do Atlântico Norte</i>
PBC	<i>Performance-Based Contracting</i>
PBL	<i>Performance-Based Logistic</i>
PMCF	<i>Preventive Maintenance Coordination Factor</i>
PN	<i>Part Number do equipamento</i>
RAM	<i>Reliability, Availability, and Maintainability</i>
SRU	<i>Shop Replaceable Unit</i>
TAT	<i>Turn-around Time</i>
TARP	<i>Tactical Aircraft Routing Problem</i>
TN	<i>Tail Number da aeronave</i>
VMetric	<i>Software de otimização de estoques da empresa americana TFD Group</i>
ZIP	<i>Zero-Inflated Poisson</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização.....	16
1.2	Problema de Pesquisa.....	19
1.3	Objetivo	19
1.4	Estrutura do Trabalho	20
2	REVISÃO DE LITERATURA E REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	O Problema Operacional de Aeronaves Destoantes.....	22
2.2	Métricas de suportabilidade	24
2.2.1	Supportabilidade e Fatores RAM	25
2.2.2	Confiabilidade	27
2.2.3	Manutenibilidade	29
2.2.4	Manutenção	30
2.2.5	Disponibilidade.....	31
2.3	Roteamento de Aeronaves para Manutenção	33
2.3.1	Roteamento de Aeronaves na Aviação Comercial	34
2.3.2	Planejamento de Manutenção de Aeronaves na Aviação Militar.....	36
2.4	Modelagem da Suportabilidade da Frota.....	38
2.4.1	Gerenciamento de Estoque	38
2.4.2	Multi-escalão	40
2.4.3	Modelo de Único Escalão.....	42
2.4.3.1	Nível de Estoque.....	42
2.4.3.2	Previsão de Pedido em Aberto.....	43
2.4.3.3	Análise Marginal	44
2.4.3.4	Disponibilidade <i>versus</i> Investimento	45
2.4.4	METRIC	47
2.4.5	VARI-METRIC	49
2.4.6	Sistemas Contemporâneos (<i>Softwares</i>)	50
2.4.7	Trabalhos Abordando Modelo Multi-Escalão	53
3	METODOLOGIA.....	58
3.1	Método	58

3.2	Modelo Conceitual.....	59
3.3	Premissas do Modelo	61
3.4	Modelo Proposto	63
3.4.1	Identificação das Aeronaves Destoantes	63
3.4.2	Descrição Matemática do Modelo	67
3.4.3	Estratégias de Aplicação.....	70
3.5	Recursos Computacionais.....	71
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	72
4.1.1	Identificação das Aeronaves Destoantes	72
4.1.2	Montagem do Modelo Inicial	75
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1.1	Instâncias de Aeronaves Destoantes.....	80
5.1.2	Estudo de Caso – A-29 Super Tucano na FAB	92
6	CONCLUSÃO.....	96
6.1	Trabalhos Futuros	97
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICE A – LISTAGEM DE EQUIPAMENTOS	103
	APÊNDICE B – PARÂMETROS PARA FROTA DE 67 E 113 AERONAVES.....	106
	APÊNDICE C – PARÂMETROS DO ESTUDO DE CASO.....	111

1 Introdução

1.1 Contextualização

O gerenciamento dos desempenhos de suportabilidade está diretamente ligado às demandas oriundas da manutenção de um sistema aeroespacial complexo. O gerenciamento dos desempenhos de suportabilidade é considerado um problema de difícil solução uma vez que engloba diversas variáveis associadas às características técnicas do sistema aeroespacial em análise, ao seu esforço de operação e manutenção, e à estrutura organizacional de suporte do usuário-final. Assim, este problema está diretamente ligado à disponibilidade dos sistemas aeroespaciais em seu ambiente operacional conforme Costantino *et al.* (2018).

A coleta dos dados de manutenção tem o potencial de enriquecer o processo de apoio à decisão relacionado ao gerenciamento da frota e dos estoques necessários para atendê-la ao longo de sua fase de operação. Com isso, também há um eventual benefício em refinar os níveis de estoque ao utilizar das informações de manutenção para o aperfeiçoamento da suportabilidade da frota. Horenbeek *et al.* (2013) afirma que o gerenciamento de manutenção e dos estoques estão fortemente interconectados. Assim, ambos devem ser considerados simultaneamente para a otimização das operações de uma companhia.

Um importante fator associado à disponibilidade é a prontidão em atender as demandas de manutenção com o uso das peças de reposição, dentre elas, as peças reparáveis. Costantino *et al.* (2018) aponta a necessidade de manter um estoque de peças de reposição para apoiar as operações e as manutenções de um sistema aeroespacial, relacionando o nível de serviço e as restrições diretamente.

De acordo com Wong (2005), as indústrias de equipamentos intensivos como linhas aéreas, instalações de energia nuclear e várias outras indústrias utilizam máquinas complexas que sempre requerem peças de reposição para garantir a disponibilidade do sistema em níveis aceitáveis, resultando em custos de estoque.

Do conjunto de peças de reposição a serem estocadas, as peças reparáveis são as que causam maior impacto no valor investido em estoque pelo usuário-final. Selçuk (2013) afirma que uma peça reparável é geralmente uma peça tecnicamente complexa de algum sistema intensivo, o qual a peça é capaz de ser restaurada à condição operacional aceitável após uma falha.

O custo em adquirir peças reparáveis é afetado por seus aspectos técnicos e tecnológicos. Apesar dos itens reparáveis constituírem um subconjunto reduzido de todas as partes que compõem um sistema aeroespacial, esses itens podem representar valores de investimento em estoque na ordem de dezenas ou, até mesmo, centenas de milhões de reais ou dólares, variando em relação à quantidade de sistemas aeroespaciais adquiridos, em função do esforço de utilização destes sistemas e da confiabilidade dos equipamentos instalados. Por isso, há relevância em buscar por alternativas otimizadas para as decisões de investimento, levando em consideração a alocação da frota.

O gerenciamento ineficiente dos estoques pode causar prejuízo a disponibilidade da frota. Isso pode afetar diretamente o gerenciamento da frota de um operador devido aos potenciais remanejamentos das aeronaves, gerando possíveis consequências na satisfação desse operador.

O gerenciamento de estoque torna-se uma atividade desafiadora devido à busca pela melhor relação de custo-benefício. Este benefício pode ser medido por meio do indicador de disponibilidade operacional ou outro semelhante. Ao generalizar os valores de algumas das diversas variáveis, perde-se os potenciais de refinamento. Esses refinamentos são perdidos por não se utilizar os dados reais já percebidos e coletados pelo usuário-final, seja referente à operação, como, a confiabilidade, e manutenção das aeronaves, como, a manutenibilidade, bem como o reflexo nos níveis de estoque pelo ciclo de reabastecimento.

De acordo com Selçuk (2013), no contexto de linhas aéreas, essas empresas incorrem em custos de inatividade devido à perda de vendas, perda de produtividade, ou insatisfação de seus clientes quando uma ou mais aeronaves não estão em funcionamento. Assim, de acordo com Costantino *et al.* (2018), o custo de estoque para uma peça com alta taxa de falha é geralmente menor do que as potenciais perdas devido às restrições que essa falha causaria.

Uma frota requer na sua entrada em serviço a definição dos níveis de estoque com base em dados médios e teóricos, sejam por informações relacionadas ao conhecimento do fabricante, seja por informações e especificações do usuário-final. Isso ocorre pelo motivo do usuário-final ainda não ter iniciado a operação das aeronaves efetivamente e por essa gestão inicial estar compartilhada com o fabricante.

Após os primeiros anos de operação das aeronaves, o usuário final apresenta condições de avaliar individualmente o comportamento de cada uma delas. Neste contexto, é possível identificar quais aeronaves apresentam comportamento de desempenho destoante às demais da frota, trazendo diretamente o impacto na disponibilidade operacional da frota devido a maior ocorrência de manutenção e substituição das peças reparáveis.

Algumas aeronaves podem apresentar não conformidades sem afetar a aeronavegabilidade e a segurança em voo que, por motivos fora do escopo deste trabalho, implicam taxas de falha maiores para os equipamentos neles instalados do que a maioria da frota. Apesar disso, a abordagem convencional utiliza da confiabilidade generalizada da frota como uma das variáveis para calcular os níveis de estoque necessários para atender as demandas dessas aeronaves. Wikander (2016) afirma que ambos os modelos METRIC (SHERBROOKE, 1968) e VARI-METRIC (SHERBROOKE, 1986) são usados para lidar com a modelagem matemática de equipamentos falhados, sendo os modelos baseados em média de falhas para um determinado período de tempo.

Com o detalhamento do comportamento das aeronaves, é possível refinar os níveis de estoque para atender às demandas devido às manutenções corretivas já no seu ambiente real de operação. Segundo Kennedy *et al.* (2002), tais níveis estão em função de como o equipamento é utilizado e como é tratada sua manutenção. Dessa forma, o uso de dados médios implica em soluções não ótimas de investimentos em estoque.

Segundo Kilpi e Vepsäläinen (2004), para manter os estoques dentro dos níveis aceitáveis de investimento em uma companhia aérea, há quatro fatores que afetam o custo associado à prontidão de peças: confiabilidade do equipamento, tempo do processo de reparo do equipamento, do inglês *turn-around time* (TAT), nível de serviço requisitado e o número de peças suportadas no estoque.

Segundo Kok *et al.* (2018), com a crescente popularidade de gerenciamento da cadeia de suprimentos na literatura bem como nas práticas industriais, modelos de estoque multi-escalão, do inglês *multi-echelon*, ganharam atenção e importância. Segundo Patriarca *et al.* (2016), estruturas multi-escalão geralmente consistem em um armazém central e armazéns locais, onde o armazém central é responsável por reabastecer os armazéns locais.

Nesta linha, a abordagem multi-escalão ganha cada vez mais destaque nas aplicações industriais de defesa devido às características de operação entre as diversas bases aéreas das forças aéreas. Além disso, essa abordagem tem sido explorada de modo a trazer maiores refinamentos, correspondendo à atuais complexidades das cadeias de suprimento.

Esses refinamentos podem ser notados em trabalhos, como, por exemplo, de Sheikh-Zahed, Farhangi e Rossetti (2020) onde buscam uma solução de agrupamento de estoque. Johansson *et al.* (2020) aplicam outros custos em seu modelo multi-escalão. Costantino *et al.* (2018) elaboram um modelo para aprimorar a estimativa de demandas irregulares. Patriarca, Costantino e Gravio (2016) elaboram um modelo onde aplicam o abastecimento lateral entre as bases aéreas.

1.2 Problema de Pesquisa

Modelos analíticos que relacionam investimento em peças de reposição e disponibilidade operacional, comumente encontrados na bibliografia, consideram apenas taxas de falha médias para equipamentos e aeronaves. A comunidade acadêmica não leva em consideração a particularidade do desempenho de cada aeronave. Isso pode ser observado, por exemplo, nos modelos elaborados por Sherbrooke (1968, 1986), Zahed, Farhangi e Rossetti (2020), Costantino *et al.* (2018), Patriarca, Costantino e Gravio (2016), Wikander (2016) e Hallin (2015). Esses modelos analíticos geram a relação de custo-benefício entre o investimento em estoque de peças de reposição e a disponibilidade operacional esperada.

Ao considerar a existência de diferentes comportamentos de confiabilidade em aeronaves de uma frota, algumas dessas aeronaves podem ter um desempenho de confiabilidade destoante às demais. Essas aeronaves destoantes podem exigir mais intervenções de manutenção, peças e mão-de-obra, causando resultados insatisfatórios de disponibilidade da frota. Esses resultados podem ocorrer em função do tratamento subótimo na alocação dessas aeronaves, recursos de manutenção e respectivos suprimentos. Assim, é desconsiderado nos modelos analíticos o potencial refinamento em tratar o comportamento de confiabilidade obtido de cada aeronave de forma sistêmica.

Neste contexto, emerge a seguinte questão norteadora deste trabalho: “é possível melhorar a relação de disponibilidade operacional e investimento em estoque de peças de reposição considerando o comportamento de confiabilidade de cada aeronave ao invés dos valores médios observados em uma frota”?

1.3 Objetivo

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é a construção de um modelo onde é relacionada a disponibilidade operacional de uma frota e o correspondente investimento em estoque considerando o comportamento de cada aeronave pelo ponto de vista sistêmico. É também proposto como alocar eventuais aeronaves que apresentem desempenhos destoantes em termos de confiabilidade. Este trabalho pretende empregar uma ferramenta de otimização de parâmetros de desempenho logístico associada à confiabilidade, disponibilidade e

manutenibilidade, para explorar alternativas de alocação das aeronaves, considerando o comportamento dos indivíduos com confiabilidade destoante.

Para atingir este objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- OE1: Identificar a existência de aeronaves com desempenho de confiabilidade destoante do esperado e da média da frota.
- OE2: Modelar o problema da forma tradicional e verificar seus desempenhos para depois modelar o problema considerando as características peculiares (destoantes ou não) de cada aeronave e aspectos da operação para a alocação nas bases aéreas.
- OE3: Executar avaliações dos resultados de disponibilidade operacional e investimentos obtidos por meio do modelo proposto conhecendo o comportamento de confiabilidade de cada aeronave.
- OE4: Elaborar avaliações de sensibilidade trazendo variabilidade de aeronaves destoantes para a verificação do modelo proposto.

1.4 Estrutura do Trabalho

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução da pesquisa através da contextualização do problema, identificando o problema de pesquisa, bem como objetivos específicos. Além disso, discorre sobre a estrutura desta dissertação.

O capítulo 2 apresenta a revisão de literatura e o referencial teórico, abordando os atuais trabalhos na área do problema. Além disso, apresenta as bases teóricas que fundamentam esta pesquisa.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para modelar o relacionamento entre investimento em peças de reposição e a disponibilidade operacional capaz de considerar taxas de falhas de componentes e aeronaves específicos. Inicialmente, são apresentados o modelo conceitual e as premissas consideradas na pesquisa. Em seguida, é definida a estratégia na aplicação dos modelos matemáticos para a consecução dos objetivos e verificações deste trabalho.

O capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia proposta em variadas estratégias de alocação da frota e uma estrutura organizacional de suporte inspirada em um cenário real. Serão investigados os investimentos e a disponibilidade operacional atingida de acordo com as

estratégias de alocação de cada aeronave e distribuição dos estoques pela abordagem básica (tradicional) e pela abordagem proposta neste trabalho.

O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões pelo emprego da metodologia proposta em suas variadas estratégias de alocação de frota e distribuição das peças de reposição reparáveis. Os resultados permitem avaliar o modelo proposto, bem como a viabilidade das soluções para aplicações práticas.

Por fim, o capítulo 6 apresenta a conclusão e a contribuição deste trabalho. Apresenta também a indicação de trabalhos futuros para a continuidade acerca do assunto desenvolvido nesta pesquisa.

2 Revisão de Literatura e Referencial Teórico

Este capítulo apresenta a revisão de literatura e o referencial teórico, abordando os atuais trabalhos na área do problema de pesquisa e também as bases teóricas que fundamentam a metodologia envolvida neste trabalho. Inicialmente o problema de pesquisa é explorado, apresentando o contexto, as causas, as consequências e as ações mitigadoras. Posteriormente, as métricas de suportabilidade são apresentadas como a base teórica na identificação das eventuais aeronaves com confiabilidade destoante. Em seguida, é feita a revisão das pesquisas voltadas para o roteamento de aeronaves para manutenção. Também, é feita a revisão de trabalhos sobre gerenciamento de estoques utilizando modelo multi-escalão. Além disso, são apresentados os sistemas contemporâneos (softwares) sendo utilizados para modelagem de problemas semelhantes.

2.1 O Problema Operacional de Aeronaves Destoantes

A indústria aeronáutica é reconhecida pelos seus níveis de exigência para a produção, certificação e manutenção de seus produtos, sejam as aeronaves propriamente ou seus equipamentos embarcados. Apesar disso, é do conhecimento dos fabricantes, autoridades aeronáuticas e dos operadores que as aeronaves e equipamentos podem sofrer falhas sem afetar a segurança de voo e a aeronavegabilidade dos produtos ao longo de suas operações.

Intervenções de manutenção, corretiva ou preventiva, são previstas pelos fabricantes e legitimadas pelas autoridades aeronáuticas, resguardando os operadores nos possíveis eventos futuros. Essas manutenções podem ocorrer recorrentemente para manter as operações das aeronaves o mais constante possível. Além disso, de acordo com Wang e Long (2011), manutenção é um fator chave para garantir a segurança da aeronave.

Contudo, no âmbito de uma frota de aeronaves, algumas delas podem apresentar com mais frequência eventos de falha e resultar em um comportamento peculiar dentro da frota. Essas aeronaves com comportamento destoante podem exigir maior necessidade de recursos de manutenção.

Pode haver vários motivos de existir esse comportamento destoante em uma aeronave específica, como, por exemplo, o processo de produção, incidentes de operação, qualidade dos

equipamentos embarcados e idade da aeronave. Esses motivos podem estar dispersos em uma frota de forma aleatória.

Todos os sistemas críticos de aeronaves envelhecidas são mais sensíveis a poeira, água, detritos, temperatura, vibração e outros fatores no processo de funcionamento e manutenção, havendo riscos ocultos em suas operações (WANG; LONG, 2011).

De acordo com Shawlee e Humphrey (2001), em seu estudo sobre o envelhecimento de equipamentos aviônicos, é observado a longa duração operacional atingida por equipamentos aeronáuticos. Nesse tipo de equipamento, o envelhecimento da eletrônica embarcada não é bem conhecida, pois inicia na produção e continua inexoravelmente, ainda que hajam manutenções preventivas, já que o processo de deterioração pode ocorrer até mesmo no nível molecular. Embora existam esforços para identificar corretamente, a deterioração dos itens eletrônicos pode levar anos para se manifestar, e esses mesmos itens podem preencher o estoque de peças de reposição com o tempo (SHAWLEE; HUMPHREY, 2001).

Para isso, os operadores e fabricantes precisam fazer o contínuo monitoramento das métricas de suportabilidade, como, confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade. Essas métricas podem indicar quais aeronaves deterioradas necessitam de um tratamento específico ou até mesmo, apoiar o gerente da frota em decisões estratégicas, como, o remanejamento de rota e aeroporto para o pernoite.

Segundo *United States* (2005), as métricas de suportabilidade são afetadas por fatores como: design do sistema; qualidade de manufatura; o ambiente em que o sistema é transportado, manuseado, armazenado e operado; o projeto e o desenvolvimento do sistema de suporte; o nível de treinamento e a habilidade das pessoas que operam e fazem manutenção do sistema; a disponibilidade de material necessário para reparar o sistema; e auxílio no diagnóstico e instrumentação disponível para eles. Todos esses fatores devem ser entendidos para o atingimento dos níveis esperados das métricas de suportabilidade.

Ainda, de acordo com *United States* (2005), durante a produção, a atividade mais importante é garantir a qualidade na fabricação, de modo que as qualidades inerentes de suportabilidade do projeto não sejam degradadas. Na operação, a atividade mais importante é monitorar o desempenho para facilitar a retenção da capacidade de suportabilidade, para permitir melhorias no projeto ou do sistema de suporte, como, o conceito de suporte e o armazenamento de peças de reposição.

A fase de operação consiste no gerenciamento do uso das aeronaves e envolve manutenção e reparo. Cada aeronave tem um desempenho ou falha diferente, dependendo de seu projeto inerente e de como é operado. Também, uma falha de um componente da aeronave

pode afetar outros e levar à vários defeitos (MOFOKENG; MATIVENGA; MARNEWICK, 2020).

Por consequência, pode haver um aumento nos custos em manter uma frota de aeronaves onde há a potencial existência dessas aeronaves dissonantes, requerendo maior necessidade de manutenção. Por essa característica no comportamento, essas aeronaves podem causar disrupturas na operação de uma companhia aérea entre uma rota e outra ou no contexto militar, comprometer o início ou a execução de uma missão. Outra forma, é ampliar a armazenagem de peças de reposição dos equipamentos nos estoques da companhia aérea ou da força aérea, minimizando as falhas ocorridas com a rápida substituição do equipamento na aeronave.

A frequência de intervalos e tarefas excessivas de manutenção resultam em custos e redução da disponibilidade da aeronave. Intervalos prolongados também resultam na degradação da efetividade da manutenção. Neste sentido, o custo de manutenção de aeronaves é um desafio para as companhias aéreas, a fim de promover a disponibilidade e a viabilidade financeira das aeronaves (MOFOKENG; MATIVENGA; MARNEWICK, 2020).

2.2 Métricas de suportabilidade

De acordo com a *AeroSpace and Defense Industries Association of Europe - ASD* (2020), as características desejadas de desempenho de um sistema são formuladas na definição dos seus requisitos, sendo esses requisitos baseados em fatores, como, plano estratégico, desempenho técnico, ambiente de operação, ameaças percebidas e perfis de financiamento. As métricas de suportabilidade são derivadas desses requisitos de produto, para gerar resultados que servem como indicadores primários de desempenho. Essas métricas medem o grau o qual o programa de suporte de um sistema aeroespacial demonstra capacidade de atingir seus objetivos nas condições esperadas.

Ainda, segundo *AeroSpace and Defense Industries Association of Europe* (2020), os requisitos de projeto são classificados em níveis de prioridade. Os objetivos primários que devem ser atingidos pelo projeto são tipicamente chamados de parâmetros chave de desempenho (KPP), do inglês *key performance parameters*. A disponibilidade é o KPP frequentemente atribuído ao programa de suporte e consiste em dois componentes, quais sejam: disponibilidade do material e disponibilidade operacional, do inglês *material availability* e *operational availability* respectivamente. As medidas secundárias são denominadas como

atributos chave do sistema (KSA), do inglês *key system attributes*, e um outro nível é associado às métricas alinhadas aos domínios estratégicos do sistema de suporte do produto.

Disponibilidade do material (nível de serviço), do inglês *Fill Rate*, é definida como a porcentagem de demandas por materiais que podem ser atendidas no momento em que são colocadas (SHERBROOKE, 2004). Disponibilidade operacional é definida como a porcentagem de tempo que um sistema ou um grupo de sistemas estão operacionalmente capazes de executar uma missão designada (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2019b; AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE, 2020).

De acordo com *AeroSpace and Defense Industries Association of Europe* (2020), essas métricas são distribuídas em oito categorias, quais sejam: acessibilidade, disponibilidade (prontidão), manutenibilidade, confiabilidade, suprimento, suportabilidade, transporte e treinamento. Ainda, de acordo com *United States* (2018), as métricas de suportabilidade são componentes essenciais do desempenho e devem ser acompanhadas durante todo o ciclo de vida do sistema.

Nesse sentido, este trabalho usa a métrica de taxa de falha para identificar quais aeronaves possuem eventuais comportamentos dissonantes à média da frota. Essa é a métrica fundamental usada como entrada no modelo com intuito de definir a alocação de cada aeronave, bem como a demanda gerada por peças de reposição.

Além dessa métrica, outras métricas são consideradas para a estruturação do modelo e estão distribuídas entre as categorias de confiabilidade, manutenibilidade, suprimento, suportabilidade e transporte de acordo com *AeroSpace and Defense Industries Association of Europe* (2020). Essas categorias estão diretamente ligadas ao desempenho técnico do sistema aeroespacial e à estrutura de suporte logístico. Como composição dessas entradas, a disponibilidade operacional é resultante do modelo pelo emprego simultâneo dessas métricas, sendo avaliada através da relação de custo-benefício entre disponibilidade e investimento necessário.

2.2.1 Suportabilidade e Fatores RAM

Uma aeronave pode requerer vários recursos de suporte para atingir os níveis aceitáveis de desempenho em seu ambiente operacional. Essa quantidade de recursos de suporte pode ser minimizada na fase de operação, endereçando os requisitos de suporte relacionados à suportabilidade e aos fatores RAM durante o desenvolvimento deste sistema. Com isso, os

tempos de inatividade do sistema podem ser minimizados na fase de operação e suporte pelo refinamento da confiabilidade e manutenção de seus equipamentos.

De acordo com *AeroSpace and Defense Industries Association of Europe* (2020), a suportabilidade é a medida no qual todos os recursos de suporte do sistema são requeridos para atender os requisitos operacionais de uma organização, abrangendo todos os recursos de suporte dos elementos IPS, do inglês *Integrated Product Support*, tais como informação técnica, equipamentos de apoio ao solo, peças de reposição e pessoal. Ainda, de acordo com *United States* (2018), a suportabilidade é um indicador fundamental de desempenho logístico de uma aeronave e deve ser acompanhada durante todo o ciclo de vida.

De acordo com Blanchard e Blyler (2016), o objetivo da suportabilidade é influenciar o projeto do sistema de forma que ele possa ser suportado de maneira eficaz e eficiente ao longo de todo o seu ciclo de vida programado.

Os fatores RAM e a suportabilidade progridem conjuntamente durante todo o ciclo de vida de uma aeronave, indo de sua fase de concepção ao seu desfazimento. Também, suas inter-relações ocorrem devido aos aspectos técnicos da aeronave influenciarem a maneira como tal sistema será apoiado durante a operação. Ainda, os aspectos do ambiente operacional podem trazer influências de forma a tornar mais robustas as características técnicas do sistema em desenvolvimento ou aquisição.

A Figura 1 apresenta como os requisitos da aeronave relacionam-se, trazendo o parâmetro disponibilidade como uma medida do grau de inter-relação das características técnicas e de suporte de um sistema em seu ambiente operacional.

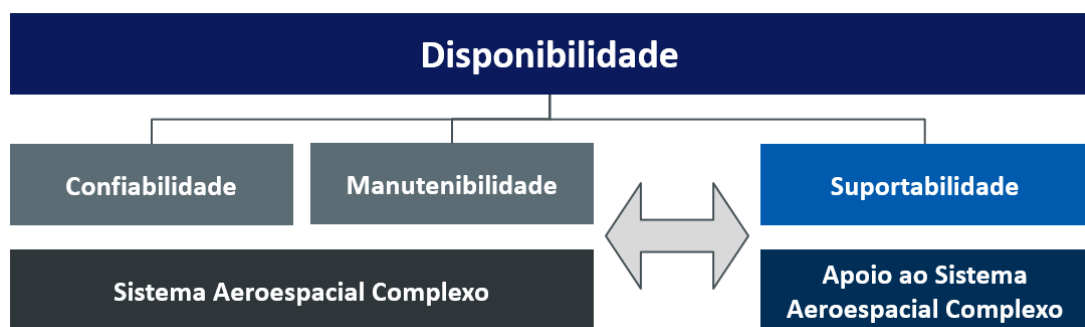


Figura 1 - Detalhamento da disponibilidade com suas influências (Fonte: AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE, 2014).

Por essa relação, a suportabilidade depende das características de confiabilidade e manutenibilidade onde esses fatores em conjunto contribuem para o resultado da disponibilidade.

Segundo Ahmadi *et al.* (2019), como características da operação de longo prazo de um sistema, as análises de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade são abordagens significativas para reduzir os custos de manutenção e melhorar as funções e operações do sistema.

De acordo com o *United States* (2005), alcançar os níveis requeridos de confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade é importante para um sistema ou produto, especificamente, pelo efeito que esses fatores têm na prontidão, segurança do sistema, sucesso da missão, custo total de propriedade e a estrutura logística de suporte.

2.2.2 Confiabilidade

Confiabilidade pode ser definida simplesmente como a probabilidade de que um sistema ou produto terá um desempenho satisfatório por um determinado período de tempo ou na realização de uma missão quando usado sob condições operacionais especificadas (BLANCHARD; BLYLER, 2016; BLANCHARD, 2014; BLANCHARD; FABRYCKY, 2014).

De acordo com Blanchard e Blyler (2016), a confiabilidade é inerente ao sistema ou produto e é um fator importante na disponibilidade geral. Ainda, outros elementos associados ao tempo podem estar correlacionados à confiabilidade, como, por exemplo, o tempo médio entre falhas, do inglês *Mean Time Between Failures* (MTBF), e a taxa de falha (λ).

Ainda, a taxa de falha é definida como o número total de falhas ocorridas durante um intervalo de tempo específico, podendo ser expressa em termos de número de falhas por hora (BLANCHARD; BLYLER, 2016; BLANCHARD, 2014; BLANCHARD; FABRYCKY, 2014) conforme a Equação 1:

$$\lambda = \frac{\text{número total de falhas}}{\text{total de horas operadas}} \quad (1)$$

Assim, segundo os mesmos autores, em 2014 e 2016, o tempo médio entre falhas (MTBF) é tido em horas de operação, assumindo uma distribuição exponencial. O MTBF é expresso conforme a Equação 2, todavia, essa relação somente é válida para a distribuição exponencial, na qual taxa de falha (λ) é constante:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

A confiabilidade contribui para disponibilidade de uma aeronave por estar diretamente ligada ao seu tempo de operação. Dessa forma, elevados valores de MTBF representam a probabilidade de longos intervalos de operação, da mesma forma, representam longos períodos entre a ocorrência de um evento de falha e outro.

A confiabilidade pode ser medida ao nível de operação da aeronave, no entanto, essa confiabilidade é obtida pela composição da confiabilidade dos vários equipamentos embarcados na aeronave. Os equipamentos embarcados possuem suas respectivas confiabilidades individualmente uma vez que a confiabilidade é inerente ao sistema ou produto (BLANCHARD; BLYLER, 2016). Derivado das relações funcionais do sistema, de acordo com Blanchard e Blyler (2016), o diagrama de bloco de confiabilidade descreve a confiabilidade do sistema em termos dos relacionamentos de cada equipamento.

Os equipamentos embarcados podem ser também referenciados como unidades substituíveis em linha, do inglês *Line Replaceable Unit* (LRU). Após um evento de falha, esses equipamentos podem ser retirados e substituídos por outros equipamentos prontos para uso com base em sua condição, partindo do princípio “reparo por substituição”, do inglês “*repair-by-replacement*”. Esses equipamentos, às vezes, são módulos inteiros que consistem em várias peças (DRIESSEN *et al.*, 2020). A Figura 2 apresenta a estrutura de sistemas do sistema complexo (aeronave) até o nível dos equipamentos embarcados (LRU) onde existem vários sistemas desdobrados em subsistemas e consequentemente, centenas de equipamentos.

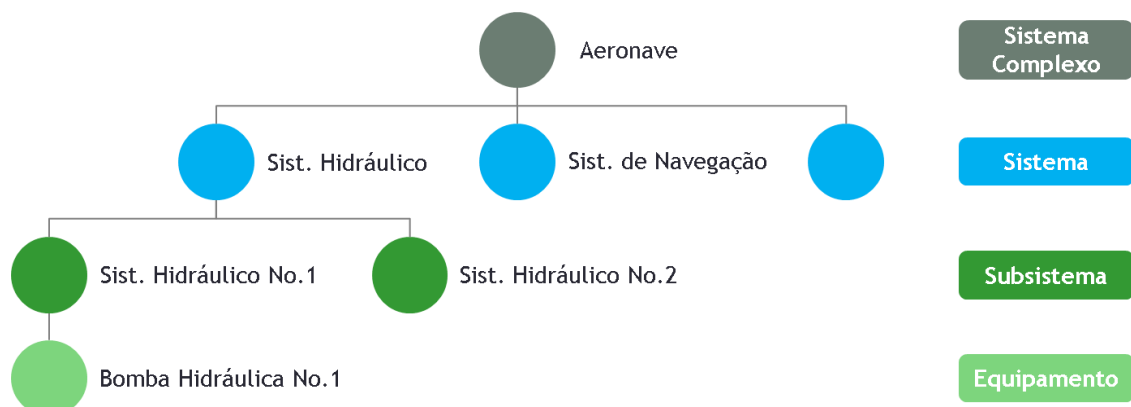


Figura 2 - Representação da estrutura de um sistema complexo (Fonte: O autor).

Um sistema ou equipamento pode estar contido em alguma forma de hierarquia, conforme mostrado na Figura 2, onde existem diferentes camadas de sistemas em uma configuração geral. Particularmente ao lidar com sistemas de grande escala, como uma

aeronave, tal configuração pode ser referida como um sistema de sistemas, do inglês *system-of-systems* (SOS) (BLANCHARD; BLYLER, 2016).

O MTBF, associado às relações desses sistemas, é um atributo relevante neste trabalho, pois o desempenho avaliado de cada aeronave está em relação ao desempenho de cada equipamento embarcado, sendo seus valores fundamentalmente ligados à disponibilidade da aeronave. Por exemplo, um equipamento com baixo valor MTBF, apresenta maior probabilidade de aleatoriamente ocorrer um evento de falha não-programada e causar interrupção na operação da aeronave. Dessa maneira, é requerido um estoque de peças de reposição para que o operador tenha prontamente condições de substituir a peça falhada da aeronave por uma outra peça em condição de uso, garantindo o retorno da aeronave à condição operacional novamente.

A informação de MTBF ou taxa de falha é geralmente fornecida pela fabricante das aeronaves, podendo indicar compromissos entre o fabricante e o operador. O intuito desses compromissos é gerar garantias de desempenhos operacionais do produto sob as circunstâncias acordadas em contratos, havendo penalidades ao fabricante para o desempenho inferior ao desempenho garantido.

2.2.3 Manutenibilidade

A manutenibilidade é outro importante componente da disponibilidade de uma aeronave por estar diretamente ligada ao seu tempo de inatividade devido à manutenção. Uma aeronave deverá ser sujeita há várias intervenções de manutenção para continuar operando dentro das suas especificações de projeto e padrões de segurança durante todo o seu ciclo de vida.

Manutenibilidade é uma característica do projeto e da instalação expressa como a probabilidade do custo de manutenção de um sistema ou produto não exceder uma determinada quantia num certo período de tempo, quando o sistema é operado e mantido de acordo com procedimentos prescritos (BLANCHARD, 2014; BLANCHARD; FABRYCKY, 2014).

A manutenibilidade, definida no sentido mais amplo, pode ser também medida em termos de uma combinação de tempos de manutenção, horas de trabalho do pessoal, fatores de frequência de manutenção, custo de manutenção e fatores de suporte logístico relacionados, não existindo uma medida única que aborde todos os problemas (BLANCHARD; BLYLER, 2016; BLANCHARD, 2014; BLANCHARD; FABRYCKY, 2014).

Blanchard e Fabrycky (2014) afirmam que a manutenibilidade diz respeito à facilidade e economia na execução da manutenção. Como tal, o objetivo é obter o equilíbrio adequado

entre o tempo decorrido, o tempo de trabalho e as habilidades do pessoal com um custo mínimo de manutenção.

2.2.4 Manutenção

No contexto aeronáutico, a manutenção distingue-se consideravelmente em relação a manutenção de outros tipos de equipamentos e sistemas complexos, como radares, fragatas e submarinos, devido aos níveis de exigência relativos aos padrões de segurança, além de ser imprescindível elevados investimentos na capacitação da mão-de-obra, peças de reposição, equipamentos de apoio ao solo e infraestrutura.

Sheng e Prescott (2019), por exemplo, definem a manutenção como um conjunto de estruturas de suporte inter-relacionadas cujo objetivo é minimizar as interrupções nas operações de uma frota de veículos, tais como aeronaves. Os mesmos autores, em 2019, afirmam que a manutenção da frota de aeronaves é geralmente realizada para aumentar a confiabilidade da aeronave, diminuindo o número de falhas inesperadas e reduzindo o tempo de inatividade da aeronave inoperante por meio de reparos eficazes.

De acordo Blanchard e Blyler (2016), a manutenção é classificada em duas categorias:

- a) **Manutenção corretiva:** São as manutenções em eventos não-programados resultantes de falhas que são necessários para restaurar um equipamento ou sistema ao seu nível de desempenho requerido, sendo aleatória a ocorrência dessas falhas e exigindo intervenções pontuais.
- b) **Manutenção preventiva:** São as manutenções necessárias em eventos programados para preservar um equipamento ou sistema em um nível de desempenho especificado, sendo essas manutenções executadas em intervalos de tempos regulares com prolongados períodos de inatividade do equipamento ou sistema.

Além das classificações apresentadas, a estrutura de manutenção pode ser dividida em três níveis dentro de uma força aérea como Blanchard (2014), Blanchard e Fabrycky (2014) e Blanchard e Blyler (2016) preconizaram. A descrição de cada um desses níveis é apresentada a seguir:

Primeiro nível de manutenção (Orgânico) – também são denominadas manutenções de linha, ocorrendo as manutenções, corretiva ou preventiva, diretamente no sistema da aeronave no seu ambiente operacional. Normalmente, requer menor nível de habilidade da mão-de-obra e equipamentos de apoio ao solo menos sofisticados. Esse nível é constituído por ações de

inspeção visual, limpezas, lubrificações, ajustes, calibrações, reparos e substituição de equipamentos da aeronave.

Segundo nível de manutenção (Intermediário) – cobrem as manutenções não executadas pelo primeiro nível, exigindo maior capacitação da mão-de-obra, bem como equipamentos de apoio especiais ou até mesmos bancadas para a realização de desmontagens, substituição ou reparo de componentes internos dos equipamentos da aeronave e a montagens. Esse nível geralmente encontra-se nas competências da força aérea.

Terceiro nível de manutenção (Fabricante ou Oficina) – são manutenções não realizadas nos níveis anteriores e tratam-se de manutenções com elevadas complexidades, demandando mão-de-obra altamente especializada bem como equipamentos mais sofisticados. Essas manutenções são executadas para revisões e restaurações dos equipamentos da aeronave, restabelecendo-os às suas condições operacionais.

Os níveis de manutenção trazem consideráveis influências à disponibilidade de uma aeronave dentro de uma força aérea, pois esses níveis permitem maior prontidão na solução de uma falha ou na programação de manutenção, tendo maior abrangência dessas capacidades de manutenção.

Neste trabalho, serão considerados os eventos não-programados que requerem as manutenções corretivas, pois esses eventos causam com maior frequência rupturas nas operações da frota de defesa devido à imprevisibilidade, trazendo impacto direto à disponibilidade operacional da frota. Para as manutenções corretivas, as atividades desdobram-se no nível orgânico onde ocorrem as substituições dos equipamentos falhados em manutenções de linha na base aérea do próprio operador. Além disso, considera-se o nível oficina na estrutura multi-escalão onde o equipamento é recuperado ao seu estado operacional nas condições especificadas.

2.2.5 Disponibilidade

De acordo com Blanchard (2014), a disponibilidade é a probabilidade de um dado sistema estar operativo, sob condições específicas de uso e suporte, quando este é solicitado em um momento aleatório no tempo para cumprir uma missão. Ainda, segundo o autor, este fator também é conhecido como prontidão operacional, sendo a disponibilidade uma função do tempo operacional (confiabilidade) e do tempo de inatividade (manutenibilidade e suportabilidade).

Silva (2018) define disponibilidade no contexto de forças aéreas como a métrica utilizada no inter-relacionamento entre o setor operacional e o setor de manutenção. De acordo com o autor, essa métrica é estabelecida dessa maneira devido à demanda do setor operacional por aeronaves em condição de voo, sendo o principal impedimento para que isso ocorra as manutenções corretivas e preventivas.

Blanchard (2014), Blanchard e Fabrycky (2014) e Blanchard e Blyler (2016) definem disponibilidade inerente A_i como a probabilidade que um sistema estará em estado operativo sob condições específicas, em um ambiente ideal de suporte (sem ausência de peças, recursos e mão-de-obra) quando acionado em qualquer momento. Nesta medida não estão considerados os tempos devido aos atrasos logísticos e à manutenção preventiva. Essa abordagem considera somente manutenção corretiva e é expressa como:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + \bar{M}ct} \quad (3)$$

Onde MTBF (*Mean Time Between Failure*) é o tempo médio entre falhas e $\bar{M}ct$ é o tempo médio de ação para manutenção corretiva.

Também apresentada por esses mesmos autores, a disponibilidade atingida A_a é similar à disponibilidade inerente. Nessa medida, a manutenção preventiva é considerada e é expressa como:

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} \quad (4)$$

Onde MTBM, do inglês *Mean Time Between Maintenance*, é o tempo médio entre manutenções e \bar{M} é tempo médio de ação de manutenção, seja ela corretiva ou preventiva.

Para finalizar os conceitos de disponibilidade, ainda há disponibilidade operacional A_o . Disponibilidade operacional é a probabilidade de que um sistema ou equipamento, quando usado nas condições estabelecidas em um ambiente operacional real, opere satisfatoriamente quando solicitado (BLANCHARD; FABRYCKY, 2014). Essa medida é representada de forma mais realística por considerar os atrasos logísticos e é expressa como:

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (5)$$

Onde MDT, do inglês *Mean Maintenance Downtime*, é o tempo médio de inatividade devido ao tempo médio das ações de manutenção, tempos de atrasos logísticos e administrativos.

Neste contexto, a disponibilidade operacional é a forma que melhor representa os cenários operacionais reais, pois os atrasos devido à ausência de alguns recursos necessários para as manutenções podem ocorrer. Além disso, traz outros fatores externos, como os tempos logísticos e administrativos praticados pela força aérea, sendo contidos nestes fatores, atrasos no fluxo das informações, atrasos no fornecimento de peças de reposição, equipamentos de apoio ao solo, ferramentas e mão-de-obra.

Patra *et al.* (2019) citam vários pesquisadores que apontam a disponibilidade operacional como a métrica frequentemente utilizada em contratos de suporte do Departamento de Defesa Norte-Americano e do Ministério de Defesa do Reino Unido. Esses contratos usam geralmente as abordagens PBL e PBC, do inglês *performance-based logistics* e *performance-based contracting* respectivamente. Segundo os autores, esses contratos aplicam-se em indústrias com produtos de alta complexidade e com uso de capitais intensivos tais como indústrias aeroespaciais, defesa, mineração e petroquímica.

A disponibilidade operacional é a mais adequada no contexto deste trabalho, pois é adotado nesta pesquisa um modelo para otimização dos estoques de peças de reposição utilizados dentro da estrutura de suporte de uma organização militar para atingir os melhores resultados possíveis em relação à disponibilidade e os investimentos necessário para manter a frota operacional. Além disso, no modelo também são aplicadas alternativas de alocações das aeronaves devido aos seus comportamentos avaliados individualmente para melhorar a forma como os estoques são provisionados e distribuídos.

2.3 Roteamento de Aeronaves para Manutenção

Nesta seção são abordados os aspectos de roteamento de aeronaves para manutenção no contexto de aviação comercial e aviação militar onde distinguem-se no emprego das aeronaves devidos às suas peculiaridades e finalidades de operação. Entretanto, em ambos os contextos é primordial a execução das manutenções para garantir a melhor utilização possível de suas aeronaves e atingir a disponibilidade esperada. Este é um ponto relevante em comum entre a aviação comercial e a aviação militar. Embora, o assunto de roteamento de aeronaves tenha um

vasto campo de pesquisa e faça interface a este trabalho, não é do interesse desta pesquisa trazer detalhes neste campo.

2.3.1 Roteamento de Aeronaves na Aviação Comercial

Sanchez, Boyaci e Zografos (2020) apontam no contexto de aviação comercial a existência de várias decisões operacionais associadas às companhias aéreas, indo desde o preço das passagens aos horários de voos, escalas de serviço das tripulações e manutenção de aeronaves. As companhias aéreas devem levar em consideração seus próprios interesses econômicos ao tomar essas decisões. Assim, em um ambiente competitivo, as companhias aéreas buscam minimizar seus custos operacionais e ampliar a receita ao fornecer serviços competitivos ao mesmo tempo, sendo que uma parte significativa dos custos operacionais é dedicada à manutenção das aeronaves.

Segundo os mesmos autores, em 2020, as manutenções são classificadas no ambiente de aviação comercial de acordo com as intervenções de curto, médio e longo prazo. Neste sentido, indicam as manutenções de curto prazo como as manutenções de linha, pois são realizadas como procedimentos de manutenção padrão nos portões de embarque dos aeroportos ou durante os pernoites em hangar onde as aeronaves encontram-se disponíveis para as manutenções. Dessa forma, intervenções de curto prazo não requerem modelagens ou planejamentos avançados, diferindo das manutenções de médio e longo prazo as quais as Autoridades de Aviação Civil impõem intervalos específicos após certos números de meses, ciclos de voo e horas de voo, com essas atividades sendo executadas em oficinas de manutenção certificadas (SANCHEZ; BOYACI; ZOGRAFOS, 2020).

Dessa forma, as manutenções são executadas para manter as aeronaves com níveis de operação aceitáveis em suas rotas. No âmbito de aviação comercial, aeronaves fora das linhas de operação podem representar perdas de receita à companhia aérea.

No contexto deste trabalho, as aeronaves com desempenho de confiabilidade degradada devem ter rotas atribuídas com capacidades de manutenção e recursos acessíveis. Isso pode permitir à companhia aérea minimizar os possíveis impactos de ruptura em suas rotas devido à falta de recursos para manutenção. Pode haver complexidade nas operações de aviação comercial em alocar as aeronaves com confiabilidade degradada devido às suas malhas aéreas. Combinado ao fator de manutenção, outros aspectos de otimização podem elevar as dificuldades de otimização como, por exemplo, considerar simultaneamente os planejamentos de voos, tripulação e equipes de manutenção.

Segundo Eltoukhy *et al.* (2019), as companhias aéreas e os provedores de manutenção enfrentam desafios no gerenciamento do número crescente de aeronaves. Neste sentido, o problema de roteamento de manutenção de aeronaves, do inglês *aircraft maintenance routing problem* (AMRP), é de fundamental importância para as companhias aéreas, pois estas constroem o roteamento das aeronaves conjugados às suas programações de manutenção.

De acordo com Eltoukhy *et al.* (2019), o problema de roteamento de manutenção de aeronaves tem sido extensivamente debatido na literatura, sendo uma efetiva ferramenta para as companhias aéreas gerarem soluções de roteamento viáveis. Neste contexto, segundo os mesmos autores, em 2019, o problema de roteamento de manutenção de aeronaves é geralmente classificado em três tipos, quais sejam: problema tático de roteamento de manutenção de aeronaves (TARP), problema operacional de roteamento de manutenção de aeronaves (OARP) e problema operacional de roteamento de manutenção de aeronaves com base em atrasos de voo (FDARP), do inglês *tactical aircraft routing problem*, *operational aircraft routing problem* e *flight delay-based operational aircraft routing problem* respectivamente. A descrição de cada um desses tipos é apresentada a seguir:

Problema tático de roteamento de manutenção de aeronaves – especifica o arranjo genérico das pernas de voo a serem repetidas por cada aeronave, ignorando algumas restrições operacionais de manutenção.

Problema operacional de roteamento de manutenção de aeronaves – determina as rotas das aeronaves levando em consideração as restrições operacionais de manutenção, tais como, número máximo de horas de voo, número máximo de decolagens e o número máximo de dias desde a última manutenção.

Problema operacional de roteamento de manutenção de aeronaves com base em atrasos de voo – é similar ao problema anterior, exceto pelo fato de que os atrasos de voos são explicitamente considerados.

De acordo com Bazargan (2010) o problema de roteamento de aeronaves é o processo de atribuir cada aeronave individual dentro de cada perna de voo. Cada aeronave individualmente recebe um registro também referido como número de cauda, do inglês *tail number*. O roteamento de aeronaves também é conhecido como rotação de aeronaves, atribuição de aeronaves ou atribuição de cauda, do inglês *aircraft rotation*, *aircraft assignment*, ou *tail assignment* respectivamente.

Ainda, segundo Bazargan (2010), os modelos de pesquisa operacional causam um imenso impacto no planejamento e no gerenciamento das operações das companhias aéreas. Com os avanços na tecnologia da computação e nos modelos de otimização, as companhias

aéreas podem enfrentar problemas mais desafiadores e resolvê-los em um espaço de tempo mais curto, buscando maximizar as receitas ou minimizar os custos operacionais.

Associado ao problema deste trabalho, o problema de roteamento de aeronaves pode apresentar resultados aprimorados ao utilizar a confiabilidade de cada aeronave para atribuição das rotas. Dessa forma, as aeronaves com confiabilidade dissonante devem operar em rotas com mais acessos aos recursos de manutenção, diminuindo os riscos de a aeronave não retornar ao serviço e gerar remanejamentos na frota para continuidade das operações.

2.3.2 Planejamento de Manutenção de Aeronaves na Aviação Militar

Van den Bergh *et al.* (2013) apresentam e classificam trabalhos relacionados ao problema roteamento de frota para o planejamento de manutenção na aviação comercial, contudo, nota-se que os trabalhos citados não se aplicam à aviação militar diretamente. Assim como, os trabalhos citados de Sanchez, Boyaci e Zografos (2020) e Eltoukhy *et al.* (2019) buscam por soluções voltadas às operações de companhias aéreas como resolver o problema de programação de manutenção da frota, considerando atribuição de aeronaves para maximizar os lucros de uma companhia aérea e seu provedor de manutenção por meio de suas interações respectivamente.

Cho (2011) realça essa observação ao afirmar que em particular, a aviação militar lida com objetivos diferentes do que a sua contraparte a aviação comercial. Enquanto as companhias aéreas empenham-se pela lucratividade e redução dos seus custos operacionais, a aviação militar busca pela prontidão para o combate e execução das missões, resultando em diferentes conjuntos de restrições e objetivos. Outra diferença relaciona-se à programação de voos comerciais, concentrando-se na seleção de rotas e na atribuição de aeronaves. No âmbito de aviação militar, as operações ocorrem geralmente a partir de uma localidade fixa e, portanto, não envolvem decisões de rota.

A aviação militar diverge da aviação comercial também pela necessidade de manter elevada prontidão de suas aeronaves, contudo, apresenta um esforço de horas de operação reduzido. Isso pode permitir maior flexibilidade no gerenciamento da frota militar para a realocação de suas aeronaves com baixa confiabilidade em suas bases aéreas que dispõem de melhores recursos para manutenção. Diferentemente do ambiente de aviação comercial, onde as rotas devem ser bem definidas. Isso permite que as aeronaves dissonantes possam ter condições de terem as intervenções de manutenção durante seu turno de voo ou no pernoite.

Neste trabalho, as aeronaves militares com baixa confiabilidade motivam a busca pelas realocações para que os níveis de disponibilidade sejam refinados e os suprimentos também estejam aderentes aos níveis exigidos. Apesar de terem uma base fixa, as aeronaves militares dissonantes podem estar posicionadas em bases aéreas com escassez de recursos para determinados níveis de manutenção, podendo comprometer constantemente a realização de suas missões.

Além disso, as aeronaves militares podem ser designadas para participarem de missões desdobradas em outras bases aéreas por elevados períodos. Nessas missões podem haver restrições de recursos, como, mão-de-obra e peças para as eventuais manutenções. Dessa forma, as aeronaves com confiabilidade reduzida devem ser evitadas como alternativas nessas campanhas, reforçando a necessidade de avaliar os comportamentos individuais de uma frota.

Balakrishnan *et al.* (2021) trazem no contexto de aviação militar o problema de planejamento de voos e manutenção, do inglês, *flight and maintenance planning* (FMP), aplicando os métodos heurísticos de algoritmo genético e algoritmo modificado de colônia artificial de abelhas. Estes pesquisadores (2021) buscaram maximizar a taxa de utilização das aeronaves enquanto também satisfazer outras restrições operacionais e de manutenção, como horas de voo, ciclos de voo, requisitos anuais de voo e vida-limite por tempo calendário. No entanto, o foco foi em manutenção preventiva, partindo de uma referência homogênea da idade das aeronaves. Os mesmos autores (2021) desconsideraram os eventos de manutenções corretivas.

Peschiera *et al.* (2020) trazem também a abordagem de FMP ao aplicar o problema no planejamento de manutenção de longo prazo de uma frota com idade heterogênea. Os cenários foram inspirados na frota da Força Aérea Francesa, formulando um modelo de programação inteira mista para resolver os problemas. O objetivo dos autores (2020) era atribuir as aeronaves militares para missões já programadas enquanto ocorriam as manutenções planejadas ao longo do tempo.

Silva (2018) aplica o problema de planejamento voos e manutenção (FMP) no âmbito da Força Aérea Brasileira. O autor (2018) propõe um método combinado de meta-heurística evolucionário, considerando algoritmo genético e a programação de metas. O método foi aplicado em dez instâncias onde os resultados obtidos mostraram que o método híbrido foi capaz de gerar soluções de planejamento de manutenção viáveis.

Cho (2011) desenvolve seu trabalho sobre programação de manutenção no contexto de aviação de caça da Força Aérea Americana, apresentando um modelo matemático linear inteiro misto para minimizar o número máximo de aeronaves em manutenção simultaneamente. Em

seu trabalho, o pesquisador desenvolveu um modelo para fornecer um planejamento de manutenção preventiva e alocação de aeronaves às suas missões, tendo o modelo como entrada os requisitos de voos e de manutenção.

Com os trabalhos apresentados, a manutenção preventiva é o foco para as soluções de planejamento buscadas, gerando alternativas de remanejamento das aeronaves para a execução das missões e atingimento das horas de voo esperadas na frota. Contudo, não há uma abordagem tratando os possíveis comportamentos individuais das aeronaves, sendo elas consideradas nas mesmas condições de confiabilidade. Além disso, as rupturas de operação ocorrem também devido aos eventos não-programados, causando a necessidade de manutenção corretiva.

Esses eventos podem trazer impacto à prontidão da frota em função da imprevisibilidade e também pela possível ocorrência no ato da missão. Este trabalho aborda as manutenções corretivas à luz da confiabilidade de cada aeronave, pois essa informação é uma entrada do modelo e utilizada para alternativas de possíveis realocação da frota. Essas realocações têm por objetivo aprimorar a disponibilidade geral e também os investimentos associados às manutenções, como, por exemplo, peças de reposição.

2.4 Modelagem da Suportabilidade da Frota

Nesta seção são abordados os aspectos sobre a modelagem da suportabilidade da frota baseada no gerenciamento de estoque. Este assunto tem sido de interesse da indústria e a da academia de acordo com Kok *et al.* (2018) devido aos elevados custos associados em aprovisionar e manter peças de reposição em níveis de serviço aceitáveis no estoque. No âmbito deste trabalho, é o principal fator investigado no refinamento da relação de custo-benefício entre o seu investimento associado à disponibilidade operacional esperada.

2.4.1 Gerenciamento de Estoque

Uma das formas de modelar a suportabilidade de uma frota é por meio de modelos relacionados ao gerenciamento de estoques. O gerenciamento de estoque ganha destaque nas operações e manutenções de uma frota devido ao seu valor de investimento. Com isso, os modelos de gerenciamento de estoques podem estar associados às métricas de suportabilidade, visando atingir resultados satisfatórios de desempenho ao menor investimento possível.

Um importante aspecto associado à métrica de suportabilidade, disponibilidade operacional, de uma frota é a prontidão em atender suas demandas por peças de reposição através de um robusto gerenciamento de estoque. Neste contexto, o desempenho logístico pode ser medido pela disponibilidade operacional onde é necessário manter um estoque de peças para apoiar uma frota qualquer de aeronaves. O tempo médio de inatividade (MDT) é um fator que afeta a disponibilidade operacional devido ao tempo total decorrido para reparar e restaurar um sistema à condição operacional ou para mantê-lo nessa condição. O tempo médio de atraso logístico está incluído neste fator, considerando a espera por peças de reposição em estoque (BLANCHARD, 2014; BLANCHARD; FABRYCKY, 2014).

Este estoque deve ser dimensionado com base nas condições técnicas das aeronaves, nas características operacionais e na organização da estrutura de apoio logístico. Wong (2005) expressa que apesar dos custos em manter um estoque, isso é justificado pelos requisitos de níveis de desempenho do sistema exigido pelo usuário-final.

Estoques são acumulações de matérias-primas, suprimentos, componentes, materiais em processo e produtos acabados que surgem em numerosos pontos do canal de produção e logística das empresas (BALLOU, 2007).

De acordo com Gleissner e Femerling (2013), estoques podem ser definidos como concentrações de matéria-prima, componentes, produtos semiacabados e produtos acabados dependendo de sua posição na cadeia de suprimentos. Ainda, Gleissner e Femerling (2013), estabelecem que o objetivo do estoque é otimizar a cadeia de suprimentos ao longo dos diferentes estágios para servir adequadamente as demandas.

Por isso, o gerenciamento do estoque é estabelecido com intuito de gerenciar as ações necessárias para organizar e ter assertividade do que é armazenado no estoque. *Defense Acquisition University - DAU* (2019a) descreve o gerenciamento de suprimentos como o responsável por assegurar as peças de reposição, seus reparos e suprimentos de forma correta no tempo, nas quantidades, nos locais e nos preços. Esse processo inclui o provisionamento para o suporte inicial, bem como a aquisição, distribuição e reabastecimento dos inventários ao longo da operação dos sistemas aeroespaciais.

De acordo com Ivanov, Tsipoulaidis e Schönberger (2019), o papel do gerenciamento de estoque é encontrar o equilíbrio entre o investimento de estoque e o serviço ao cliente. Ainda, segundo Ivanov, Tsipoulaidis e Schönberger (2019), estoque é um dos bens mais caros de muitas companhias, representando mais do que 50% de todo o capital investido.

Segundo Sheikh-Zadeh e Rossetti (2020), as indústrias dependem de investimentos em peças de reposição incluindo a área militar, aviação comercial, infraestrutura de tecnologia da

informação e comunicação e outras indústrias de operações intensivas. O provisionamento de peças de reposição é desafiador devido às quantidades significantes de tipos de itens, estruturas multi-escalão e a natureza de suas operações.

Segundo Kilpi e Vepsäläinen (2004), para manter os estoques dentro dos níveis aceitáveis de investimento em uma companhia aérea, há quatro fatores que afetam o custo associado à disponibilidade de peças: confiabilidade do equipamento, tempo do processo de reparo do equipamento, do inglês *turn-around time* (TAT), nível de serviço requisitado e o número de peças disponíveis no estoque.

No contexto deste trabalho, os resultados dos níveis de estoque trazem impactos diretos aos níveis de disponibilidade da frota. Isso dá-se pelo uso da confiabilidade de cada aeronave ao gerar demandas específicas, além de outros fatores como a facilidade de acesso às fontes de reparo. Neste caso, o tempo associado a esse acesso permite processos mais ágeis ao trazer uma peça em condições de uso para o estoque novamente.

2.4.2 Multi-escalão

De acordo com Kok *et al.* (2018), com a crescente popularidade de gerenciamento da cadeia de suprimentos na literatura, bem como nas práticas industriais, faz com que os modelos de estoque multi-escalão, do inglês *multi-echelon*, ganhem atenção e importância. Além disso, segundo Costantino *et al.* (2018), é uma técnica flexível amplamente discutida em gerenciamento de estoque para redes complexas.

Segundo Patriarca *et al.* (2016), estruturas multi-escalão geralmente consistem de um depósito central e depósitos locais. Dessa forma, o depósito central é responsável pelo reabastecimento de peças nos depósitos locais devidos às suas capacidades mais abrangentes no gerenciamento de estoque. Nesse contexto, o depósito central pode ser uma base aérea principal com recursos de armazenagem de estoque e oficinas de reparo das peças e os depósitos locais podem ser bases aéreas mais afastadas geograficamente com limitações de recursos por exemplo.

Uma referência básica para a abordagem de multi-escalão é o modelo METRIC (SHERBROOKE, 1968), do inglês *Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*, desenvolvido por Sherbrooke, em 1968, que determina níveis ótimos de estoque para um sistema de inventário com dois escalões. De acordo com Costantino, Gravio e Tronci (2013), o modelo METRIC foi desenvolvido para aplicações militares onde uma peça particular pode ser

demandada em várias bases aéreas de uma força aérea que são reabastecidas por uma outra base aérea principal.

A Figura 3 apresenta uma estrutura multi-escalão de dois níveis, sendo o primeiro escalão relacionado aos depósitos locais e o segundo escalão relacionado ao depósito principal.

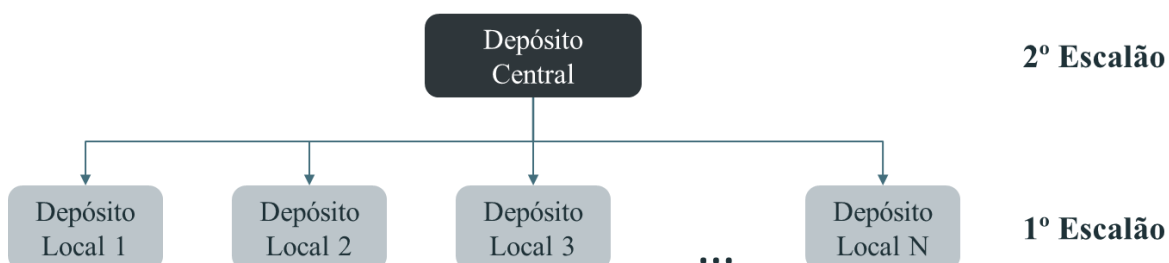


Figura 3 - Organização contendo dois escalões (Fonte: adaptado de Costantino, Gravio e Tronci, 2013).

Extensões do METRIC (SHERBROOKE, 1968) foram desenvolvidas como MOD-METRIC (MUCKSTADT, 1973) que considera a estrutura hierárquica, do inglês *multi-indenture*, das peças em dois níveis, equipamento e seus componentes, para um modelo de dois escalões. O modelo VARI-METRIC (COSTANTINO *et al.*, 2013 *apud* SLAY, 1984) assume que o número médio de itens sob o reparo é igual à sua variância através de uma distribuição Binomial Negativa. Por fim, Sherbrooke (1986) estende a aplicação do VARI-METRIC proposto por Slay (1984) por meio da combinação da abordagem de *multi-echelon* e *multi-indenture*, bem como o aprimoramento do cálculo do EBO, abreviação do inglês *expected backorders*.

Este assunto, de acordo com Kok *et al.* (2018), tem sido de interesse na indústria dados os possíveis refinamentos no investimento em função das métricas de suportabilidade. A relação de custo-benefício gerada permite a tomada de decisão com base nos desempenhos orientados pelas métricas ou nas condições de investimento dado um de orçamento específico.

A abordagem multi-escalão permite neste trabalho modelar um cenário de suportabilidade da frota. O modelo trata a relação de custo-benefício entre a disponibilidade operacional e o investimento necessário, considerando as demandas por peças de reposição de cada aeronave alocada nos diferentes escalões. Dessa forma, cada aeronave gera diferentes entradas de demanda para o modelo devido às diferentes condições de confiabilidade das aeronaves, sendo destoantes ou não em seus comportamentos. Por esse motivo, a abordagem multi-escalão usada demonstra uma relação dos possíveis impactos no investimento em estoque e disponibilidade da frota ao tratar a condição de confiabilidade das aeronaves individualmente no modelo.

Dessa forma, alguns experimentos podem ser feitos em uma única localidade (único escalão) para estender à uma organização multi-escalão posteriormente. Por isso, há necessidade em entender os mecanismos aplicados em somente uma localidade inicialmente e então, aplicar às demais localidades.

2.4.3 Modelo de Único Escalão

O modelo de único escalão, do inglês *single-echelon*, é o modelo inicial, pois parte do princípio de operação e abastecimento de materiais concentrados somente em uma localidade. Este modelo traz as principais equações e fundamentações adotadas nos modelos multi-escalão. Neste contexto, são apresentadas as equações de demanda de peças e nível de estoque, trazendo as condições associadas. Além disso, é apresentada que a maximização da disponibilidade é obtida em função da minimização do número de pedidos em aberto. Assim, a curva ótima de investimento em relação à quantidade esperada de pedidos em aberto pode ser transformada imediatamente em uma curva ótima de investimento em relação à disponibilidade.

2.4.3.1 Nível de Estoque

De acordo com Sherbrooke (2004), os termos “falha” e “demanda” podem ser usados de forma intercambiável. Quando uma demanda ocorre, é necessária uma peça do estoque. Se nenhuma peça estiver disponível, algum sistema fica inoperante até que uma peça possa ser fornecida. Ainda, segundo o mesmo autor, em 2004, essa teoria é aplicável a qualquer sistema em que seja significativo falar sobre disponibilidade. Assim, o nível de estoque torna-se um dos principais parâmetros para a otimização.

De acordo com Sherbrooke (2004), o nível de estoque s denota a quantidade real de peças i atribuída a um estoque. O nível de estoque s_i inclui o número de peças i em mãos, o número de peças i em processo de reparo ou de reabastecimento e o número de pedidos de peças i em aberto, esses termos vêm respectivamente do inglês *On Hand* (OH), *Due In* (DI) e *Backorders* (BO). Essas variáveis são discretas, aleatórias e não-negativas.

Como todas as peças devem estar em alguma dessas condições, a Equação 6 é a base para as análises seguintes e é expressa como:

$$s_i = OH_i + DI_i - BO_i \quad (6)$$

O nível estoque, s_i , é constante quando o lote de compra é 1 e o ponto de reabastecimento é s_i-1 . Logo, é seguido a política de estoque $(s_i-1,1)$ onde os termos representam o ponto de reabastecimento e o lote de compra, respectivamente. Essa política assume que ao reduzir a posição do nível de estoque s_i em 1 unidade da peça i , é feito o reabastecimento de 1 peça. Portanto, essas premissas são seguidas para o desenvolvimento deste trabalho.

2.4.3.2 Previsão de Pedido em Aberto

Outro fator importante para otimização de estoque, é prever a demanda de cada peça que compõe o estoque. Deste modo, é estimado o nível de estoque das peças necessárias para garantir a disponibilidade desejada.

Este trabalho adotou a premissa de que as demandas das peças seguem uma distribuição de Poisson. Segundo o teorema de Palm (SHERBROOKE, 2004 *apud* PALM, 1938), se a demanda por um item i é o processo de Poisson com média anual m_i e o tempo de reparo para cada unidade falhada do item i é independente e identicamente distribuído de acordo com qualquer distribuição com média T_i anos, então a distribuição de probabilidade em estado estacionário para o número de unidade em reparo tem uma distribuição de Poisson com média $m_i T_i$ (SHERBROOKE, 2004). Logo, o valor obtido por $m_i T_i$ é correspondente ao valor médio de peças em reparo para uma determinada peça e é expresso como:

$$p_i(x) = P_i(X = x) = \frac{(m_i T_i)^x}{x!} e^{-m_i T_i} \quad x = 1, 2, 3... \quad (7)$$

Uma vez definido este valor para cada peça i , é possível calcular qual a estimativa de pedidos em aberto, do inglês *expected backorders* (EBO). Segundo Sherbrooke (2004), pedidos em aberto (*backorders*) são o número de demandas existentes não atendidas em qualquer ponto no tempo. Quando o estoque é incapaz de preencher uma demanda, um pedido em aberto é estabelecido e mantém-se até que hajam peças provenientes do processo de reparo ou reabastecimento, *due in* (DI).

Segundo Sherbrooke (2004), havendo s_i+k_i peças no processo de reparo (DI) em um ponto aleatório no tempo, então, da Equação 6, existem k_i pedidos atrasados. Assim, o número esperado dos pedidos em aberto (EBO) para uma certa peça i é dado por:

$$EBO_i(s_i) = P_i(DI_i=s_i+1) + 2P_i(DI_i=s_i+2) + 3P_i(DI_i=s_i+3) \dots = \sum_{x=s_i+1}^{\infty} (x-s_i)P_i(DI_i = x) \quad (8)$$

O resultado da estimativa de pedidos em aberto (EBO) é uma quantidade não-negativa (SHERBROOKE, 2004). Pelo teorema de Palm (SHERBROOKE, 2004 *apud* PALM, 1938), é possível deduzir que DI_i tem uma distribuição de Poisson com média m_iT_i , e modificar a Equação 8 em uma soma finita conforme expresso na Equação 9:

$$\begin{aligned} EBO_i(s_i) &= \sum_{x=s_i+1}^{\infty} xP_i(DI_i = x) - s_i \sum_{x=s_i+1}^{\infty} P_i(DI_i = x) \\ EBO_i(s_i) &= \sum_{x=0}^{\infty} xP_i(DI_i = x) - \sum_{x=0}^{s_i} xP_i(DI_i = x) - s_i \left(1 - \sum_{x=0}^{s_i} P_i(DI_i = x) \right) \\ EBO_i(s_i|m_iT_i) &= m_iT_i - s_i + \sum_{x=0}^{s_i} (s_i - x) P_i(DI_i = x) \end{aligned} \quad (9)$$

2.4.3.3 Análise Marginal

Dado o acréscimo de uma nova peça i no estoque, o resultado é a redução do número de pedidos em aberto. Nos casos onde existem múltiplas peças, é necessária a aplicação de alguma técnica para apoiar na decisão de qual peça i deve ser adquirida para alcançar a maior redução de *expected backorders* (EBO) relacionada ao custo dessa aquisição.

A Análise Marginal, segundo Sherbrooke (2004), é assim chamada, pois em cada passo do algoritmo, é preciso avaliar apenas um número de cada item i para determinar o próximo item i que deve ser adquirido. Logo, o valor marginal ou incremental fornece todas as informações necessárias sobre cada item. O cálculo da Análise Marginal, ΔEBO , é expresso da seguinte maneira:

$$\Delta EBO_i = \frac{EBO_i(s_i - 1) - EBO_i(s_i)}{C_i} \quad (10)$$

Onde os números esperados de pedidos em aberto da peça i são apresentados com quantidades de $s-1$ e s peças, logo, $EBO_i(s_i-1)$ e $EBO_i(s_i)$, respectivamente. O custo unitário da peça i é expresso por C_i . Essa abordagem é utilizada em modelos com base única (único escalão)

e multi-escalão. A Figura 4 mostra o resultado hipotético de uma curva de custo-benefício, trazendo a relação da métrica de estoque EBO (ordenada) e o investimento (abscissa) para cada ponto.

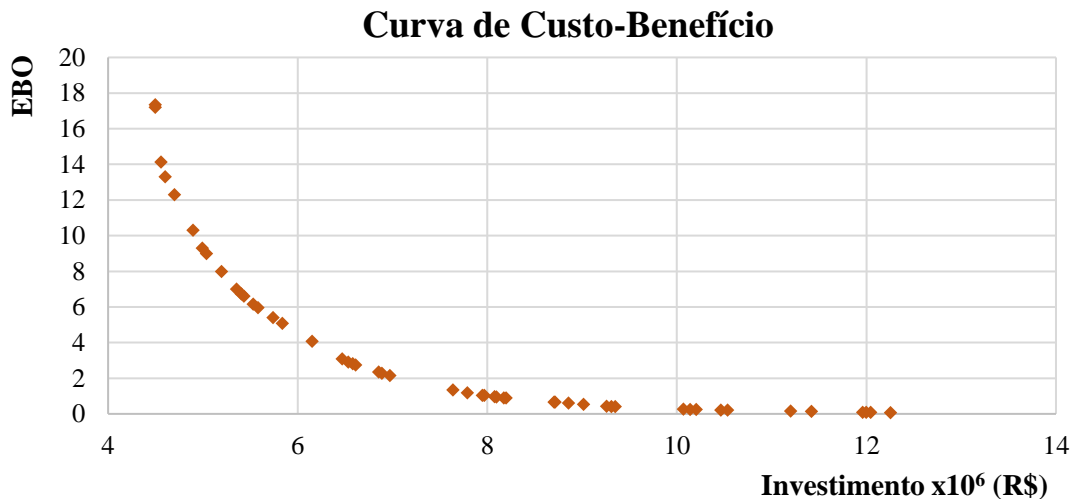


Figura 4 - Curva de custo-benefício entre o EBO e o investimento (Fonte: O autor).

O resultado da análise marginal é uma curva de custo-benefício, ora também referida como curva de custo-efetividade. Neste contexto, cada ponto da curva representa uma estratégia de investimento restrito a uma lista de peças definida como entrada no modelo, variando então as quantidades adquiridas de cada peça. Assim, quanto maior é o investimento, menor é a quantidade esperada de pedidos em aberto (EBO).

2.4.3.4 Disponibilidade *versus* Investimento

Segundo Sherbrooke (2004), a primeira métrica de suportabilidade em nível de sistema é a disponibilidade, ou seja, a porcentagem esperada de uma frota de aeronaves que não está inoperante por falta de peças em um ponto aleatório no tempo, por exemplo.

Nesta seção, a disponibilidade operacional é trazida em função do EBO e dos sistemas considerados no modelo. A disponibilidade operacional apresentada por Sherbrooke (2004), A, para uma única base considerando múltiplas peças em estoque é expressa por:

$$A = 100 \prod_{i=1}^I \left(\frac{1 - EBO_i(s_i)}{NZ_i} \right)^{Z_i} \quad (11)$$

Onde I é o número total de tipos de itens em estoque, N é a quantidade de sistemas e Z_i é a quantidade da peça i instalada no sistema. Assim, s_i é a quantidade em estoque da peça i e EBO_i é a quantidade esperada de pedidos em aberto para a peça i se s_i peças forem adquiridas.

A Figura 5 mostra uma curva de custo-benefício hipotética relacionando a disponibilidade (ordenada) e o investimento (abscissa). Da mesma forma que na Figura 4, cada ponto está associado à uma estratégia de estoque, seja para a tomada de decisão em relação à disponibilidade desejada, seja para tomada de decisão condicionada à um orçamento.

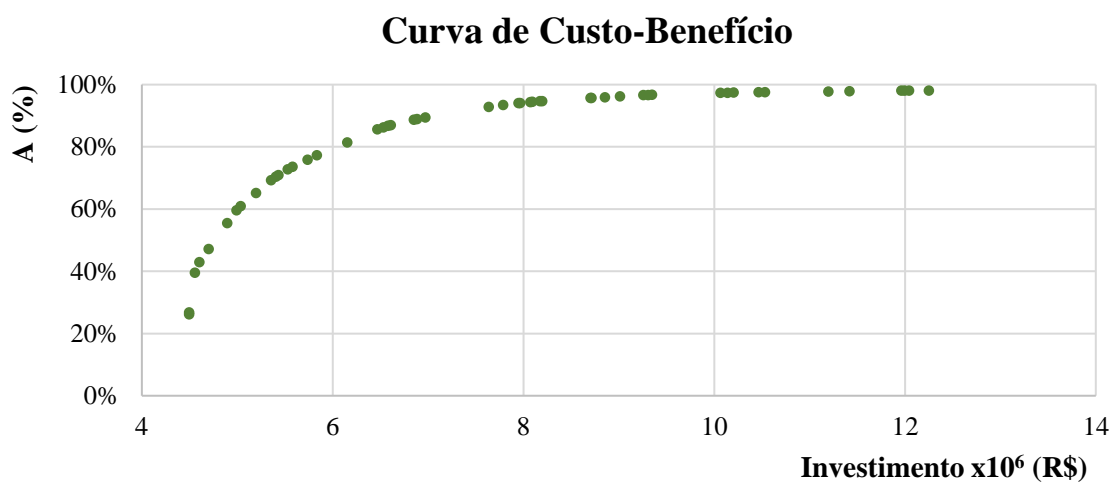


Figura 5 - Curva de custo-benefício entre disponibilidade e investimento (Fonte: O autor).

Nessas condições, não são consideradas a canibalização de nenhum dos sistemas. Segundo Sherbrooke (2004), canibalização é a consolidação das peças em falta de uma aeronave ao menor número possível por meio da substituição das peças solicitadas originárias de outra aeronave, podendo ela estar em processo de produção ou em condição de inoperante também. Além disso, o modelo deste trabalho não considera a ocorrência de canibalização.

Acerca da curva gerada, ela representa a fronteira de soluções ótimas de um cenário específico. A disponibilidade é ampliada à medida que ocorrem investimentos de forma ordenada nas peças de reposição. Nessas condições, qualquer ponto abaixo da curva é uma solução subótima considerando as mesmas entradas no modelo.

Além disso, níveis de disponibilidade podem ser alcançados com nenhum investimento mesmo com longos tempos de inatividade incorridos por todo o processo logístico que a peça falhada passa até retornar a sua condição operacional e instalada na aeronave. Contudo, outros níveis de disponibilidade são atingidos com elevados investimentos em estoque, minimizando os tempos de inatividade da frota e prontamente voltando as aeronaves nas suas condições operacionais com maior agilidade.

2.4.4 METRIC

O modelo *METRIC*, do inglês *Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*, foi proposto originalmente por Sherbrooke (1968) e representa a dinâmica do gerenciamento de estoques entre as diversas localidades em escalões diferentes. Assim, segundo o mesmo autor, a função objetivo busca minimizar a quantidade de pedidos em abertos (EBO) das localidades, o que é equivalente a maximizar a disponibilidade (A) quando não há canibalização.

Para a compreensão adiante, o termo “depósito” é adotado para se referir ao depósito central e o termo “bases” é adotado para se referir aos depósitos locais.

Segundo o Sherbrooke (2004), quatro suposições são fundamentais para o modelo, mesmo essas sendo violadas ocasionalmente em um ambiente real.

1. A decisão sobre se uma base pode reparar um item, não depende dos níveis de estoque ou da carga de trabalho. Algumas bases podem ter condições mínimas de reparo, como executar testes por exemplo. Contudo, se uma peça não está disponível na base, a base solicita a peça ao depósito.
2. As bases do primeiro escalão, do inglês *first echelon*, são reabastecidas pelo depósito do segundo escalão, do inglês *second echelon*, e não ocorre suprimento lateral entre as bases do primeiro escalão.
3. A política de estoque $(s-1, s)$ é apropriada para cada item em cada escalão. Neste contexto, Sherbrooke (2004) que o segundo termo s , lote de compra, para peças reparáveis é próximo de um pela relação da demanda e custo. Assim, a política de estoque $(s-1, 1)$ é válida.
4. Os níveis ótimos de estoque no estado estacionário são determinados. A premissa é que o número de aeronaves ou horas de voo permanecerão razoavelmente consistentes por um período de tempo no futuro.

Segundo Sherbrooke (2004), o depósito nem sempre tem estoque suficiente para atender uma demanda quando um pedido de reabastecimento é recebido das bases. O modelo *METRIC* considera esse atraso do depósito nas bases que dependem dos níveis de estoque do depósito. Os pedidos em aberto podem ser considerados em cada base, já que dependem do atraso de reabastecimento do depósito e do nível de estoque na base.

Primeiramente, é calculada a demanda média m_{i0} do item i no depósito, e isso é apenas uma fração da demanda do item que não é reparado em cada base, somado às J bases. A demanda média da peça i no depósito é expressa como:

$$m_{i0} = \sum_{j=1}^J m_{ij}(1-r_{ij}) \quad (12)$$

Onde m_{ij} é a demanda média anual da peça i na base j e r_{ij} é a probabilidade de reparar a peça i na base j . Assumindo a demanda como um processo de Poisson e utilizando-se do teorema de Palm (SHERBROOKE, 2004 *apud* PALM, 1938), é possível deduzir o número esperado de pedidos em aberto no depósito $EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0})$ como:

$$EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0}) = \sum_{x=s_{i0}+1}^{\infty} (x-s_{i0})P(DI = x), \quad DI \sim \text{Poisson}(m_{i0}T_{i0})$$

$$EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0}) = m_{i0}T_{i0} - s_{i0} + \sum_{x=0}^{s_{i0}} (s_{i0} - x) P(DI = x) \quad (13)$$

Onde $m_{i0}T_{i0}$ é número médio de peças em reparo no depósito, T_{i0} é o tempo médio de reparo da peça i no depósito, e s_{i0} é o estoque da peça i no depósito.

Se a base j tem sempre a capacidade de reparar a peça i , então o número médio de peças em reparo, μ_{ij} , é dado por $m_{ij}T_{ij}$, onde T_{ij} é o tempo médio de reparo da peça i na base j . No entanto, havendo limitações no processo de reparo nas bases, o número médio da peça i em processo reparo em cada base j é expresso por:

$$\mu_{ij} = m_{ij} \left[r_{ij}T_{ij} + (1-r_{ij}) \left(O_j + \frac{EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0})}{m_{i0}} \right) \right], \quad j > 1 \quad (14)$$

Nesse contexto, O_j é o tempo médio de reabastecimento entre o depósito e a base j . Assim sendo, o número esperado de pedidos em aberto da peça i na base j é dado por:

$$EBO(s_{ij}|\mu_{ij}) = \mu_{ij} - s_{ij} + \sum_{x=0}^{s_{ij}} (s_{ij} - x) P(DI = x), \quad DI \sim \text{Poisson}(\mu_{ij}) \quad (15)$$

A Equação 15 assume que a quantidade x de peças em processo de reparo segue uma distribuição de Poisson com valor médio esperado de μ_{ij} . Portanto, o EBO depende do nível de estoque na base, s_{ij} , e do nível de estoque no depósito, s_{i0} .

Neste contexto, a disponibilidade, A_{sis} , é maximizada para todas as localidades, depósito e bases. A Equação 11 é modificada a partir da disponibilidade em uma única base anexando j para indicar a localidade específica.

$$A_{sis} = \frac{\sum_{j=1}^J A_j N_j}{\sum_{j=1}^J N_j} \quad (16)$$

2.4.5 VARI-METRIC

Segundo Sherbrooke (2004), no modelo VARI-METRIC é feita uma abordagem na qual é aprimorado o cálculo do EBO. O VARI-METRIC é uma modelo de segunda ordem, pois são incorporados dois parâmetros no cálculo do EBO, a média e a variância para o número de peças no processo de reparo.

No modelo METRIC é assumido que o número médio de peças em reparo ou reabastecimento segue uma distribuição de Poisson. No modelo VARI-METRIC, por outro lado, é assumido que o número médio de peças em reparo ou reabastecimentos de uma base, em qualquer ponto do tempo, segue uma distribuição Binomial Negativa.

Dessa forma, o número médio de peças em reparo, μ_{ij} , é apresentado na Equação 17. A Equação 18 é a variância de uma variável aleatória x_{ij} e f_{ij} , na Equação 19, é a fração de todos os reabastecimentos do depósito que está indo para a base j .

$$\mu_{ij} = E[x_{ij}] = m_{ij} [(1 - r_{ij})O_j + r_{ij}T_{ij}] + f_{ij} \cdot EBO(s_{i0}) \quad (17)$$

$$\text{Var}[x_{ij}] = m_{ij} [(1 - r_{ij})O_j + r_{ij}T_{ij}] + f_{ij} (1 - f_{ij}) EBO(s_{i0}) + f_{ij}^2 VBO(s_{i0}) \quad (18)$$

$$f_{ij} = \frac{m_{ij}(1 - r_{ij})}{m_{i0}} \quad (19)$$

$EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0})$ é a quantidade esperada de pedidos em aberto no depósito e $VBO(s_{i0})$ é a variância no depósito onde com y unidades são reparadas no depósito. Ambas funções são apresentadas nas Equações 20 e 21 respectivamente.

$$EBO(s_{i0}|m_{i0}T_{i0}) = m_{i0}T_{i0} - s_{i0} + \sum_{x=0}^{s_{i0}} (s_{i0} - y) P(DI = y) \quad DI \sim \text{Poisson}(m_{i0}T_{i0}) \quad (20)$$

$$VBO(s_{i0}) = \text{Var}[Y] + (E[Y] - s_{i0})^2 - \sum_{y=0}^s (y - s_{i0})^2 P(Y = y) - EBO(s_{i0})^2 \quad (21)$$

Com a média e a variância calculadas a partir das Equações 17 e 18, os dois parâmetros, r e p , da Binomial Negativa (BN) para x_{ij} são definidos como:

$$r = \frac{E[x_{ij}]^2}{\text{Var}[x_{ij}] - E[x_{ij}]} \quad (22)$$

$$p = \frac{E[x_{ij}]}{\text{Var}[x_{ij}]} \quad (23)$$

Onde a distribuição BN é dada por:

$$BN(x|r, p) = \binom{x+r-1}{x} p^r (1-p)^x \quad (24)$$

Portanto, a equação para a quantidade esperada de pedidos em aberto nas bases é modificada como na Equação 25. Onde μ é igual à $E[x_{ij}]$ e s é igual à s_{ij} número de peças i armazenadas na base j .

$$EBO(s|\mu) = \mu - s + \sum_{x=0}^s (s-x) P(X = x) \quad (25)$$

2.4.6 Sistemas Contemporâneos (*Softwares*)

A empresa sueca Systecon AB tem desenvolvido desde a década de 70 o *software* OPUS10 (SYSTECON, 2018) para otimização de fornecimento de peças de reposição para sistemas complexos e soluções de suporte logístico através da entrada de parâmetros de

suportabilidade. Esses parâmetros de entrada podem ser agrupados em três conjuntos, sendo as características técnicas do sistema, as informações de operação dos sistemas complexos e estrutura de suporte logístico.

Todos os parâmetros de entradas são tratados simultaneamente na otimização para gerar as soluções possíveis para o modelo adotado. Dessa forma, o elemento central da otimização do OPUS10 (SYSTECON, 2018) é a apresentação dos resultados por meio da curva de custo-benefício relacionada à disponibilidade operacional e ao investimento em peças de reposição como ilustrado na Figura 5 anteriormente. A Figura 6 representa os dados usados como entrada na ferramenta e a forma de apresentação do resultado.

Os atributos e dados de entrada são carregados no *software* de acordo com as diversas tabelas atribuídas para cada agrupamento de dados. As tabelas são organizadas em: parâmetros de controles globais; dados técnicos dos sistemas complexos e seus equipamentos; organização das localidades e tempos logísticos; operação e alocação dos sistemas complexos; e tempos dos processos manutenção dos sistemas complexos e dos equipamentos.

Blanchard e Blyler (2016) apontam o *software* OPUS10 (SYSTECON, 2018) como versátil principalmente para a otimização de estoque de peças de reposição e alternativas de reparo. Ainda, segundo mesmos os autores (2016), a ferramenta pode considerar diferentes cenários operacionais e perfis de utilização dos sistemas complexos na determinação de padrões de demanda para peças de reposição, além de auxiliar na avaliação de diversos arranjos de bases aéreas e frota. Alternativas de políticas de suporte e estrutura de localidades podem ser avaliadas com base na relação de custo-benefício.

Ainda, Blanchard e Blyler (2016), apontam também o *software* VMetric® (TFD GROUP, 2019) como outra ferramenta usada para otimizar a disponibilidade de sistemas complexos através de um modelo de peças sobressalentes, determinando as disponibilidades individuais adequadas para os componentes do sistema e os requisitos de estoque nos escalões de manutenção. As saídas incluem os níveis ideais de estoque em cada escalão de manutenção, quantidades econômicas de pedidos e intervalos ideais para novos pedidos.

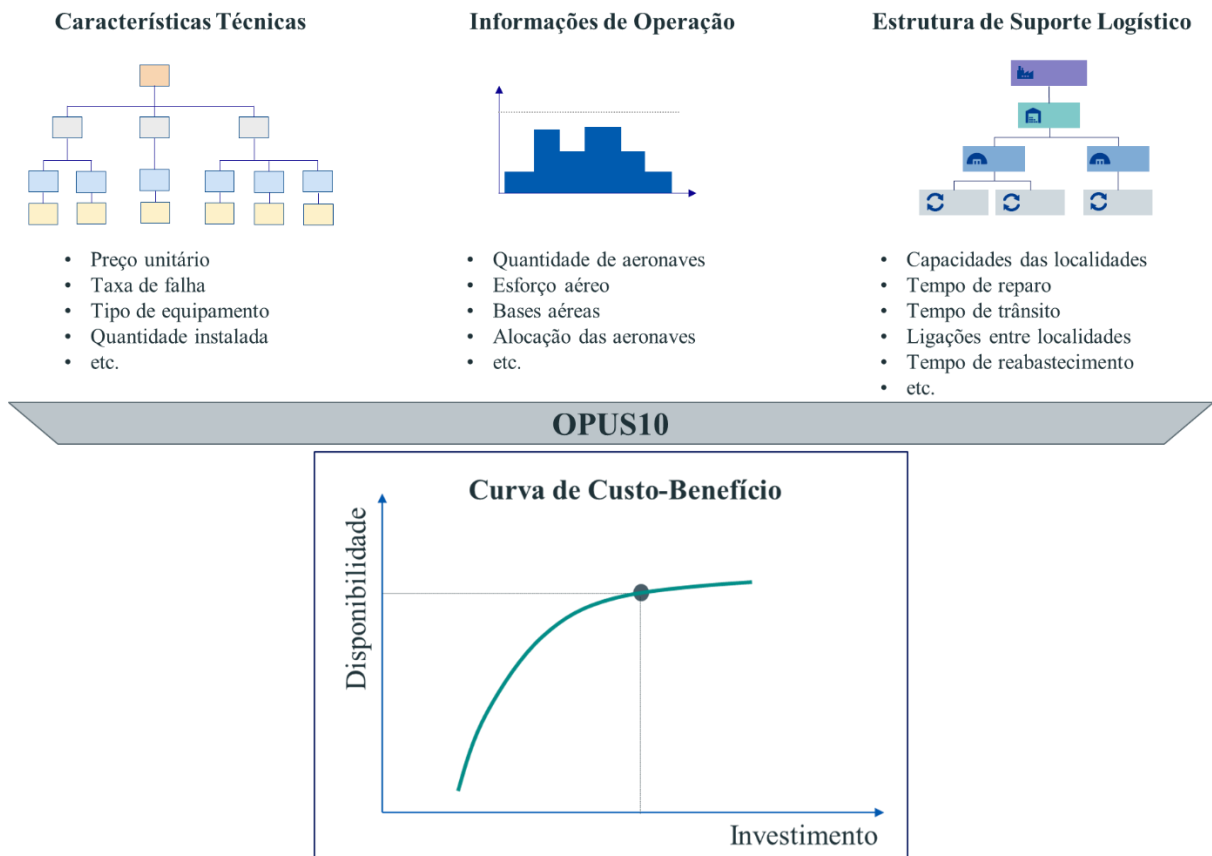


Figura 6 - Entradas e resultado gerado pelo *software* OPUS10 (Fonte: Autor).

Sherbrooke (2004) afirma que a teoria do VARI-METRIC está incorporada no *software* OPUS10 (SYSTECON, 2018). Este modelo tem sido usado extensivamente na Europa por fabricantes de aeronaves e várias forças aéreas da OTAN. O VARI-METRIC tem sido usado também por centenas de fabricantes nos Estados Unidos, particularmente aqueles envolvidos com aeronaves e sistemas relacionados.

De acordo com Hallin (2015), o OPUS10 (SYSTECON, 2018) é construído com base na assunção de modelo matemático no estado-estacionário, o que significa que todas as taxas de demanda e outras condições são mantidas constantes no período de tempo atribuído.

Dessa forma, a confiabilidade por aeronave poderá causar o aumento ou diminuição da demanda por peças de reposição, logo, essa entrada também é modelada no estado-estacionário. Além disso, o modelo do OPUS10 (SYSTECON, 2018) não trata explicitamente a modelagem de comportamento de confiabilidade por aeronave. Contudo, existem alternativas de modelagem para ajustes nas taxas de demandas por aeronave para abordar o objetivo deste trabalho.

2.4.7 Trabalhos Abordando Modelo Multi-Escalão

Modelos multi-escalão têm sido de interesse acadêmico, de acordo com Kok *et al.* (2018), devido às diversas abordagens e formas de orientar a tomada de decisão, buscando a combinação de melhor desempenho da cadeia de suprimentos ao menor custo possível. Vários trabalhos têm sido conduzidos neste campo de pesquisa, contudo, tratando diferentes nuances do gerenciamento de estoque pela abordagem multi-escalão. Contudo, as pesquisas tratam os aspectos e desenvolvem soluções voltadas à estrutura logística e não tratam os sistemas e produtos nelas inseridas de forma individualizada.

Em sua pesquisa, Sheikh-Zahed e Rossetti (2020) propõem um modelo de classificação de inventário multi-escalão baseado na incorporação direta de uma política de inventário e medidas de desempenho no modelo de classificação. Neste sentido, o resultado do modelo VARI-METRIC é tratado através de um critério de classificação nomeado política de estocagem artificial (ASP), do inglês *artificial stocking policy*. Em seguida, os mesmos autores, em 2020, propõem metodologia de classificação linear ponderada para converter os “ASPs” multidimensionais em um único critério, denominado *ASP-score*. A proposta desse trabalho atingiu resultados satisfatórios e com facilidade para implantações.

Sheikh-Zahed, Farhangi e Rossetti (2020) definem uma nova variação do VARI-METRIC com o objetivo de encontrar a melhor solução de agrupamento de estoque. Isso ocorre com base na minimização do número total de pedidos em aberto esperados, atribuindo políticas de estoque agregadas para cada grupo de item. O problema é classificado como um problema de programação não-linear inteiro mista (MINLP), do inglês *mixed-integer nonlinear programming*, onde a não linearidade aparece tanto nas funções objetivo quanto nas restrições. A principal contribuição e inovação desse trabalho é formação de grupos para os itens com políticas de estoque semelhantes para a otimização do estoque.

Johansson *et al.* (2020) aplicam um modelo de custo de pedidos em aberto para buscar a melhor relação entre os custos logísticos (expedição de material) e os custos de carregamento do estoque. O objetivo é determinar os melhores intervalos de abastecimento e o estoque de segurança na relação entre o fabricante e os varejistas, minimizando o custo total. Para estabelecer as demandas, utilizam a abordagem de Poisson composto por meio de uma solução heurística. O resultado mostrou melhorias em relação à redução dos custos dos pedidos em aberto e o nível de serviço quando usado os mesmos intervalos de expedição.

Saragih *et al.* (2019) desenvolvem um método heurístico para tratar uma estrutura de três escalões onde três entidades, fornecedor, armazéns e varejistas, são envolvidos na tomada

de decisão sobre o inventário. O método consiste em dois estágios, construtivo e melhoria. O primeiro gera a solução inicial e em seguida, melhorias iterativas ocorrem por meio de *simulated annealing* para modificação das localidades, estoque e logística. As soluções das instâncias são comparadas ao modelo de programação não-linear inteiro mista. A solução pode trazer expressiva melhoria na disponibilidade.

Costantino *et al.* (2018) elaboram o modelo ZIP-METRIC para aumentar a precisão da estimativa de demandas irregulares onde há um prolongado intervalo de tempo entre um evento e outro. O modelo com alta intermitência usa a distribuição ZIP, abreviação do inglês *Zero-Inflated Poisson*. O modelo ZIP é baseado na mistura da distribuição de Poisson e da distribuição Binomial degenerada em zero, particularmente adequada para modelar demandas com intermitência. Os resultados demonstraram que a abordagem tradicional de Poisson não é tão acurada em caso com alta irregularidade no padrão de demanda.

Patriarca, Costantino e Gravio (2016) elaboram um modelo baseado no METRIC onde aplicam o abastecimento lateral, do inglês *lateral transshipment*, unidirecional entre as localidades de mesmo nível em uma estrutura multi-escalon. Os autores têm por objetivo desenvolver um sistema para gerenciar de forma eficiente o fornecimento lateral de peças, reduzindo os custos e aprimorando a disponibilidade. Nos casos onde a análise marginal não gera soluções robustas e confiáveis, o uso de algoritmo genético ocorre, permitindo um processo de otimização inteira não-linear.

O modelo PBC-METRIC proposto por Patriarca *et al.* (2016) trazem a abordagem multi-escalon no contexto de companhias aéreas para a urgência no abastecimento de materiais. PBC é uma abreviação, do inglês *Performance-Based Contract* (PBC), na qual apresenta uma relação direta entre o fornecedor, estoque e capacidades de oficina de reparo, e o operador, estoque e alocação de kits de peças. As condições de transporte são trazidas para esse modelo de acordo com duas condições, pedido regular e pedido rápido (crítico). Com base nos modos de transporte, a contribuição está em identificar os itens mais relevantes que devem ser mantidos em estoque no contexto de um contrato PBC.

Wikander (2016), pesquisa os efeitos das atuais premissas adotadas para modelo VARI-METRIC quando usada demanda de manutenção preventiva. Dessa forma, foram propostas duas abordagens para refinar o modelo, usando primeiramente um fator nomeado de fator de coordenação de manutenção preventiva (PMCF), do inglês *Preventive Maintenance Coordination Factor*, para refinar o resultado das demandas. Outra abordagem foi adotar no modelo a distribuição Binomial. A abordagem pelo fator PMCF pode ser bastante eficaz, mas

apresenta complicações em como determinar os valores para o PMCF. Já a abordagem pela distribuição Binomial trouxe resultados precisos, porém, requer o conhecimento das variâncias.

Em seu trabalho, Hallin (2015), estuda o problema de modelagem de peças sobressalentes com vida-útil limitada e predefinida em um cenário de estado estacionário. O objetivo de seu trabalho foi analisar o uso da informação de vida-útil das peças no cenário da vida real e investigar quais modelos elaborados diferentes usuários utilizariam. Também, é proposto analisar as consequências dos modelos aproximados e investigar a possibilidade de um modelo aprimorado. De acordo com Hallin (2015), em sua conclusão, o modelo mais adequado é por meio da modelagem considerando intervalos de manutenção preventiva com o descarte do material em cada período. Além disso, se o limite de vida-útil for medido em tempo de calendário, mesmo a melhor aproximação, dará uma subestimação do número esperado de pedidos em atraso.

Pek (2013) desenvolve sua pesquisa através de um modelo de programação não-linear que combine a otimização da disponibilidade e dos recursos de sustentabilidade para atender os requisitos dinâmicos no cenário de operação e suporte da Força Aérea de Cingapura. Um modelo de conversão de perfil operacional dinâmico exclusivo foi desenvolvido para realizar esses recursos na solução combinada. O modelo atingiu precisão esperada para modelar as variações de componentes de forma dinâmica e agilidade de processamento.

Tracht, Hagen e Schneider (2013) apresentam um método de planejamento de estoque de peças de reposição aplicado às companhias aéreas usando um modelo de simulação de eventos discretos. O objetivo foi otimizar os níveis de estoque em uma estrutura de dois escalões considerando vários parâmetros de planejamento, tais como limitações de orçamento e níveis de estoque.

Costantino, Gravio e Tronci (2013) aplicam o VARI-METRIC na alocação de peças em um estudo de caso com dados da Força Aérea Italiana, minimizando os pedidos em aberto dos equipamentos da aeronave (LRU) e dos componentes desses equipamentos. Esses componentes também são denominados SRU, do inglês *shop replaceable unit*. O trabalho aplica uma proposta de análise marginal com intuito de garantir uma elevada disponibilidade e atender o plano de voo real.

O modelo proposto por Fritzsche (2012) é uma extensão de modelos estáticos de estoques compartilhados entre companhias aéreas por meio da implantação de uma taxa de falha dinâmica, usando o período operacional livre de manutenção (MFOP), do inglês *maintenance free operating period*, como técnica de medição para aumentar disponibilidade dos materiais. O objetivo é minimizar os custos existentes no processo de intercâmbio das peças em um

estoque compartilhado por companhias aéreas, sendo ele alcançado em função da adaptação feita.

A Tabela 2.1 contém os trabalhos descritos anteriormente e posiciona este trabalho em relação a eles. São apresentados os diferentes parâmetros e restrições utilizados pelos autores quando é calculado o nível ótimo do estoque. Alguns parâmetros são específicos para o caso sendo estudado. Outros parâmetros são usados em todos ou na maioria dos trabalhos. Todos os modelos estão empenhados em otimizar o nível de estoque de peças de reposição e em sua maioria peças reparáveis (LRU) devido à redução dos custos ou ao aumento da disponibilidade dos sistemas.

Breves explicações são dadas aos parâmetros encontrados na Tabela 2.1:

- Nível de estoque (1): quantidade de peças distribuídas nos estoques de cada base.
- Preço da peça (2): valor de compra de uma peça nova.
- Taxa de falha (3): é definida como o número total de falhas ocorridas durante um intervalo de tempo específico (BLANCHARD; BLYLER, 2016).
- Tempo logístico (4): é o tempo de transporte entre uma localidade e outra, podendo ser a relação de localidades em escalões diferentes ou no mesmo escalão.
- Tempo de reparo (5): é o tempo necessário para uma oficina ou fabricante reparar uma peça reparável com falha ao seu estado de operação de acordo com os requisitos de projeto.
- Tempo médio de inatividade (6): é o tempo médio necessário para executar a manutenção na aeronave, considerando o tempo para investigação da pane, remoção da peça falhada e instalação da peça operacional.
- Comportamento das aeronaves (7): fator atribuído individualmente a cada aeronave da frota de acordo com as respectivas confiabilidades. Não é abordado o comportamento dos componentes diretamente.
- Pré-alocação das aeronaves (8): base aérea que cada aeronave deverá estar alocada para cálculo dos níveis de estoque.

Diversos aspectos são possíveis de serem abordados nos modelos multi-escalão, como transporte, estoque, manutenção e diversos outros aspectos desse processo. Devido à abrangência do gerenciamento de estoque, o modelo demonstra flexibilidade às características dessa operação em tratar parte específicas do processo. Nesse sentido, é observado nos trabalhos a aplicação das peculiaridades que um mercado ou uma indústria específica possui.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para tratar e modelar a relação entre disponibilidade operacional e investimento em estoque considerando o comportamento de cada aeronave. É apresentado o método utilizado com a proposta de um avanço em relação aos modelos atuais. São apresentados também o modelo conceitual estruturado, as premissas e o modelo proposta propriamente.

3.1 Método

A presente seção apresenta a proposta de uma nova abordagem metodológica para ajustar as demandas por peça de reposição a partir do comportamento de cada aeronave. Esse refinamento é obtido através da identificação do comportamento de confiabilidade de cada aeronave da frota investigada. Essa confiabilidade é gerada com bases em parâmetros coletados de eventos de falha e horas de voo acumuladas em um intervalo de tempo determinado.

Com isso, o refinamento da demanda é usado para alimentar um modelo de otimização de suportabilidade com ênfase no estoque de peças de reposição. O método proposto permite aprimorar a relação de custo-benefício entre disponibilidade operacional e investimento em peças de reposição a partir do uso da confiabilidade de cada aeronave. As confiabilidades de cada aeronave são informações valiosas para apoiar a tomada de decisão relativa à alocação das aeronaves nas bases aéreas e ao respectivo gerenciamento dos estoques distribuídos de peças. A previsão da demanda é um fator relevante para ter um desempenho adequado no gerenciamento de estoques.

O método proposto considera que cada aeronave apresenta um diferente comportamento de confiabilidade e isso é desdobrado às falhas de seus equipamentos embarcados. Com isso, a previsão de demanda por peças passa ser feita com base na condição da confiabilidade de cada aeronave, ao invés de ser feita com base em dados estatísticos (médios) do histórico da frota como um todo. Essa característica do modelo pode proporcionar um gerenciamento mais eficiente dos estoques de peças de reposição, bem como pode permitir o gerente da frota alocar as aeronaves de forma mais assertiva nas bases aéreas.

3.2 Modelo Conceitual

Este trabalho teve três fases distintas de desenvolvimento como observado na Figura 7. Para isso, o modelo de Banks *et al.* (2010) orienta as etapas de metodologia de pesquisa utilizadas neste trabalho. Primeiro, na fase de definição, após a observação dos fatos e o levantamento da hipótese, o problema de pesquisa é declarado e os objetivos são definidos para direcionar quais questões devem ser respondidas. A coleta de dados dos parâmetros de manutenção, operação e logística é feita para auxiliar na definição dos parâmetros de entrada do modelo. Simultaneamente, as equações de gerenciamento de estoque são analisadas para dar sentido às suas aplicabilidades ao contexto da suportabilidade da frota. Além disso, é entendido o mecanismo do modelo tradicional para entender quais variáveis afetam na conceituação do modelo proposto.

Na fase de desenvolvimento, três etapas ocorrem na continuação da pesquisa, iniciando o desenvolvimento do modelo proposto, a realização de testes no modelo e por fim, a elaboração dos experimentos. Inicialmente, é feita a identificação das aeronaves que podem apresentar comportamento destoante na frota com base no histórico de manutenção de cada aeronave (eventos de falha) e histórico de horas de voo acumulada (operação). Também, é elaborado o modelo proposto, considerando as mudanças de parâmetros que permitirão o seu aprimoramento. São feitos os testes no modelo considerando algumas observações para verificação da proposta. Por fim, são estabelecidos os experimentos para aplicação das estratégias nas instâncias definidas.

Finalmente, na fase de implantação, o modelo proposto é executado nas instâncias e no estudo de caso seguindo as estratégias definidas e os resultados são apresentados em relação às métricas de suportabilidade e investimento. Também, são apresentadas as análises, mostrando as relações extraídas dos resultados do modelo. Por fim, o trabalho é concluído com as recomendações para implantação do modelo desenvolvido, bem como são indicadas futuras oportunidades de pesquisa.

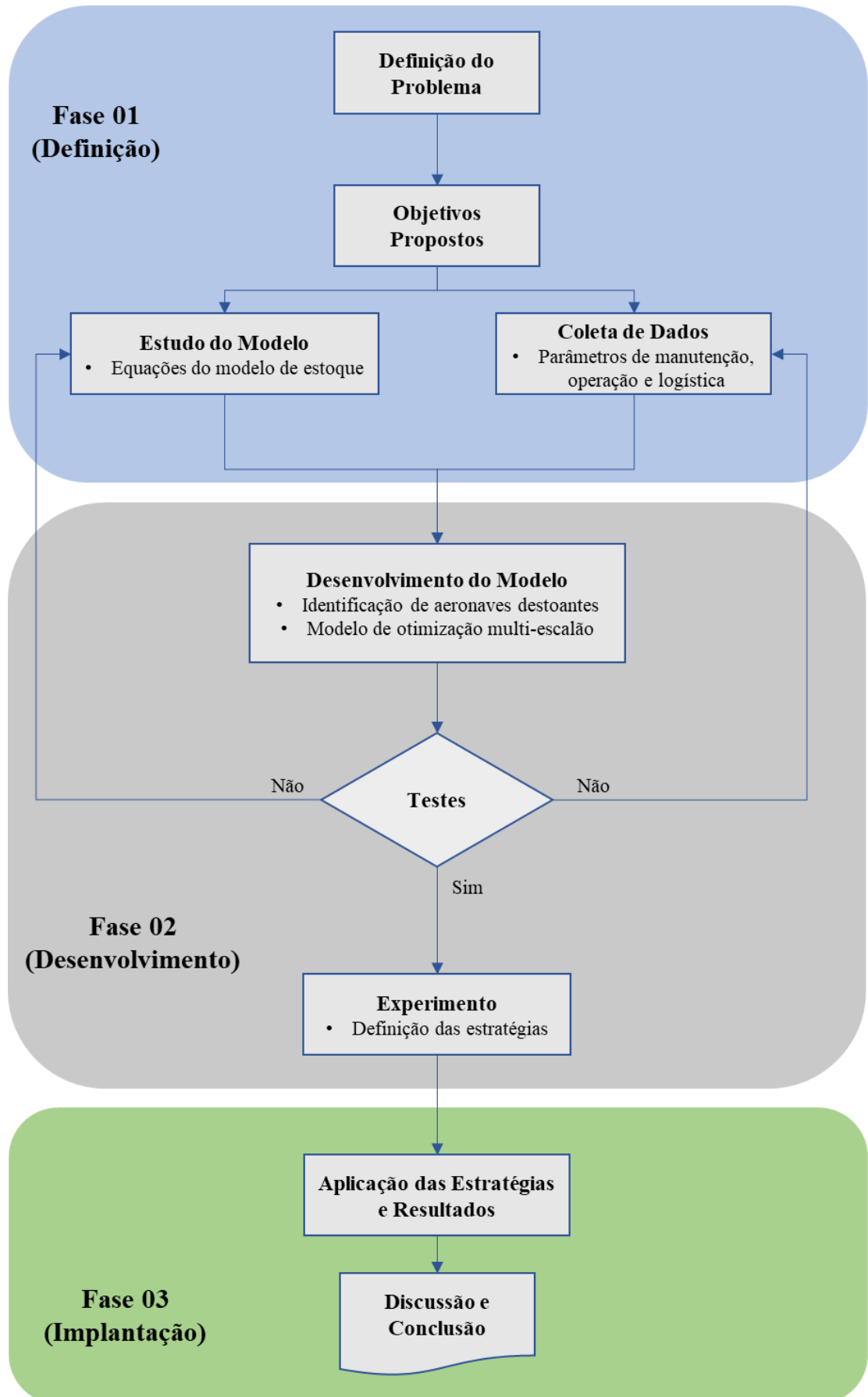


Figura 7 - Etapas metodológicas (Fonte: Adaptada de Banks *et al.*, 2010)

3.3 Premissas do Modelo

Variados fatores podem influenciar a modelagem para otimização do investimento em estoque relacionado à disponibilidade operacional. Várias premissas são importantes para focar no esforço deste trabalho. O principal propósito é trazer ao modelo o fator da confiabilidade associada à cada aeronave de uma frota específica, bem como atribuir alternativas de alocação para as aeronaves.

Para a compreensão adiante do modelo, o depósito central é declarado como base aérea principal e os depósitos locais são declarados como bases aéreas remotas. As premissas assumidas para implantação do modelo proposto são listadas a seguir.

- O modelo proposto considera um escopo limitado e representativo de equipamentos reparáveis (LRU). Os equipamentos foram escolhidos com base nos sistemas mais críticos e com maior histórico de falhas das aeronaves, sendo eles: sistema de ar condicionado, sistema elétrico, sistema de comandos de voo, sistema hidráulico, sistema de trem de pouso, sistema pneumático e sistema da unidade auxiliar de energia.
- Considerou-se que todos os componentes reparáveis de uma aeronave destoante sofrem o mesmo aumento proporcional na sua taxa de falha, ou seja, todos os reparáveis de uma aeronave destoante, destoam igualmente quando comparados com uma aeronave padrão.
- Os equipamentos em questão não sofrem descarte e não têm vida-limite de uso. Sempre que uma falha ocorre, o equipamento falhado é enviado para a oficina de reparo e disponibilizado no estoque em seu estado operacional novamente.
- O modelo é composto por dois escalões. O primeiro escalão contém as bases aéreas remotas e o segundo escalão contém a base aérea principal.
- Todas as bases aéreas têm seus próprios estoques de peças de reposição. As bases aéreas remotas são reabastecidas somente pela base aérea principal. Portanto, não existe o abastecimento lateral no primeiro escalão.
- A política de estoque $(s-1, 1)$ é assumida para todos os equipamentos em todas as bases aéreas, o que significa que tais itens não são agrupados para o processo de reparo e as unidades são reabastecidas de uma em uma no estoque novamente.
- O custo direto dos equipamentos (investimento em estoque) é parte do foco principal deste estudo, bem como a disponibilidade operacional. Assim, os custos indiretos,

como, por exemplo, custo de armazenamento, custo de transporte e custos de mão-de-obra, não são considerados. Isso garante que apenas o principal direcionador de custo seja analisado.

- Os tempos de transporte (reabastecimento) entre as bases aéreas remotas e a base aérea principal são conhecidos e constantes para ambos os sentidos de deslocamento, seja no trânsito entre base aérea principal e bases aéreas remotas e vice-versa.
- Somente a base aérea principal possui capacidade de oficina de reparo dos equipamentos, tendo as capacitações de segundo e terceiro nível de manutenção.
- Todos os equipamentos falhados são direcionados somente para a base aérea principal para passarem pelo processo de reparo.
- Os tempos de reparo da oficina são conhecidos e constantes.
- Se ocorrer um evento de falha em alguma base aérea e não existir peça de reposição em estoque, é aguardado até que uma peça de reposição em reparo retorne da oficina e seja disponibilizada no estoque da base aérea principal ou da base aérea remota em questão.
- Todas as bases aéreas têm as mesmas capacidades e condições de operação da frota, bem como todas as bases aéreas têm as mesmas condições e capacidades de primeiro nível de manutenção das aeronaves.
- Os tempos de manutenção das aeronaves são conhecidos e constantes para todas as bases aéreas.
- Presume-se que apenas a manutenção corretiva afeta o desempenho geral de disponibilidade operacional do sistema. Devido à sua previsibilidade inerente e, portanto, às possíveis diferenças nas políticas de estocagem, a manutenção preventiva não é considerada como tendo qualquer efeito nas probabilidades de falha dos equipamentos.
- As falhas são consideradas independentes. Um defeito associado a qualquer equipamento não afeta a probabilidade de falha de outro equipamento no mesmo sistema ou em outros sistemas da aeronave.
- Fatores ambientais, como, por exemplo, clima quente, e fatores de infraestrutura, como, por exemplo, pistas não pavimentadas, não são motivadores das falhas.

- Os efeitos de manutenção, como, por exemplo, canibalização, restrições de mão-de-obra e ferramentas, não são considerados. O foco está nos efeitos de fornecer a disponibilidade da frota.
- As aeronaves têm o mesmo perfil operacional (utilização) em termos de horas de voo por ano independente da base aérea em que esteja alocada. Além disso, as aeronaves são do mesmo modelo.
- As aeronaves iniciam as suas operações (missões) e retornam para a mesma base aérea de origem.
- São conhecidas e constantes a condição destoante das aeronaves identificadas nesta situação.
- Não são considerados sobressalentes e SRU, como, por exemplo, parafusos, porcas, arruelas, gaxetas, e rebites, no modelo devido aos seus custos e pelas políticas de estocagem específicas, tendo variações em seus lotes mínimos de compra e pontos de pedido em decorrência de seus custos menores quando comparados aos equipamentos reparáveis.

3.4 Modelo Proposto

A seguir é apresentada a maneira adotada para identificar as aeronaves com confiabilidade destoante às demais da frota. Também é apresentado o modelo proposto de suportabilidade baseado no gerenciamento de estoque. Este modelo permite obter a relação de custo-benefício entre o investimento em estoque e a disponibilidade operacional da frota considerando o comportamento de cada aeronave.

3.4.1 Identificação das Aeronaves Destoantes

A partir da hipótese que uma frota de aeronaves pode ter alguns indivíduos com comportamento de confiabilidade destoante às demais, esta seção endereça o processo de identificação das aeronaves com comportamento destoante.

Inicialmente, são coletados os dados de manutenção e operação das aeronaves de um único modelo de todos os operadores contidos em ambas as bases de dados. Nesse contexto, é levantado para cada aeronave o histórico de falhas dos equipamentos e as horas de voo acumuladas desde o início de suas operações pelo usuário-final (operador). As informações

coletadas de manutenção e operação correspondem ao mesmo intervalo de tempo para que os dados sejam tratados exatamente no mesmo período selecionado para as análises.

Os dados de manutenção referentes ao histórico de falha contêm as quantidades de eventos de falha ocorridos em diversos equipamentos reparáveis. Esses eventos ocasionaram atividades de manutenção corretiva em cada aeronave específica. Cada equipamento falhado é analisado por seu número de peça, do inglês *part number* (PN), e o número de cauda (*tail number*) da aeronave em manutenção.

Essa base de dados contém somente o histórico dos equipamentos reparáveis para as operações das aeronaves, logo, peças descartáveis não fazem parte desse escopo. Contudo, desta base de dados de manutenção, são removidos os eventos de remoção de equipamentos cujo motivo foi manutenção preventiva, eventos de canibalização de peças e casos onde não houve falha encontrada após testes em oficina.

Da mesma forma, os dados de operação contêm as informações históricas das aeronaves por número de cauda. Essa base de dados tem o total de horas de voo operadas por mês de cada número de cauda desde o início de suas atividades no ambiente real de operação. Para isso, somente aeronaves na condição operacional (em serviço) são mantidas na análise, visando garantir as aeronaves que ainda produzem dados consistentes sobre suas operações. Nesse sentido, são removidas aeronaves na condição de preservação, aeronaves de reposição (*sparcs*), fora de serviço temporariamente e em processo de desfazimento.

Após os tratamentos executados em ambos conjuntos de dados, o período de tempo é estabelecido para que sejam feitos os cálculos do número total de remoções ocorridas por falhas para cada aeronave, bem como é calculada as horas acumuladas de voo produzida por cada número de cauda. O período de tempo definido permite que o número total de falhas seja correspondente ao mesmo intervalo das horas de voo acumuladas de cada aeronave.

Da Equação 1, é calculada, então, a taxa de falha para cada aeronave com base no número total de falhas dos seus equipamentos e no total de horas de voo acumuladas em um mesmo intervalo de tempo. Esse cálculo é feito para todos os números de cauda que estão na condição de serviço. Com isso, os dados são analisados em função da distribuição dos resultados de cada aeronave.

Para a distribuição obtida, o conjunto de dados é dividido em quartis e são analisadas as posições nos quartis de cada taxa de falha correspondente a cada número de cauda de aeronave. Com a determinação desses subconjuntos, algumas aeronaves ficam com as taxas de falha posicionadas acima do limite superior estabelecido, sendo valores discrepantes, do inglês *outliers*, às demais aeronaves da frota. O limite superior é definido pelo resultado do 3º quartil

somado a multiplicação da constante 1,5 e a amplitude interquartil. Portanto, a premissa adotada para atribuir quais aeronaves têm desempenho de confiabilidade destoantes às demais da frota, são os números de cauda cuja taxa de falha tem o resultado acima do limite superior.

A fim de ter uma análise específica, os dados também são avaliados pelos números de cauda de operadores específicos. Isso pode minimizar impactos pelos aspectos peculiares de cada perfil de operação e manutenção como, por exemplo, aspectos de capacidades de manutenção entre um operador e outro, aspectos de novos operadores daquele modelo de aeronaves e até mesmo, os aspectos ambientais diversificados entre operadores de uma região com clima tropical e outros de clima árido. Por fim, com as taxas de falha obtidas, é feita uma normalização dos dados para que sirvam de entrada no modelo proposto. A Figura 8 apresenta as etapas realizadas na identificação das aeronaves com comportamento destoante.

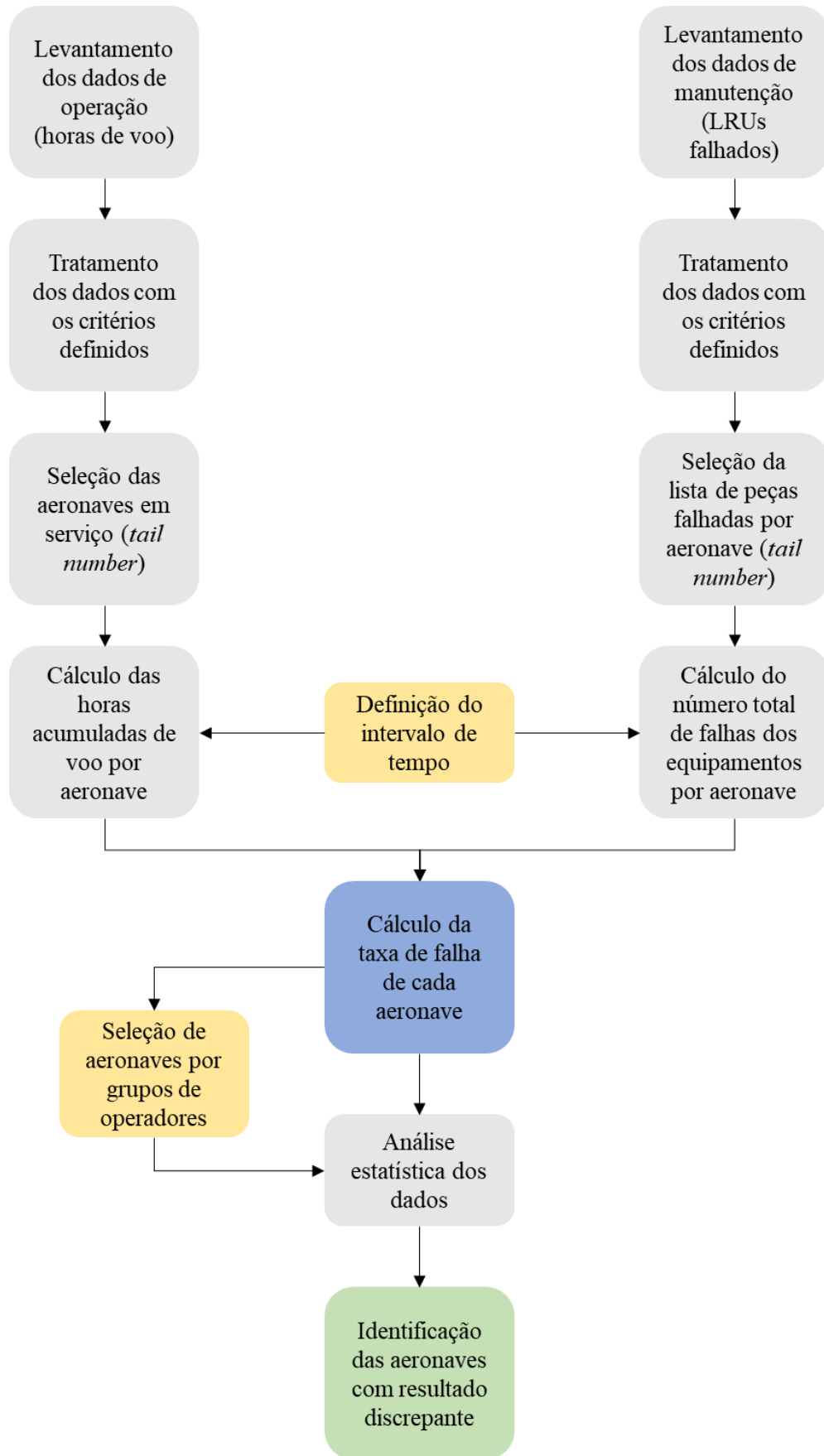


Figura 8 - Etapas de análise dos dados coletados (Fonte: O autor).

3.4.2 Descrição Matemática do Modelo

Conforme anteriormente relatado, a base desta pesquisa foi o modelo analítico VARI-METRIC proposto por Sherbrooke (1986) para endereçar o problema de suportabilidade de uma frota de aeronaves. A disponibilidade operacional é a métrica de suportabilidade associada ao problema e o modelo multi-escala permite relacionar essa métrica em função do investimento em peças de reposição. A modelagem original adota como entrada valores médios de taxa de falha para a frota toda em questão.

A modelagem do problema é composta por conjuntos de dados de entrada consistindo em informações técnicas dos equipamentos da aeronave, estrutura organizacional de suporte e aspectos de operação e manutenção do operador. As informações inerentes aos equipamentos são definidas para análise de investimento das peças de reposição que afetam diretamente a disponibilidade. A Figura 9 explicita as etapas necessárias de carregamento dos dados de entrada no modelo.

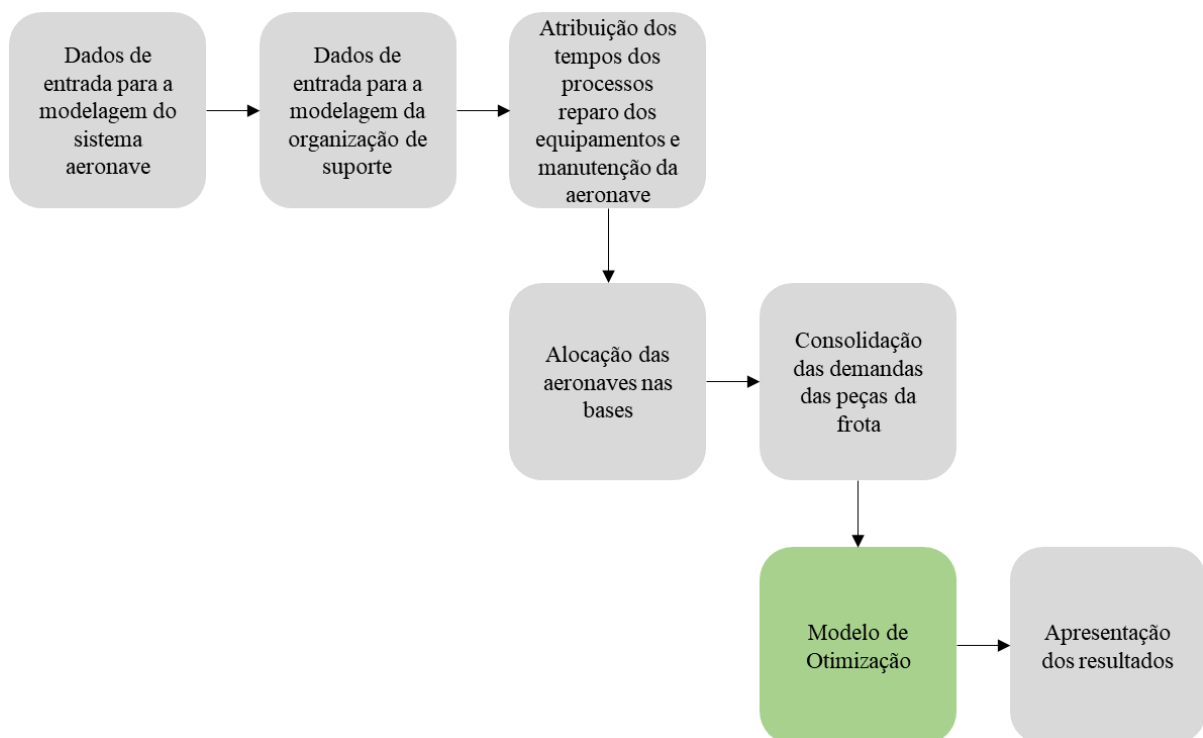


Figura 9 - Etapas de entrada do modelo básico (Fonte: O autor).

No modelo básico, com uso simplesmente da taxa de falha de cada equipamento, a seguinte notação foi utilizada para cálculo da demanda média anual m_{ij} da peça i na base j :

N_j é a quantidade total de aeronaves na base j .

U_j é o esforço em horas de utilização anual de cada aeronave na base j .

Q_i é a quantidade total instalada da peça i nas aeronaves.

λ_i é a taxa de falha da peça i instalada nas aeronaves.

Logo, a demanda média anual m_{ij} da peça i da frota alocada na base j é exposta a seguir:

$$m_{ij} = N_j \cdot U_j \cdot Q_i \cdot \lambda_i \quad (26)$$

Com isso, a demanda média anual m_{ij} de cada equipamento i é calculada em função das taxas de falha de cada equipamento, levando em consideração a frota total alocada na base aérea j , principal e remotas. Dessa forma, o resultado da Equação 26 é aplicada nas Equações 17, 18, 19 e 20 citadas anteriormente na seção 2.4.5. Também são aplicados os tempos associados à estrutura de suporte logístico, ou seja, o tempo médio reparo T_{ij} de cada equipamento i na base aérea principal e os tempos médios de reabastecimentos O_j entre a base aérea principal e as bases aéreas remotas para o posterior cálculo do EBO de cada item.

Assumindo as premissas declaradas, r_{ij} é zero para as bases aéreas remotas e um para a base aérea principal. Logo, é assumido que o processo de reparo de cada equipamento i ocorre somente na base aérea principal.

A partir do EBO, é realizada a análise marginal por meio da Equação 10, seção 2.4.3.3, com base nos resultados de cada item i contido no escopo de peças definida no modelo. A cada iteração da análise marginal, é definido qual item mais contribui para minimizar o EBO em relação ao investimento necessário. Assim, é construída a curva de custo-benefício em relação ao EBO e o investimento em peças.

Com a curva de custo-benefício estabelecida por meio da análise marginal. Os resultados de investimento em peças de reposição são relacionados em função do EBO. Dessa forma, a partir do EBO, é calculada a disponibilidade operacional (A_o) em cada base aérea j como demonstrado na Equação 27:

$$A_{o_j} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^I \bar{M}ct \cdot \frac{m_{ij}}{8760} + EBO_{ij}}{N_j} \quad (27)$$

Ao final calcula-se a disponibilidade operacional de toda a estrutura de suporte logístico através da Equação 16, seção 2.4.4, sendo uma média ponderada entre as quantidades de bases aéreas j e o total de aeronaves alocadas em cada uma delas.

Com o modelo básico estabelecido, é aplicado o fator de confiabilidade, D_k , de cada aeronave k alocada na base aérea j . Esse fator define a demanda por peças de reposição gerada por cada aeronave k . Assim, o cálculo da demanda média anual m_{ijk} passa a estar associada a aeronave k ali alocada, tendo a seguinte notação:

$$m_{ijk} = N_{jk} \cdot U_{jk} \cdot Q_i \cdot \lambda_i \cdot D_k \quad (28)$$

Dessa forma, a demanda média anual m_{ij} da peça i na base j é o somatório da demanda gerada individualmente por cada aeronave k na base j , logo, a demanda é calculada da seguinte forma pela Equação 29:

$$m_{ij} = \sum_{k=1}^K m_{ijk} \quad (29)$$

Da mesma forma que no modelo básico, o cálculo do EBO, da disponibilidade operacional (A_o) por base e da disponibilidade operacional de toda a estrutura de suporte logístico seguem da mesma forma no modelo proposto. Contudo, diferentes resultados de disponibilidade operacional podem ser obtidos em função das variadas alocações das K aeronaves nas J bases aéreas. Assim, a disponibilidade operacional e o investimento em peças de reposição neste trabalho estão em função do fator de confiabilidade de cada aeronave de uma frota específica e também das realocações nas bases aéreas principal e remotas. A Figura 10 representa as etapas do modelo proposto.

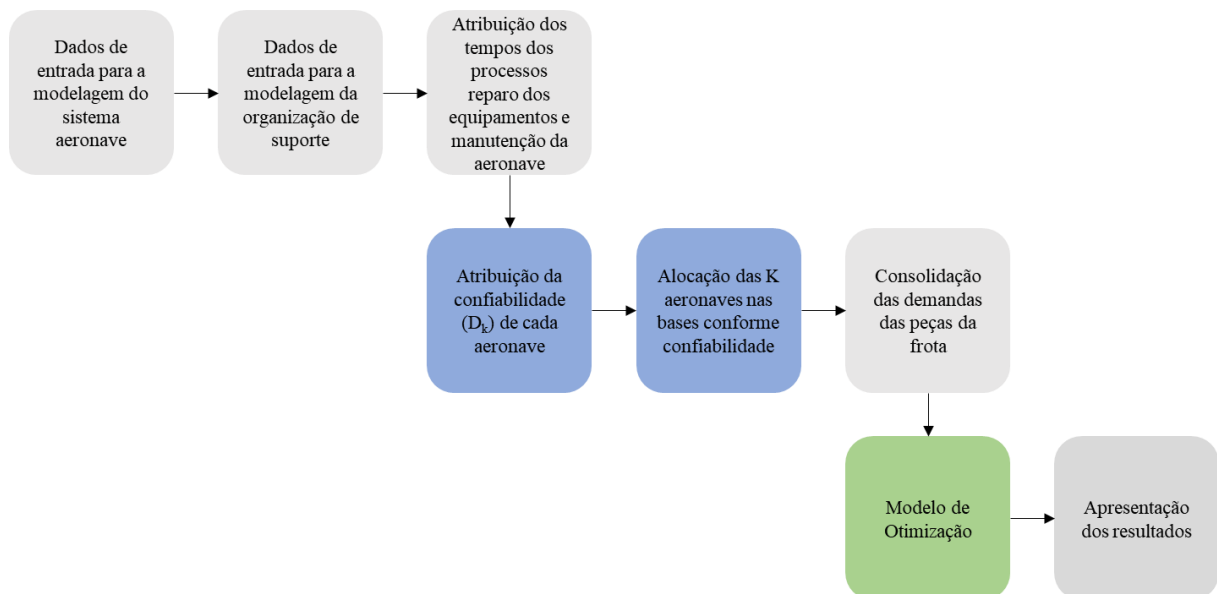


Figura 10 - Etapas de entrada do modelo proposto (Fonte: O autor).

Em cada etapa de entrada, os conjuntos de tabelas são preenchidas no OPUS10 para configuração do modelo de acordo com a condição básica e proposta neste trabalho. Os parâmetros de controles globais recebem as informações gerais do tipo de problema, métrica de suportabilidade adotada, possíveis limites da métrica ou investimento, duração do cenário e até mesmo a moeda dos preços unitários carregados.

Os dados técnicos das aeronaves e seus equipamentos são mandatórios para a otimização. Nesse estágio pode ser adotada a configuração de um modelo de aeronave específica ou a entrada das aeronaves por número de cauda. Também, os dados técnicos são

carregados para cada equipamento embarcado. O nível de estoque de cada equipamento define a relação de investimento e a contribuição que cada peça traz para a disponibilidade das aeronaves.

A organização das localidades forma a estrutura multi-escalão e a ligação de cada localidade recebe os tempos logísticos referente ao trânsito de ida e volta do material. Além disso, nessa etapa cada localidade é configurada de acordo com sua capacidade de armazenagem, oficina de reparo, ambos ou simplesmente uma localidade para operação da aeronave.

As tabelas de operação e alocação das aeronaves recebem as informações de quantidades de aeronaves em cada base aérea (localidade) e o esforço aéreo anual (utilização anual) de cada uma. Nessa tabela, ocorre a configuração das alocações estudadas nesse trabalho, sendo feita a ordenação de alocação conforme os desempenhos de confiabilidade de cada aeronave.

Os tempos dos processos manutenção das aeronaves e dos equipamentos remetem aos tempos de inatividade que ocorreram devido à falha de algum equipamento e consequente interrupção da operação da aeronave. Os tempos usados indicam a duração para restabelecer o equipamento e aeronave ao seu estado operacional novamente.

3.4.3 Estratégias de Aplicação

O modelo matemático proposto na seção 3.4.2 foi elaborado para obter, como solução, a disponibilidade operacional ótima de uma frota de aeronaves, assumindo a confiabilidade de cada aeronave para estimar o investimento em peças de reposição para mantê-las em operação.

Assim, as estratégias de alocação das aeronaves são apresentadas nesta seção em três diferentes instâncias de aeronaves destoantes em variados tamanhos de frotas. As instâncias definidas variam as quantidades de aeronaves destoantes com base nas frotas de alguns operadores analisados.

Foram definidas três abordagens de aplicação dos modelos. A primeira abordagem, os dados de entrada são aplicados no modelo básico sem considerar o efeito que cada aeronave pode causar no resultado final da otimização. Dessa forma, a alocação das aeronaves não leva em consideração os desempenhos individuais de taxa de falha, gerando resultado com base na média da frota.

As outras duas abordagens são aplicadas em duas alternativas de alocação no modelo proposto. A primeira alternativa, segunda abordagem, considera a alocação das aeronaves da pior maneira possível, designando as aeronaves com piores taxas de falha na base aérea remota

mais distante dos acessos aos recursos de reparo e suprimentos da base aérea principal, logo, tendo tempos mais longos associado ao processo de logístico. O objetivo desta abordagem é estabelecer um limite inferior em termos de benefício para um mesmo custo ou disponibilidade operacional.

A segunda alternativa, terceira abordagem, considera a alocação das aeronaves da melhor maneira possível, designando as aeronaves com piores taxas de falha na base aérea principal, ou seja, tendo acessos imediatos aos recursos de reparo e suprimentos desta base aérea. O objetivo desta abordagem é estabelecer um limite superior em termos de benefício para um mesmo custo ou disponibilidade operacional. A Figura 11 apresenta as três abordagens sugeridas neste trabalho, onde a base aérea remota 03 representa a localidade mais distante da base aérea principal 01.

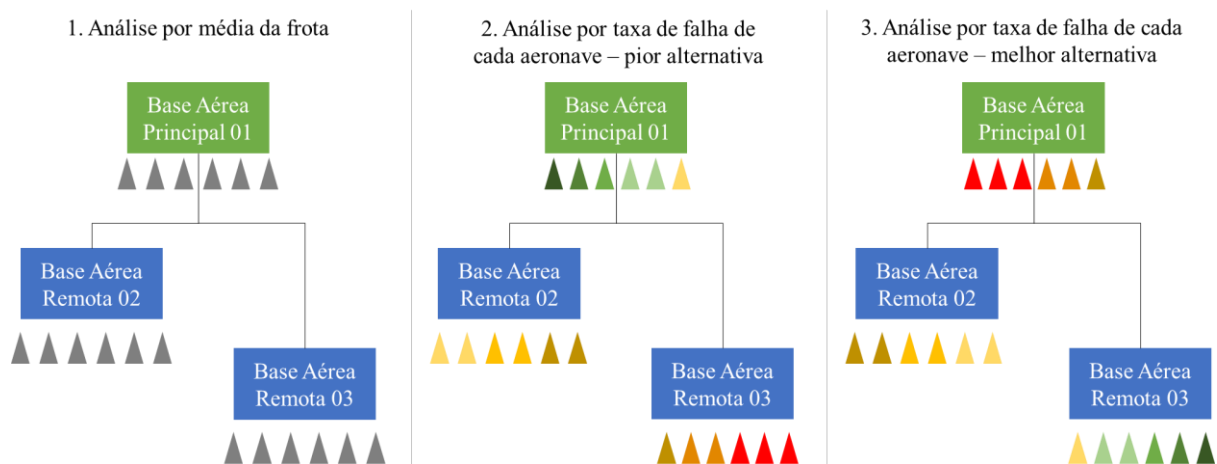


Figura 11 - Representação das três abordagens propostas (Fonte: O autor).

Posteriormente às instâncias definidas, o modelo proposto é aplicado em um estudo de caso inspirado na estrutura de bases aéreas e tamanho de frota similar das aeronaves A-29 Super Tucano operadas pela Força Aérea Brasileira (FAB). Contudo, os esforços aéreos e configuração de equipamentos das aeronaves não tem relação com esse modelo em questão.

3.5 Recursos Computacionais

A implantação dos modelos básico e proposto foi realizada no *software* OPUS10 versão 2019 64 bit, sendo concedida para esta pesquisa a licença temporária pela Systecon AB ao laboratório AeroLogLab-ITA. O computador utilizado foi um Dell® com processador Intel® Core i7 @ 1,99 GHz, 8,00 GB RAM, Windows 10® 64 bit.

4 Aplicação da Metodologia

Neste capítulo é demonstrada a análise dos dados coletados para identificação das aeronaves destoantes. É aplicada a metodologia no modelo básico e no proposto onde são consideradas as instâncias de aeronaves destoantes para três tamanhos de frota. O modelo proposto também é aplicado em um estudo de caso inspirado no cenário logístico real do A-29 operado pela FAB.

4.1.1 Identificação das Aeronaves Destoantes

Inicialmente, foram exploradas duas bases de dados com a finalidade de verificar as aeronaves com taxas de falha destoante às demais da frota e justificar a motivação deste trabalho. As bases de dados contêm informações inspiradas em desempenhos observados por diferentes frotas de aeronave amplamente operadas no cenário global.

A primeira base de dados continha as informações de manutenção do programa em questão. A partir dessa base de dados foi obtido o histórico de remoções de equipamentos reparáveis (LRU) por número de cauda (*tail number*) de mais de 700 aeronaves, representando um total por volta de 273.000 eventos de remoção em um período de 2 anos. Essas remoções representam as ocorrências de manutenção de linha no primeiro nível de manutenção.

A segunda base de dados continha as informações referentes à operação dessas aeronaves. Desta base de dados, foram obtidas as horas de voo acumuladas por aeronave no exato mesmo período de 2 anos adotado na base de dados de manutenção para as mais de 700 aeronaves. A Tabela 4.1 resume os dados coletados, onde parte dos dados foi desconsiderada seguindo o que foi apresentado na seção 3.4.1.

Tabela 4.1 – Dados coletados para verificação de aeronave destoante (Fonte: O autor).

Total de eventos de manutenção	Total de eventos considerados	Percentual de eventos considerados	Total de aeronaves	Total de aeronaves consideradas	Percentual de aeronaves consideradas
273.193	221.189	81%	701	647	92%

Dessa forma, passa a ser conhecido para cada número de cauda (aeronave) o total de horas operadas e o número total de falhas ocorridas em um período de 2 anos coletados. Com ambas informações, é calculada a taxa de falha para cada aeronave a partir da Equação 1 apresentada na seção 2.2.2.

A Figura 12 mostra o diagrama de caixa relacionado à distribuição das taxas de falha de cada aeronave. Os pontos acima do limite superior são as aeronaves com comportamentos destoantes, pois têm valores discrepantes às demais da frota. O limite superior é estabelecido pelo resultado do 3º quartil somado a multiplicação da constante (1,5) e a amplitude interquartil da distribuição obtida. A média das aeronaves destoantes está 4,91 vezes acima da média das aeronaves regulares.

O resultado foi de 36 aeronaves destoantes (6%) na frota, representadas pelos pontos vermelhos do diagrama de caixa, onde o total de aeronaves analisadas foi de 647. Contudo, também foi verificado o resultado de frotas específicas de determinados operadores com intuito de minimizar os diferentes aspectos relacionados às capacidades de manutenção de cada operador, o clima da região operada e os perfis de operação por exemplo.

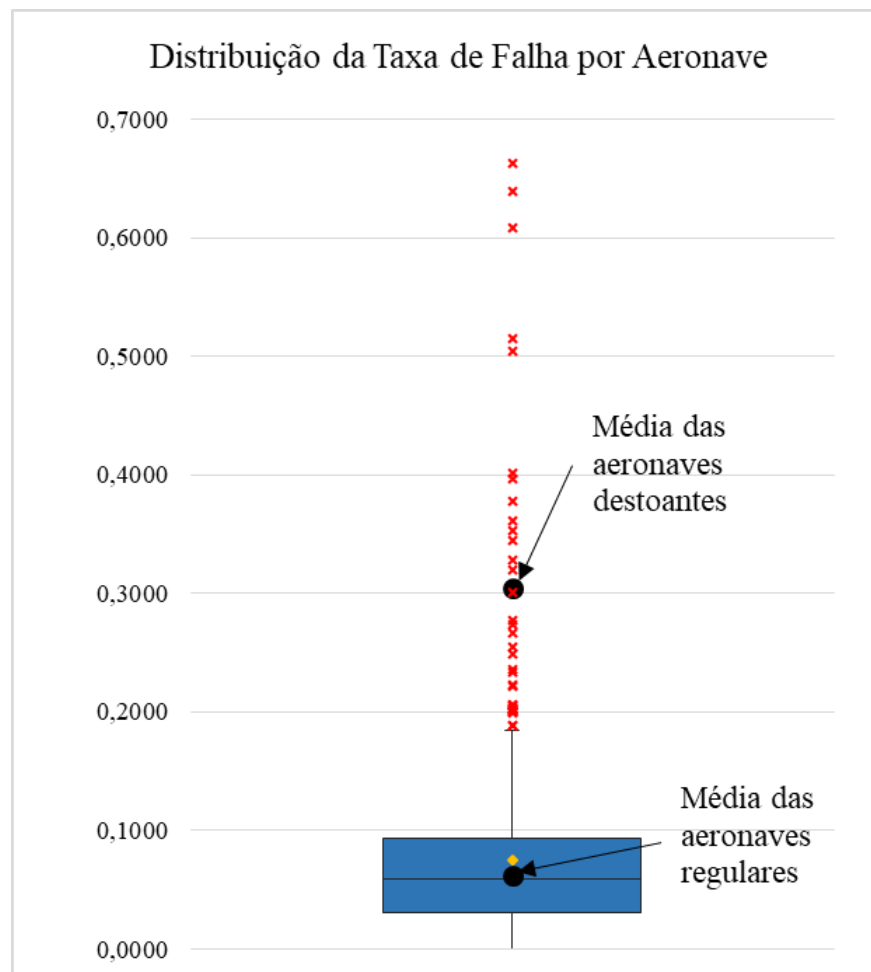


Figura 12 - Resultado da taxa de falha de cada aeronave (Fonte: O autor).

Esses aspectos podem ter diferenças de operador para operador. Assim, é buscado identificar a quantidade de aeronaves destoantes para cada operador com seus diferentes tamanhos de frota e assumindo condições semelhantes de operação e manutenção de suas frotas. A Figura 13 mostra o resultado obtido para três operadores distintos dessa mesma aeronave.

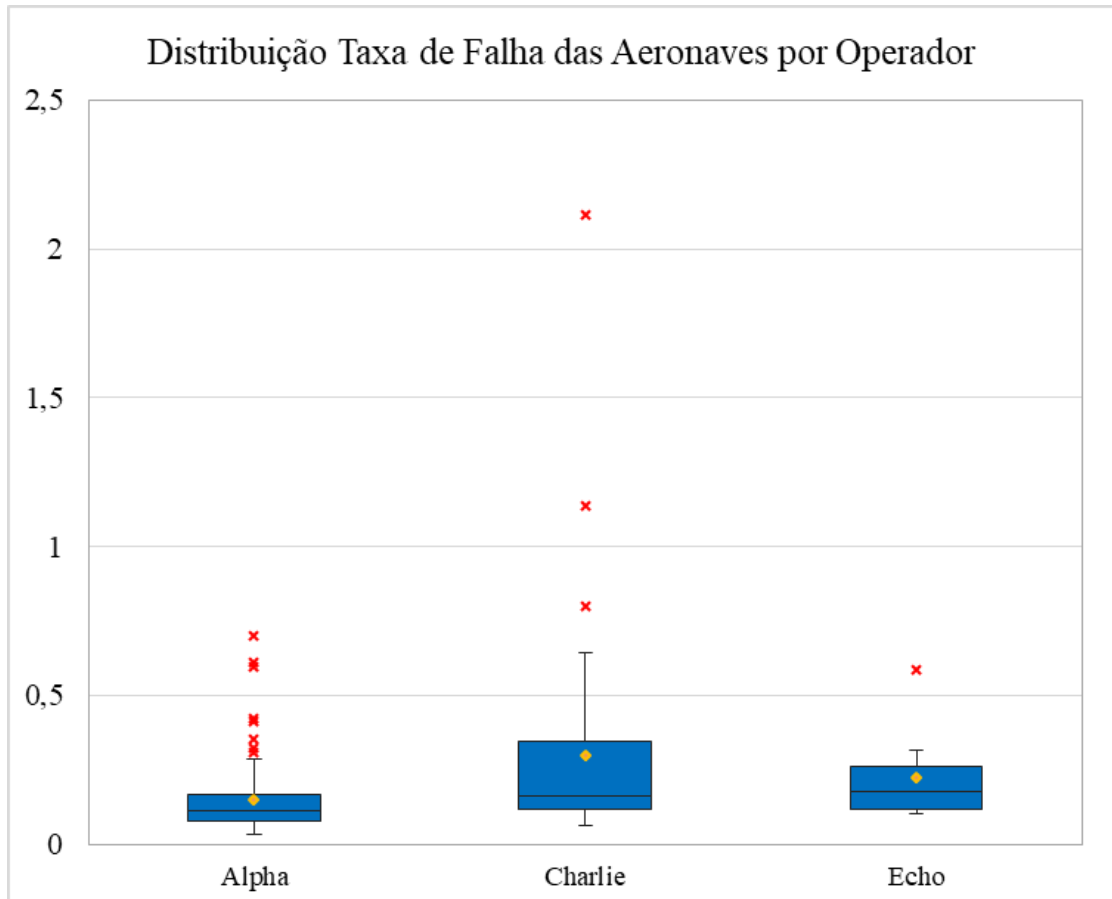


Figura 13 - Resultado da taxa de falha de cada aeronave por operador (Fonte: O autor).

Os operadores *Alpha*, *Charlie* e *Echo* possuem em suas frotas o total de 88, 43 e 10 aeronaves respectivamente, tendo para cada um deles o percentual de 9%, 7% e 10% de aeronaves destoantes em suas frotas. Esses operadores possuem essas aeronaves há mais tempo do que os demais, minimizando potenciais condições de entrada em serviço e outras situações ainda não experimentadas por operadores mais novos. Nesse sentido, são observados conjuntos de aeronaves com taxas de falha destoantes no contexto geral e específico da frota.

Apesar disso, o trabalho considera a existência dessas aeronaves destoantes nas frotas independentemente do tamanho de cada frota. Pode observar a existência de um intervalo entre 6% e 10% das aeronaves destoantes em uma frota. Esse resultado serve como direcionador para a definição das instâncias seguintes adotadas neste trabalho.

4.1.2 Montagem do Modelo Inicial

Nas aplicações realizadas, foi considerada uma estrutura de 2 escalões e 3 bases aéreas para a alocação das aeronaves e distribuição dos estoques de peças de reposição conforme mostrado na Figura 14. A base aérea principal possui as principais capacidades de armazenagem e reparo dos equipamentos, bem como é responsável pelo suprimento dos estoques das duas bases aéreas remotas. Além disso, são consideradas todas as premissas apresentadas na seção 3.3 na aplicação do modelo.

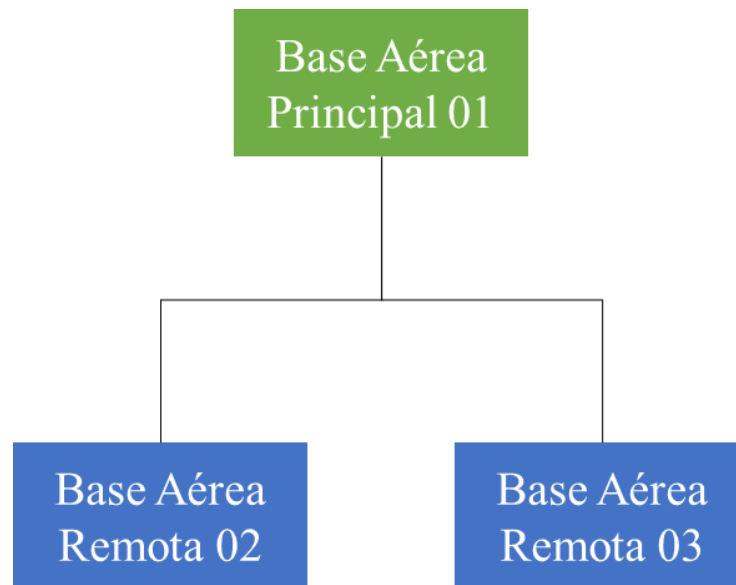


Figura 14 - Estrutura de suporte logístico (Fonte: O autor).

A organização da estrutura de suporte possui seus parâmetros de entrada no modelo definido da Tabela 4.2. Esses dados são todos carregados no *software* OPUS10 para configuração da relação entre as localidades e seus tempos associados. A estrutura de suporte apresentada e seus parâmetros são os mesmos para os três cenários de frota.

Tabela 4.2 – Parâmetros de entrada da estrutura de dois escalões (Fonte: O autor).

Localidade	Localidade Principal	Tempo médio de reabastecimento (O_j)
Base Aérea Remota 02	Base Aérea Principal 01	7 dias
Base Aérea Remota 03	Base Aérea Principal 01	30 dias

Outros parâmetros são configurados no modelo, relacionando as localidades aos parâmetros de manutenção e operação da frota que nelas estão alocadas. A Tabela 4.3 contém os parâmetros de manutenção das aeronaves, a distribuição de aeronaves em cada base aérea e os esforços aéreos anuais de cada aeronave.

Tabela 4.3 – Parâmetros de manutenção e operação da frota (Fonte: O autor).

Localidade	Tempo de Manutenção por Aeronave (\bar{M}_{ct})	Alocação da frota com 31 aeronaves (N_j)	Alocação da frota com 67 aeronaves (N_j)	Alocação da frota com 113 aeronaves (N_j)	Esforço Aéreo Anual por Aeronave (U_j)
Base Aérea Principal 01	4 horas	11 aeronaves	23 aeronaves	38 aeronaves	900 horas de voo/ano
Base Aérea Remota 02	4 horas	10 aeronaves	22 aeronaves	38 aeronaves	900 horas de voo/ano
Base Aérea Remota 03	4 horas	10 aeronaves	22 aeronaves	37 aeronaves	900 horas de voo/ano

Com esses parâmetros de suportabilidade carregados, os modelos já contêm as informações de operação das aeronaves e estrutura de suporte logístico. Porém, para rodá-los, ainda é necessária a configuração das características técnicas dos sistemas das aeronaves. Essas são as principais informações para a definição dos investimentos em estoque de peças de reposição. A Tabela 4.4 contém uma amostra de todos os parâmetros necessários à serem utilizados no modelo de cada equipamento (LRU). O Apêndice A contém a lista completa de todos os equipamentos e seus parâmetros.

Tabela 4.4 – Parâmetros dos equipamentos instalados por aeronave (Fonte: O autor).

Equipamento (I)	Preço (C_i) [R\$]	Taxa de Falha (λ_i) [1/Milhões de Horas]	Quantidade Total Instalada por Aeronave (Q_i)	Tempo de Reparo na Base Aérea Principal em dias (T_{ij})
LRU#1-G1	189.750,00	238,095	2	45
LRU#2-G1	63.250,00	102,041	2	45
LRU#3-G1	126.500,00	95,238	3	45
LRU#4-G1	316.250,00	129,87	2	45
LRU#5-G1	664.125,00	71,429	2	45
LRU#6-G1	316.250,00	95,238	2	45
LRU#7-G1	126.500,00	41,667	2	45

Além dos parâmetros definidos anteriormente, também é necessário definir os parâmetros que caracterizam as aeronaves com seus fatores de confiabilidade individualizados, sendo elas destoantes ou não às demais aeronaves da frota. Os valores usados no modelo para 31 aeronaves são apresentados nas Tabela 4.5. Os valores usados nos modelos das frotas de 67 e 113 aeronaves seguem no Apêndice B. Nessas tabelas são apresentados os fatores de confiabilidade (D_k) que cada aeronave possui em 3 instâncias de aeronaves destoantes. O uso do fator de confiabilidade faz com que as demandas por peças de cada aeronave sejam individualizadas, seguindo o modelo proposto.

Todos os parâmetros apresentados nesta seção são utilizados como dados de entrada para a montagem dos modelos no OPUS10. As principais diferenças dos modelos são as

quantidades de aeronaves contidas em cada frota e as quantidades de aeronaves destoantes que cada frota possui.

Tabela 4.5 – Parâmetros das 31 aeronaves (Fonte: O autor).

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade de Alocação da Aeronave K	Fator de Confiabilidade (D_k) [5% de aeronaves destoantes]	Fator de Confiabilidade (D_k) [10% de aeronaves destoantes]	Fator de Confiabilidade (D_k) [15% de aeronaves destoantes]
A/C-TN1	Base Aérea Principal 01	0,930	0,930	0,930
A/C-TN2	Base Aérea Principal 01	0,810	0,810	0,810
A/C-TN3	Base Aérea Principal 01	0,870	0,870	0,870
A/C-TN4	Base Aérea Principal 01	0,800	0,800	0,800
A/C-TN5	Base Aérea Principal 01	0,900	0,900	0,900
A/C-TN6	Base Aérea Principal 01	0,890	0,890	0,890
A/C-TN7	Base Aérea Principal 01	0,860	0,860	0,860
A/C-TN8	Base Aérea Principal 01	0,800	0,800	0,800
A/C-TN9	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN10	Base Aérea Principal 01	0,720	0,720	0,720
A/C-TN11	Base Aérea Principal 01	0,850	0,850	0,850
A/C-TN12	Base Aérea Remota 02	0,800	0,800	0,800
A/C-TN13	Base Aérea Remota 02	0,860	0,860	0,860
A/C-TN14	Base Aérea Remota 02	0,820	0,820	0,820
A/C-TN15	Base Aérea Remota 02	0,840	0,840	0,840
A/C-TN16	Base Aérea Remota 02	0,840	0,840	0,840
A/C-TN17	Base Aérea Remota 02	1,000	1,000	1,000
A/C-TN18	Base Aérea Remota 02	0,830	0,830	0,830
A/C-TN19	Base Aérea Remota 02	0,830	0,830	0,830
A/C-TN20	Base Aérea Remota 02	0,870	0,870	0,870
A/C-TN21	Base Aérea Remota 02	0,990	0,990	0,990
A/C-TN22	Base Aérea Remota 03	1,280	1,789	1,789
A/C-TN23	Base Aérea Remota 03	0,940	0,940	0,940
A/C-TN24	Base Aérea Remota 03	1,060	1,060	1,574
A/C-TN25	Base Aérea Remota 03	0,880	0,880	0,880
A/C-TN26	Base Aérea Remota 03	0,930	0,930	0,930
A/C-TN27	Base Aérea Remota 03	0,830	0,830	0,830
A/C-TN28	Base Aérea Remota 03	2,232	2,232	2,232
A/C-TN29	Base Aérea Remota 03	0,900	0,900	0,900
A/C-TN30	Base Aérea Remota 03	1,140	1,140	1,566
A/C-TN31	Base Aérea Remota 03	2,334	2,334	2,334

Com os dados obtidos na seção 4.1.1, é possível identificar variações nas quantidades de aeronaves destoantes em diversos tamanhos de frota. Essa identificação orienta nas instâncias de 5%, 10% e 15% de aeronaves destoantes em 3 tamanhos de frota. Cada frota tem

31, 67 e 113 aeronaves. O modelo básico e o modelo proposto foram aplicados para cada frota e instância de aeronaves destoantes conforme ilustrado na Figura 15.

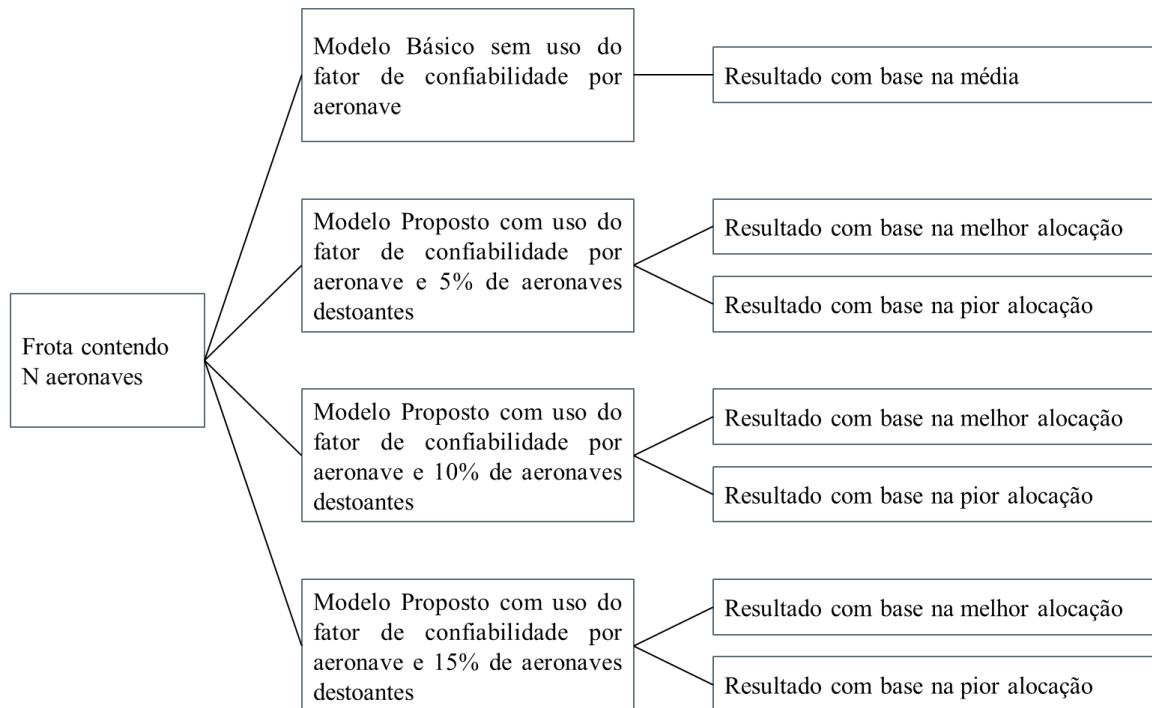


Figura 15 - Aplicação das frotas nos modelos básico e proposto (Fonte: O autor).

Foram adotados valores aleatórios para definição dos fatores de confiabilidade (D_k) de cada aeronave. Ainda, foi respeitada a condição de a média das aeronaves destoantes ser até 4,91 vezes maior do que a média das aeronaves com comportamento regular dentro da frota em questão.

A alocação no modelo básico ocorre de forma simplesmente a alocar cada aeronave em uma base aérea sem o uso do fator de confiabilidade individualmente. A melhor alocação é obtida pela ordenação crescente dos fatores de confiabilidade de forma a ficar as melhores aeronaves no início da lista e as piores no final. Assim, as piores aeronaves são alocadas na base aérea principal 01 e a alocação é seguida até as melhores aeronaves estarem alocadas na base aérea remota 03. Da mesma forma, a pior alocação é obtida pela alocação das aeronaves de forma inversa à melhor alocação.

Também, é elaborado um estudo de caso inspirado na estrutura de suporte logístico que a FAB adota para as operações e manutenções do programa A-29 Super Tucano. A aplicação dos parâmetros no modelo ocorre da mesma forma apresentada anteriormente. É utilizado o mesmo escopo de peças apresentado no Apêndice A. Contudo, foi considerada uma frota de 75 aeronaves distribuídas em 6 bases aéreas, sendo uma base aérea principal e outras cinco bases aéreas remotas conforme ilustrado na Figura 16. Para as 75 aeronaves, foi assumido que

aproximadamente 11 % das aeronaves possuem comportamento destoante quando comparadas ao restante da frota, logo, 8 aeronaves do total de 75.

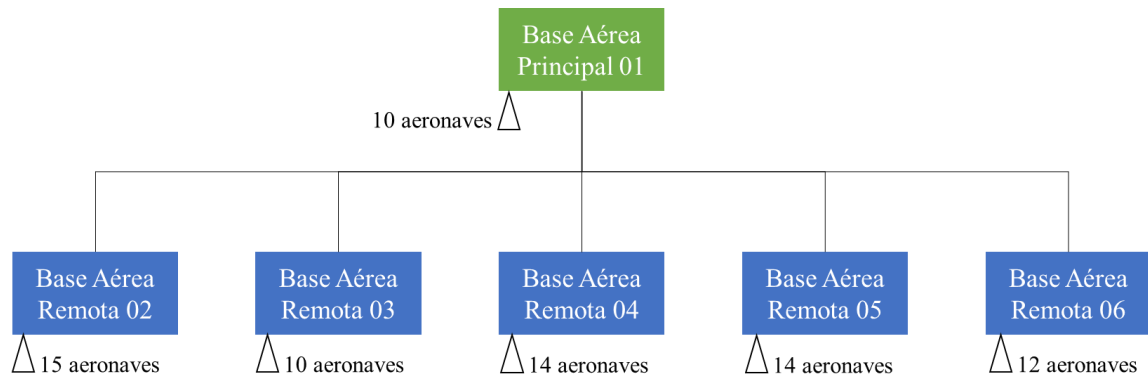


Figura 16 - Estrutura logística e alocação da frota do estudo de caso (Fonte: O autor).

Além do estudo de caso ter mais bases aéreas, os tempos de reabastecimentos entre a base aérea principal e as bases aéreas remotas são apresentados no Apêndice C, assim como os demais parâmetros de entrada dedicados ao estudo de caso, como, por exemplo, os fatores de confiabilidade e as alocações das aeronaves nas bases aéreas.

5 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do modelo proposto, dentro do formato exposto no capítulo de metodologia. São apresentados os resultados da otimização da disponibilidade operacional em função do gerenciamento de estoque onde é utilizado o fator de confiabilidade de cada aeronave alocada nas bases aéreas. Para cada conjunto de frota, foram adotadas as instâncias de aeronaves destoantes. Também é apresentado e discutido o resultado obtido no estudo de caso.

5.1.1 Instâncias de Aeronaves Destoantes

Nesta seção são apresentados os resultados para as instâncias aplicadas nas frotas de aeronaves apresentadas na seção 4.1.2. As instâncias são referentes às quantidades de aeronaves destoantes encontradas na frota. A Tabela 4.6 apresenta a condição básica de tamanho da frota com o total de 31 aeronaves e as quantidades de aeronaves identificadas como destoantes para cada instância.

Tabela 5.1 – Aeronaves destoantes adotadas no modelo proposto (Fonte: O autor).

Total de aeronaves na frota	Total de 5% de aeronaves destoantes	Total de 10% de aeronaves destoantes	Total de 15% de aeronaves destoantes
31	2	3	5

Utilizando o modelo básico e o modelo proposto, foram obtidas as curvas de custo-benefício da relação entre a disponibilidade operacional (A_o) e o investimento total em estoque conforme a Figura 17.

O resultado observado a partir da abscissa representa o investimento em estoque, enquanto a disponibilidade operacional (A_o) é representada ao ser observada a partir da ordenada. Cada ponto nas curvas resultantes dos modelos é uma estratégia de investimento em estoque, sendo o estoque delimitado pelo escopo de equipamentos considerados conforme Apêndice A. Nesse sentido, quanto maior é o investimento, variando as quantidades em estoque de cada equipamento listado, maior é a disponibilidade operacional da frota.

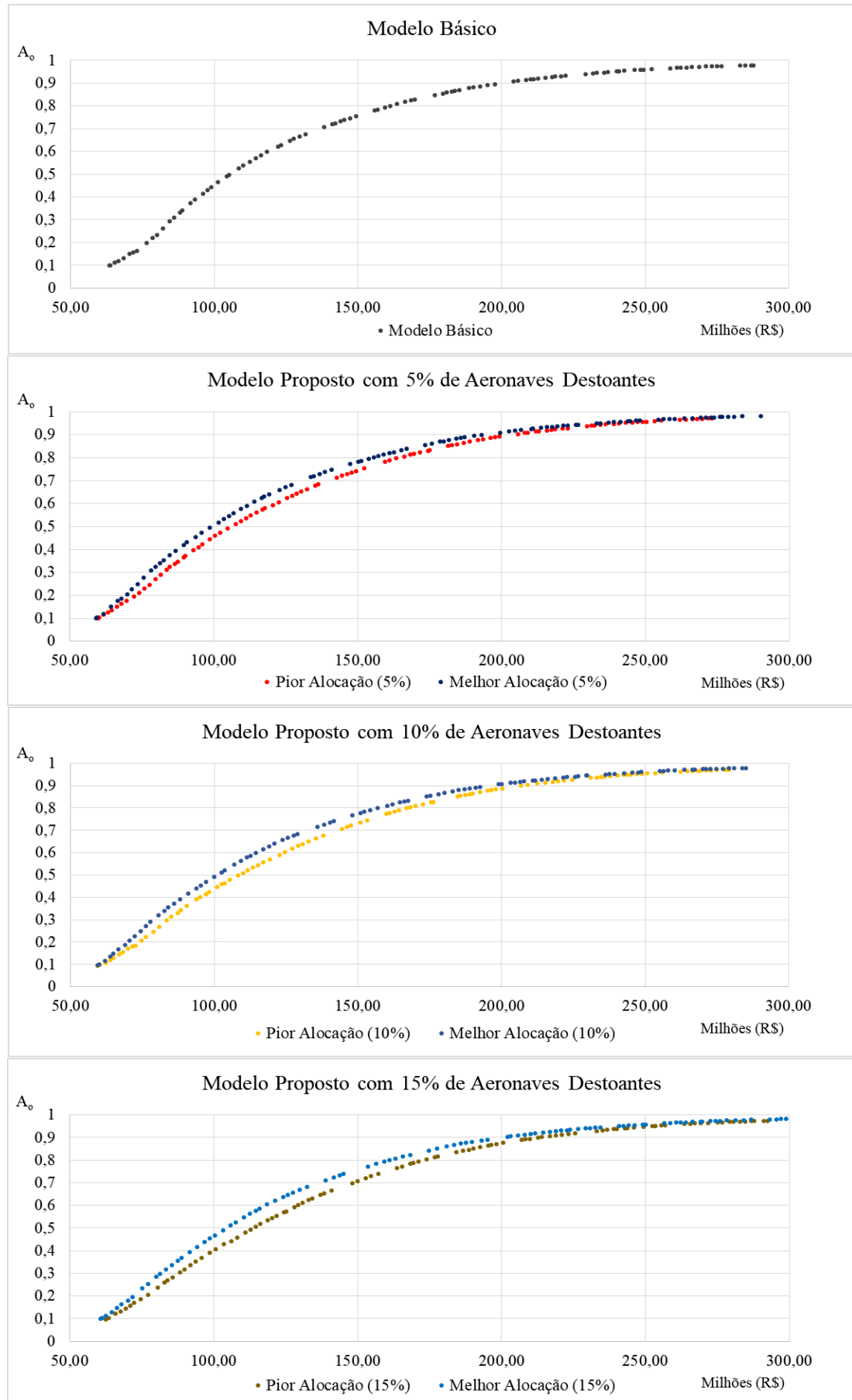


Figura 17 - Resultados do modelo para uma frota de 31 aeronaves (Fonte: O autor).

É possível observar um distanciamento entre os resultados obtidos no modelo proposto ao comparar as curvas resultantes para a melhor e a pior alocação. Está contido neste distanciamento o resultado da curva obtida pelo uso do modelo básico onde são usados somente os dados médios da frota. Isso fica evidente ao observar as curvas de custo-benefício da frota de 31 aeronaves por um segmento conforme ilustrado na Figura 18.

Na Figura 18, os pontos azuis são os resultados do modelo proposto por meio da abordagem considerando a melhor alocação possível. Os pontos amarelos são os resultados do modelo proposto por meio da abordagem considerando a pior alocação possível. Os pontos cinzas são os resultados do modelo básico por meio da abordagem considerando a média da frota, formando a curva entre o resultado da melhor e da pior alocação.

Esse comportamento ocorre da mesma forma para as demais instâncias de aeronaves destoantes onde o resultado do modelo básico fica situado entre as curvas resultantes do modelo proposto. Outra forma de notar esse comportamento, é ilustrada conforme a Figura 19.

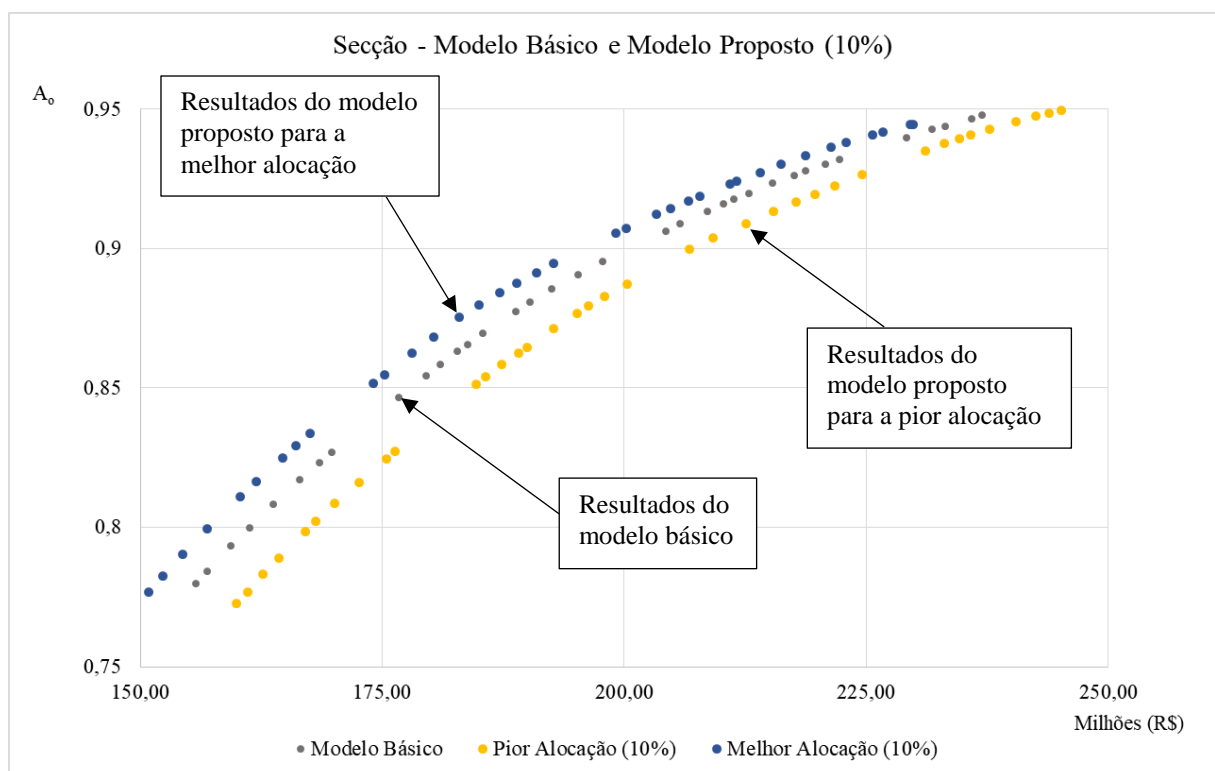


Figura 18 - Segmentos das curvas dos modelos básico e proposto (Fonte: O autor).

Os resultados para diferentes níveis de disponibilidade podem ser verificados na Tabela 4.7. Nesta tabela, estão os resultados de investimento para cada nível de disponibilidade de acordo com a aplicação dos modelos. As colunas mostram a variação nas disponibilidades analisadas. Cada valor observado é o total de investimento em estoque de todas as bases aéreas

utilizadas nos modelos, bem como a disponibilidade operacional é obtida dos resultados das disponibilidades operacionais de todas elas também.

Tabela 5.2 - Resultados em diversos níveis de disponibilidade operacional (Fonte: O autor).

	Investimento Total em R\$ (A₀=0,80)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,85)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,90)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,95)
Modelo Básico	161.336.375,00	179.561.000,00	204.286.000,00	240.071.125,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (5%)	166.186.500,00	181.470.000,00	205.663.125,00	243.184.750,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (5%)	155.551.875,00	173.489.000,00	193.064.875,00	233.087.750,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (10%)	168.158.750,00	184.675.625,00	209.167.750,00	245.108.125,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (10%)	156.943.375,00	174.058.250,00	199.139.750,00	236.284.750,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (15%)	173.943.250,00	190.270.375,00	214.009.250,00	252.390.500,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (15%)	160.956.875,00	177.508.250,00	202.124.000,00	240.804.250,00

Os resultados ilustrados na Figura 19 estão organizados da seguinte forma: modelo básico (1); modelo proposto adotando a pior alocação da frota com 5% de aeronaves destoantes (2); modelo proposto adotando a melhor alocação da frota com 5% de aeronaves destoantes (3); modelo proposto adotando a pior alocação da frota com 10% de aeronaves destoantes (4); modelo proposto adotando a melhor alocação da frota com 10% de aeronaves destoantes (5); modelo proposto adotando a pior alocação da frota com 15% de aeronaves destoantes (6); e modelo proposto adotando a melhor alocação da frota com 15% de aeronaves destoantes (7).

Outra forma de interpretar as colunas é pela representação das cores. A coluna cinza (1) é o resultado do modelo básico. As colunas amarelas (2, 4 e 6) são os resultados obtidos pelo uso do modelo proposto adotando a pior alocação da frota. As colunas azuis (3, 5 e 7) são os resultados obtidos pelo uso do modelo proposto adotando a melhor alocação da frota. O primeiro agrupamento (2 e 3), primeira coluna amarela e a primeira coluna azul, representa o resultado para instância de 5% de aeronaves destoantes. O segundo agrupamento (4 e 5) e terceiro agrupamento (6 e 7) representam os resultados para as instâncias de 10% e 15% de aeronaves destoantes respectivamente. As explicações dadas também são válidas para as Figuras 22 e 23.

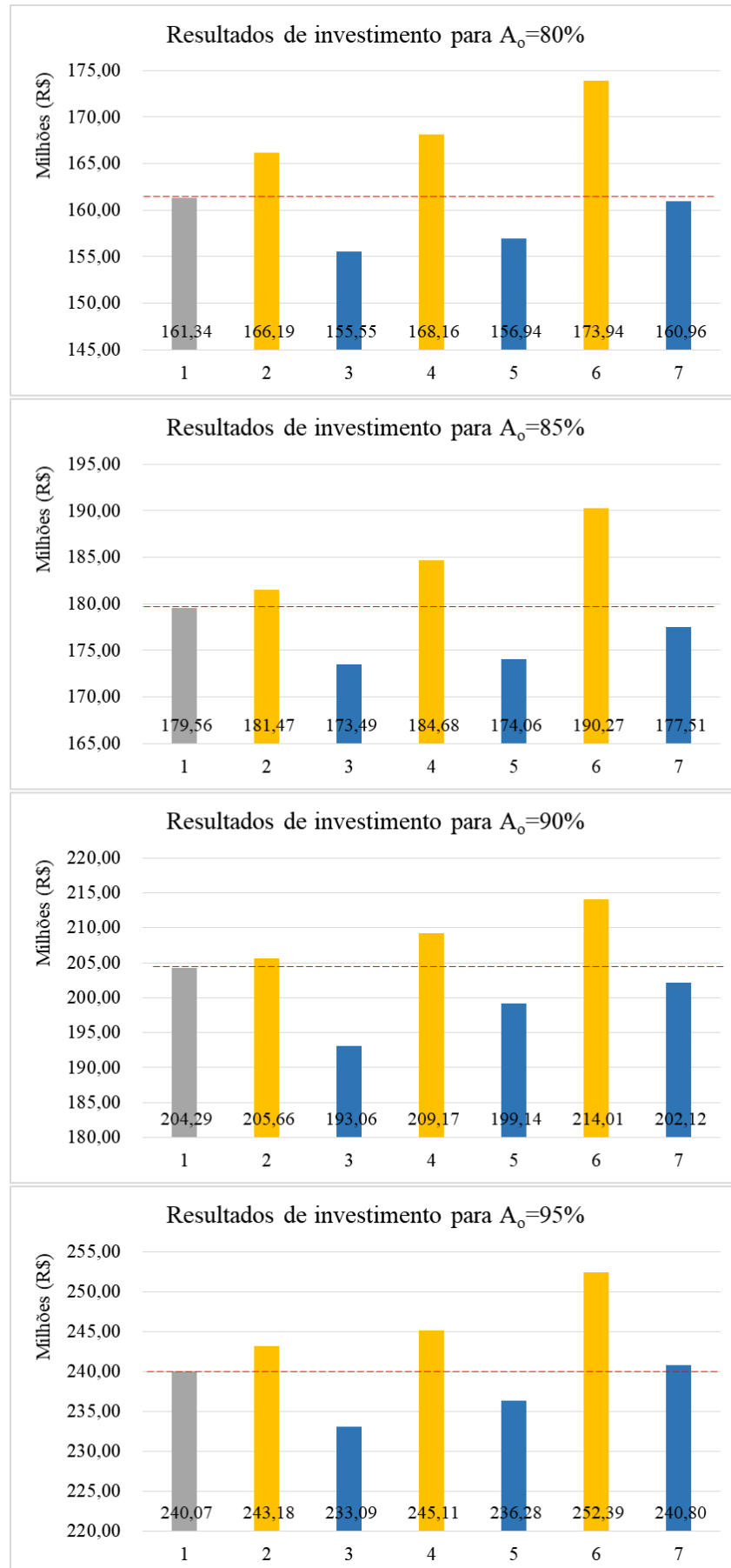


Figura 19 - Resultados de acordo com disponibilidade operacional (Fonte: O autor).

A linha cruzando todos os resultados é tomada como referência a partir do resultado obtido do modelo básico (primeira coluna). Todos os resultados alcançados com a pior alocação estão acima dos valores resultantes do modelo básico. Os resultados alcançados com a melhor alocação estão abaixo dos valores resultantes do modelo básico.

Os modelos também foram aplicados nos demais cenários de frota, considerando 67 e 113 aeronaves. As quantidades de aeronaves destoantes assumidas nos demais modelos podem ser verificadas na Tabela 4.8, considerando esses dois tamanhos de frota. Da mesma forma, elas também serviram de entrada no modelo proposto e resultaram em diferentes curvas de custo-benefício. Contudo, as grandezas de investimento são maiores em decorrência de terem mais aeronaves nas aplicações dos modelos, gerando mais demandas por manutenção e peças em estoque consequentemente.

Tabela 5.3 – Aeronaves destoantes adotadas no modelo proposto (Fonte: O autor).

Total de aeronaves na frota	Total de 5% de aeronaves destoantes	Total de 10% de aeronaves destoantes	Total de 15% de aeronaves destoantes
67 aeronaves	4	7	10
113 aeronaves	6	11	17

Os comportamentos observados nos resultados das curvas de custo-benefício anteriormente podem também ser percebidos nas frotas com mais aeronaves conforme a Figura 20 e a Figura 21. Com as mesmas características, as curvas resultantes do modelo proposto também apresentam um distanciamento entre o resultado da melhor alocação e o resultado da pior alocação. Ainda, os resultados do modelo básico ficam entre os valores obtidos no modelo proposto conforme as alternativas de alocações. Os resultados também podem ser avaliados de acordo com os conjuntos de disponibilidade obtidos pelas curvas de custo-benefício resultantes dos modelos conforme as Figuras 22 e 23.

Os resultados para diferentes níveis de disponibilidade podem ser verificados na Tabela 4.9 e na Tabela 4.10. Da mesma forma mostrada anteriormente, estão nestas tabelas os resultados de investimento para cada nível de disponibilidade de acordo com a aplicação dos modelos, mostrando a variação nas disponibilidades analisadas para uma frota de 67 e 113 aeronaves.

Em termos de efetividade, o modelo proposto apresenta as melhores soluções de investimento e disponibilidade para os resultados considerando a melhor alocação possível quando comparados aos resultados do modelo básico e do modelo proposto considerando a pior alocação possível. Ainda com a existência das aeronaves destoantes na frota, a melhor alocação representa as melhores soluções obtidas pelo modelo proposto.

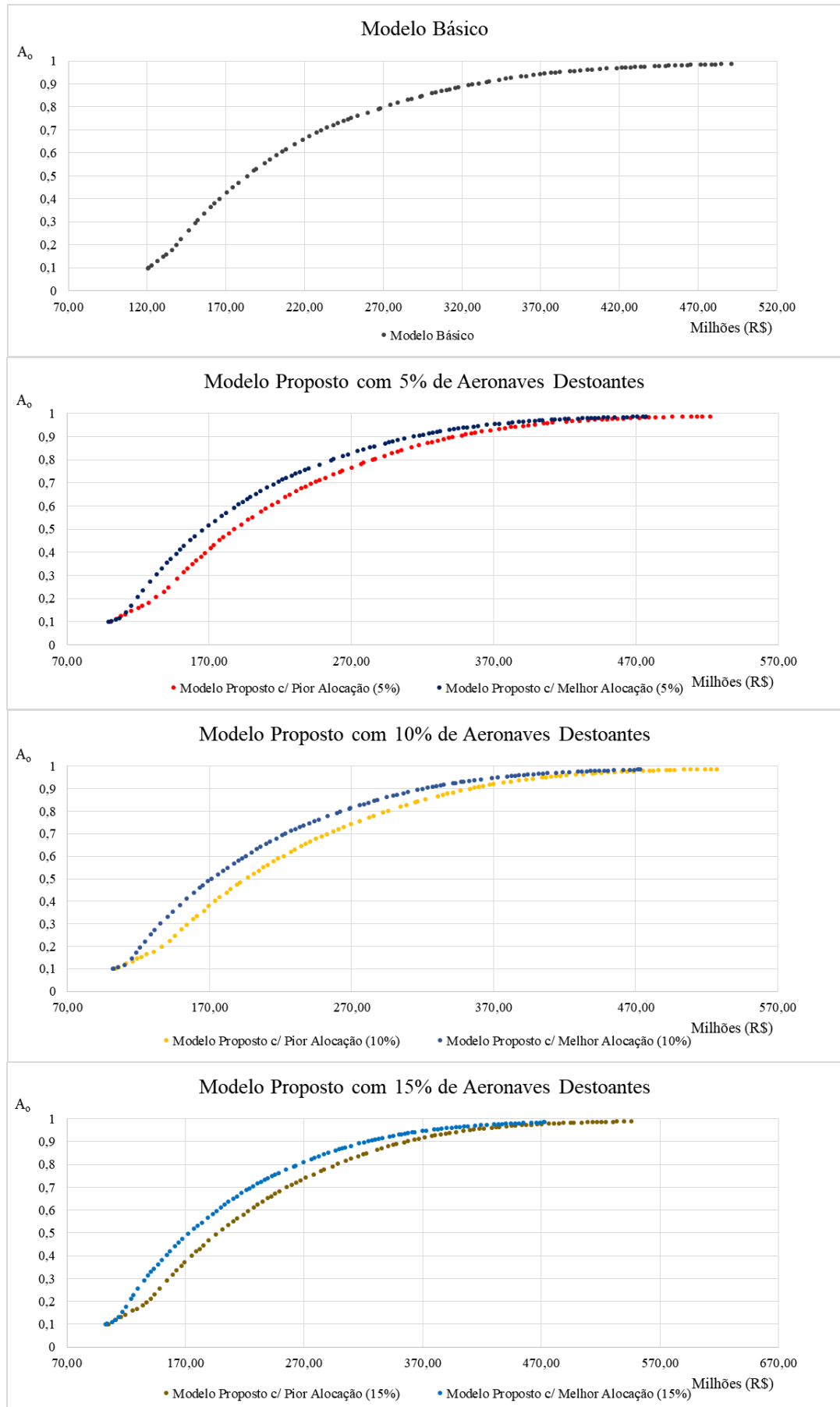


Figura 20 - Resultados para uma frota de 67 aeronaves (Fonte: O autor).

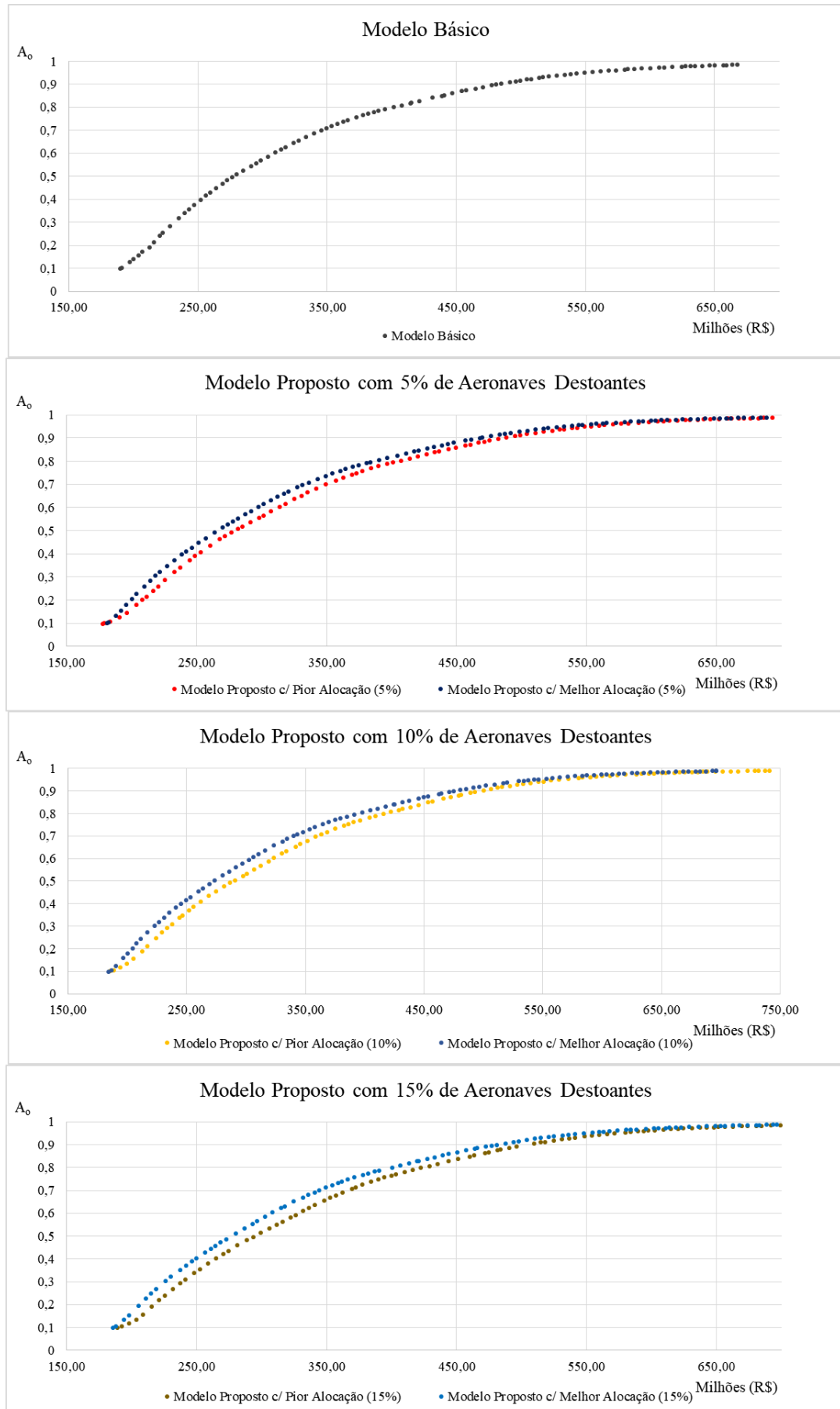


Figura 21 - Resultados para uma frota de 113 aeronaves (Fonte: O autor).

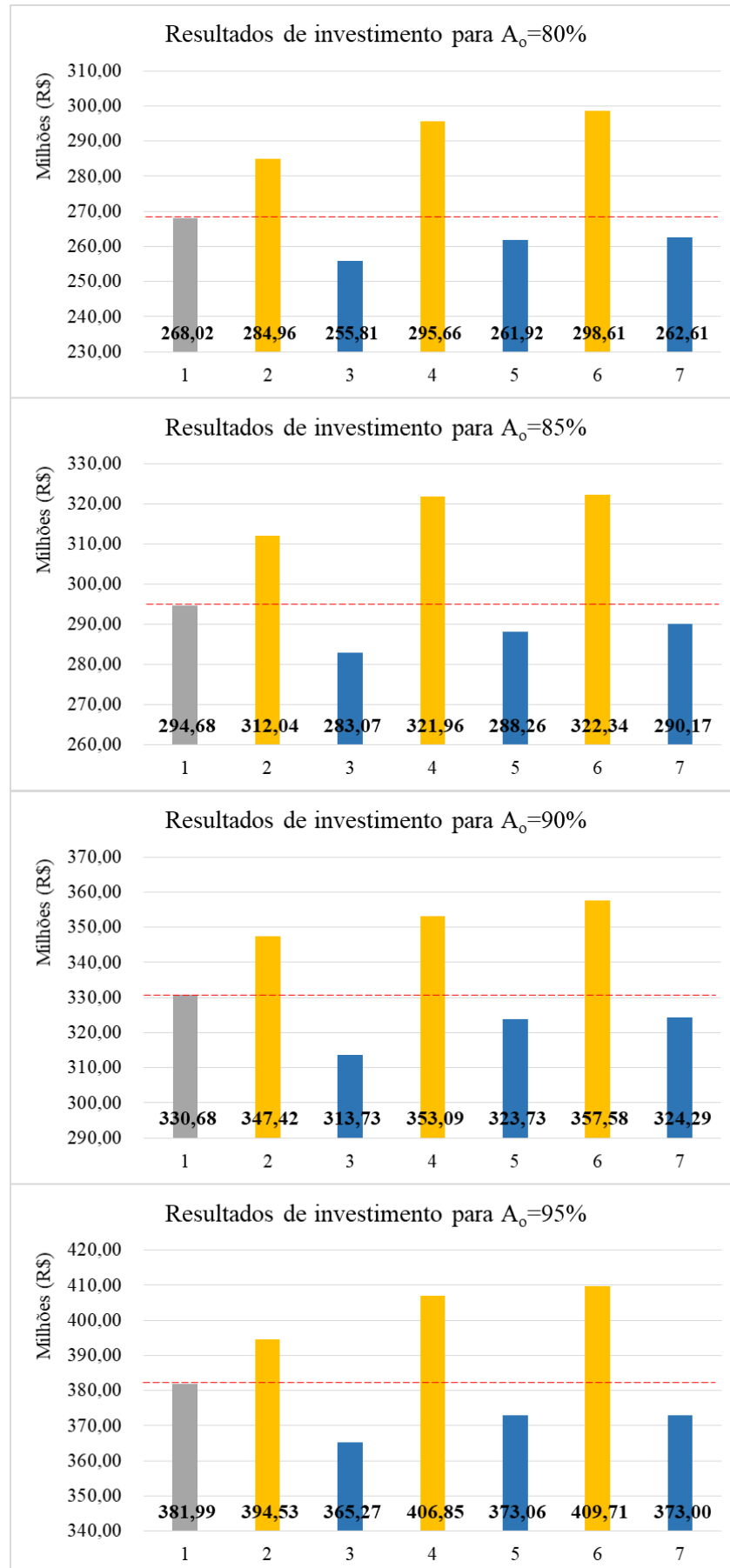


Figura 22 - Resultados por disponibilidade da frota de 67 aeronaves (Fonte: O autor).

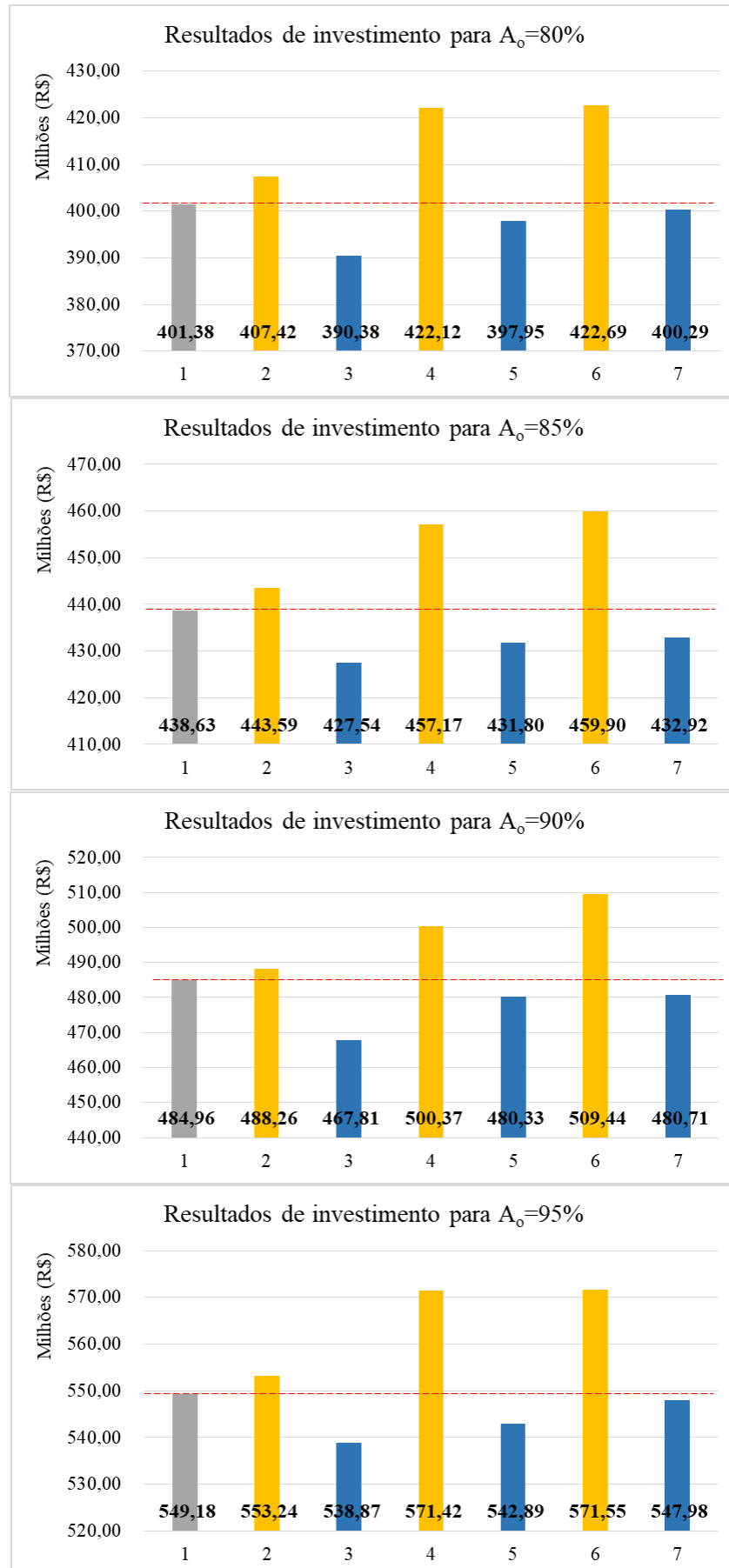


Figura 23 - Resultados por disponibilidade da frota de 113 aeronaves (Fonte: O autor).

Tabela 5.4 – Investimentos da frota de 67 aeronaves (Fonte: O autor).

	Investimento Total em R\$ (A₀=0,80)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,85)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,90)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,95)
Modelo Básico	268.019.000,00	294.676.000,00	330.676.750,00	381.986.875,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (5%)	284.964.250,00	312.035.250,00	347.415.000,00	394.530.500,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (5%)	255.808.875,00	283.072.500,00	313.734.375,00	365.265.875,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (10%)	295.662.125,00	321.956.875,00	353.087.375,00	406.849.875,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (10%)	261.918.250,00	288.264.750,00	323.725.000,00	373.062.875,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (15%)	298.609.000,00	322.336.375,00	357.575.250,00	409.710.500,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (15%)	262.614.000,00	290.173.750,00	324.294.250,00	372.999.625,00

Tabela 5.5 – Investimentos da frota de 113 aeronaves (Fonte: O autor).

	Investimento Total em R\$ (A₀=0,80)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,85)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,90)	Investimento Total em R\$ (A₀=0,95)
Modelo Básico	401.375.875,00	438.630.125,00	484.957.875,00	549.182.500,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (5%)	407.419.125,00	443.586.625,00	488.261.250,00	553.239.125,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (5%)	390.384.750,00	427.541.250,00	467.814.250,00	538.869.875,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (10%)	422.116.125,00	457.171.000,00	500.370.750,00	571.420.625,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (10%)	397.948.875,00	431.804.875,00	480.326.250,00	542.886.250,00
Modelo Proposto c/ Pior Alocação (15%)	422.685.375,00	459.902.250,00	509.435.625,00	571.547.125,00
Modelo Proposto c/ Melhor Alocação (15%)	400.289.125,00	432.920.375,00	480.705.750,00	547.975.000,00

O modelo proposto pode trazer mais detalhes quanto ao real intervalo de disponibilidade operacional ou investimento em estoque necessário para manter uma frota dentro das condições desejadas de operação e manutenção. Com isso, o modelo proposto pode permitir o responsável em gerenciar a frota se apoiar em definições de alocação das aeronaves e distribuição dos estoques para aprimorar a disponibilidade e até mesmo minimizar investimentos em estoque.

A instância de 10% de aeronaves destoante é a instância mais próxima da identificação feita com os dados coletados. Os resultados do modelo proposto para esta instância permanecem consistentes em todas rodadas do modelo proposto, tendo seus valores como melhores alternativas de custo-benefício para as melhores alocações. Isso é notadamente mantido em todas as instâncias de 10% de aeronaves destoantes em todos os cenários de frota.

Apesar do modelo básico ser a principal referência para modelos multi-escalon na indústria e a academia, o modelo proposto mostra resultados mais aprimorados com o uso do fator de confiabilidade de cada aeronave quando a frota já atingiu maturidade e dados consistentes. Dessa forma, o modelo básico não necessariamente representa a realidade em frotas com estágios mais avançados de maturidade, porém, em alguma situação aleatória de alocação o modelo básico pode representar uma alternativa de resultado.

Também é possível notar o deslocamento dos resultados de investimento das melhores alocações para valores mais próximos aos resultados de investimento obtidos com base na média. Da mesma forma, é possível notar um afastamento dos resultados de investimento referente à abordagem de pior alocação quando comparados aos resultados do modelo básico. Esse comportamento ocorre devido ao aumento das aeronaves destoantes na frota. Com isso, há uma tendência de os resultados do modelo básico estarem totalmente desalinhados em relação aos resultados alcançados com a utilização do modelo proposto, havendo uma quantidade de aeronaves destoantes acima de 15% na frota.

Contudo, os resultados do modelo proposto são mais vantajosos em dois aspectos. Primeiramente, caso a decisão seja com base na métrica de suportabilidade, a frota pode ter uma disponibilidade operacional mantida, porém, o investimento em estoque é reduzido. Outra alternativa, caso a decisão seja orientada pelo investimento, então, a disponibilidade pode ser ampliada conforme ilustrado na Figura 24.

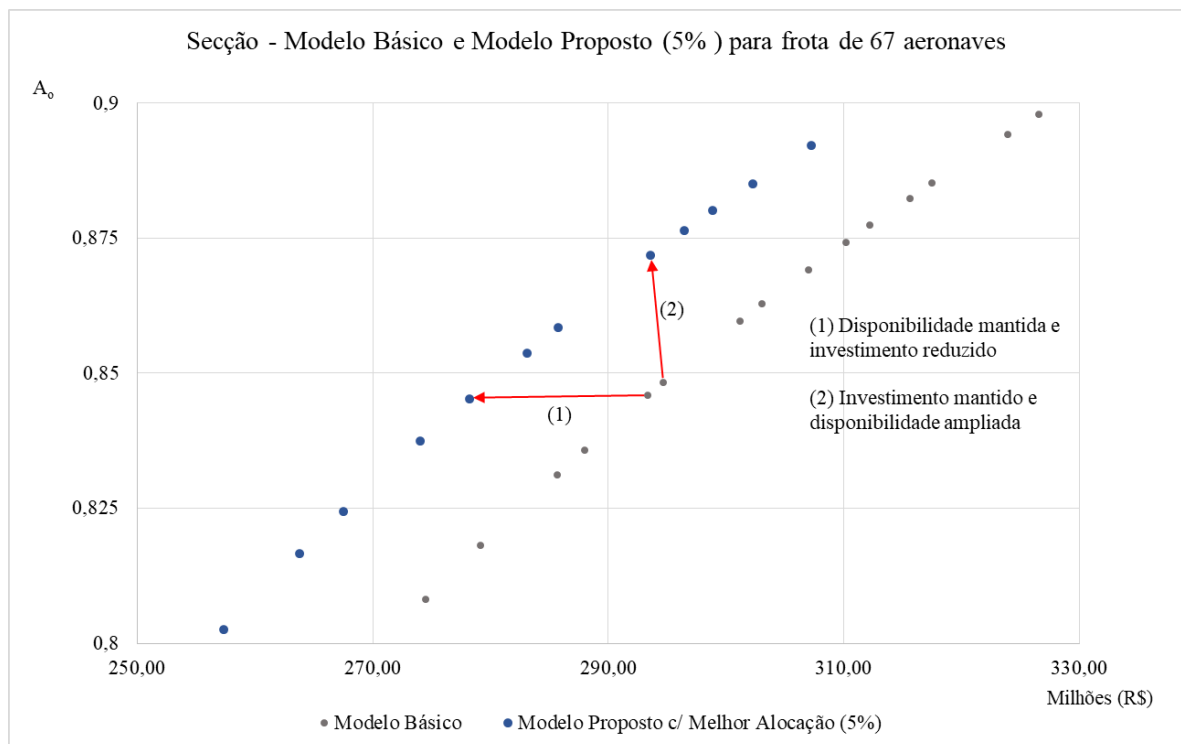


Figura 24 - Alternativas de análise da curva de custo-benefício (Fonte: O autor).

Ao comparar as curvas resultantes do modelo proposto, os resultados de investimento das melhores alocações estão em média menores -6,0%, -6,6% e -7,1% em relação aos resultados das piores alocações para as instâncias de 5%, 10% e 15% respectivamente, analisando os intervalos de disponibilidade de 80% a 95%.

Neste sentido, existem uma tendência em aumentar o ganho alterando a forma de alocar as aeronaves nas bases e tendo cada vez mais aeronaves destoantes na frota. Os resultados das alocações aleatórias das aeronaves ficam entre o resultado da melhor e pior alocação e em alguma situação de alocação, os ganhos podem ser minimizados.

5.1.2 Estudo de Caso – A-29 Super Tucano na FAB

Nesta seção são apresentados os resultados do estudo de caso conforme apresentado na seção 4.1.2. Este estudo de caso é inspirado na estrutura de suporte logístico que a FAB adota para as operações e manutenções do programa A-29 Super Tucano. Contudo, escopo de equipamentos não possui relação com os equipamentos de fato aplicáveis à configuração da aeronave.

Foi aplicada a instância de 11% de aeronaves destoantes na frota total de 75 aeronaves, havendo, então, 8 aeronaves destoantes nesta frota. Foi considerada a distribuição dessas aeronaves em 6 bases aéreas, sendo uma base área principal e outras cinco bases aéreas remotas conforme ilustrado na Figura 16 anteriormente na seção 4.1.2.

Seguindo a aplicação da metodologia, o modelo básico e o modelo proposto resultaram nas curvas de custo-benefício da relação entre a disponibilidade operacional (A_o) e o investimento total em estoque conforme a Figura 25. Neste estudo de caso, também foi gerada uma alocação aleatória a partir do modelo proposto, demonstrando seu resultado entre curvas de custo-benefício da melhor e pior alocação. Entretanto, divergindo do resultado produzido pelo modelo básico.

Os resultados podem ser analisados de forma consolidada como visto na Figura 26. Nota-se a tendências de os pontos ficarem aglomerados para disponibilidades acima de 95%. De forma a não gerar necessariamente resultados expressivos de redução de investimento ainda com a ocorrência de realocações. Todavia, os investimentos necessários para tais níveis são altíssimos e geralmente os níveis aceitáveis de disponibilidade em forças aéreas estão em torno de 80%, podendo variar para mais ou menos de acordo com aeronaves operadas e suas respectivas missões.

A decisão sendo tomada em relação à disponibilidade operacional, existe um ganho no investimento em estoque na melhor alocação quando comparada à pior alocação, reduzindo em -11,21% a estratégia de investimento em estoque quando assumida a disponibilidade operacional de 80%. Dessa forma para o mínimo de 80% de disponibilidade operacional (A_0), o resultado da pior alocação é de R\$ 347 milhões, passando para R\$ 308 milhões na melhor alocação. Seria um ganho de mais de R\$ 38 milhões para os cofres públicos, podendo gerar a oportunidades de investimento em outras áreas de interesse conforme percebido na Figura 27.

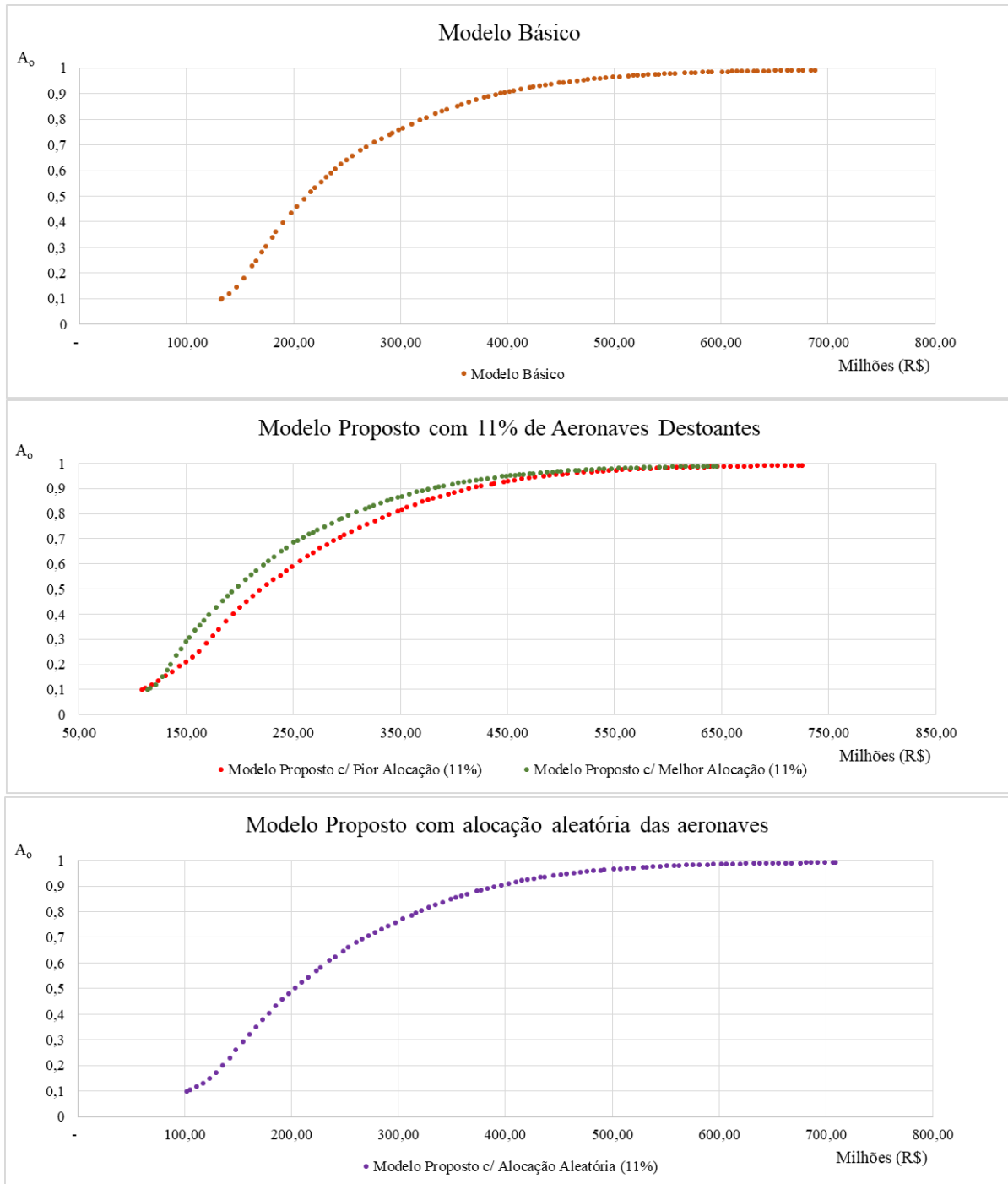


Figura 25 - Curvas de custo-benefício do estudo de caso (Fonte: O autor).

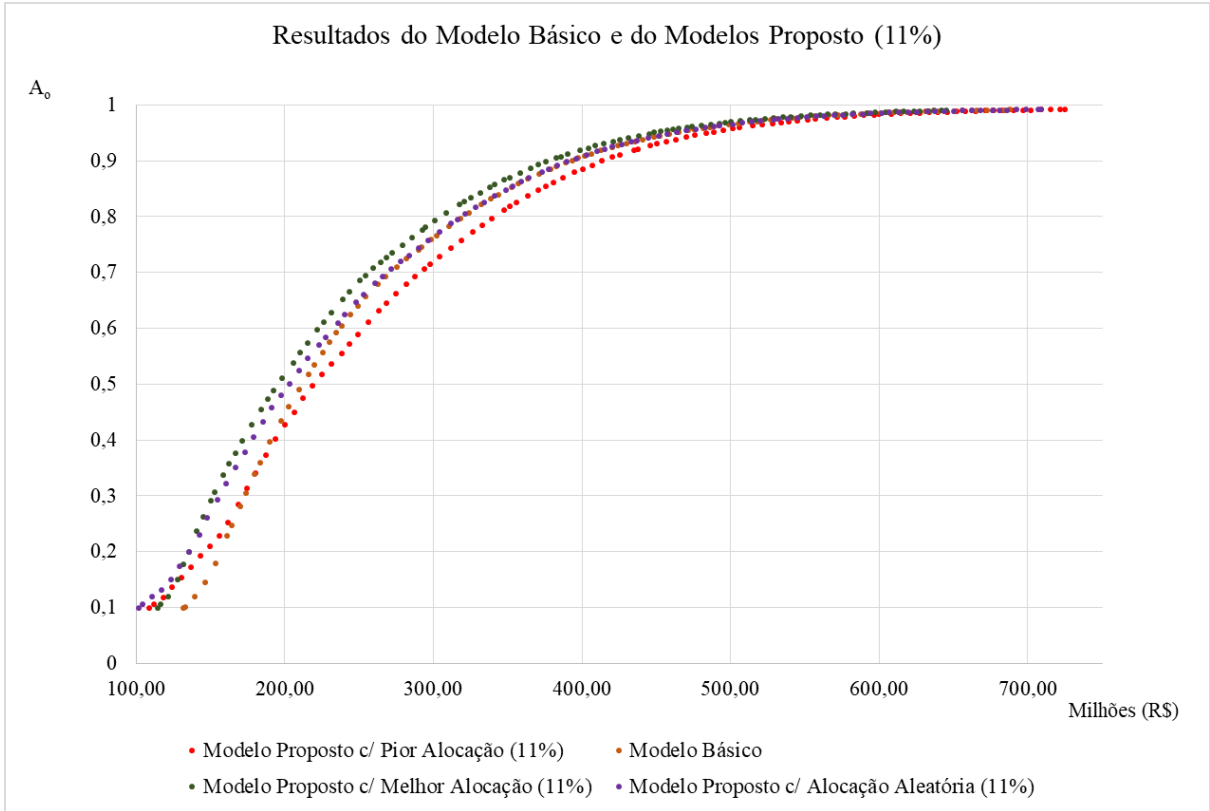


Figura 26 - Curvas de custo-benefício consolidadas (Fonte: O autor).

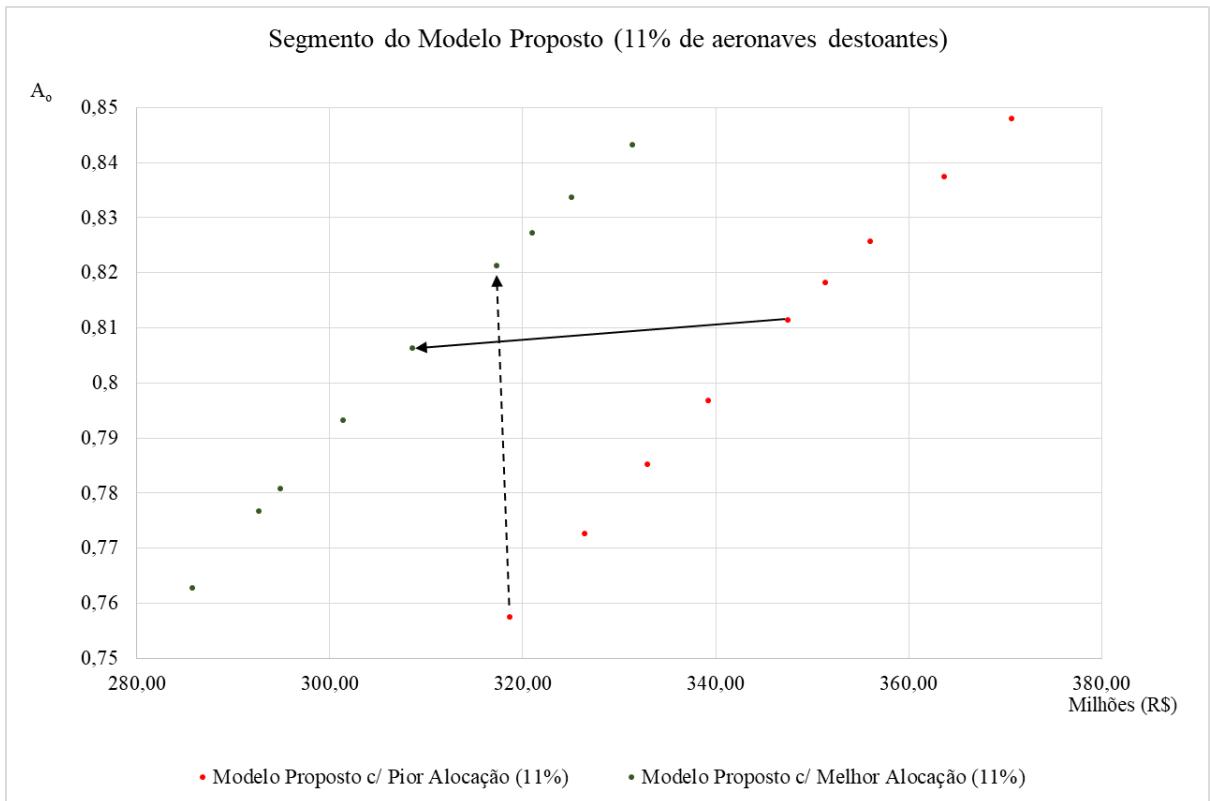


Figura 27 - Potenciais ganhos de custo-benefício consolidadas (Fonte: O autor).

De forma análoga, a decisão pode ser tomada com base no orçamento disponível. Ao assumir um investimento em estoque de até R\$ 320 milhões, pode haver uma ampliação de

disponibilidade, partindo da pior para a melhor alocação. Esse ganho é de até 6,38% de disponibilidade operacional ampliada, saindo de 75,75% para 82,13% e gerando uma redução marginal no investimento em estoque de R\$ 1,32 milhões. Esse comportamento também é observado na Figura 27 mostrada anteriormente com seta de linha tracejada.

Apesar dos ganhos exemplificados e da relevância em gerar potenciais reduções de investimento ou aumento na disponibilidade operacional, o modelo proposto é uma visão analítica da disponibilidade e investimento no estado-estacionário. Nesse sentido, seriam necessárias rodadas simulações ao longo do tempo para as devidas efetivações dos potenciais ganhos, adotando a estratégia de investimento e disponibilidade operacional desejadas de forma dinâmica. Seria, então, necessário analisar os resultados obtidos no decorrer do tempo, aplicando os ciclos de voo efetivo da frota no período desejado para aproximar-se ainda mais do ambiente real de operação.

Além disso, operador de alguma aeronave em questão pode apresentar dificuldades em levantar todos os dados reais de operação e manutenção da frota para a identificação de suas aeronaves destoantes. Isso pode ocorrer devido à escassez de informações ou até mesmo uma estrutura adequada de bases de dados. Essa é uma situação na qual o modelo proposto pode não atender as expectativas para a busca de uma solução otimizada de investimento em estoque ou disponibilidade operacional por meio das possíveis realocações das aeronaves.

Outra situação na qual o modelo proposto não tem efetividade, é na situação onde os dados são produzidos com consistência e precisão para identificação da aeronave destoante, porém, as aeronaves são todas operadas a partir de uma única base aérea, contendo todas as capacidades concentradas naquela localidade. Supostamente, este pode ser o caso dos modernos caças F-39 *Gripen NG* adquiridos pela FAB, onde toda a frota será operada a partir da base aérea de Anápolis a princípio.

Portanto, a frota deve apresentar mais do que uma localidade de operação para que o modelo tenha efetividade, bem como as localidades devem ter suas capacidades de manutenção e seus tempos logísticos diferenciados, podendo, assim, os ganhos serem observados. Além disso, outros aspectos precisariam ser incorporados para o modelo tornar-se uma ferramenta de decisão, como, por exemplo, tratar os demais conjuntos de peças de reposição descartáveis e sobressalentes utilizadas nas manutenções, aplicação de taxas de descarte de algumas peças reparáveis e até mesmo as diferenças de criticidade que os equipamentos embarcados podem ter no impacto da disponibilidade operacional.

6 Conclusão

O objetivo da dissertação foi modelar a relação entre disponibilidade operacional de uma frota e o correspondente investimento em estoque considerando o comportamento de cada aeronave em termos de confiabilidade. Para isso, o trabalho realizado apresentou uma proposta de modelo multi-escalão associando parâmetros de desempenho de suportabilidade, aspectos das aeronaves e alternativas de alocações da frota entre as diversas bases aéreas relacionadas à estrutura de suporte logístico.

Primeiramente, para identificar a existência de aeronaves com desempenho de confiabilidade destoante, foram verificadas e analisadas bases de dados de manutenção e operação inspiradas em desempenhos observados por diferentes frotas de aeronave amplamente operadas no cenário global. Dessa análise, confirmou-se a existências de diversos comportamentos na frota, inclusive aeronaves que estão fora dos limites estatísticos assumidos neste trabalho como comportamento regular. Assim, um conjunto de aeronaves mostraram um comportamento discrepante às demais, sendo elas elencadas como aeronaves destoantes.

Neste contexto, o problema de suportabilidade foi reproduzido com base no modelo básico (tradicional) e no modelo proposto onde neste último foi considerado o comportamento de confiabilidade individual de cada aeronave. Com o uso do fator de confiabilidade individualizado, abordagens de alocação e variação de instâncias de aeronaves destoantes, o modelo proposto trouxe soluções satisfatórias em termos de potenciais de redução de investimento em estoque ou potenciais ampliações da disponibilidade operacional. Essas decisões podem ser baseadas na expectativa de um requisito de disponibilidade operacional para a frota ou devido à alguma condição de orçamento previsto.

Ao executar avaliações dos resultados de disponibilidade operacional e investimentos obtidos por meio do modelo proposto, esses resultados mostraram que o modelo proposto proporcionou melhores resultados em relação ao modelo básico, considerando os comportamentos de aeronave da frota sendo destoantes ou não. À luz dos resultados, o modelo proposto se mostrou mais eficiente que o modelo básico quando aplicada a melhor alocação possível em todas as instâncias aplicadas. É evidente o resultado atingido quando comparado também à alternativa de pior alocação possível, pois fica estabelecido um limite inferior e superior com as curvas de custo-benefício.

Foram obtidos resultados satisfatórios no modelo proposto quando elaboradas as avaliações de sensibilidade nos variados tamanhos de frota e estudo de caso. As avaliações trouxeram variabilidade de aeronaves destoantes em cada frota definida onde as alocações causaram os impactos esperados nos resultados. Isso é notado através das relações obtidas entre o deslocamento sofrido pelas curvas de custo-benefício resultantes do modelo proposto em relação à curva de custo-benefício do modelo básico.

O modelo proposto traz sua contribuição para a indústria e operadores, como, por exemplo, a FAB. Com isso, os gerentes de frota têm mais recursos para apoiar a decisão de realocar as aeronaves nas bases aéreas ou aeroportos, permitindo possíveis ganhos em disponibilidade operacional ou investimento em estoque.

Além disso, é reforçada a importância em monitorar as informações de manutenção e operação geradas pelas aeronaves, pois o modelo proposto contribui sobre como elas podem ser utilizadas a favor das análises de suprimentos. A FAB já contém aeronaves com capacidades de geração de dados manutenção e operação, como o KC-390 *Millennium* e o F-39 *Gripen NG*, para aprimoramento de suas capacidades de suportabilidade, gerando oportunidade de potenciais melhorias do modelo pelo uso no gerenciamento dessas frotas.

Apesar disso, o modelo proposto também apresenta limitações em relação à realidade, pois somente as peças reparáveis são tratadas. Do mesmo modo, há necessidade de ampliar as análises para o conjunto de peças descartáveis (não reparáveis) que seguem geralmente outras políticas de estoque, estando essas peças agrupadas em lotes econômicos mínimos.

Outra limitação existente, está associada ao modelo proposto tratar a solução no estado-estacionário da frota. As operações e manutenções ocorrem em um ambiente dinâmico. Neste caso, os resultados obtidos por meio do modelo proposto requerem simulações ao longo do tempo para aplicar as características mais latentes que poderiam ser experimentadas no ambiente real de operação.

6.1 Trabalhos Futuros

Uma forma de possibilitar a extensão do modelo proposto é considerar peças descartáveis, considerando as suas utilizações durante as manutenções corretivas. Esse conjunto de peças são baratas quando comparadas aos equipamentos reparáveis instalados na aeronave. Além disso, as peças descartáveis geralmente seguem outra política de estoque de modo à serem adquiridas em lotes econômicos mínimos. Contudo, esses materiais descartáveis e

sobressalentes podem também afetar a disponibilidade da aeronave e até mesmo comprometer a execução de uma missão.

Outra alternativa é também explorar as capacidades de peças de reposição no nível das oficinas de reparo. Os equipamentos falhados ao serem destinados aos centros de reparo também requerem a substituição interna de seus componentes, também referidos como SRU. A limitação das capacidades das linhas de processo de reparo e quantidades disponíveis desses componentes podem trazer diferentes resultados para otimização considerando a informação individual de confiabilidade para cada aeronave.

Além do aspecto da confiabilidade, aspectos da manutenibilidade pode ser adotado para a identificação de aeronaves destoantes uma vez que a manutenibilidade também é outra métrica de suportabilidade. De fato, na vida prática, as aeronaves que demandam mais tempo de manutenção e ficam menos tempo disponíveis são as que mais afetam a disponibilidade operacional da frota.

Um caso futuro à ser estudado e com interface a este trabalho, são as operações de transporte realizadas com helicópteros para as plataformas petrolíferas *off-shore*. Este é um caso semelhante ao apresentado neste trabalho, pois as operações partem de múltiplas bases aéreas costeiras, tendo início e fim em sua origem. Essas bases aéreas apresentam uma relação multi-escalão onde uma base de aérea principal tem a atribuição de suprir as demais bases. Além disso, há um outro desafio neste problema uma vez que os eventos de falha podem ocorrer nas plataformas. Assim, essas plataformas *off-shore* podem ser também consideradas um escalão na estrutura logística de suporte para essas operações.

Por fim, com os avanços tecnológicos, alguns equipamentos já podem produzir informações de prognóstico e terem sua saúde gerenciada constantemente. O acesso a esses dados pode permitir um refinamento do modelo proposto visto que o monitoramento passa a ser feito em um nível mais profundo no uso do equipamento e não no nível da frota. Além disso, essa integração pode trazer maior previsibilidade para as capacidades necessárias de manutenção de linha, além de um possível relaxamento da premissa adotada para o comportamento de cada aeronave. Assim, o comportamento destoante da aeronave não é propagado igualmente para todos os sistemas da aeronave, podendo ser avaliado de acordo com cada conjunto de sistemas em cada aeronave.

Referências

- AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE. **SX000i**: International specification for Integrated Product Support (IPS). 2nd ed. Brussels: ASD, 2020.
- AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE. **S3000L**: International procedure specification for logistics support analysis LSA. Brussels: ASD, 2014.
- AHMADI, S. *et al.* Reliability, availability and maintainability analysis of the conveyor system in mechanized tunneling. **Measurement**, v. 145, p. 756-764, Jun. 2019.
- 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, Jan. 2021.
- BALLOU, R.H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: logística empresarial. 5^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- BANKS, J. *et al.* **Discrete-event system simulation**. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010. p. 34-39.
- BAZARGAN, M. **Airline operations and scheduling**. 2nd ed. Daytona Beach: Embry-Riddle Aeronautical University, US, 2010. 1-61 p.
- BLANCHARD, B.S.; BLYLER, J.E. **Systems engineering management**. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016. p. 16-167
- BLANCHARD, B.S. **Logistic engineering and management**. 6th Ed. Harlow, Essex: Pearson Education, 2014. P. 48-76.
- BLANCHARD, B.S.; FABRYCKY, W.J. **System Engineering and Analysis**. 5th ed. Harlow, Essex: Pearson Education, 2014. p. 410-534.
- CHO, P.Y. **Optimal scheduling of fighter aircraft maintenance**. 2011. 13 p. Thesis (M. Sc. in Operations Research) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2011.
- COSTANTINO, F. *et al.* Spare parts management for irregular demand items. **Omega**, v. 81, p. 57-66, Dec. 2018.
- COSTANTINO, F.; GRAVIO, G.D.; TRONCI, M. Multi-echelon, multi-indenture spare parts inventory control subject to system availability and budget constraints. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 119, p. 95-101, Nov. 2013.
- DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY **Product Support Manager (PSM) guidebook**. Springfield: DAU, 2019a.
- DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY **Integrated Product Support (IPS) elements Guidebook**. Springfield: DAU, 2019b.

DRIESSEN, M.A. *et al.* Capacity assignment in repair shops with high material uncertainty. **International Journal of Production Economics**, v. 221, Mar. 2020.

ELTOUKHY, A. E. E. *et al.* Data analytics in managing aircraft routing and maintenance staffing with price competition by a Stackelberg-Nash game model. **Transportation Research Part E**, v. 122, p. 143-168, Feb. 2019.

FRITZSCHE, R. Cost adjustment for single item pooling models using a dynamic failure rate: A calculation for the aircraft industry. **Transportation Research Part E**, v. 48, n. 6, p. 1065-1079, Nov. 2012.

GEIER, W.; VILSMEIER, J. Supportability of composite airframes: an integrated logistic viewpoint. **Composite Structures**, v. 10, n. 1, p. 17-36, 1988.

GLEISSNER, H.; FEMERLING, J.C. **Logistics**. 1^a ed. Cham: Springer, 2014. 140 p.

HALLIN, S. **Modeling of life-limited spare units in a steady-state scenario**. 2015. 74 p. Thesis (Master's in Optimization and Systems Theory) -Master Programme in Applied and Computational Mathematics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015.

HORENBEEK, A.V. *et al.* Joint maintenance and inventory optimization systems: a review. **International Journal of Production Economics**, v. 143, n. 2, p. 499-508, Jun. 2013.

IVANOV, D.; TSIPOULANIDIS, A.; SCHÖNBERGER, J. **Global supply chain and operations management**. 2^a ed. Cham: Springer, 2019. 363 p.

JOHANSSON, L. *et al.* Controlling distribution inventory systems with shipment consolidation and compound Poisson demand. **European Journal of Operational Research**, v. 280, n. 1, p. 90-101, Jan. 2020.

KENNEDY, W.J.; PATTERSON, J.W.; FREDENDALL, L.D. An overview of recent literature on spare parts inventories. **International Journal of Production Economics**, v. 76, n. 2, p. 201-215, Mar. 2002.

KILPI, J.; VEPSÄLÄINEN, A.P.J. Pooling of spare components between airlines. **Journal of Air Transport Management**, v. 10, n. 2, p. 137-146, Mar. 2004.

KOK, T. *et al.* A typology and literature review on stochastic multi-echelon inventory models. **European Journal of Operational Research**, v. 269, n. 3, p. 955-983, Sept. 2018.

MOFOKENG, T.; MATIVENGA, P.T.; MARNEWICK, A. Analysis of aircraft maintenance processes and cost. **Procedia CIRP**, v. 90, p. 467-472, 2020.

MUCKSTADT, J.A. A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system. **Management Science**, v. 20, n. 4, p. 472-481, Dec. 1973.

PATRA, P. *et al.* Effective management of performance-based contracts for sustainment dominant systems. **International Journal of Production Economics**, v. 208, p. 369-382, Feb. 2019.

PATRIARCA, R.; COSTANTINO, F.; GRAVIO, G. Inventory model for multi-echelon system with unidirectional lateral transshipment. **Expert Systems With Applications**, v. 65, p. 372-382, Dec. 2016.

PATRIARCA, R. *et al.* Inventory optimization for a customer airline in a performance based contract. **Journal of Air Transport Management**, v. 57, p. 206-216, Oct. 2016.

PESCHIERA, F. *et al.* **Long term planning of military aircraft flight and maintenance operation**. [S. l.]: [arXiv Operational Status](https://arxiv.org/abs/2001.09856), 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2001.09856>. Acesso em: 16 mar. 2021.

PEK, E.K.W. **Development of availability and sustainability spares optimization models for aircraft reparables**. 2013. 86 p. Thesis (Master of Science in Logistics and Supply Chain Management) - Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, 2013.

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

SARAGIH, N.I.; *et al.* A heuristic method for location-inventory-routing problem in a three-echelon supply chain system. **Computers & Industrial Engineering**, v. 127, p. 875-886, Jan. 2019.

SELÇUK, B. An adaptive base stock policy for repairable item inventory control. **International Journal of Production Economics**, v. 143, n. 2, p. 304-315, Jun. 2013.

SHAWLEE, W.; HUMPHREY, D. Aging avionics-what causes it and how to respond. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, v. 24, n. 4, p. 739-740, 2001.

SHEIKH-ZADEH, A.; FARHANGI, H.; ROSSETTI, M.D. Inventory grouping and sensitivity analysis in multi-echelon spare part provisioning systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 143, n. artigo 106230, May 2020.

SHEIKH-ZADEH, A.; ROSSETTI, M.D. Classification methods for problem size reduction in spare part provisioning. **International Journal of Production Economics**, v. 219, p. 99-114, Jan. 2020.

SHENG, J.; PRESCOTT, D. A coloured Petri net framework for modelling aircraft fleet maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 189, p. 67-88, Sept. 2019.

SHERBROOKE, C.C. METRIC: a multi-echelon technique for recoverable item control. **Operations Research**, v. 16, n.1, p. 122-141, Feb. 1968.

SHERBROOKE, C.C. VARI-METRIC: improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models. **Operations Research**, v. 34, n.2, p. 311-319, Apr. 1986.

SHERBROOKE, C.C. **Optimal inventory modeling of systems: multi-echelon techniques**. 2^a ed. Boston: Kluwer Academic, 2004.

SILVA, J.F. **Aplicação de algoritmo genético e programação de metas no problema de planejamento de manutenção de aeronaves militares**. 2018. 95f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

SYSTECON. **Opus Suite 2018**. Stokholm: Systecon, 2018. Disponível em: <https://www.systecongroup.com/sites/default/files/2018-09/Opus%20Suite%20release%202018.pdf> Acesso em: 07 maio 2021.

TRACHT, K.; HAGEN, F.; SCHNEIDER, D. Applied repairable-item inventory modeling in the aviation industry. **Procedia CIRP**, v. 11, p. 334-339, 2013.

TFD GROUP. **VMetric**. Carmel, [2019?] Disponível em: https://6fa7c38f-d7a0-4ea4-9f22-3a9c9f18bff5.filesusr.com/ugd/37c47b_61c28c557575437dba5f1f84a77f4560.pdf. Acesso em: 07 maio 2021.

UNITED STATES. Department of Defense. **The defense acquisition system**. Washington, DC: Department of Defense, United States 2018.

UNITED STATES. Department of Defense. **Guide for achieving reliability, availability, and maintainability**. Washington, DC: Department of Defense, United States, 2005.

VAN DEN BERGH, J. *et al.* **Aircraft maintenance operations: state of the art**. Brussel: Faculteid Economie en Bedrijfswetenschappen, Katholieke Universiteit, 2013 (2013/09). Research papers

WANG, Y.; LONG, H. Summary and analysis of the aging aircraft's failure. **Procedia Engineering**, v. 17, p. 303-309, Jan. 2011.

WIKANDER, M. **Modeling unit replacement associated with preventive maintenance**. 2016. 59 p. Thesis (Master's in Systems Engineering) - Degree Programme in Aerospace Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2016.

WONG, H.W. Pooling of repairable spare parts: a study on inventory policies. **A Quarterly Journal of Operations Research**, v. 3, n. 3, p. 253-256, Sept. 2005.

Apêndice A – Listagem de Equipamentos

Este apêndice contém os parâmetros técnicos de todos os equipamentos utilizados na aplicação do modelo básico e modelo proposto.

Equipamento (I)	Sistema da Aeronave	Preço (C _i) [R\$]	Taxa de Falha (λ_i) [1/Milhões de Horas]	Quantidade Total Instalada por Aeronave (Q _i)	Tempo de Reparo na Base Aérea Principal em dias (T _{ij})
LRU#1-G1	Ar Condicionado	189.750,00	238,095	2	45
LRU#2-G1	Ar Condicionado	63.250,00	102,041	2	45
LRU#3-G1	Ar Condicionado	126.500,00	95,238	3	45
LRU#4-G1	Ar Condicionado	316.250,00	129,87	2	45
LRU#5-G1	Ar Condicionado	664.125,00	71,429	2	45
LRU#6-G1	Ar Condicionado	316.250,00	95,238	2	45
LRU#7-G1	Ar Condicionado	126.500,00	41,667	2	45
LRU#8-G1	Ar Condicionado	126.500,00	35,461	2	45
LRU#9-G1	Ar Condicionado	126.500,00	59,524	2	45
LRU#10-G1	Ar Condicionado	63.250,00	35,461	2	45
LRU#11-G1	Ar Condicionado	253.000,00	102,041	2	45
LRU#12-G1	Ar Condicionado	126.500,00	59,524	2	45
LRU#13-G1	Ar Condicionado	126.500,00	59,524	3	45
LRU#14-G1	Ar Condicionado	126.500,00	69,444	2	45
LRU#15-G1	Ar Condicionado	126.500,00	250	1	45
LRU#16-G1	Ar Condicionado	126.500,00	250	2	45
LRU#17-G2	Sistema Elétrico	2.817.500,00	250	2	60
LRU#18-G2	Sistema Elétrico	316.250,00	142,857	2	60

Equipamento (I)	Sistema da Aeronave	Preço (C_i) [R\$]	Taxa de Falha (λ_i) [1/Milhões de Horas]	Quantidade Total Instalada por Aeronave (Q_i)	Tempo de Reparo na Base Aérea Principal em dias (T_{ij})
LRU#19-G2	Sistema Elétrico	2.173.500,00	17,007	1	60
LRU#20-G2	Sistema Elétrico	664.125,00	109,89	1	60
LRU#21-G3	Comandos de Voo	442.750,00	178,571	3	120
LRU#22-G3	Comandos de Voo	2.716.875,00	89,286	2	120
LRU#23-G3	Comandos de Voo	316.250,00	33,333	20	120
LRU#24-G3	Comandos de Voo	189.750,00	33,333	2	120
LRU#25-G3	Comandos de Voo	189.750,00	33,333	2	120
LRU#26-G3	Comandos de Voo	189.750,00	33,333	2	120
LRU#27-G3	Comandos de Voo	189.750,00	33,333	2	120
LRU#28-G3	Comandos de Voo	2.052.750,00	250	1	120
LRU#29-G3	Comandos de Voo	1.026.375,00	72,464	2	120
LRU#30-G3	Comandos de Voo	784.875,00	102,041	2	120
LRU#31-G3	Comandos de Voo	845.250,00	102,041	2	120
LRU#32-G3	Comandos de Voo	442.750,00	55,556	8	120
LRU#33-G3	Comandos de Voo	442.750,00	55,556	4	120
LRU#34-G3	Comandos de Voo	442.750,00	102,041	3	120
LRU#35-G3	Comandos de Voo	1.750.875,00	66,667	1	120
LRU#36-G3	Comandos de Voo	1.690.500,00	72,464	2	120
LRU#37-G3	Comandos de Voo	1.690.500,00	72,464	2	120
LRU#38-G3	Comandos de Voo	506.000,00	59,524	5	120
LRU#39-G5	Sistema Hidráulico	506.000,00	27,778	4	60
LRU#40-G5	Sistema Hidráulico	316.250,00	52,083	2	60

Equipamento (I)	Sistema da Aeronave	Preço (C_i) [R\$]	Taxa de Falha (λ_i) [1/Milhões de Horas]	Quantidade Total Instalada por Aeronave (Q_i)	Tempo de Reparo na Base Aérea Principal em dias (T_{ij})
LRU#41-G6	Sistema de Trem de Pouso	379.500,00	119,048	2	180
LRU#42-G6	Sistema de Trem de Pouso	126.500,00	71,429	2	180
LRU#43-G6	Sistema de Trem de Pouso	253.000,00	119,048	1	180
LRU#44-G6	Sistema de Trem de Pouso	189.750,00	71,429	1	180
LRU#45-G6	Sistema de Trem de Pouso	1.086.750,00	102,041	4	180
LRU#46-G6	Sistema de Trem de Pouso	253.000,00	109,89	1	180
LRU#47-G6	Sistema de Trem de Pouso	379.500,00	416,667	8	180
LRU#48-G8	Sistema Pneumático	126.500,00	27,778	2	60
LRU#49-G8	Sistema Pneumático	126.500,00	55,556	1	60
LRU#50-G10	Unidade Auxiliar de Energia	253.000,00	95,238	1	150
LRU#51-G10	Unidade Auxiliar de Energia	6.480.250,00	238,095	1	150
LRU#52-G10	Unidade Auxiliar de Energia	379.500,00	95,238	1	150
LRU#53-G10	Unidade Auxiliar de Energia	784.875,00	158,73	1	150
LRU#54-G10	Unidade Auxiliar de Energia	569.250,00	109,89	1	150

Apêndice B – Parâmetros para frota de 67 e 113 aeronaves

Este apêndice contém os fatores de confiabilidade (D_k) utilizados nas frotas de 67 e 113 aeronaves que foram aplicados no modelo proposto.

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade	Fator de Confiabilidade (Dk) [5%]	Fator de Confiabilidade (Dk) [10%]	Fator de Confiabilidade (Dk) [15%]
A/C-TN1	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN2	Base Aérea Principal 01	0,940	0,940	0,940
A/C-TN3	Base Aérea Principal 01	0,900	0,900	0,900
A/C-TN4	Base Aérea Principal 01	0,920	0,920	0,920
A/C-TN5	Base Aérea Principal 01	0,930	0,930	0,930
A/C-TN6	Base Aérea Principal 01	0,910	0,910	0,910
A/C-TN7	Base Aérea Principal 01	0,940	0,940	0,940
A/C-TN8	Base Aérea Principal 01	0,980	0,980	0,980
A/C-TN9	Base Aérea Principal 01	0,990	0,990	0,990
A/C-TN10	Base Aérea Principal 01	0,960	0,960	0,960
A/C-TN11	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN12	Base Aérea Principal 01	0,990	0,990	0,990
A/C-TN13	Base Aérea Principal 01	0,980	0,980	0,980
A/C-TN14	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN15	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN16	Base Aérea Principal 01	0,960	0,960	0,960
A/C-TN17	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN18	Base Aérea Principal 01	0,980	0,980	0,980
A/C-TN19	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN20	Base Aérea Principal 01	0,920	0,920	0,920
A/C-TN21	Base Aérea Principal 01	0,960	0,960	0,960
A/C-TN22	Base Aérea Principal 01	0,920	0,920	0,920
A/C-TN23	Base Aérea Principal 01	0,910	0,910	0,910
A/C-TN24	Base Aérea Remota 02	0,500	0,500	0,500
A/C-TN25	Base Aérea Remota 02	0,980	0,980	0,980
A/C-TN26	Base Aérea Remota 02	0,980	0,980	0,980
A/C-TN27	Base Aérea Remota 02	0,520	0,520	0,520
A/C-TN28	Base Aérea Remota 02	0,660	0,660	0,660
A/C-TN29	Base Aérea Remota 02	0,610	0,610	0,610
A/C-TN30	Base Aérea Remota 02	0,640	0,640	0,640
A/C-TN31	Base Aérea Remota 02	0,570	0,570	0,570
A/C-TN32	Base Aérea Remota 02	0,680	0,680	0,680

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade	Fator de Confiabilidade (Dk) [5%]	Fator de Confiabilidade (Dk) [10%]	Fator de Confiabilidade (Dk) [15%]
A/C-TN33	Base Aérea Remota 02	0,710	0,710	0,710
A/C-TN34	Base Aérea Remota 02	0,500	0,500	0,500
A/C-TN35	Base Aérea Remota 02	0,690	0,690	0,690
A/C-TN36	Base Aérea Remota 02	0,860	0,860	0,860
A/C-TN37	Base Aérea Remota 02	0,790	0,790	0,790
A/C-TN38	Base Aérea Remota 02	0,860	0,860	0,860
A/C-TN39	Base Aérea Remota 02	0,500	0,500	0,500
A/C-TN40	Base Aérea Remota 02	0,780	0,780	0,780
A/C-TN41	Base Aérea Remota 02	0,670	0,670	0,670
A/C-TN42	Base Aérea Remota 02	0,850	0,850	0,850
A/C-TN43	Base Aérea Remota 02	0,620	0,620	0,620
A/C-TN44	Base Aérea Remota 02	0,750	0,750	0,750
A/C-TN45	Base Aérea Remota 02	0,990	0,990	0,990
A/C-TN46	Base Aérea Remota 03	0,990	0,990	0,990
A/C-TN47	Base Aérea Remota 03	1,256	1,637	1,637
A/C-TN48	Base Aérea Remota 03	0,790	0,790	0,790
A/C-TN49	Base Aérea Remota 03	1,270	1,524	1,524
A/C-TN50	Base Aérea Remota 03	0,810	0,810	0,810
A/C-TN51	Base Aérea Remota 03	2,855	2,855	2,855
A/C-TN52	Base Aérea Remota 03	0,690	0,690	0,690
A/C-TN53	Base Aérea Remota 03	0,910	0,910	0,910
A/C-TN54	Base Aérea Remota 03	1,000	1,000	1,000
A/C-TN55	Base Aérea Remota 03	0,710	0,710	0,710
A/C-TN56	Base Aérea Remota 03	3,765	3,765	3,765
A/C-TN57	Base Aérea Remota 03	0,820	0,820	0,820
A/C-TN58	Base Aérea Remota 03	1,290	1,290	1,439
A/C-TN59	Base Aérea Remota 03	1,268	1,268	1,449
A/C-TN60	Base Aérea Remota 03	1,273	2,606	2,606
A/C-TN61	Base Aérea Remota 03	2,330	2,330	2,330
A/C-TN62	Base Aérea Remota 03	0,920	0,920	0,920
A/C-TN63	Base Aérea Remota 03	0,560	0,560	0,560
A/C-TN64	Base Aérea Remota 03	0,540	0,540	0,540
A/C-TN65	Base Aérea Remota 03	1,265	1,265	1,443
A/C-TN66	Base Aérea Remota 03	0,880	0,880	0,880
A/C-TN67	Base Aérea Remota 03	2,923	2,923	2,923

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade	Fator de Confiabilidade e (Dk) [5%]	Fator de Confiabilidade e (Dk) [10%]	Fator de Confiabilidade e (Dk) [15%]
A/C-TN1	Base Aérea Principal 01	0,830	0,830	0,830
A/C-TN2	Base Aérea Principal 01	0,954	0,954	0,954
A/C-TN3	Base Aérea Principal 01	0,990	0,990	0,990
A/C-TN4	Base Aérea Principal 01	0,959	0,959	0,959
A/C-TN5	Base Aérea Principal 01	0,967	0,967	0,967
A/C-TN6	Base Aérea Principal 01	0,988	0,988	0,988
A/C-TN7	Base Aérea Principal 01	0,800	0,800	0,800
A/C-TN8	Base Aérea Principal 01	0,850	0,850	0,850
A/C-TN9	Base Aérea Principal 01	0,840	0,840	0,840
A/C-TN10	Base Aérea Principal 01	0,995	0,995	0,995
A/C-TN11	Base Aérea Principal 01	0,990	0,990	0,990
A/C-TN12	Base Aérea Principal 01	0,962	0,962	0,962
A/C-TN13	Base Aérea Principal 01	0,800	0,800	0,800
A/C-TN14	Base Aérea Principal 01	0,910	0,910	0,910
A/C-TN15	Base Aérea Principal 01	0,870	0,870	0,870
A/C-TN16	Base Aérea Principal 01	0,980	0,980	0,980
A/C-TN17	Base Aérea Principal 01	0,800	0,800	0,800
A/C-TN18	Base Aérea Principal 01	0,780	0,780	0,780
A/C-TN19	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN20	Base Aérea Principal 01	0,910	0,910	0,910
A/C-TN21	Base Aérea Principal 01	0,930	0,930	0,930
A/C-TN22	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN23	Base Aérea Principal 01	0,940	0,940	0,940
A/C-TN24	Base Aérea Principal 01	0,880	0,880	0,880
A/C-TN25	Base Aérea Principal 01	0,960	0,960	0,960
A/C-TN26	Base Aérea Principal 01	0,800	0,800	0,800
A/C-TN27	Base Aérea Principal 01	0,940	0,940	0,940
A/C-TN28	Base Aérea Principal 01	0,810	0,810	0,810
A/C-TN29	Base Aérea Principal 01	0,830	0,830	0,830
A/C-TN30	Base Aérea Principal 01	0,790	0,790	0,790
A/C-TN31	Base Aérea Principal 01	1,000	1,000	1,000
A/C-TN32	Base Aérea Principal 01	0,800	0,800	0,800
A/C-TN33	Base Aérea Principal 01	0,820	0,820	0,820
A/C-TN34	Base Aérea Principal 01	0,890	0,890	0,890
A/C-TN35	Base Aérea Principal 01	0,950	0,950	0,950
A/C-TN36	Base Aérea Principal 01	0,800	0,800	0,800
A/C-TN37	Base Aérea Principal 01	0,870	0,870	0,870
A/C-TN38	Base Aérea Principal 01	0,960	0,960	0,960
A/C-TN39	Base Aérea Remota 02	0,780	0,780	0,780
A/C-TN40	Base Aérea Remota 02	0,850	0,850	0,850

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade	Fator de Confiabilidade e (Dk) [5%]	Fator de Confiabilidade e (Dk) [10%]	Fator de Confiabilidade e (Dk) [15%]
A/C-TN41	Base Aérea Remota 02	0,860	0,860	0,860
A/C-TN42	Base Aérea Remota 02	0,780	0,780	0,780
A/C-TN43	Base Aérea Remota 02	0,920	0,920	0,920
A/C-TN44	Base Aérea Remota 02	0,800	0,800	0,800
A/C-TN45	Base Aérea Remota 02	0,890	0,890	0,890
A/C-TN46	Base Aérea Remota 02	0,980	0,980	0,980
A/C-TN47	Base Aérea Remota 02	0,790	0,790	0,790
A/C-TN48	Base Aérea Remota 02	0,930	0,930	0,930
A/C-TN49	Base Aérea Remota 02	0,930	0,930	0,930
A/C-TN50	Base Aérea Remota 02	0,780	0,780	0,780
A/C-TN51	Base Aérea Remota 02	0,960	0,960	0,960
A/C-TN52	Base Aérea Remota 02	0,910	0,910	0,910
A/C-TN53	Base Aérea Remota 02	0,980	0,980	0,980
A/C-TN54	Base Aérea Remota 02	0,950	0,950	0,950
A/C-TN55	Base Aérea Remota 02	0,920	0,920	0,920
A/C-TN56	Base Aérea Remota 02	0,959	0,959	0,959
A/C-TN57	Base Aérea Remota 02	1,000	1,000	1,000
A/C-TN58	Base Aérea Remota 02	0,980	0,980	0,980
A/C-TN59	Base Aérea Remota 02	0,990	0,990	0,990
A/C-TN60	Base Aérea Remota 02	0,940	0,940	0,940
A/C-TN61	Base Aérea Remota 02	0,990	0,990	0,990
A/C-TN62	Base Aérea Remota 02	0,970	0,970	0,970
A/C-TN63	Base Aérea Remota 02	0,998	0,998	0,998
A/C-TN64	Base Aérea Remota 02	0,960	0,960	0,960
A/C-TN65	Base Aérea Remota 02	0,997	0,997	0,997
A/C-TN66	Base Aérea Remota 02	0,950	0,950	0,950
A/C-TN67	Base Aérea Remota 02	1,000	1,000	1,000
A/C-TN68	Base Aérea Remota 02	0,975	0,975	0,975
A/C-TN69	Base Aérea Remota 02	0,930	0,930	0,930
A/C-TN70	Base Aérea Remota 02	0,920	0,920	0,920
A/C-TN71	Base Aérea Remota 02	0,940	0,940	0,940
A/C-TN72	Base Aérea Remota 02	0,984	0,984	0,984
A/C-TN73	Base Aérea Remota 02	0,940	0,940	0,940
A/C-TN74	Base Aérea Remota 02	1,000	1,000	1,000
A/C-TN75	Base Aérea Remota 02	0,930	0,930	0,930
A/C-TN76	Base Aérea Remota 02	0,970	0,970	0,970
A/C-TN77	Base Aérea Remota 03	1,875	1,875	1,875
A/C-TN78	Base Aérea Remota 03	1,062	1,062	1,503
A/C-TN79	Base Aérea Remota 03	0,960	0,960	0,960
A/C-TN80	Base Aérea Remota 03	1,048	1,048	1,549

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade	Fator de Confiabilidade e (Dk) [5%]	Fator de Confiabilidade e (Dk) [10%]	Fator de Confiabilidade e (Dk) [15%]
A/C-TN81	Base Aérea Remota 03	0,910	0,910	0,910
A/C-TN82	Base Aérea Remota 03	1,065	1,065	1,204
A/C-TN83	Base Aérea Remota 03	0,970	0,970	0,970
A/C-TN84	Base Aérea Remota 03	0,910	0,910	0,910
A/C-TN85	Base Aérea Remota 03	0,920	0,920	0,920
A/C-TN86	Base Aérea Remota 03	1,000	1,000	1,000
A/C-TN87	Base Aérea Remota 03	1,010	1,581	1,581
A/C-TN88	Base Aérea Remota 03	0,950	0,950	0,950
A/C-TN89	Base Aérea Remota 03	1,000	1,511	1,511
A/C-TN90	Base Aérea Remota 03	0,980	0,980	0,980
A/C-TN91	Base Aérea Remota 03	0,910	0,910	0,910
A/C-TN92	Base Aérea Remota 03	1,030	1,895	1,895
A/C-TN93	Base Aérea Remota 03	1,000	1,000	1,000
A/C-TN94	Base Aérea Remota 03	1,100	1,363	1,363
A/C-TN95	Base Aérea Remota 03	1,056	1,214	1,214
A/C-TN96	Base Aérea Remota 03	0,990	0,990	0,990
A/C-TN97	Base Aérea Remota 03	0,910	0,910	0,910
A/C-TN98	Base Aérea Remota 03	0,963	0,963	0,963
A/C-TN99	Base Aérea Remota 03	0,990	0,990	0,990
A/C-TN100	Base Aérea Remota 03	1,906	1,906	1,906
A/C-TN101	Base Aérea Remota 03	1,902	1,902	1,902
A/C-TN102	Base Aérea Remota 03	2,007	2,007	2,007
A/C-TN103	Base Aérea Remota 03	1,099	1,099	1,205
A/C-TN104	Base Aérea Remota 03	0,900	0,900	0,900
A/C-TN105	Base Aérea Remota 03	1,076	1,076	1,136
A/C-TN106	Base Aérea Remota 03	0,953	0,953	0,953
A/C-TN107	Base Aérea Remota 03	0,990	0,990	0,990
A/C-TN108	Base Aérea Remota 03	0,974	0,974	0,974
A/C-TN109	Base Aérea Remota 03	1,068	1,068	1,152
A/C-TN110	Base Aérea Remota 03	0,970	0,970	0,970
A/C-TN111	Base Aérea Remota 03	1,928	1,928	1,928
A/C-TN112	Base Aérea Remota 03	1,946	1,946	1,946
A/C-TN113	Base Aérea Remota 03	0,910	0,910	0,910

Apêndice C – Parâmetros do Estudo de Caso

Este apêndice contém parâmetros utilizados para a construção do estudo de caso inspirado na estrutura de suporte logístico do programa A-29 Super Tucano operado pela FAB.

Parâmetros de entrada da estrutura de dois escalões (Fonte: O autor)

Localidade	Localidade Principal	Tempo médio de reabastecimento (O_j)
Base Aérea Remota 02	Base Aérea Principal 01	5 dias
Base Aérea Remota 03	Base Aérea Principal 01	5 dias
Base Aérea Remota 04	Base Aérea Principal 01	14 dias
Base Aérea Remota 05	Base Aérea Principal 01	14 dias
Base Aérea Remota 06	Base Aérea Principal 01	30 dias

Parâmetros de manutenção e operação da frota (Fonte: O autor).

Localidade	Tempo de Manutenção por Aeronave (\bar{M}_{ct})	Alocação da frota de 75 aeronaves (N_j)	Esforço Aéreo Anual por Aeronave (U_j)
Base Aérea Principal 01	4 horas	10 aeronaves	900 horas de voo/ano
Base Aérea Remota 02	4 horas	15 aeronaves	900 horas de voo/ano
Base Aérea Remota 03	4 horas	10 aeronaves	900 horas de voo/ano
Base Aérea Remota 04	4 horas	14 aeronaves	900 horas de voo/ano
Base Aérea Remota 05	4 horas	14 aeronaves	900 horas de voo/ano
Base Aérea Remota 06	4 horas	12 aeronaves	900 horas de voo/ano

Parâmetros das 75 aeronaves (Fonte: O autor).

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade de Alocação da Aeronave K	Fator de Confiabilidade (D_k) [5% de aeronaves destoantes]	Fator de Confiabilidade (D_k) [10% de aeronaves destoantes]	Fator de Confiabilidade (D_k) [15% de aeronaves destoantes]
A/C-TN1	Base Aérea Principal 01	0,600	0,600	0,600
A/C-TN2	Base Aérea Principal 01	0,900	0,900	0,900
A/C-TN3	Base Aérea Principal 01	0,510	0,510	0,510
A/C-TN4	Base Aérea Principal 01	0,790	0,790	0,790
A/C-TN5	Base Aérea Principal 01	0,920	0,920	0,920
A/C-TN6	Base Aérea Principal 01	0,960	0,960	0,960
A/C-TN7	Base Aérea Principal 01	0,920	0,920	0,920
A/C-TN8	Base Aérea Principal 01	0,660	0,660	0,660

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade de Alocação da Aeronave K	Fator de Confiabilidade (D_k) [5% de aeronaves destoantes]	Fator de Confiabilidade (D_k) [10% de aeronaves destoantes]	Fator de Confiabilidade (D_k) [15% de aeronaves destoantes]
A/C-TN9	Base Aérea Principal 01	0,850	0,850	0,850
A/C-TN10	Base Aérea Principal 01	0,750	0,750	0,750
A/C-TN11	Base Aérea Remota 02	0,910	0,910	0,910
A/C-TN12	Base Aérea Remota 02	0,560	0,560	0,560
A/C-TN13	Base Aérea Remota 02	0,910	0,910	0,910
A/C-TN14	Base Aérea Remota 02	0,670	0,670	0,670
A/C-TN15	Base Aérea Remota 02	0,600	0,600	0,600
A/C-TN16	Base Aérea Remota 02	0,550	0,550	0,550
A/C-TN17	Base Aérea Remota 02	0,960	0,960	0,960
A/C-TN18	Base Aérea Remota 02	0,940	0,940	0,940
A/C-TN19	Base Aérea Remota 02	0,910	0,910	0,910
A/C-TN20	Base Aérea Remota 02	0,960	0,960	0,960
A/C-TN21	Base Aérea Remota 02	0,760	0,760	0,760
A/C-TN22	Base Aérea Remota 02	0,810	0,810	0,810
A/C-TN23	Base Aérea Remota 02	0,610	0,610	0,610
A/C-TN24	Base Aérea Remota 02	0,940	0,940	0,940
A/C-TN25	Base Aérea Remota 02	0,970	0,970	0,970
A/C-TN26	Base Aérea Remota 03	0,980	0,980	0,980
A/C-TN27	Base Aérea Remota 03	0,920	0,920	0,920
A/C-TN28	Base Aérea Remota 03	0,920	0,920	0,920
A/C-TN29	Base Aérea Remota 03	0,980	0,980	0,980
A/C-TN30	Base Aérea Remota 03	0,960	0,960	0,960
A/C-TN31	Base Aérea Remota 03	0,710	0,710	0,710
A/C-TN32	Base Aérea Remota 03	0,590	0,590	0,590
A/C-TN33	Base Aérea Remota 03	0,700	0,700	0,700
A/C-TN34	Base Aérea Remota 03	0,850	0,850	0,850
A/C-TN35	Base Aérea Remota 03	0,510	0,510	0,510
A/C-TN36	Base Aérea Remota 04	0,940	0,940	0,940
A/C-TN37	Base Aérea Remota 04	0,980	0,980	0,980
A/C-TN38	Base Aérea Remota 04	0,970	0,970	0,970
A/C-TN39	Base Aérea Remota 04	0,990	0,990	0,990
A/C-TN40	Base Aérea Remota 04	0,930	0,930	0,930
A/C-TN41	Base Aérea Remota 04	0,910	0,910	0,910
A/C-TN42	Base Aérea Remota 04	0,940	0,940	0,940
A/C-TN43	Base Aérea Remota 04	0,560	0,560	0,560
A/C-TN44	Base Aérea Remota 04	0,840	0,840	0,840
A/C-TN45	Base Aérea Remota 04	0,700	0,700	0,700
A/C-TN46	Base Aérea Remota 04	0,830	0,830	0,830
A/C-TN47	Base Aérea Remota 04	0,940	0,940	0,940

Aeronave por Número de Cauda (K)	Localidade de Alocação da Aeronave K	Fator de Confiabilidade (D_k) [5% de aeronaves destoantes]	Fator de Confiabilidade (D_k) [10% de aeronaves destoantes]	Fator de Confiabilidade (D_k) [15% de aeronaves destoantes]
A/C-TN48	Base Aérea Remota 04	0,700	0,700	0,700
A/C-TN49	Base Aérea Remota 04	0,710	0,710	0,710
A/C-TN50	Base Aérea Remota 05	0,510	0,510	0,510
A/C-TN51	Base Aérea Remota 05	0,570	0,570	0,570
A/C-TN52	Base Aérea Remota 05	0,570	0,570	0,570
A/C-TN53	Base Aérea Remota 05	0,720	0,720	0,720
A/C-TN54	Base Aérea Remota 05	0,920	0,920	0,920
A/C-TN55	Base Aérea Remota 05	0,850	0,850	0,850
A/C-TN56	Base Aérea Remota 05	0,810	0,810	0,810
A/C-TN57	Base Aérea Remota 05	0,880	0,880	0,880
A/C-TN58	Base Aérea Remota 05	0,960	0,960	0,960
A/C-TN59	Base Aérea Remota 05	0,960	0,960	0,960
A/C-TN60	Base Aérea Remota 05	0,910	0,910	0,910
A/C-TN61	Base Aérea Remota 05	0,920	0,920	0,920
A/C-TN62	Base Aérea Remota 05	0,970	0,970	0,970
A/C-TN63	Base Aérea Remota 05	0,940	0,940	0,940
A/C-TN64	Base Aérea Remota 06	1,340	1,960	1,960
A/C-TN65	Base Aérea Remota 06	1,330	1,690	1,690
A/C-TN66	Base Aérea Remota 06	0,540	0,540	0,540
A/C-TN67	Base Aérea Remota 06	2,575	2,575	2,575
A/C-TN68	Base Aérea Remota 06	2,968	2,968	2,968
A/C-TN69	Base Aérea Remota 06	1,077	1,077	1,510
A/C-TN70	Base Aérea Remota 06	1,270	2,446	2,446
A/C-TN71	Base Aérea Remota 06	1,150	1,150	1,580
A/C-TN72	Base Aérea Remota 06	3,320	3,320	3,320
A/C-TN73	Base Aérea Remota 06	3,495	3,495	3,495
A/C-TN74	Base Aérea Remota 06	1,300	2,180	2,180
A/C-TN75	Base Aérea Remota 06	1,045	1,045	1,680

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DM	2. DATA 10 de agosto de 2021	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/DM-067/2021	4. N° DE PÁGINAS 113
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Otimização Da Relação Entre Disponibilidade Operacional De Uma Frota De Aeronaves e Investimento Em Estoque, Utilizando Informações Logísticas Individualizadas De Cada Aeronave			
6. AUTOR(ES): Diego Sodré de Souza.			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Disponibilidade Operacional. 2. Multi-Escalão. 3. Engenharia Logística.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Logística; Frotas aéreas; Confiabilidade de aeronaves; Indicadores de desempenho; Administração de transportes.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional			
ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Área de Transporte Aéreo e Aeroportos. Orientador: Prof. Dr. Anderson Ribeiro Correia. Coorientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão. Defesa em 05/08/2021. Publicada em 2021.			
11. RESUMO: O problema de gerenciamento dos desempenhos de suportabilidade tem trazido vários desafios para a indústria e academia. O desafio é grande, pois envolve conjuntos de variáveis associadas às características técnicas da aeronave, suas condições de operação e manutenção, e também à sua estrutura de suporte logístico. Com isso, a métrica de disponibilidade operacional ganha ênfase por tratar-se de um indicador de desempenho que permite o inter-relacionamento de variáveis envolvidas no gerenciamento de suportabilidade como um todo. Este trabalho apresenta uma abordagem para o problema de alocação de aeronaves à luz do desempenho individualizado em termos de confiabilidade de cada aeronave. Inicialmente, é feita a identificação de aeronaves com comportamento de confiabilidade destoante em uma frota específica. Em seguida, é estudado um modelo multi-escalão que gera como resultado uma curva de custo-benefício relacionando a disponibilidade operacional e o investimento necessário para suporte à frota. Os parâmetros são utilizados no modelo básico em sua forma tradicional com valores médios da frota. Também, propõe-se um modelo de estimativa de custos e de disponibilidade operacional onde é feita a utilização dos parâmetros individuais de cada aeronave, considerando a existência de aeronaves destoantes em diferentes instâncias e tamanhos de frota. Com a utilização do modelo proposto, os resultados mostraram possíveis reduções nos investimentos e possíveis ampliações dos níveis de disponibilidade operacional nas diferentes instâncias com as melhores alocações possíveis estabelecidas. Além disso, o modelo proposto apresentou resultados satisfatório com sua aplicação nas diferentes instâncias de aeronaves destoantes, bem como no estudo de caso inspirado na estrutura de suporte logístico do programa A-29 Super Tucano operado pela Força Aérea Brasileira. Este modelo traz sua contribuição em utilizar as informações de manutenção e operação a favor das análises de suprimentos, podendo apoiar as decisões dos gerentes de frota quanto à melhor alternativa de alocação da frota para ampliação da disponibilidade operacional e/ou redução dos investimentos em estoque.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			