

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 Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica.

Lucas Sales Martins

**SUPPORTABILIDADE DE AERONAVES DE DEFESA:
MODELO DE PROCESSO PARA AVALIAÇÃO DOS
IMPACTOS DE FATORES DE CONFIABILIDADE E
MANUTENIBILIDADE NA FASE DE SERVIÇO**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão
Orientador

Profa. Dra. Emília Villani
Pró-Reitora de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Martins, Lucas Sales

Suportabilidade de aeronaves de defesa: modelo de processo para avaliação dos impactos de fatores de confiabilidade e manutenibilidade na fase de serviço / Lucas Sales Martins.

São José dos Campos, 2023.

138f.

Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023. Orientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão.

1. Suporte logístico integrado. 2. Engenharia do valor. 3. Manutenção de aeronaves. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARTINS, Lucas Sales. **Suportabilidade de aeronaves de defesa**: modelo de processo para avaliação dos impactos de fatores de confiabilidade e manutenibilidade na fase de serviço. 2023. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2023.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas Sales Martins

TÍTULO DO TRABALHO: Suportabilidade de aeronaves de defesa: modelo de processo para avaliação dos impactos de fatores de confiabilidade e manutenibilidade na fase de serviço

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2023

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.

Lucas Sales Martins

Alameda Albatroz, nº 86. Vila Militar de Cumbica

CEP: 07184-020, Guarulhos – SP

lucasmartinslsm@fab.mil.br

**SUPPORTABILIDADE DE AERONAVES DE DEFESA:
MODELO DE PROCESSO PARA AVALIAÇÃO DOS
IMPACTOS DE FATORES DE CONFIABILIDADE E
MANUTENIBILIDADE NA FASE DE SERVIÇO**

Lucas Sales Martins

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Olympio Lucchini Coutinho	Presidente	- ITA
Prof. Dr. Fernando T. Mendes Abrahão	Orientador	- ITA
Prof. Dr. Henrique Costa Marques	Membro Interno	- ITA
Prof. Dr. Marcio Cardoso Machado	Membro Externo	- UNIP

ITA

Dedico este trabalho à minha esposa, Emilly,
com quem tenho compartilhado todas as circunstâncias,
por meio de quem Deus tem me inspirado e motivado,
em quem tenho encontrado suporte diante dos desafios.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, autor da minha fé e deste sonho concretizado, bem como à minha amada esposa, Emilly, companheira fiel que me deu apoio incondicional durante todos os dias desta caminhada, do início ao fim. Agradeço também aos meus pais, Paulo e Norma, que desde cedo plantaram a semente, incentivando e apontando o valor dos estudos.

Agradeço ao meu Professor Orientador, Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão, pela atenção, paciência e confiança a mim conferidas durante todo o curso, bem como pelo compartilhamento de seus conhecimentos e de sua experiência, não somente em relação aos conteúdos curriculares de sua disciplina, mas também quanto à concepção e ao desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço aos Professores Dr. Henrique Costa Marques e Dr. Guilherme Conceição Rocha, do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais (PG-CTE), Área de Gestão Tecnológica, pelos conteúdos ensinados em suas disciplinas, que também me impulsionaram em direção aos resultados alcançados.

Agradeço ainda ao Professor Dr. Olympio Lucchini Coutinho, do PG-CTE, e ao Professor Dr. Marcio Cardoso Machado, da Universidade Paulista (UNIP), pela disponibilidade para contribuição no aprimoramento deste trabalho.

Agradeço aos amigos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), do Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais (PPGAO) e do Laboratório de Engenharia Logística do ITA (AeroLogLab-ITA), pelo companheirismo ao longo de toda esta caminhada.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Defesa Nacional (PRÓ-DEFESA IV) e à empresa Systecon Group AB pelo suporte fornecido aos meus estudos e a esta pesquisa.

Por fim, agradeço à Força Aérea Brasileira, pela oportunidade de realizar este curso de pós-graduação *stricto sensu*, no nível de mestrado, em instituição tão renomada, como forma de continuar a minha formação acadêmica e aperfeiçoar os meus conhecimentos, deferindo-me a honra de poder elevar o meu nível de capacitação profissional, para continuar a prestar assessoria técnica quanto ao suporte logístico de frotas de aeronaves militares, e assim contribuir para a defesa e o desenvolvimento do Brasil.

*"Não se gerencia o que não se mede,
não se mede o que não se define,
não se define o que não se entende,
e não há sucesso no que não se gerencia".*

(William Edwards Deming)

Resumo

O problema desta pesquisa emerge do desafio enfrentado por gestores de aeronaves de defesa nos processos de decisão quanto à alocação de recursos, inclusive financeiros, para aumentar a relação custo-benefício do Suporte Integrado ao Produto, do inglês *Integrated Product Support* (IPS). Assim, este trabalho propõe um modelo para avaliar os impactos que fatores de confiabilidade e manutenibilidade exercem na suportabilidade desses sistemas, caracterizada pela relação entre disponibilidade operacional e custo de suporte, de modo a indicar, sistemicamente, as prioridades de alocação de recursos em determinado contexto da vida em serviço. A estratégia para atingir o objetivo traçado utiliza otimização de estoque e simulação, consistindo numa combinação do Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida com o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor, substituindo-se, no entanto, a expressão matemática desta segunda técnica pelo Cálculo de Custo-Efetividade. São apresentados testes de funcionalidade e de sensibilidade do modelo desenvolvido, bem como um estudo de caso inspirado na frota de aeronaves A-29 da Força Aérea Brasileira. Em ambos os experimentos foi possível analisar diferentes cenários quanto à melhoria ou degradação da suportabilidade, em ambientes e contextos simulados da fase de serviço, a partir de variações nos seguintes fatores analisados: tempo médio entre falhas; tempo médio entre manutenções preventivas; tempo médio de manutenções corretivas e preventivas; tempo médio de transporte de material; e tempo médio de atraso administrativo. O trabalho mostrou sua contribuição acadêmica mediante a abordagem do modelo proposto de apoio à decisão, relacionado aos elementos do IPS denominados como Gerenciamento de Suporte ao Produto e Suporte Continuado de Engenharia, permitindo ainda uma aplicação operacional como guia de alto nível em revisões da solução de suporte a uma frota. Embora os testes tenham sido realizados com aeronaves de defesa, a aplicação é cabível a outros sistemas complexos.

Abstract

The problem of this research emerges from the challenge faced by defense aircraft managers in the decision processes regarding the allocation of resources, including financial ones, to increase the cost-benefit ratio of Integrated Product Support (IPS). Thus, this work proposes a model to evaluate the impacts that reliability and maintainability factors exert on the supportability of these systems, characterized by the relationship between operational availability and support cost, to indicate, systemically, the priorities for resource allocation in a given context of life in service. The strategy to achieve the established objective uses inventory optimization and simulation, consisting of a combination of the Prospective Life Cycle Cost Calculation Method with the Value-Based Supportability Assessment Method, replacing, however, the mathematical expression of this second technique by the Cost-Effectiveness Calculation. Functionality and sensitivity tests of the developed model are presented, as well as a case study inspired by the A-29 fleet of the Brazilian Air Force. In both experiments, it was possible to analyze different scenarios regarding the improvement or degradation of supportability, in simulated environments and contexts of the service phase, based on variations in the following analyzed factors: mean time between failures; mean time between preventive maintenance; mean time of corrective and preventive maintenance; mean time of material transport; and mean administrative delay time. The work showed its academic contribution by approaching the proposed decision support model, related to the elements of the IPS called Product Support Management and Sustaining Engineering, also allowing an operational application as a high-level guide in revisions of the support solution for a fleet. Although the tests were carried out with defense aircraft, it is also possible to apply to other complex systems.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Maturidade dos Indicadores RAMS (adaptado de ABRAHÃO <i>et al.</i> , 2019).	21
Figura 1.2 – Métricas Fundamentais da Suportabilidade.	22
Figura 1.3 – Aeronave A-29 Super Tucano (FAB, 2019).	23
Figura 1.4 – Histórico de Recursos Recebidos e da Média de Disponibilidade Operacional para a Frota de Aeronaves A-29 da FAB.	24
Figura 2.1 – Perfil de Despesas Anuais no Ciclo de Vida de Sistemas Complexos de Defesa (adaptado de JONES, 2014).	32
Figura 2.2 – Percentuais das Categorias de Custos no Ciclo de Vida de aeronaves de asa fixa e rotativa do Departamento de Defesa dos EUA (adaptado de UNITED STATES, 2020).	33
Figura 2.3 – Visibilidade de Custos do Sistema (BLANCHARD, 2014).	34
Figura 2.4 – Elementos IPS e Fases do Ciclo de Vida (adaptado de Abrahão <i>et al.</i> , 2019).....	36
Figura 2.5 – Função Densidade de Probabilidade de Falha para a Distribuição Exponencial de Falhas (adaptado de O’CONNOR; KLEYNER, 2012).	37
Figura 3.1 – Etapas Metodológicas para Desenvolver o Modelo de Processo.....	52
Figura 3.2 – Conceito de Emprego do Modelo.	53
Figura 4.1 – Fluxograma do Modelo de Processo para Avaliação dos Impactos de Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade na Suportabilidade de Aeronaves de Defesa.....	59
Figura 4.2 – Modelagem Computacional no <i>Software</i> OPUS10 [®]	63
Figura 4.3 – Cenário Inicial no Gráfico de Custo-Efetividade do OPUS10 [®]	64
Figura 4.4 – Cenários Alternativos e Inicial no Gráfico de Custo-Efetividade do OPUS10 [®]	64
Figura 4.5 – Perfil Operacional da Fota Simulado no SIMLOX [®]	65
Figura 4.6 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] para o Cenário Inicial.	65
Figura 4.7 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] para Cenário Taxa de Falha -20%.....	66

Figura 4.8 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] Cenário Tempo Manutenção -20%.	66
Figura 4.9 – Custo de Suporte no CATLOC [®] para o Cenário Inicial.	66
Figura 4.10 – Custo de Suporte no CATLOC [®] para o Cenário Taxa de Falha -20%.	67
Figura 4.11 – Custo de Suporte no CATLOC [®] para Cenário Tempo de Manutenção -20%...67	
Figura 4.12 – Cenários Alternativos e Inicial no Gráfico de Custo-Efetividade do OPUS10 [®]	68
Figura 4.13 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] Cenário Tempo Manutenção +10%.	69
Figura 4.14 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] para o Cenário Taxa de Falha -20% e Custo de <i>Setup</i> de 25 Milhões (\$).	69
Figura 4.15 – Custo de Suporte no CATLOC [®] para Cenário Tempo de Manutenção +10%..	69
Figura 4.16 – Custo de Suporte no CATLOC [®] para o Cenário Taxa de Falha -20% e Custo de <i>Setup</i> de 25 Milhões (\$).	70
Figura 4.17 – Características do Sistema, Estrutura de Suporte e Informações de Operação..	75
Figura 4.18 – Curva de Custo-Efetividade do Cenário Inicial e Destaque do Ponto que Atende ao Requisito de 65% de Disponibilidade Operacional com Menor Custo de Suporte.	75
Figura 4.19 – Curvas de Custo-Efetividade dos Cenários Alternativos e do Cenário Inicial. .	78
Figura 4.20 – Custos de Suporte dos Cenários Alternativos e do Cenário Inicial.	78
Figura 4.21 – Ilustração do Perfil Operacional Construído no SIMLOX [®]	79
Figura 4.22 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] (Cenário Inicial).	79
Figura 4.23 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] (Cenário de Aumento no Tempo Médio entre Inspeções).	80
Figura 4.24 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] (Cenário de Redução dos Tempos Médios de Atraso Administrativo).	80
Figura 4.25 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] (Cenário de Redução dos Tempos Médios de Reparo e Revisão).	81

Figura 4.26 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] (Cenário de Redução dos Tempos Médios de Transporte).....	81
Figura 4.27 – Custos de Suporte no CATLOC [®] (Cenário Inicial).....	82
Figura 4.28 – Custos de Suporte no CATLOC [®] (Cenário de Aumento no Tempo Médio entre Inspeções).....	82
Figura 4.29 – Custos de Suporte no CATLOC [®] (Cenário de Redução dos Tempos Médios de Atraso Administrativo).....	82
Figura 4.30 – Custos de Suporte no CATLOC [®] (Cenário Redução Tempos Médios de Reparo e Revisão).....	83
Figura 4.31 – Custos de Suporte no CATLOC [®] (Cenário Redução Tempos Médios de Transporte).....	83
Figura 4.32 – Custos de Suporte do Cenário de Degradação da Suportabilidade.....	85
Figura 4.33 – Disponibilidade Média no SIMLOX [®] (Degradação da Suportabilidade).....	85
Figura 4.34 – Custos de Suporte no CATLOC [®] (Degradação da Suportabilidade).....	86
Figura 4.35 – Áreas de Conhecimento/Experiência dos Participantes da Avaliação.....	88
Figura 4.36 – Graus de Escolaridade dos Participantes da Avaliação.....	89
Figura 4.37 – Questão 1 do Formulário de Avaliação.....	89
Figura 4.38 – Questão 2 do Formulário de Avaliação.....	90
Figura 4.39 – Questão 3 do Formulário de Avaliação.....	90
Figura 4.40 – Questão 4 do Formulário de Avaliação.....	91
Figura 4.41 – Questão 5 do Formulário de Avaliação.....	91
Figura 4.42 – Questão 6 do Formulário de Avaliação.....	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Equivalência das Fases do Ciclo de Vida (adaptado de ASD/AIA, 2021).	31
Tabela 2.2 – Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade Versus Elementos do IPS (adaptado de ASD/AIA, 2021).	42
Tabela 2.3 – Tabela Comparativa entre Pesquisas Antecedentes e o Presente Estudo.	51
Tabela 3.1 – Matriz de Rastreabilidade Requisito <i>Versus</i> Procedimento de Verificação.	55
Tabela 4.1 – Dados dos Itens das Aeronaves.	61
Tabela 4.2 – Inspeções Programadas das Aeronaves.	62
Tabela 4.3 – Dados do Perfil Operacional.	63
Tabela 4.4 – Cálculo de Custo-Efetividade e Classificação.	67
Tabela 4.5 – Cálculo do Valor de Custo-Efetividade e Classificação dos Novos Cenários Quanto ao Impacto na Suportabilidade da Frota.	70
Tabela 4.6 – Dados de Distribuição e Utilização das Aeronaves.	71
Tabela 4.7 – Inspeções Programadas das Aeronaves.	72
Tabela 4.8 – Dados do Perfil Operacional.	74
Tabela 4.9 – Resumo dos Custos de Suporte para o Ponto Selecionado.	76
Tabela 4.10 – Variação da Taxa de Falha por Sistema (adaptado de Sousa, 2022).	77
Tabela 4.11 – Classificação dos Fatores Logísticos Quanto ao Impacto na Suportabilidade. .	84
Tabela 4.12 – Custo-Efetividade do Cenário de Degradação da Suportabilidade.	86
Tabela 4.13 – Resultado das Classificações Atribuídas pelos Participantes da Avaliação.	93
Tabela 4.14 – Ordenação das Alternativas.	94

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADT	<i>Administrative Delay Time</i>
AeroLogLab-ITA	Laboratório de Engenharia Logística do ITA
AIA	<i>Aerospace Industries Association of America</i>
Anv	Aeronave
ASD	<i>Aerospace and Defense Industries Association of Europe</i>
BO	<i>Backorder</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CATLOC	<i>Software</i> de cálculo de custos da empresa Systecon Group AB
CECOMSAER	Centro de Comunicação Social da Aeronáutica
COMAER	Comando da Aeronáutica
DAU	<i>Defense Acquisition University</i>
DCA	Diretriz do Comando da Aeronáutica
DI	<i>Due In</i>
DoD	<i>Department of Defense</i>
EBO	<i>Expected Backorder</i>
EDA	Esquadrão de Demonstração Aérea
EUA	Estados Unidos da América
FAB	Força Aérea Brasileira
FR	<i>Fill Rate</i>
GAV	Grupo de Aviação
H.h	Homem-hora
HV	Hora(s) de Voo

ILS	<i>Integrated Logistics Support</i>
IPS	<i>Integrated Product Support</i>
IS	Índice de Significância
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
KSA	<i>key System Attributes</i>
LCCA	<i>Life-Cycle Cost Analysis</i>
LDT	<i>Logistic Delay Time</i>
LORA	<i>Level-of-Repair Analysis</i>
LRU	<i>Line Replaceable Unit</i>
MDT	<i>Maintenance Downtime</i>
METRIC	<i>Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control</i>
MILCON	<i>Military Constructions</i>
MD	Ministério da Defesa
MTA	<i>Maintenance Task Analysis</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTBM	<i>Mean Time Between Maintenance</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
NA	Não Aplicável
NBR	Normas Brasileiras
NFF	<i>No Fault Found</i>
OE	Objetivos Específicos
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
O&S	<i>Operating and Support</i>
OH	<i>On Hand</i>
OPUS10	<i>Software de otimização de estoque da empresa Systecon Group AB</i>

OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PAMA	Parque de Material Aeronáutico
PG-CTE	Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais
PPGAO	Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais
QPA	Quantidade Por Aeronave
R&D	<i>Research and Development</i>
RAMS	<i>Reliability, Availability, Maintainability and Safety</i>
RDM	<i>Refined Data Model</i>
RDT&E	<i>Research, Development, Test and Evaluation</i>
SILOMS	Sistema Integrado de Logística de Material e Serviços
SIMLOX	<i>Software</i> de simulação estocástica da empresa Systecon Group AB
SISMAB	Sistema de Material Aeronáutico e Bélico
TAT	<i>Turn-Around Time</i> (tempo entre saída e retorno de um item para reparo)
TLV	Tempo Limite de Vida
UNIP	Universidade Paulista
VOM	<i>Value Operations Methodology</i>
WT	<i>Mean Waiting Time for Spares</i>

Lista de Símbolos

A	Disponibilidade
A_0	Disponibilidade Operacional
A_{0ni}	Disponibilidade Operacional do Item i do Sistema n
A_{Ofrota}	Disponibilidade Operacional da Frota
A_{0n}	Disponibilidade Operacional do Sistema n
A_0	Disponibilidade no Estado Inicial Zero
A_i	Disponibilidade Operacional no Estado ou Cenário i
C_0	Custo de Suporte no Estado Inicial Zero
C_i	Custo de Suporte no Estado ou Cenário i
C_j	Custo do item j
e	Base do Logaritmo Natural (2,7183)
f_{pt}	Frequência de Manutenção Preventiva
$f(t)$	Função densidade de probabilidade de falha no tempo
m	Demanda Média de itens para reparo
\bar{M}	<i>Mean Active Maintenance Time</i>
$\overline{M_{CT}}$	<i>Mean Corrective Maintenance Time</i>
$\overline{M_{PT}}$	<i>Mean Preventive Maintenance Time</i>
n	Quantidade de Sistemas Operando
N	Número de Falhas
P	Probabilidade
q	Quantidade de Itens por Sistema

R	Confiabilidade (do inglês <i>Reliability</i>)
$R(t)$	Função de Confiabilidade no Tempo
S	Nível de Estoque
S_j	Nível de Estoque do item j
t	Tempo de Operação do sistema
T	Tempo Total de Operação
u	Taxa de Utilização
X	<i>Pipeline</i> ou quantidade de itens em reparo
X_m	<i>Pipeline</i> médio ou quantidade média de itens em reparo
α_A	Coefficiente de Peso para disponibilidade
α_C	Coefficiente de Peso para custo de suporte
δA	Razão de Disponibilidade na mudança do estado 0 para o estado i
δC	Razão de Custo de Suporte na mudança do estado 0 para o estado i
ΔV	Valor Diferencial de Suportabilidade
λ	Taxa de Falha

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contextualização.....	20
1.2	Motivação	22
1.3	Problema de Pesquisa.....	23
1.4	Hipótese	25
1.5	Objetivo Geral do Trabalho	26
1.5.1	Objetivos Específicos	26
1.6	Relevância da Pesquisa	27
1.7	Delimitação da Pesquisa.....	27
1.8	Estrutura da Dissertação	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1	Fases do Ciclo de Vida de Sistemas Complexos de Defesa	29
2.2	Custos do Ciclo de Vida de Sistemas Complexos de Defesa	31
2.2.1	Custos de Suporte	34
2.3	Suporte Integrado do Produto	35
2.4	Confiabilidade e Manutenibilidade.....	37
2.4.1	Taxa de Falha e Distribuição Exponencial de Falhas.....	37
2.4.2	Confiabilidade	38
2.4.3	Manutenção	39
2.4.4	Manutenibilidade	40
2.5	Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade <i>Versus</i> Elementos do IPS	41
2.6	Disponibilidade Operacional	43
2.7	Cálculo de Custo-Efetividade	44
2.8	Modelagem Matemática da Demanda de Reparáveis	44
2.9	Nível de Estoque	45
2.10	Medidas de Desempenho de Estoque	46
2.11	Relação entre EBO e Disponibilidade.....	47
2.12	Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida	48
2.13	Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor	49
2.14	Pesquisas Antecedentes <i>Versus</i> Presente Estudo	50
2.15	Considerações Finais do Capítulo	51

3	METODOLOGIA.....	52
3.1	Método de Desenvolvimento do Modelo de Processo	52
3.1.1	Concepção do Modelo	53
3.1.2	Especificação de Requisitos do Modelo	54
3.1.3	Descrição e Esquematização do Modelo	54
3.1.4	Verificação do Modelo	54
3.1.5	Avaliação do Modelo por Especialistas.....	55
3.2	Recursos Computacionais.....	55
3.3	Considerações Finais do Capítulo	56
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA, APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	Descrição e Esquematização do Modelo de Processo	57
4.2	Verificação do Modelo.....	60
4.2.1	Análise de Aderência à Literatura	60
4.2.2	Teste Funcional	61
4.2.3	Teste de Sensibilidade	68
4.2.4	Estudo de Caso	70
4.3	Avaliação do Modelo por Especialistas	87
4.4	Discussão	95
4.5	Considerações Finais do Capítulo	97
5	CONCLUSÃO.....	98
5.1	Contribuição Acadêmica.....	98
5.2	Aplicação Operacional	99
5.3	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	99
	REFERÊNCIAS	100
	APÊNDICE A – PARÂMETROS DOS COMPONENTES DAS AERONAVES	104
	APÊNDICE B – LISTA DE ITENS DO ESTOQUE DE GIRO	108
	APÊNDICE C – FATORES DE CONFIABILIDADE E MANUTENIBILIDADE.....	110
	APÊNDICE D – CURRICULUM VITAE DOS ESPECIALISTAS.....	113
	APÊNDICE E – FORMULÁRIOS DE AVALIAÇÃO DO MODELO.....	118

1 Introdução

Este trabalho aborda o tema da suportabilidade de sistemas aeroespaciais de defesa, seguindo uma linha de pesquisa de Engenharia Logística, definida por Blanchard (1998) como o conjunto das atividades relacionadas ao projeto do sistema e executadas conforme necessário, para atender aos objetivos do suporte logístico integrado no decorrer do ciclo de vida.

Embora a literatura acadêmica disponha de um arcabouço teórico estruturado nessa área do conhecimento, a rápida evolução tecnológica, a limitação de recursos financeiros e os cenários dinâmicos de emprego operacional, durante a fase de serviço, fomentam constantemente a busca por novos modelos de apoio à decisão relacionados a problemas de custo-efetividade dos sistemas tratados nesta pesquisa.

1.1 Contextualização

De acordo com Blanchard (1998), um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos combinados de modo a executar uma determinada função, em resposta a uma necessidade identificada.

Sistemas aeroespaciais, particularmente, são projetados para voar na atmosfera ou no espaço circundante, desenvolvidos mediante combinação de diversos campos da ciência e suas tecnologias (OLIVEIRA, 2022). Segundo Hobday (1998), esses sistemas, em geral, caracterizam-se como complexos, por envolver tecnologia avançada, custo elevado, arquitetura customizada, integração de componentes e forte ênfase no *design* e desenvolvimento.

No setor de defesa, outras duas características dos sistemas complexos se destacam: a longevidade em serviço e a dependência de estrutura robusta de suporte (PRZMIENIECKI, 1993). O cargueiro Embraer KC-390 Millennium e o caça Saab F-39 Gripen, aeronaves estratégicas em implantação na Força Aérea Brasileira (FAB), são exemplos desses sistemas.

Conforme explicado por Abrahão *et al.* (2019), a ausência de requisitos de suporte na fase de preparação de um sistema complexo de defesa pode fazer com que a sua curva de maturidade logística escorregue à direita no decorrer do ciclo de vida, evidenciada por indicadores de confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade e segurança (do inglês *Reliability, Availability, Maintainability and Safety* - RAMS), como mostra a curva ② na Figura 1.1.

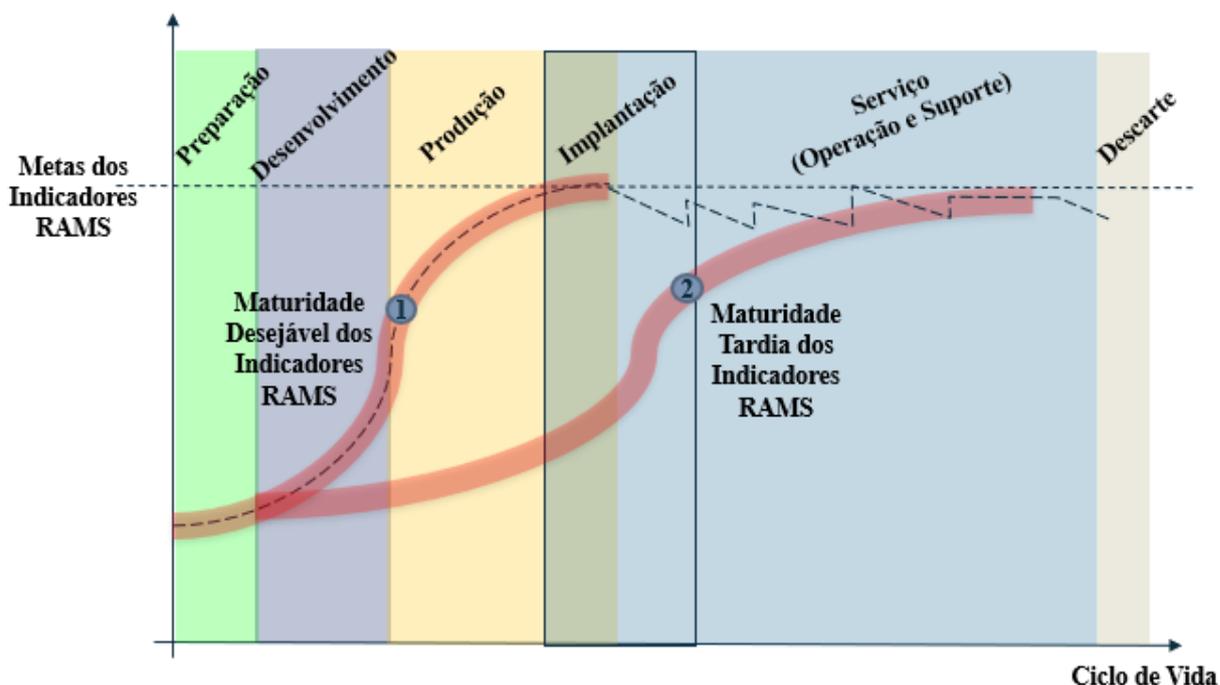


Figura 1.1 – Maturidade dos Indicadores RAMS (adaptado de ABRAHÃO *et al.*, 2019).

Exemplos reais de sistemas com o comportamento dessa curva ② são as aeronaves norte-americanas *McDonnell Douglas F-4 Phantom* e *Convair B-58 Hustler*. De acordo com Olivier, Daniel e Magee (2011), o caça F-4 apresentou problemas de confiabilidade e manutenibilidade, resultando em baixa disponibilidade e grande quantidade de homem-hora de manutenção por hora de voo, operando parte da sua fase de serviço de forma imatura do ponto de vista de suportabilidade. Já o bombardeiro supersônico B-58, que nunca chegou a voar maduro e teve a frota retirada de serviço por conta das dificuldades, revelou problemas de engenharia, custos exorbitantes de operação e complexidades de manutenção que exigiram treinamentos excessivos, além de equipamentos altamente especializados (RUSSELL, 2007).

No entanto, ainda que os requisitos apropriados de suporte sejam inseridos oportunamente no início do ciclo de vida, ineficiências relacionadas ao suporte logístico posteriormente fornecido ao sistema também podem induzir degradações nos indicadores RAMS, observadas já no período de implantação e no decorrer da fase de serviço, como ilustrado no prolongamento tracejado da curva ① na Figura 1.1.

De fato, não é raro que a vida em serviço dos sistemas tratados nesta pesquisa seja afetada por problemas de suportabilidade, a qual é definida por Blanchard (2014) como o grau em que um sistema pode ser efetivamente suportado, tanto em termos das características de projeto dos principais componentes relacionados à sua missão, quanto em termos dos aspectos da infraestrutura geral de suporte.

Segundo Cruyt, Ghobbar e Curran (2014), embora pela definição acadêmica a suportabilidade não seja calculada diretamente, alguns parâmetros relacionados podem ser medidos, como o custo de suporte necessário para atingir determinado nível de disponibilidade.

Corroborando com este pensamento, Silva (2018) afirma que, no âmbito de forças aéreas, a métrica mais utilizada no relacionamento entre o setor operacional e o setor de manutenção é justamente a disponibilidade, uma vez que a quantidade de aeronaves disponíveis está diretamente relacionada com a quantidade de horas que podem ser voadas e com o número de missões que pode ser cumprido em um determinado período.

Assim, de modo análogo ao modelo de custo-efetividade preconizado por Blanchard (2014), que considera custos do ciclo de vida e efetividades do sistema, nesta pesquisa as métricas fundamentais da suportabilidade durante a fase de serviço são o custo de suporte e a disponibilidade operacional, ambas influenciadas por características de projeto e aspectos da infraestrutura geral de suporte, como ilustrado na Figura 1.2.

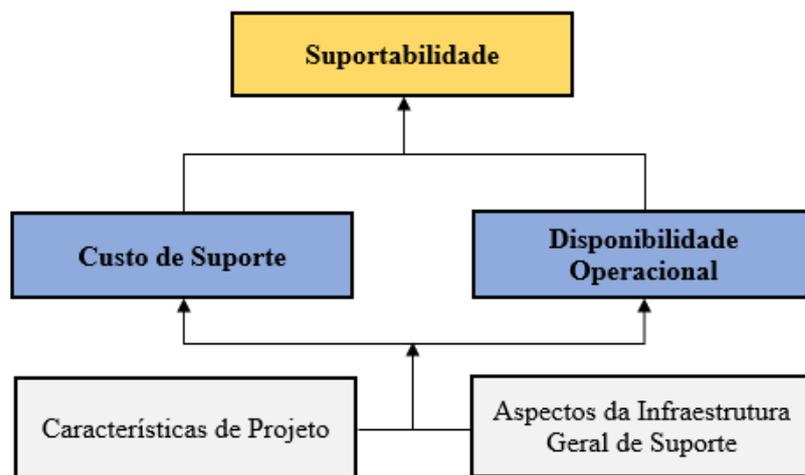


Figura 1.2 – Métricas Fundamentais da Suportabilidade.

1.2 Motivação

Em meio à contextualização apresentada, alguns aspectos importantes motivaram a realização do presente trabalho, conforme discorre-se a seguir.

De acordo com a análise de Assumpção (2020), um sistema pode oferecer um índice de disponibilidade adequado, mas apresentar custo de suporte elevado a tal ponto que inviabilize sua operação ao longo da vida útil.

Nesse sentido, segundo Blanchard (2014), a literatura de engenharia logística dispõe de alguns métodos clássicos de análise de suportabilidade, inerentes à concepção do sistema e

avaliação contínua da sua infraestrutura geral de suporte, tais como: Análise de Custo do Ciclo de Vida (*Life-Cycle Cost Analysis - LCCA*); Análise de Tarefas de Manutenção (*Maintenance Task Analysis - MTA*); e Análise de Nível de Reparo (*Level-of-Repair Analysis - LORA*).

Contudo, apesar de validadas e consagradas em suas finalidades, observa-se na prática que essas técnicas analíticas aplicadas isoladamente, em determinado cenário da vida em serviço, não apontam um *ranking* de fatores ou parâmetros quanto aos impactos que exercem na suportabilidade do sistema.

Conforme Duarte e Santos (2019), apesar dos esforços das Forças Armadas do Brasil, as normas que tratam de suportabilidade, no que diz respeito a ferramentas, técnicas ou métodos aplicáveis, ainda são insipientes. Assim, os procedimentos adotados para identificar aqueles fatores que devem ser priorizados na alocação de recursos ainda são empíricos.

Irigon (2020) também apontou a falta de aderência, por parte da indústria, aos padrões e guias existentes relacionados a suportabilidade de sistemas complexos, observando ainda que as boas práticas não estão amplamente enraizadas na comunidade operacional.

Desta forma, entende-se como imprescindível que os gestores de frotas de aeronaves de defesa disponham de uma estratégia para identificar, sempre que necessário durante a fase de serviço, a linha de ação mais eficiente para melhoria da suportabilidade.

1.3 Problema de Pesquisa

A aeronave A-29 Super Tucano, ilustrada na Figura 1.3, é empregada pela FAB na instrução inicial de caça, em atividades de demonstração aérea e em missões de interceptação do tráfego aéreo clandestino na região amazônica, representando assim, um vetor de defesa aérea nacional cuja prontidão é fundamental (FAB, 2019).



Figura 1.3 – Aeronave A-29 Super Tucano (FAB, 2019).

O gráfico da Figura 1.4 mostra a evolução de recursos recebidos para manutenção e suprimento de material aeronáutico, bem como o comportamento da média anual de disponibilidade operacional da frota de aeronaves A-29 da FAB, no período de 2009 a 2022, cuja meta atual é de 65%. Os dados foram coletados em Anuários Estatísticos da Logística, os quais são documentos publicados pelo Comando da Aeronáutica (COMAER) com a finalidade de manter um registro histórico e divulgar informações relacionadas ao cenário logístico do Sistema de Material Aeronáutico e Bélico (BRASIL, 2014, 2018, 2023).



Figura 1.4 – Histórico de Recursos Recebidos e da Média de Disponibilidade Operacional para a Frota de Aeronaves A-29 da FAB.

A despeito da evolução dos valores anualmente recebidos, em parte como resultado de inflação e de variações cambiais entre as moedas Real e Dólar, observa-se que manter a disponibilidade da frota em comento acima da meta, sobretudo em eventuais cenários de restrição orçamentária, sempre foi um desafio.

Diante desse quadro, mediante pesquisa documental e de campo no âmbito deste trabalho, os seguintes parâmetros foram identificados como oportunidades de melhoria para a suportabilidade da frota, não estando definidos, entretanto, os respectivos graus de influência:

- (i) tempo médio entre falhas ou taxa de falha;
- (ii) tempo médio entre manutenções preventivas;
- (iii) tempo médio de manutenções corretivas e preventivas;
- (iv) tempo médio de transporte de material; e
- (v) tempo médio de atrasos administrativos.

Assim, eventuais variações no sentido de melhoria desses fatores podem impactar positivamente a suportabilidade da referida frota. Além disso, a recorrente realidade de limitação de recursos revela a importância de haver um processo de referência para se definir em que ordem tais parâmetros influentes devem ser priorizados.

Face ao exposto, o problema desta pesquisa é a carência de um modelo de processo, embasado na literatura, para classificar fatores de confiabilidade e manutenibilidade quanto ao impacto que exercem na suportabilidade de aeronaves de defesa, com foco na fase de serviço do ciclo de vida.

Para o caso do A-29 da FAB, em particular, este problema se reflete no desafio enfrentado por gestores e gerentes logísticos nos processos de decisão relacionados a alocação de recursos, sejam eles materiais, humanos ou financeiros, em busca de maior custo-efetividade.

Portanto, o problema desta pesquisa pode ser resumido pela seguinte pergunta geral: “durante a vida em serviço de aeronaves de defesa, como avaliar os impactos que fatores de confiabilidade e manutenibilidade exercem na suportabilidade desses sistemas, de modo a identificar aqueles fatores que devem ser priorizados na alocação de recursos”?

1.4 Hipótese

Figueiredo-Pinto e Abrahão (2019) propuseram o Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida. Os autores observaram que, em havendo a viabilidade de diferentes alternativas de redução do custo de suporte para determinado nível de disponibilidade, e sendo conhecidos os custos envolvidos na implantação de cada uma delas, o método demonstrou sua utilidade ao decisor na medida em que este pode desenvolver um modelo mais detalhado para identificar e optar pela melhor alternativa de investimento para melhoria da suportabilidade.

Já no caso do trabalho de Cruyt, Ghobbar e Curran (2014), o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor desenvolvido por esses autores mostrou-se capaz de avaliar e classificar diferentes estratégias de suporte, de acordo com o valor ΔV de variação de suportabilidade, mas utilizando coeficientes de peso subjetivos correspondentes à disponibilidade e ao custo de suporte.

Portanto, formulou-se a seguinte hipótese para o problema de pesquisa definido:

- Durante a fase de serviço, a avaliação dos impactos de fatores de confiabilidade e manutenibilidade na suportabilidade de aeronaves de defesa, com identificação de prioridades para alocação de recursos, pode ser obtida mediante o emprego de modelagem e simulação, realizando-se uma combinação do Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida com o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor, substituindo-se, no entanto, a expressão matemática desta segunda técnica pelo Cálculo de Custo-Efetividade, para eliminar a subjetividade dos coeficientes de peso correspondentes à disponibilidade e ao custo de suporte.

A despeito de na literatura já existirem empregos individuais desses métodos para resolver problemas de suportabilidade, como será abordado no capítulo 2, este trabalho trata de uma proposta híbrida de solução, aplicada a um problema de pesquisa relevante em aberto.

1.5 Objetivo Geral do Trabalho

Com o intuito de resolver o problema de pesquisa e responder à pergunta geral que o resume, levando-se em consideração a hipótese formulada, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo de processo para avaliação dos impactos que fatores de confiabilidade e manutenibilidade exercem na suportabilidade de aeronaves de defesa, de modo que indique, sistemicamente, o *ranking* da prioridade de alocação de recursos em determinado contexto da vida em serviço.

1.5.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos (OE):
OE1 – Explorar conceitos do ciclo de vida de sistemas complexos de defesa, com foco na fase de serviço, de forma a contemplar as métricas fundamentais da suportabilidade, bem como fatores de confiabilidade e manutenibilidade, compreendendo características e correlações;

OE2 – Analisar pesquisas precedentes em suportabilidade de aeronaves de defesa, de modo a extrair inspirações para resolver o problema de pesquisa;

OE3 – Elaborar um modelo de processo para avaliação diagnóstica e prognóstica dos impactos que fatores de confiabilidade e manutenibilidade exercem na suportabilidade desses sistemas;

OE4 – Verificar o modelo de processo elaborado quanto ao atendimento de requisitos, bem como submetê-lo à avaliação por especialistas;

OE5 – Apresentar e discutir os resultados obtidos; e

OE6 – Apontar uma contribuição científica e uma aplicação operacional.

1.6 Relevância da Pesquisa

A relevância desta pesquisa está no desenvolvimento de um guia de apoio à decisão, para uso durante revisões da solução de suporte de sistemas aeroespaciais de defesa.

Nesse sentido, é importante destacar o estabelecimento da correlação entre variações de fatores de confiabilidade ou manutenibilidade e variações nas métricas de disponibilidade operacional e custo de suporte, principais componentes da suportabilidade, sob a ótica de uma relação causa-efeito, considerando a conjuntura da estrutura de suporte logístico, as características do sistema e o seu perfil de operação.

1.7 Delimitação da Pesquisa

A solução do problema de pesquisa será abordada academicamente para aeronaves de defesa, delimitando-se como um guia de alto nível, sem a intenção de abarcar todas as peculiaridades da suportabilidade de um sistema complexo qualquer, de forma que eventuais adaptações devem ser consideradas conforme o contexto de aplicação.

1.8 Estrutura da Dissertação

O capítulo 1, que se encerra neste subitem, abordou o contexto da suportabilidade de aeronaves de defesa, a motivação do trabalho e o problema de pesquisa, bem como apresentou a hipótese formulada e definiu os objetivos geral e específicos, registrando relevância, delimitação e estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta os conhecimentos teóricos consolidados e o estado da arte necessários à compreensão dos próximos capítulos, culminando com um comparativo entre o presente trabalho e pesquisas antecedentes a respeito da suportabilidade de sistemas aeroespaciais e sistemas complexos de defesa em geral.

O Capítulo 3 trata da metodologia empregada para testar a hipótese e atingir o objetivo geral do trabalho, cobrindo também os recursos computacionais utilizados.

O Capítulo 4 traz a aplicação da metodologia, bem como apresenta os resultados obtidos e realiza uma discussão, permitindo avaliar o modelo desenvolvido quanto à efetividade para solucionar o problema de pesquisa e à viabilidade de aplicação.

O capítulo 5 finalmente conclui o trabalho com um posicionamento a respeito da hipótese, revisitando o problema de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos. Nesse desfecho, é abordada a contribuição científica e a aplicação operacional. Por fim, são apontadas as limitações deste estudo e as respectivas sugestões de trabalhos futuros a respeito do tema.

2 Fundamentação Teórica e Revisão da Literatura

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais da literatura e uma revisão do tratamento que outros pesquisadores deram ao problema de suportabilidade de sistemas aeroespaciais, com a finalidade de embasar o desenvolvimento dos capítulos seguintes.

São abordadas as fases do ciclo de vida de sistemas complexos e as suas categorias de custos, com ênfase no custo de suporte. Na sequência, são cobertos os conceitos de suporte integrado do produto, confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade operacional, além do cálculo de custo-efetividade, bem como os principais fatores de confiabilidade e manutenibilidade que influenciam a suportabilidade.

São apresentadas, ainda, as principais medidas desempenho de estoque e a modelagem matemática da demanda de materiais reparáveis. Mais adiante, são estudados o Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida e o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor. Antes das considerações finais, é apresentado um comparativo entre este trabalho e as abordagens já realizadas por outros autores a respeito do tema.

2.1 Fases do Ciclo de Vida de Sistemas Complexos de Defesa

De acordo com Blanchard e Blyler (2016), o ciclo de vida inclui todo o espectro de atividades para um determinado sistema, começando com a identificação da necessidade e estendendo-se pelo projeto, desenvolvimento, produção e/ou construção, operação e suporte, retirada de operação e descarte do material.

De forma contextualizada, no setor aeronáutico de defesa, o ciclo de vida pode ser entendido como o conjunto de procedimentos que vão desde a detecção de uma necessidade operacional, seu atendimento por meio de um material ou sistema, seu emprego, sua oportuna revitalização ou modernização, estendendo-se até sua desativação (BRASIL, 2007).

O Guia SX000i de Especificação Internacional para Suporte Integrado do Produto (*International specification for Integrated Product Support*), publicado pela Associação das Indústrias Aeroespaciais e de Defesa da Europa (*AeroSpace and Defense Industries Association of Europe – ASD*) e pela Associação das Indústrias Aeroespaciais da América (*Aerospace Industries Association of America – AIA*), divide e descreve as fases do ciclo de vida do sistema conforme a seguir (ASD/AIA, 2021).

Fase de Preparação:

- Identificação das necessidades do usuário e desenvolver requisitos do sistema;
- Avaliação de possíveis soluções de material;
- Identificação e redução de riscos tecnológicos por meio de estudos, experimentos e modelos de engenharia;
- Estudo de viabilidade, análise de alternativas e estimativa de custo do ciclo de vida.

Fase de Desenvolvimento:

- Desenvolvimento de um sistema que atenda aos requisitos do usuário e que possa ser produzido, testado, avaliado, operado, suportado e descartado;
- Desenvolvimento de um processo de fabricação economicamente e tecnicamente exequível;
- Desenvolvimento da suportabilidade do sistema, com atenção especial para minimizar impactos negativos de fatores logísticos.

Fase de Produção:

- Produção ou fabricação do sistema;
- Teste do sistema;
- Condução da verificação do sistema, para confirmar atendimento aos requisitos.

Fase de Serviço:

- Operação do sistema;
- Provimento contínuo de suporte logístico ao sistema, com efetividade de custo;
- Avaliação, decisão e eventual execução de modificações, atualizações e melhorias;
- Avaliação contínua da eficácia e eficiência do sistema e de seu suporte logístico.

Fase de Descarte:

- Encerramento da operação do sistema e Remoção do suporte logístico relacionado;
- Desmilitarização do sistema;
- Descarte do sistema, em conformidade com todos os dispositivos legais e regulamentares relacionadas à segurança e meio ambiente.

Pelo fato de existirem diferenças pontuais entre as abordagens disponíveis na literatura acadêmica e as encontradas em documentos oficiais do Departamento de Defesa (*Department of Defense - DoD*) dos Estados Unidos da América (EUA), do Ministério da Defesa (MD) do Brasil e do COMAER, quanto à nomenclatura e as divisões das fases do ciclo de vida de

sistemas, as principais referências relacionadas ao tema são apresentadas no quadro comparativo a seguir, ressaltando-se que o foco deste trabalho recai sobre a fase de serviço.

Tabela 2.1 – Equivalência das Fases do Ciclo de Vida (adaptado de ASD/AIA, 2021).

	FASES DO CICLO DE VIDA					
ASD/AIA SX000i	Preparação		Desenvolvimento	Produção	Serviço	Descarte
US DoD Instruction 5000.02	Análise de Soluções de Materiais	Desenvolvimento de Tecnologia	Desenvolvimento de Engenharia e Manufatura	Produção e Implantação	Operação e Suporte	
Blanchard (2014)	Projeto Conceitual	Projeto Preliminar	Projeto Detalhado e Desenvolvimento	Produção ou Construção	Utilização e Suporte	Aposentadoria e Descarte
INCOSE (S.E. Handbook)	Concepção		Desenvolvimento	Produção	Utilização Suporte	Aposentadoria
DAU (Defense Acquisition University)	Pesquisa		Desenvolvimento	Produção	Operação e Suporte	Descarte
			Testes e Avaliações	Implantação		
Ministério da Defesa MD40-M-01	Concepção		Desenvolvimento	Produção	Operação e Apoio	Desfazimento
COMAER DCA 400-6	Concepção	Desenvolvimento ou Aquisição		Produção	Utilização	Desativação
	Viabilidade			Implantação	Revitalização, Modernização ou Melhoria	
	Definição					

Conforme observado por Assumpção (2020), o Manual MD40-M-01 reflete grande influência das normas ISO/IEC 15.288:2015 (*Systems and software engineering — System life cycle processes*) e das normas da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN).

Além disso, das referências citadas na Tabela 2.1, a Diretriz do Comando da Aeronáutica (DCA) 400-6, que trata do Ciclo de Vida de Sistemas e Materiais da Aeronáutica (BRASIL, 2007) é a que apresenta maior detalhamento na divisão das fases.

2.2 Custos do Ciclo de Vida de Sistemas Complexos de Defesa

No setor de defesa, os custos do ciclo de vida de sistemas complexos são divididos em quatro categorias principais (UNITED STATES, 2020):

- Custos de Pesquisa e Desenvolvimento (*Research and Development - R&D*), presentes desde o início do programa até a decisão de produção;
- Custos de Investimento (*Investment*), que consistem na aquisição do sistema, equipamentos de apoio, treinamento e aprovisionamento inicial e infraestrutura requerida;
- Custos de Operação e suporte (*Operating and Support - O&S*), decorrentes direta ou indiretamente da utilização do sistema em campo, incluindo pessoal, manutenção, peças de reposição etc.; e
- Custos de Descarte (*Disposal*), necessários para dar o adequado destino ao sistema após sua vida útil.

A Figura 2.1 ilustra o perfil das despesas anuais, por categoria de custo, ao longo do ciclo de vida de um sistema complexo de defesa, sugerindo que os custos de operação e suporte representam o maior montante.

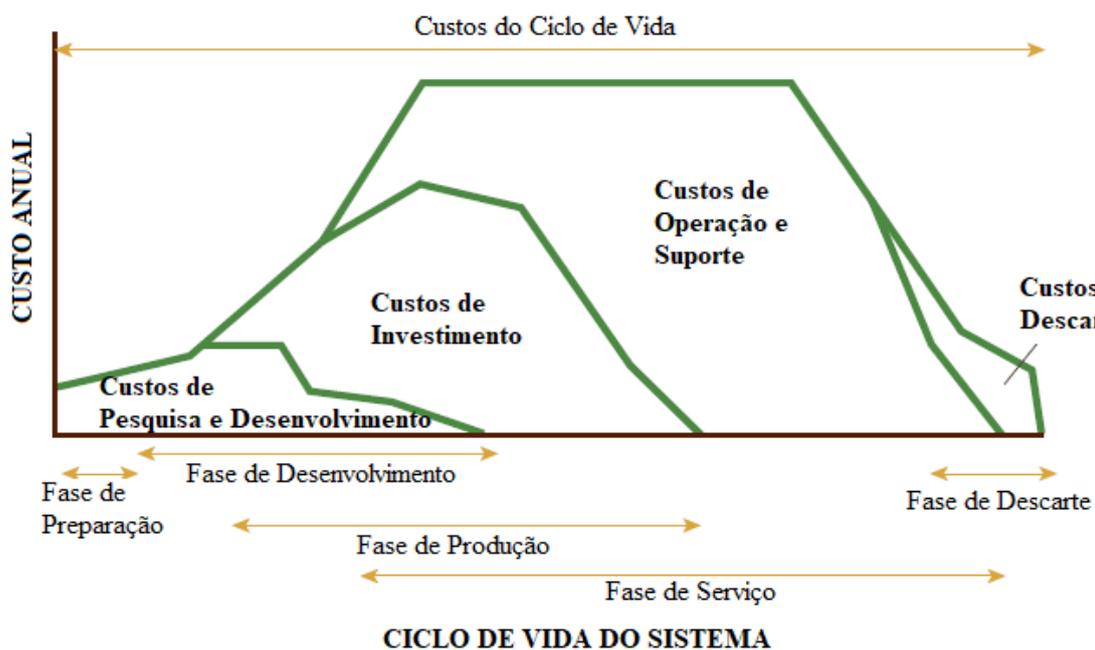


Figura 2.1 – Perfil de Despesas Anuais no Ciclo de Vida de Sistemas Complexos de Defesa (adaptado de JONES, 2014).

Muitas lideranças na área de Aquisições de Defesa reforçam há anos a ideia de que existe uma relação de custo entre as fases de vida dos sistemas de armas em geral, expressa de forma resumida e aproximada como 70% para operação e suporte e 30% para aquisição (JONES *et al.*, 2014). A Figura 2.2 mostra os percentuais das categorias de custos no ciclo de vida de

aeronaves de asa fixa e de asa rotativa do Departamento de Defesa dos EUA, conforme dados obtidos em relatórios de programas de aquisição até dezembro de 2019.

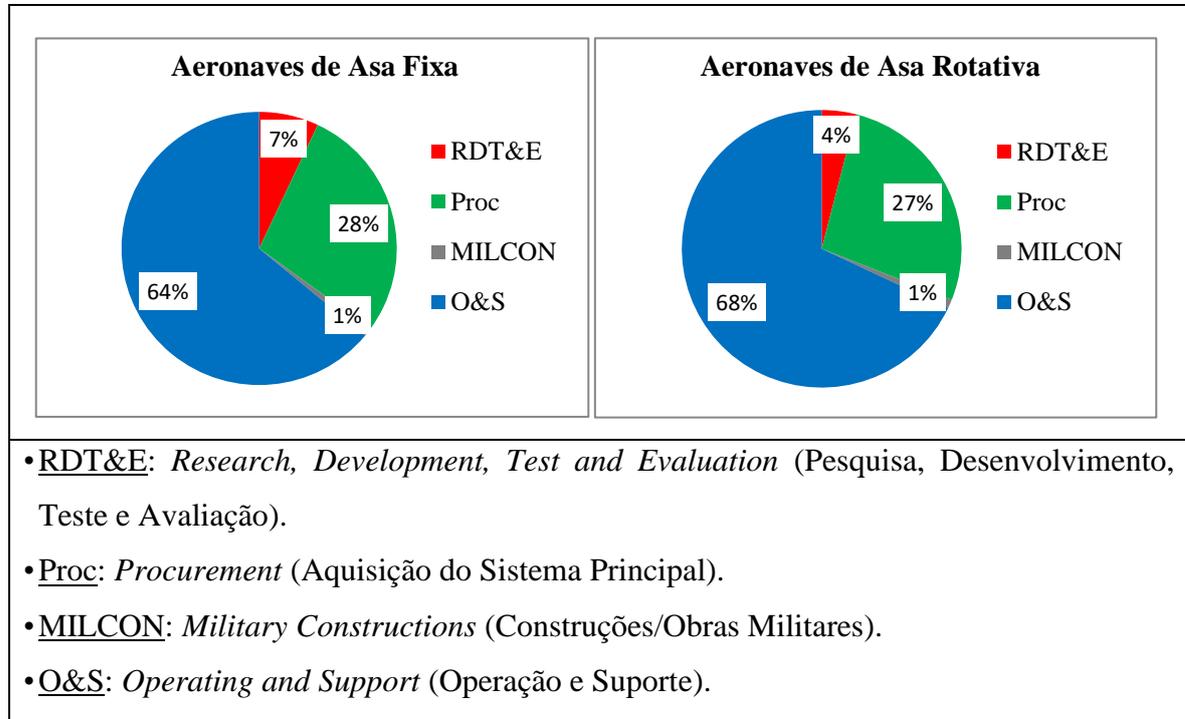


Figura 2.2 – Percentuais das Categorias de Custos no Ciclo de Vida de aeronaves de asa fixa e rotativa do Departamento de Defesa dos EUA (adaptado de UNITED STATES, 2020).

De fato, a proporção real entre esses custos varia conforme o programa. Verifica-se, no entanto, que para aeronaves de defesa dos EUA os custos O&S são os maiores dentre as quatro categorias, ficando na faixa de 64% a 68% (UNITED STATES, 2020).

Por vezes os operadores concentram-se apenas no custo de aquisição do sistema e negligenciam os demais custos envolvidos, realizando uma gestão deficiente dos custos do ciclo de vida. Posteriormente, ao se depararem com restrições financeiras, enfrentam sérios problemas para suportar a operação do sistema, o que conseqüentemente eleva o risco de perda da capacidade operacional desejada (BLANCHARD, 2014).

Essa situação pode ser comparada a um *iceberg* visto por uma embarcação, conforme ilustrado na Figura 2.3. A parte exposta, e menor, é associada aos custos diretos e mais evidentes, como é o caso do custo de aquisição do sistema. Já a parte submersa e oculta, porém maior, abarca todos os demais custos, como treinamento para operação e suporte ao sistema, suprimento, manutenção dos itens reparáveis, instalações e infraestrutura necessárias à operação e manutenção, dentre outros (BLANCHARD, 2014).

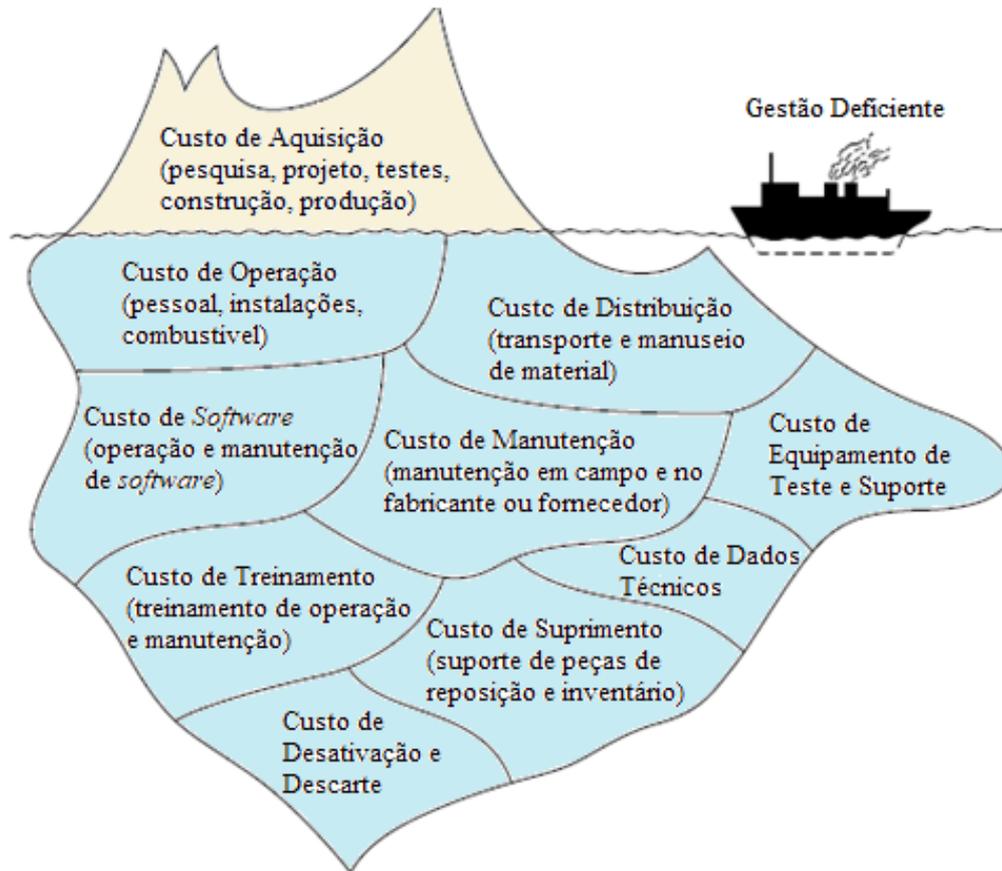


Figura 2.3 – Visibilidade de Custos do Sistema (BLANCHARD, 2014).

2.2.1 Custos de Suporte

Embora a categoria O&S contemple também custos de operação, referentes à tripulação, combustível e munição, os custos de suporte restringem-se àqueles essencialmente relacionados à manutenção e ao suporte logístico, apresentando os seguintes componentes principais, em geral calculados anualmente pelos operadores (BLANCHARD, 2014):

- (a) Custo de pessoal de manutenção e apoio (C_{Pessoal});
- (b) Custo de aquisição, estoque e inventário de materiais (C_{Estoque});
- (c) Custo de ferramentas, equipamentos de suporte e de teste ($C_{\text{Ferramental}}$);
- (d) Custo de transporte, manuseio e distribuição de materiais ($C_{\text{Transporte}}$);
- (e) Custo de treinamento de manutenção ($C_{\text{Treinamento}}$);
- (f) Custo de instalações e infraestrutura de manutenção ($C_{\text{Instalações}}$); e
- (g) Custo de dados técnicos ($C_{\text{Dados Técnicos}}$).

2.3 Suporte Integrado do Produto

De acordo com Blanchard (2014), no setor de defesa, a logística relacionada ao ciclo de vida de sistemas complexos desenvolveu-se a partir do conceito de suporte logístico integrado, do inglês *Integrated Logistics Support (ILS)*, definido como uma abordagem disciplinada, unificada e iterativa para atividades gerenciais e técnicas necessárias a (DSMC, 1994):

- Inserir considerações de suporte no *design* do sistema;
- Desenvolver requisitos de suporte compatíveis com os objetivos de prontidão do sistema;
- Adquirir o requerido suporte; e
- Prover o requerido suporte durante a fase operacional ao mínimo custo.

A expressão original foi atualizada para “*Integrated Product Support (IPS)*”, que pode ser traduzida como “Suporte Integrado do Produto”, e o seu conceito passou a contemplar o delineamento de doze elementos básicos, os quais devem ser oportunamente considerados de forma integrada para abranger todas as questões inerentes à suportabilidade, de modo a garantir que a melhor capacidade do sistema esteja disponível quando necessário e ao menor custo possível (ASD/AIA, 2021; DAU, 2011).

A seguir, os doze elementos do IPS são listados e brevemente descritos conforme Abrahão *et al.* (2019):

1. Manutenção: planejamento, gestão, conceitos, métodos, técnicas e requisitos relacionados às ações de prevenção ou correção de falhas do sistema;
2. Suprimento: atividades de gerenciamento para adquirir e catalogar componentes reparáveis, materiais de consumo e todas as classes de fornecimento necessárias ao sistema;
3. Operações Logísticas: ações relacionadas aos requisitos de embalagem, manuseio, armazenamento e transporte de material relacionado ao sistema;
4. Gestão do Suporte ao Produto: planejamento e o gerenciamento do desempenho e do custo referentes ao suporte do sistema complexo em toda a cadeia de valor, desde o projeto até o descarte, considerando todos os demais elementos do IPS;
5. Dados Técnicos: atividades de gestão para adquirir ou desenvolver informações necessárias à operação, manutenção e treinamento, visando maximizar performance, segurança e disponibilidade do sistema;
6. Suporte Continuado de Engenharia: atividades que utilizam técnicas para apoiar o sistema em serviço no seu ambiente operacional, de modo a garantir operação e manutenção contínuas;

7. Recursos de Computação: envolve o planejamento e o gerenciamento de sistemas de *hardware* e *software*, críticos ou específicos de sistemas complexos;
8. Influência do Design: envolve a participação no processo de engenharia de sistemas para impactar o *design* desde o início do ciclo de vida, visando facilitar o suporte;
9. Equipamentos de Suporte: envolve ações de adquirir, gerenciar e manter os equipamentos de apoio necessários à operação e à manutenção do sistema;
10. Instalações e Infraestrutura: edificações e ambientes adequados para permitir manutenção, armazenamento e treinamento;
11. Pessoal e Mão de Obra: recursos humanos com as quantidades e as qualificações necessárias para operar equipamentos, realizar tarefas de manutenção, suprimento, engenharia e apoiar as operações; e
12. Treinamento: envolve a capacitação contínua dos recursos humanos para operar e manter o sistema complexo durante todo o ciclo de vida.

Conforme abordado por Abrahão *et al.* (2019) e ilustrado na Figura 2.4, esses elementos devem ser considerados em todo o ciclo de vida do sistema, por meio de conceitos, métodos, ferramentas, tarefas, requisitos e questões peculiares a cada fase.

Elementos do IPS	Fases do Ciclo de Vida				
	Preparação	Desenvolvimento	Produção	Serviço	Descarte
Manutenção	Conceitos, métodos, ferramentas, tarefas, requisitos e questões peculiares a cada fase do ciclo de vida.				
Suprimento					
Operações Logísticas					
Gestão do Suporte ao Produto					
Dados Técnicos					
Suporte Continuado de Engenharia					
Recursos de Computação					
Influência do Design					
Equipamento de Suporte					
Instalações e Infraestrutura					
Pessoal e Mão de Obra					
Treinamento					

Figura 2.4 – Elementos IPS e Fases do Ciclo de Vida (adaptado de Abrahão *et al.*, 2019).

2.4 Confiabilidade e Manutenibilidade

Nesta seção serão abordados, à luz da literatura, conceitos fundamentais de confiabilidade e manutenibilidade.

2.4.1 Taxa de Falha e Distribuição Exponencial de Falhas

De acordo com Blanchard (2014), a taxa na qual as falhas ocorrem em um intervalo de tempo especificado é chamada de taxa de falha durante esse intervalo, representada por λ e calculada conforme Equação 2.1.

$$\lambda = \frac{N}{T} \quad (2.1)$$

Onde:

N é o número de falhas; e

T é o tempo total de operação.

As distribuições de probabilidade de falhas são tipicamente caracterizadas pelas respectivas Funções Densidade de Probabilidade de Falha, como ilustrado na Figura 2.5 (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

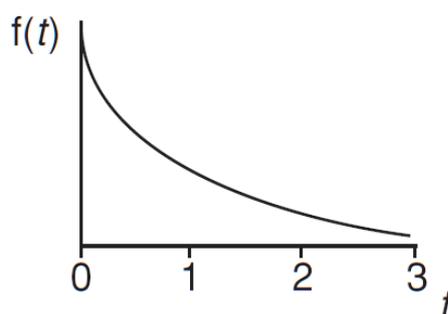


Figura 2.5 – Função Densidade de Probabilidade de Falha para a Distribuição Exponencial de Falhas (adaptado de O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

Segundo O'Connor e Kleyner (2012), a distribuição exponencial de falhas é certamente uma das mais importantes no estudo da confiabilidade, por representar, com boa aproximação, falhas de natureza aleatória e repentina, com taxa de falha (λ) constante, tendo a sua função densidade de probabilidade expressa pela Equação 2.2.

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

Onde:

$f(t)$ é a função densidade de probabilidade de falha;

t é o tempo de operação do sistema; e

e é a base do logaritmo natural (2,7183).

Assumindo uma distribuição exponencial de falhas, a taxa de falha é o inverso do tempo médio entre falhas, do inglês *Mean Time Between Failures* (MTBF), conforme a seguir (BLANCHARD, 2014):

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (2.3)$$

Logo, o MTBF é então calculado pela razão entre o tempo total de operação do sistema e o número de falhas ocorridas, como mostra a Equação 2.4 (BLANCHARD, 2014).

$$MTBF = \frac{T}{N} \quad (2.4)$$

2.4.2 Confiabilidade

Segundo Blanchard (2014), a confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um componente ou sistema operar de maneira satisfatória por um tempo determinado e dentro das condições de operação para as quais ele foi especificado. Neste conceito, a probabilidade é citada tendo em vista a relação entre o número de vezes que o evento “operação” ocorreu de maneira satisfatória em relação a todas as vezes que o sistema operou.

Assim, conforme Blanchard (2014), assumindo-se que o tempo até a falha seja descrito por uma função de densidade exponencial (distribuição exponencial de falhas), a confiabilidade R no tempo t pode ser expressa por um valor entre 0 e 1, ou de forma percentual, calculada pelas Equações 2.5 e 2.6.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.5)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

Onde:

$R(t)$ é a função de confiabilidade (do inglês *Reliability*) no tempo (BLANCHARD, 2014).

Neste caso específico, em que a taxa de falha é assumida como constante, a confiabilidade de um item em sua vida média é aproximadamente 37%, que é a probabilidade desse item sobreviver ao seu MTBF sem falha (BLANCHARD, 2014). Logo, há aproximadamente 63% de probabilidade desse mesmo item falhar antes do MTBF, ou ainda, em outras palavras, este é o percentual aproximado das unidades desse tipo de item que falham até o MTBF (BLANCHARD, 2014).

De acordo com Blanchard (2014), a frequência de manutenção para um determinado componente ou sistema é altamente dependente da sua confiabilidade, de modo que à medida que a confiabilidade aumenta, a frequência de manutenção diminui, e, por outro lado, à medida que a confiabilidade diminui, a frequência de manutenção aumenta.

Blanchard (2014) também menciona que a confiabilidade é uma característica inerente ao projeto, devendo ser adequadamente considerada no início do desenvolvimento programa, bem como acompanhada durante todo o ciclo de vida do sistema.

2.4.3 Manutenção

Antes de tratar da manutenibilidade, convém definir manutenção e apresentar suas principais categorias.

Lafraia (2001) define manutenção como o conjunto das ações destinadas a manter ou recolocar um item num estado no qual pode executar sua função requerida e Blanchard (2014) classifica ainda a manutenção em duas categorias, com as seguintes definições:

a) manutenção corretiva: aquela que inclui todas as atividades não programadas decorrentes de falha do produto ou sistema e necessárias para o restaurar o sistema para uma condição especificada. O ciclo de manutenção corretiva inclui a identificação da falha, localização e isolamento, desmontagem, remoção, substituição ou reparo, remontagem, teste e verificação de condição. Manutenções não programadas também podem ocorrer por suspeita de falha mesmo que uma futura investigação indique que não houve uma falha real; e

b) manutenção preventiva: aquela que inclui todas as atividades programadas executadas para manter um sistema ou produto em uma condição especificada. São compostas

por inspeções periódicas, monitoramento de condição, substituição de itens críticos e calibrações. Adicionalmente, serviços como lubrificação, limpeza, abastecimento, ajustes etc. podem ser genericamente englobados como manutenção programada.

De acordo com Silva (2018), as aeronaves são submetidas a requisitos mandatórios de manutenção preventiva que estabelecem tarefas a serem executadas em intervalos regulares, com o objetivo de mantê-las operando em segurança e atendendo às especificações de desempenho de projeto.

2.4.4 Manutenibilidade

A manutenibilidade é uma característica do projeto e da instalação expressa como a probabilidade de um item ser trocado ou restaurado a uma condição especificada dentro de um determinado intervalo de tempo, quando a manutenção é executada de acordo com os procedimentos e recursos prescritos (BLANCHARD, 2014).

Segundo Blanchard (2014), o Tempo Médio de Manutenção Ativa (\bar{M}), do inglês *Mean Active Maintenance Time*, necessário para restaurar a capacidade de prontidão de um item ou sistema, inclui ações corretivas e preventivas, sendo calculado pela Equação 2.7.

$$\bar{M} = \frac{(\lambda) \cdot \overline{M}_{CT} + (f_{pt}) \cdot \overline{M}_{PT}}{\lambda + f_{pt}} \quad (2.7)$$

Onde:

\overline{M}_{CT} é o *Mean Corrective Maintenance Time* (Tempo Médio de Manutenção Corretiva);

\overline{M}_{PT} é o *Mean Preventive Maintenance Time* (Tempo Médio de Manutenção Preventiva);

λ é a Taxa de Falha; e

f_{pt} é a Frequência de Manutenção Preventiva.

O projeto de um sistema complexo requer a inclusão de características de manutenibilidade que facilitem as atividades de manutenção, de forma a reduzir os tempos das paradas técnicas e os custos associados (BLANCHARD E BLYLER, 2016).

A manutenibilidade, como característica inerente ao projeto, deve ser devidamente considerada nas fases iniciais do desenvolvimento do sistema, mas as atividades relacionadas são aplicáveis ao longo de todo o ciclo de vida (BLANCHARD, 2014).

2.5 Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade *Versus* Elementos do IPS

Primeiramente, cabe destacar que os requisitos logísticos para alcançar as metas de suportabilidade devem ser perseguidos desde a concepção do sistema (DAU, 2011).

Segundo Blanchard (2014), a oportunidade para geração de economia no custo do ciclo de vida de um produto ou sistema se concentra nas suas fases iniciais, de forma que este potencial já é significativamente reduzido quando as primeiras unidades começam a ser produzidas. Portanto, as decisões com maior impacto na suportabilidade do sistema são tomadas durante o seu projeto e desenvolvimento (FIGUEIREDO-PINTO e ABRAHÃO, 2018).

Com relação aos fatores de confiabilidade, no campo da aviação, a maioria dos modelos prospectivos, ou seja, que estima os custos de suporte sem recorrer a histórico de dados, assume taxa de falha constante, característica da confiabilidade exponencial (SHERBROOKE, 2004).

Para Nowlan e Heap (1978), essa premissa é razoável e admissível, pois a taxa de falha constante foi o comportamento mais recorrente na pesquisa de campo realizada pelos autores junto a companhias aéreas, principalmente a fomentadora do estudo por eles realizado, a United Airlines.

De acordo com Blanchard (2014), além de ser comum em itens eletrônicos, essa simplificação também pode ser aplicada a itens sujeitos a falhas prematuras ou por desgaste, típicas de itens mecânicos, desde que considerada apenas a fase madura da operação, que tende a ser a mais relevante do ciclo de vida, em função do processo de eliminação (*Burn-In*) de falhas infantis, efetuado pelos fabricantes, e das tarefas de manutenção preventiva, que buscam evitar ou mitigar as falhas por desgaste.

No entanto, conforme comentado por Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018), observa-se em campo que, até mesmo os valores médios nominais, como é o caso da taxa de falha (λ) e o MTBF, oferecidos pelos fabricantes originais dos equipamentos (do inglês *Original Equipment Manufacturers* - OEMs) com base em testes realizados em laboratório, dificilmente são confirmados na prática.

Marques *et al.* (2017) apontam que tal discrepância pode ocorrer devido à falta de maturidade dos dados de confiabilidade no momento da entrada em serviço do sistema.

Quanto aos fatores associados à manutenibilidade, esses podem ser afetados por expansões ou contrações da cadeia de suprimento, e convivem com os riscos trazidos pela dimensão global das redes de fornecedores que trabalham no suporte aos sistemas de defesa, de modo que, a despeito dos tempos planejados, atrasos substanciais podem tornar-se recorrentes,

trazendo desafios significativos ao estabelecimento de prazos contratuais para o fornecimento e a manutenção dos componentes (FIGUEIREDO-PINTO e ABRAHÃO, 2018).

Portanto, eventuais variações nesses parâmetros relacionados aos elementos do IPS podem influenciar, positivamente ou negativamente, a suportabilidade de um sistema durante a fase de serviço, em maior ou menor grau, a depender do contexto.

Neste trabalho destaca-se a relevância de cinco fatores vinculados aos aspectos de confiabilidade ou manutenibilidade. A Tabela 2.2 relaciona esses fatores aos elementos do IPS, de acordo com a abordagem do Guia SX000i de Especificação Internacional para Suporte Integrado do Produto.

Tabela 2.2 – Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade Versus Elementos do IPS
(adaptado de ASD/AIA, 2021).

Elementos do IPS	Fatores Logísticos				
	Confiabilidade		Manutenibilidade		
	Tempo Médio entre Falhas	Tempo Médio entre Manutenções Preventivas	Tempo Médio de Manutenções Corretivas e Preventivas	Tempo Médio de Transporte de Material	Tempo Médio de Atraso Administrativo
Manutenção		X	X		X
Suprimento				X	X
Operações Logísticas				X	X
Gestão de Suporte ao Produto	X	X	X	X	X
Dados Técnicos		X	X		X
Suporte Cont. de Engenharia	X	X	X		X
Recursos Computacionais			X	X	X
Influência do <i>Design</i>	X	X	X	X	
Equipamentos de Suporte	X		X		X
Instalações e Infraestrutura			X		
Pessoal e Mão de Obra			X		X
Treinamento			X		X

Esses fatores, entre outros, correspondem às métricas secundárias da suportabilidade, denominadas pelo ASD/AIA (2021) como atributos chave do sistema, do inglês *Key System Attributes (KSA)*. Assim, tais parâmetros estão vinculados às características do sistema ou a sua estrutura de suporte logístico, influenciando simultaneamente a suportabilidade, a qual pode ser avaliada por meio da relação de custo-benefício entre custo de suporte e disponibilidade operacional.

2.6 Disponibilidade Operacional

A norma NBR 5462 enuncia o conceito de Disponibilidade como a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, estando os recursos externos necessários assegurados (ABNT, 1994).

Conforme Blanchard (2014), de todos os indicadores relacionados ao conceito de disponibilidade, a disponibilidade operacional (do inglês *Operational Availability* - A_o) é o mais amplo, pois leva em consideração manutenções corretivas, preventivas e ainda os tempos de espera logísticos e administrativos, sendo definida pelo autor como a probabilidade de um sistema ou equipamento operar de forma satisfatória quando requerido, sob condições especificadas em ambiente operacional real, calculada para um componente pela Equação 2.8.

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (2.8)$$

Onde:

- MTBM é o *Mean Time Between Maintenance* (Tempo Médio entre Manutenções, corretivas ou preventivas);
- MDT é o *Maintenance Downtime* (Tempo de Inatividade por Manutenção);

Neste caso, o MDT é calculado conforme Equação 2.9.

$$MDT = \bar{M} + LDT + ADT \quad (2.9)$$

Em que:

- \bar{M} é o *Mean Active Maintenance Time* (Tempo Médio de Manutenção Ativa, seja corretiva ou preventiva);
- LDT é o *Logistic Delay Time* (Tempo de Atraso Logístico), relacionado à disponibilidade de peças; e
- ADT é o *Administrative Delay Time* (Tempo de Atraso Administrativo), relacionado à disponibilidade de pessoas e autorizações corporativas.

Para um sistema n , a disponibilidade operacional A_{O_n} é igual ao produto das disponibilidades de cada componente i independente instalado, e, no nível geral da frota, a

disponibilidade operacional $A_{O_{frota}}$ é a média das disponibilidades de todos os sistemas, conforme Equações 2.10 e 2.11, respectivamente (SAE INTERNATIONAL, 1992):

$$A_{O_n} = \prod_i A_{O_{n_i}} \quad (2.10)$$

$$A_{O_{frota}} = \frac{\sum_{n=1}^N A_{O_n}}{\sum_{n=1}^N N_n} \quad (2.11)$$

O modelo adotado nesta pesquisa utiliza a métrica da disponibilidade operacional, pois leva em consideração não apenas os eventos de falhas e as respectivas manutenções corretivas, mas também as manutenções preventivas e os atrasos logísticos e administrativos.

2.7 Cálculo de Custo-Efetividade

Segundo Blanchard (2014), a Métrica de Custo-Efetividade de um sistema pode ser expressa em termos de disponibilidade e custo do ciclo de vida, conforme Equação 2.12.

$$\text{Custo-Efetividade} = \frac{\text{Disponibilidade}}{\text{Custo do Ciclo de Vida}} \quad (2.12)$$

2.8 Modelagem Matemática da Demanda de Reparáveis

Uma abordagem imprescindível para suportabilidade de sistemas complexos é a modelagem da demanda de materiais reparáveis, ou seja, daqueles que são técnica e economicamente viáveis de serem reparados, por apresentarem ciclo de vida tipicamente duradouro e alto custo de aquisição.

De acordo com Sherbrooke (2004), pelo Teorema de Palm, se a demanda por um item segue uma distribuição de Poisson com média m , e se o tempo de reparo para cada item que falhou é independente e identicamente distribuído de acordo com qualquer distribuição de probabilidade com média t , então a distribuição de probabilidade em regime do número de itens em reparo segue uma distribuição de Poisson com média $m.t$, como mostra a Equação 2.13, em que X_m é a quantidade média de itens em reparo.

$$X_m = m.t \quad (2.13)$$

A Equação 2.14 a seguir mostra que a demanda média (m) dos itens por hora é proporcional à taxa de falha (λ), à taxa de utilização (u), razão entre horas de operação e horas totais transcorridas, à quantidade (q) de itens por sistema e à quantidade (n) de sistemas operando no local de interesse (MARQUES *et. al*, 2017).

$$m = \lambda \times u \times q \times n \quad (2.14)$$

2.9 Nível de Estoque

De acordo com Sherbrooke (2004), o nível de estoque (S) pode ser pensado como a quantidade de unidades que se quer adquirir de um certo item no aprovisionamento inicial.

Assim, o nível de estoque corresponde à quantidade de itens adquiridos além daqueles que já estão instalados, ou deveriam estar instalados, nos sistemas em operação, ou ainda pode ser compreendido como a quantidade de itens que sobra quando todos os sistemas em operação já estão equipados, servindo como um estoque de giro (FIGUEIREDO-PINTO, 2021).

Também chamado de posição de estoque em muitos textos, o nível de estoque, S , é uma constante quando a quantidade do pedido é 1 e o ponto de reabastecimento é $S-1$ (SHERBROOKE, 2004). Dessa forma, o nível de estoque (S) não é uma variável aleatória, mas sim uma variável de decisão, de modo que quanto maior o nível de estoque, menor a probabilidade de faltar o item diante de demandas, e, conseqüentemente, maior é a taxa de atendimento às solicitações, porém, maior é o investimento requerido (SHERBROOKE, 2004).

Como todos os itens sobressalentes devem estar em algum lugar, de acordo com Sherbrooke (2004), pode-se descrever o equilíbrio de estoque conforme Equação 2.15.

$$S = OH + X - BO \quad (2.15)$$

Em que:

- *On-Hand* (OH) é uma variável aleatória discreta que representa a quantidade de itens disponíveis em estoque em determinado momento;
- *Backorder* (BO) é uma variável aleatória discreta que representa a quantidade de pedidos de material que não foram atendidos em qualquer ponto no tempo, ou seja, a quantidade de itens faltantes para operação normal do sistema em determinado instante;

- *Pipeline* (X), também denominado na literatura como *Due In* (DI), é uma variável aleatória discreta que representa a quantidade de itens em processo de reparo ou trânsito num dado instante, e pode ser representada por meio de uma distribuição de probabilidade; e
- OH , BO e X são maiores ou iguais a zero.

Portanto, conforme Sherbrooke (2004), quando o número de itens em reparo (X) é menor que S , há estoque disponível, mas quando é maior que S , há pedidos pendentes.

2.10 Medidas de Desempenho de Estoque

Neste ponto, é importante considerar o conceito de *Fill Rate* (FR), correspondente à probabilidade de uma demanda ser atendida imediatamente, e que pode ser calculada pela razão entre a quantidade de demandas atendidas e a quantidade total de demandas, ou conforme as seguintes equações (SHERBROOKE, 2004):

$$FR(S) = P(OH \geq 1) = P(S - X \geq 1) \quad (2.16)$$

$$FR(S) = P(X \leq S - 1) = \sum_{x=0}^{S-1} P(X = x) \quad (2.17)$$

$$FR(S) = P(X = 0) + P(X = 1) + \dots + P(X = S - 1) \quad (2.18)$$

Onde $P(X = x)$ é a probabilidade da variável aleatória X assumir o valor x .

Em síntese, o estoque de giro (S) de itens, necessário para suprir de modo imediato e ininterrupto os sistemas em operação, deve ser tal que *On-Hand* (OH) seja sempre maior ou igual a 1, ou seja, $OH \geq 1$ ou $S - X \geq 1$.

Sendo X o número de itens em reparo em determinado momento e S a quantidade de itens do estoque giro, define-se *Expected Backorders* (EBO) como a quantidade esperada de itens faltantes na frota, que pode ser calculada, segundo Sherbrooke (2004), pela Equação 2.19.

$$EBO(S) = \sum_{x=S+1}^{\infty} (x - S) P(X = x) \quad (2.19)$$

Ainda de acordo Sherbrooke (2004), sendo j um item específico, C_j o seu custo e S_j o seu estoque de giro, a função objetivo do problema de estoque de reparáveis é minimizar a

quantidade total esperada de itens em emergência, de modo a estabelecer níveis adequados de estoque para cada item j , sendo expressa pela Equação 2.20.

$$\min \sum_{j=1}^J EBO (S_j) \quad (2.20)$$

Neste caso, tal função objetivo está sujeita à seguinte restrição (SHERBROOKE, 2004):

$$\sum_{j=1}^J C_j S_j \leq Orçamento \quad (2.21)$$

2.11 Relação entre EBO e Disponibilidade

Segundo Sherbrooke (2004), desconsiderando-se as manutenções preventivas e os atrasos administrativos, por simplificação, a disponibilidade (A) é calculada pela Equação 2.22.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + WT} \quad (2.22)$$

Em que:

- MTTR é o Mean Time To Repair (Tempo Médio para Reparo); e
- WT é o Mean Waiting Time for Spares (Tempo Médio de Espera por Peças).

Pela Lei de Little, sob condições de equilíbrio, o número médio de itens em um sistema de filas é igual à taxa média de chegada dos itens multiplicada pelo tempo médio que um item passa no sistema, de onde decorre a seguinte equação (CHHAJED; LOWE, 2008):

$$WT = \frac{EBO}{m} \quad (2.23)$$

Portanto, minimizar *Expected Backorders* (EBO) corresponde a maximizar disponibilidade, relação que pode ser expressa pela Equação 2.24 (SHERBROOKE, 2004).

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + \frac{EBO}{m}} \quad (2.24)$$

2.12 Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida

Proposto por Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018), o Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida realiza a compilação dos custos básicos relacionados a todos os eventos singulares da provisão de suporte logístico a um sistema complexo, sendo derivado da técnica de estimativa de custos de Engenharia de Projetos, a qual, segundo Dhillon (1989), apesar de ser reconhecidamente mais precisa, requer a utilização de recursos computacionais eficientes, em razão da sua complexidade e abrangência.

Desta forma, esse método utiliza um pacote de *software* denominado Suíte OPUS[®], da empresa sueca Syscon Group AB, como ferramenta de modelagem, otimização, simulação e cálculo de custos (FIGUEIREDO-PINTO e ABRAHÃO, 2018).

O método tem início com a modelagem estática e determinística do cenário de suporte logístico do sistema no OPUS10[®], que assume taxas de falha constantes, bem como considera os valores médios de cada parâmetro utilizado e visa a otimizar o desempenho do sistema escolhendo a melhor combinação de estoques para suportar a operação, segundo diferentes valores de orçamento (FIGUEIREDO-PINTO e ABRAHÃO, 2018).

Para calcular o estoque otimizado que deve ser adquirido em atendimento ao nível de serviço requerido, o *software* OPUS10[®] segue um algoritmo baseado na técnica de multi-escalonamento para controle de itens reparáveis, do inglês *Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control* (METRIC), explanada por Sherbrooke (2004) e proposta originalmente em um artigo de sua autoria publicado em 1978. Dessa forma, todas as premissas e restrições impostas pela referida técnica também balizam a modelagem, tais como distribuição de Poisson para o número médio de peças em reparo ou reabastecimento, não existência de condenação de itens e não canibalização da frota (FIGUEIREDO-PINTO e ABRAHÃO, 2018).

De acordo com Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018), o resultado oferecido por este primeiro programa é uma curva de máxima efetividade de custo, em que todos os pontos representam soluções ótimas de composição de estoques para cada nível de orçamento. É adotada como requisito para o sistema em análise uma determinada disponibilidade percentual e a este ponto corresponde uma lista de material específica, que deve ser adquirida para atingir o nível de serviço desejado (FIGUEIREDO-PINTO e ABRAHÃO, 2018).

Na sequência, Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018) explicam que o modelo é submetido à simulação no programa SIMLOX[®], trazendo dinamismo à análise por meio da inserção de variáveis dependentes do tempo, como perfis operacionais. Esta ferramenta permite

compreender melhor o comportamento do sistema ao longo da sua utilização, identificando gargalos e eventuais problemas pontuais que possam surgir em momentos específicos do ciclo de vida, não evidenciados por modelos estáticos (FIGUEIREDO-PINTO e ABRAHÃO, 2018).

E por fim, o modelo construído e os resultados obtidos são carregados em um terceiro programa da suíte chamado CATLOC[®], responsável pelo cálculo dos custos, onde todos os eventos do período simulado são computados no domínio do tempo, das estações, das missões e dos componentes do sistema (FIGUEIREDO-PINTO e ABRAHÃO, 2018).

2.13 Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor

Desenvolvido por Cruyt, Ghobbar e Curran (2014), o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor utiliza um modelo matemático que leva em consideração as variações das métricas disponibilidade operacional e custos de suporte, associadas a seus respectivos coeficientes de peso, quando supõe a mudança de uma situação inicial (*baseline*) para algum novo estado (alternativa), no intuito de obter um valor diferencial ΔV , de forma que:

$$\Delta V = \alpha_A \cdot \delta A + \alpha_C \cdot \delta C \quad (2.25)$$

Sendo:

$$\delta A = \frac{A_i}{A_0} \quad (2.26)$$

e

$$\delta C = \frac{C_0}{C_i} \quad (2.27)$$

Onde:

- α_A e α_C são os coeficientes de peso correspondentes à disponibilidade e custo de suporte, respectivamente, obtidos por meio de pesquisa social com *stakeholders*, como operadores, mantenedores, fornecedores e fabricante;
- δA e δC são as razões de disponibilidade e custo de suporte, respectivamente, quando há mudança do estado inicial (0) para um novo estado (*i*); e
- $\Delta V > 1$ significa que a alternativa possui maior valor que a *baseline*, enquanto $\Delta V < 1$ corresponde a menor valor.

Em seguida, o método sugere a classificação das alternativas avaliadas de acordo com o valor ΔV . Esse modelo foi desenvolvido a partir da Metodologia de Operações de Valor (do inglês *Value Operations Methodology* - VOM), de Curran *et al.* (2010), a qual introduziu uma expansão operacional no antigo método chamado Engenharia de Valor (*Value Engineering*), também conhecido como Análise de Valor (*Value Analysis*), concebido por Lawrence Miles na década de 1940 e definido como uma aplicação de técnicas que buscam melhorar o valor de um produto ou serviço, avaliando suas funções, bem como provendo as condições necessárias para atender o desempenho exigido ao menor custo total (CHITALE e GUPTA, 2013, p. 308).

2.14 Pesquisas Antecedentes *Versus* Presente Estudo

Além dos métodos já explanados, resume-se, adiante, as abordagens de pesquisas realizadas por outros autores a respeito do tema.

Marques *et al.* (2017) discutiram sobre os impactos do amadurecimento da confiabilidade no custo de suporte de um sistema em desenvolvimento, por meio de um estudo de caso que avaliou os resultados de alteração das taxas de falha dos itens reparáveis no custo da lista de provisionamento inicial para o sistema em análise.

Abrahão *et al.* (2019) revisaram a importância das métricas RAMS e as perspectivas de Ciclo de Vida, Suporte Logístico Integrado e Engenharia de Sistemas, bem como descreveram o AeroLogLabTOOL[®], ferramenta colaborativa concebida para analisar e desenvolver a suportabilidade de sistemas complexos.

Rebouças e Abrahão (2019) abordaram o planejamento estratégico da manutenção preventiva de aeronaves, baseado em método exato de otimização, visando a minimizar os custos e os tempos de manutenção, aumentando, por conseguinte, a disponibilidade da frota.

Assumpção (2020) sugeriu um arcabouço de ferramentas e processos para tornar possível a aplicação dos conceitos do Suporte Logístico Integrado em processos de aquisição de sistemas complexos.

E Souza (2021) tratou do problema de alocação de aeronaves à luz do desempenho individualizado, em termos de confiabilidade, propondo um modelo de estimativa de custos e de disponibilidade operacional que considera a existência de aeronaves destoantes em diferentes instâncias e tamanhos de frota.

Observa-se, portanto, que todas essas pesquisas estiveram empenhadas na melhoria da suportabilidade, seja pela redução dos custos ou pelo aumento da disponibilidade dos sistemas.

No entanto, o presente estudo tem sua relevância evidenciada por abordar todos os seguintes aspectos elencados na Tabela 2.3, que posiciona este trabalho em relação aos demais:

- I – Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade;
- II – Técnicas Multi-Escalão;
- III – Fase de Serviço (operação e suporte) do ciclo de vida;
- IV – Elementos do Suporte Integrado do Produto;
- V – Aplicação em Sistemas de Defesa;
- VI – Método de Cálculo Prospectivo de custos do Ciclo de Vida;
- VII – Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor; e
- VIII – Cálculo de Custo-Efetividade.

Tabela 2.3 – Tabela Comparativa entre Pesquisas Antecedentes e o Presente Estudo.

Referência/Estudo	Aspectos Abordados							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Cruyt, Ghobbar e Curran (2014)	X		X				X	
Marques <i>et al.</i> (2017)	X	X	X		X			
Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018)	X	X	X		X	X		
Abrahão <i>et al.</i> (2019)	X		X	X	X			
Rebouças e Abrahão (2019)	X		X	X	X			
Assumpção (2020)	X			X	X			
Souza (2021)	X	X	X	X	X			
Presente Estudo (2023)	X	X	X	X	X	X	X	X

Embora os aspectos I a V estejam presentes na maioria dos trabalhos pesquisados, antes do presente estudo os aspectos VI e VII só haviam sido abordados por um único autor, separadamente, e o aspecto VIII é aqui incorporado a uma combinação destes dois últimos.

2.15 Considerações Finais do Capítulo

No Capítulo 2 foram explorados tópicos relevantes sobre o tema tratado, com a profundidade necessária para a compreensão de todo o trabalho. A disponibilidade operacional e o custo de suporte, métricas fundamentais que caracterizam a suportabilidade, receberam especial atenção. Obteve-se assim uma visão mais clara da importância que há em identificar fatores de confiabilidade e manutenibilidade a serem priorizados para melhoria da suportabilidade, bem como de métodos aplicáveis à solução do problema de pesquisa.

3 Metodologia

Este capítulo discorre sobre os procedimentos metodológicos que foram adotados para lidar com o problema de pesquisa, testar a hipótese e atingir o objetivo geral do trabalho, bem como também apresenta os recursos computacionais empregados.

3.1 Método de Desenvolvimento do Modelo de Processo

Partindo da hipótese formulada no Capítulo 1, o método empregado no desenvolvimento do modelo de processo almejado foi inspirado na abordagem *top-down and bottom-up* (de cima para baixo e de baixo para cima) do Modelo V, do inglês *Vee Model*, introduzido no início dos anos 1990 pela Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos.

Segundo Blanchard e Blyler (2016), no diagrama do Modelo V, o lado esquerdo descendente representa a evolução dos requisitos em projeto preliminar e detalhado, enquanto o lado direito ascendente representa a integração e verificação do sistema.

Analogamente, a construção do modelo requerido neste trabalho seguiu um encadeamento simplificado de engenharia de sistemas, conforme ilustrado na Figura 3.1.

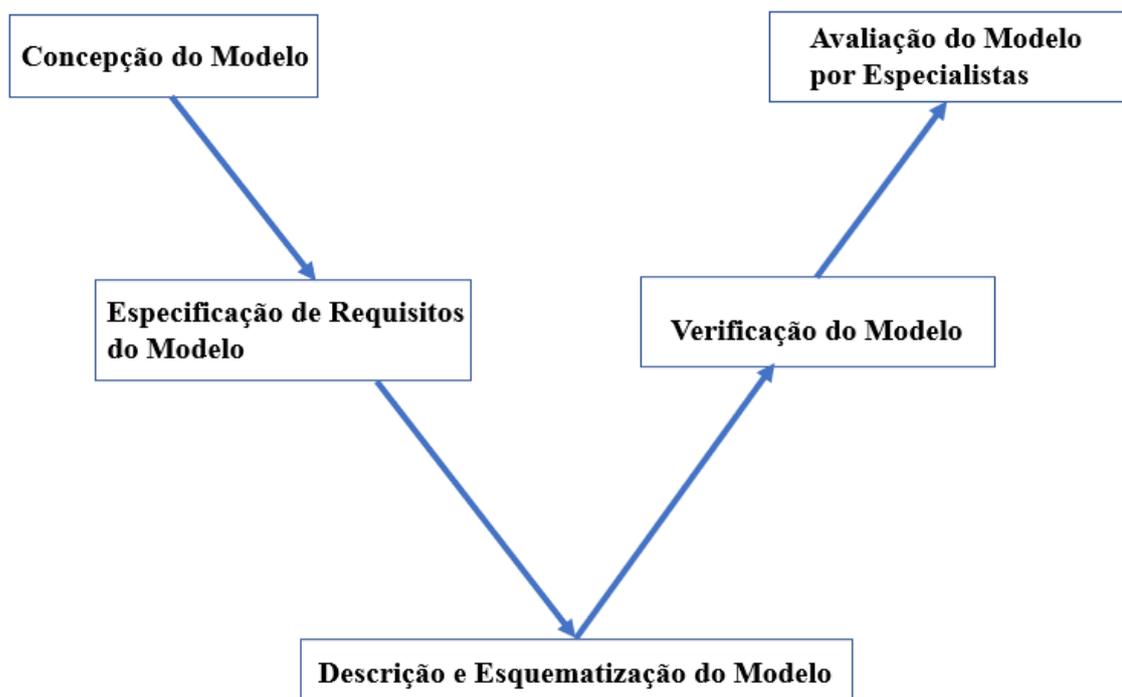


Figura 3.1 – Etapas Metodológicas para Desenvolver o Modelo de Processo.

3.1.1 Concepção do Modelo

A primeira etapa foi a concepção do modelo, caracterizada pela declaração da necessidade, em alinhamento com o problema de pesquisa do trabalho, identificação de *stakeholders* (partes interessadas) e a elaboração de um conceito de desenvolvimento, conforme registrado a seguir.

- Declaração da Necessidade: em alinhamento com o problema de pesquisa deste trabalho, a concepção do modelo surge a partir da necessidade de avaliar os impactos de fatores de confiabilidade e manutenibilidade na suportabilidade de aeronaves de defesa, durante a fase de serviço, de modo a identificar aqueles fatores que devem ser priorizados na alocação de recursos.
- Identificação de *Stakeholders*: como partes interessadas envolvidas, que podem afetar ou ser afetadas pela modelo, foram identificados gestores, gerentes ou assessores logísticos e operadores de aeronaves de defesa. O modelo concebido pode ser utilizado pelos gerentes logísticos para assessorar gestores na tomada de decisão quanto à alocação de recursos. Os operadores apresentam-se então como destinatários finais da eventual melhoria de suportabilidade da frota, após a escolha de uma linha de ação vislumbrada com base nos resultados da aplicação do modelo.
- Conceito de Emprego do Modelo: ainda no domínio do problema, o conceito de emprego do modelo considera que um cenário base será visualizado pelo usuário e inserido no modelo de processo a ser desenvolvido. Em seguida, serão incorporadas variações em fatores de confiabilidade e manutenibilidade, obtendo-se como saída uma ordem classificatória de cenários quanto ao impacto na suportabilidade da frota de aeronaves, conforme Figura 3.2.

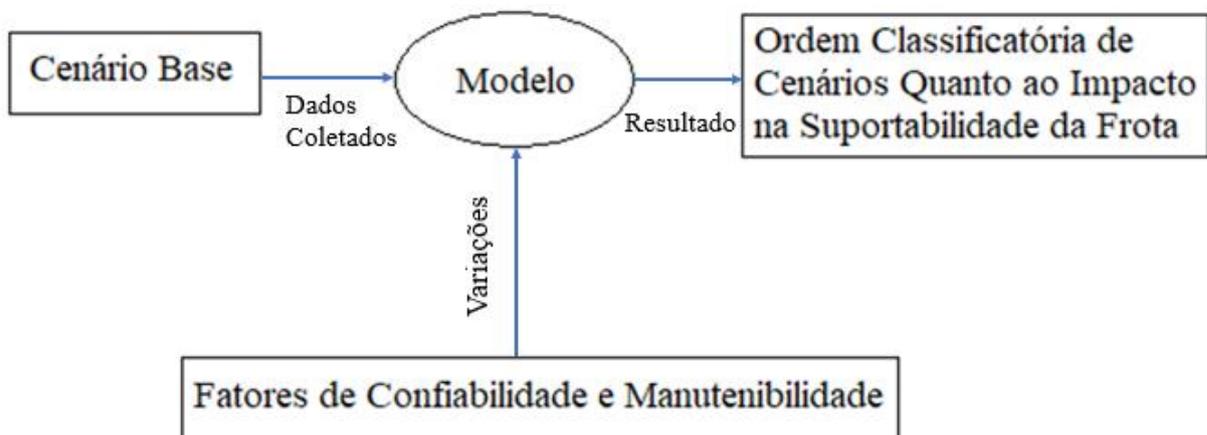


Figura 3.2 – Conceito de Emprego do Modelo.

3.1.2 Especificação de Requisitos do Modelo

Um requisito pode ser definido como uma declaração que identifica uma característica ou restrição operacional, funcional ou de *design* de um produto ou processo, que é inequívoca, testável ou mensurável, bem como necessária para a sua aceitabilidade, seja pelos usuários ou pelas diretrizes internas de garantia de qualidade (IEEE, 1999).

Nesse contexto, na segunda etapa foram especificados requisitos verificáveis do modelo, por meio da técnica de observação, relacionados com os seguintes critérios:

- Aderência à Literatura: o modelo deve cobrir aspectos do IPS, fatores logísticos relacionados às métricas de confiabilidade e manutenibilidade, e ainda o conceito de suportabilidade pela relação entre custo de suporte e disponibilidade operacional;
- Funcionalidade: o modelo deve fornecer como saída uma ordem classificatória de cenários, e respectivos fatores variantes, quanto ao impacto na suportabilidade da frota de aeronaves;
- Sensibilidade: o modelo deve apresentar a correlação e coerência entre alterações na ordem classificatória dos cenários analisados e alterações nas variações dos fatores logísticos, considerando ainda eventuais custos envolvidos; e
- Aplicabilidade: o modelo deve ser aplicável ao contexto real de uma frota de aeronaves de defesa.

3.1.3 Descrição e Esquematização do Modelo

Já no domínio da solução, nesta etapa buscou-se refletir a hipótese do trabalho, realizando-se uma combinação entre o Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida e o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor, substituindo, no entanto, a expressão matemática desta segunda técnica pelo cálculo de custo-efetividade.

Para tanto, foi elaborado um fluxograma do processo como um todo e cada uma de suas etapas foi descrita detalhadamente.

3.1.4 Verificação do Modelo

A verificação é um procedimento de confirmação de que um produto ou processo está em conformidade com os seus requisitos, podendo ser por meio de teste, análise, demonstração, inspeção ou combinação destes (IEEE, 1999).

Neste sentido, iniciando os procedimentos de verificação da quarta etapa, realizou-se uma análise de abrangência, para confirmar a aderência do modelo à literatura. Adicionalmente,

foram executados testes iniciais de robustez, por meio de uma situação-problema genérica e simplificada, porém suficiente para comprovar a funcionalidade e a sensibilidade do modelo sob o aspecto quantitativo. E para demonstrar sua aplicabilidade a situações específicas em campo, o modelo foi implementado em um estudo de caso inspirado no cenário real de uma frota de aeronaves de defesa, cujas linhas de ação alternativas e respectivos impactos na suportabilidade estiveram relacionados a variações de fatores logísticos.

Para gerenciar a correlação entre os requisitos especificados e os respectivos procedimentos de verificação, utilizou-se a Matriz de Rastreabilidade da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Matriz de Rastreabilidade Requisito *Versus* Procedimento de Verificação.

Requisito/Verificação	V1 - Análise de Aderência à Literatura	V2 - Teste Funcional	V3 - Teste de Sensibilidade	V4 - Estudo de Caso
R1 - Aderência à Literatura	X			
R2 - Funcionalidade		X		
R3 - Sensibilidade			X	
R4 - Aplicabilidade				X

3.1.5 Avaliação do Modelo por Especialistas

Por último, na quinta etapa, com a finalidade de submeter o modelo desenvolvido à apreciação de profissionais com conhecimento e experiência sobre o assunto abordado, conduziu-se uma avaliação por especialistas de áreas correlatas à presente pesquisa, por meio de um questionário, disponibilizado em uma base digital para consulta e preenchimento *on-line*.

3.2 Recursos Computacionais

A esquematização do modelo foi realizada com o *software* Bizagi[®], ferramenta de documentação e otimização de processos. Os testes de funcionalidade e sensibilidade, bem como o estudo de caso, foram executados com o Opus Suite[®], pacote de *software* de gestão do ciclo de vida para sistemas técnicos complexos, na versão RDM (*Refined Data Model*) 2022.1 Revisada, de 02 de junho de 2022, composto pelos programas OPUS10[®], SIMLOX[®] e CATLOC[®], da empresa sueca Systecon Group AB.

O OPUS10[©] é um *software* de otimização sistêmica do estoque e análise de suporte logístico, cuja apresentação dos resultados se dá por meio da curva de custo-efetividade, associando disponibilidade operacional e custo de suporte (SYSTECON, 2022).

Blanchard e Blyler (2016) apontam que o OPUS10[©] é versátil para a otimização de estoque de peças de reposição, alternativas de reparo, análise de cenários operacionais e perfis de utilização dos sistemas complexos.

Sherbrooke (2004) afirma que o *software* OPUS10[©] também incorpora a teoria do VARI-METRIC. Enquanto no modelo METRIC é assumido que o número médio de peças em reparo ou reabastecimento, em qualquer ponto do tempo, segue uma distribuição de Poisson, no modelo VARI-METRIC, por outro lado, assume-se uma distribuição Binomial Negativa.

Assim, segundo Sherbrooke (2004), no modelo VARI-METRIC é feita uma abordagem na qual é aprimorado o cálculo do EBO, agregando mais dois parâmetros, quais sejam, a média e a variância para o número de peças no processo de reparo.

De acordo com Hallin (2015), o OPUS10[©] foi construído com base em um modelo matemático de estado estacionário, o que significa que a utilização do sistema é constante ao longo do período analisado, assim como todas as taxas de demanda e outras condições.

O SIMLOX[©], por sua vez, é um *software* de simulação estocástica que considera a sazonalidade do perfil operacional, incorporando dinamismo à análise, de forma que oferece como resultado a disponibilidade média e em função do tempo (SYSTECON, 2022).

Já o CATLOC[©], completando o arcabouço de ferramentas da Systecon, trata-se de um *software* de cálculo e compilação de custos do ciclo de vida, considerando todos os eventos do período simulado (SYSTECON, 2022).

Para aplicação do questionário aos especialistas empregou-se como recurso a plataforma Google Forms e o programa Excel[©] da Microsoft. O computador utilizado foi um Acer, com processador Intel Core i5-7200U @ 2,50 GHz, 8,00 GB RAM, Windows 10, 64 bit.

3.3 Considerações Finais do Capítulo

O Capítulo 3 apresentou a estratégia utilizada para testar a hipótese formulada e atingir o objetivo do trabalho, bem como também informou os recursos computacionais que serão empregados na implementação dos experimentos. Portanto, de agora em diante, este trabalho avançará em direção à aplicação da metodologia, com apresentação dos resultados e discussão.

4 Aplicação da Metodologia, Apresentação dos Resultados e Discussão

Este capítulo trata da aplicação da metodologia, apresentando o modelo de processo desenvolvido, a sua verificação e a avaliação por especialistas.

O presente capítulo é encerrado com uma discussão acerca dos resultados de cada procedimento, bem como a respeito da relevância do modelo.

4.1 Descrição e Esquematização do Modelo de Processo

Após os procedimentos de concepção do modelo e de especificação de requisitos, já explanados no capítulo anterior, prosseguiu-se com a sua descrição e esquematização.

O modelo de processo desenvolvido consistiu na análise comparativa entre um cenário de referência e projeções de cenários alternativos, decorrentes de variações controladas em determinados fatores logísticos, para viabilizar o cálculo dos respectivos valores de custo-efetividade e a elaboração de um *ranking* dos fatores analisados quanto ao impacto na suportabilidade do sistema.

A seguir, é realizada uma descrição detalhada do modelo.

O primeiro passo é a coleta de dados do cenário inicial em sistema apropriado de informações logísticas.

O segundo passo é a representação computacional do cenário inicial. Assim, o modelo deve compreender três importantes conjuntos de informações, quais sejam: Características do Sistema; Estrutura de Suporte Logístico e Informações de Operação.

As Características do Sistema correspondem a parâmetros de projeto, como variantes do produto, elementos estruturais, dados de confiabilidade, preços e requisitos de manutenção associados aos componentes e subsistemas. A Estrutura de Suporte Logístico diz respeito à arquitetura formada por bases operacionais, armazéns ou estoques, oficinas, seus respectivos recursos e capacidades de manutenção, bem como a dinâmica logística envolvida, como por exemplo os tempos e custos de transporte e reparo ou revisão dos itens. Em complemento, as Informações de Operação refletem os parâmetros de quantidade e alocação das aeronaves, bem como a taxa de utilização no horizonte de tempo requerido.

O terceiro passo inclui a plotagem determinística de um ponto ou de uma curva no gráfico de disponibilidade operacional *versus* custo de suporte, na qual todos os pontos são soluções ótimas, ou seja, com máxima efetividade de custo, bem como a escolha do ponto que atende ao requisito de disponibilidade operacional referente a um cenário inicial, denominado como *baseline* ou situação de referência. A este ponto corresponde uma lista específica de itens para compor o estoque de giro, com as respectivas quantidades e locais de armazenamento.

O quarto passo requer a indução de variações controladas em fatores logísticos, sendo um por vez, mantendo-se os demais parâmetros, para obter novos pontos de custo-efetividade com o mesmo estoque inicial ou novas curvas de máxima efetividade de custo, que em ambos os casos representam cenários alternativos. Nesta última opção, observando-se o requisito de disponibilidade operacional.

O quinto passo é a simulação da vida em serviço para cada um dos cenários, pelo período requerido, levando em consideração a sazonalidade do perfil operacional, para obter de maneira estocástica a média de disponibilidade nesse período e a sua variação em função do tempo.

O sexto passo é a compilação dos custos totais de suporte para cada cenário no período requerido, considerando as simulações realizadas.

Finalizando, o sétimo passo é o cálculo do valor de Custo-Efetividade para todos os cenários, em termos de custo de suporte e disponibilidade operacional, conforme Equação 4.1 adaptada de Blanchard (2014), bem como a classificação das alternativas em um *ranking* segundo o impacto que exercem na suportabilidade da frota.

$$\text{Custo-Efetividade} = \frac{A_i}{C_i} \quad (4.1)$$

Onde:

A_i representa a disponibilidade operacional do cenário i ; e

C_i representa o custo de suporte do cenário i .

Desta forma, a função objetivo para apoiar a tomada de decisão corresponde à maximização do valor de Custo-Efetividade, conforme Equação 4.2.

$$\max \frac{A_i}{C_i} \quad (4.2)$$

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma que esquematiza o modelo de processo ora descrito, elaborado no *software* Bizagi[®].

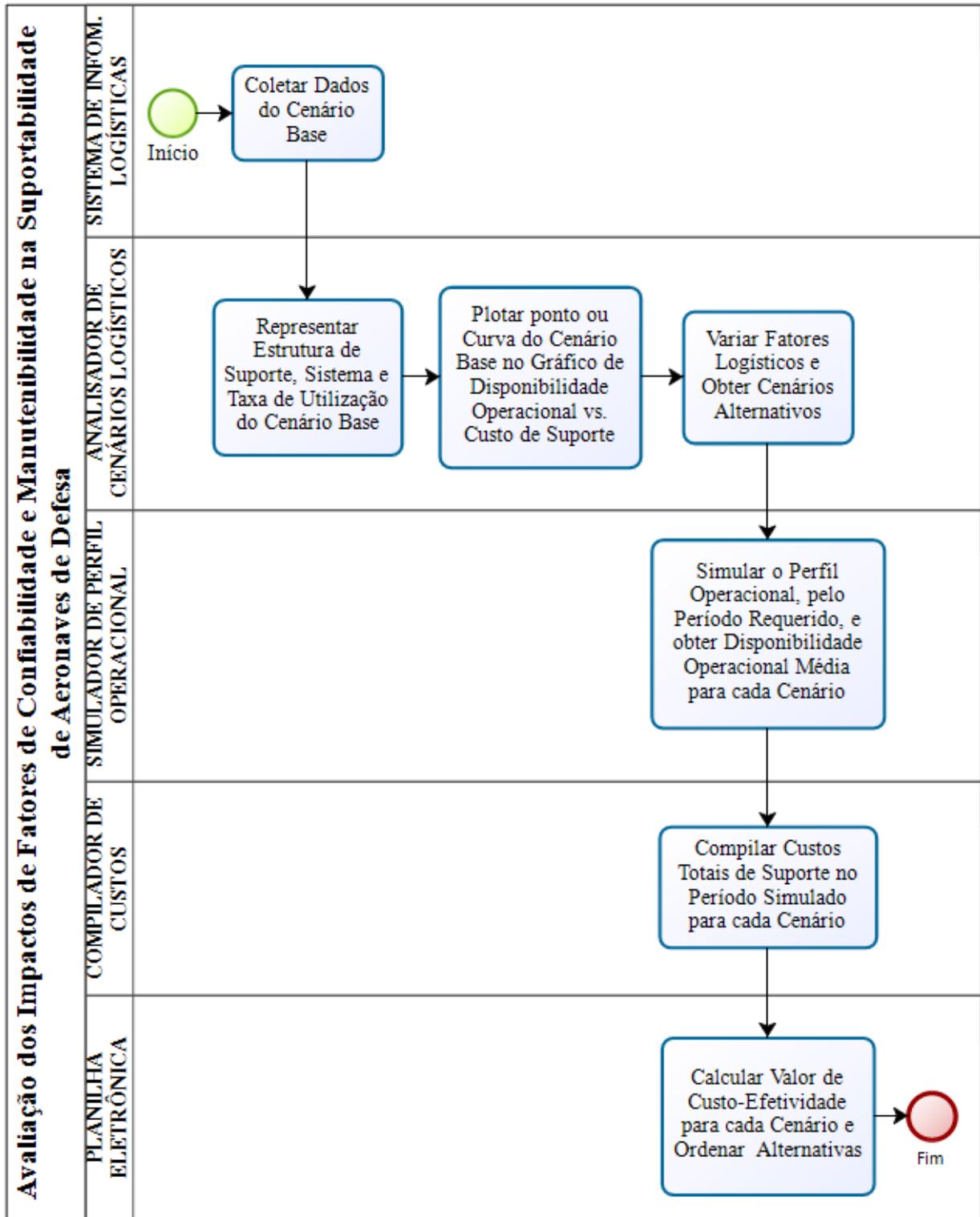


Figura 4.1 – Fluxograma do Modelo de Processo para Avaliação dos Impactos de Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade na Suportabilidade de Aeronaves de Defesa.

4.2 Verificação do Modelo

A seguir, são apresentados os procedimentos e respectivos resultados da etapa verificação do modelo de processo em tela, como parte integrante do seu desenvolvimento.

4.2.1 Análise de Aderência à Literatura

A verificação do modelo foi iniciada por uma análise qualitativa cujo objetivo foi confirmar que o modelo reflete, de modo consistente, os conteúdos estudados na fundamentação teórica e revisão da literatura deste trabalho.

Sob o aspecto acadêmico, caso o modelo não contemple os aspectos essenciais relativos à suportabilidade, podem ocorrer omissões na sua aplicação, induzindo os usuários a uma perspectiva equivocada de que tudo que é relevante está abarcado.

Por esse motivo, a seguinte análise foi realizada, para atestar aderência à literatura e assim eliminar ou mitigar o risco supracitado:

- a) O modelo representa a efetividade de custo, em alinhamento com o objetivo do Suporte Integrado do Produto, favorecendo o apoio a decisões que busquem manter o custo de suporte em nível aceitável para determinado patamar de disponibilidade operacional;
- b) O modelo prevê a desejável cobertura dos doze elementos do Suporte Integrado do Produto, possibilitando abarcar todas as questões inerentes à suportabilidade do sistema;
- c) O modelo usa como base a inserção de dados relacionados às características do sistema, estrutura de suporte logístico e informações de utilização;
- d) O modelo trata de disponibilidade operacional, principal métrica utilizada entre os setores de operação e manutenção de aeronaves de defesa;
- e) O modelo leva a um gráfico de custo-efetividade, pela relação entre custo de suporte e disponibilidade operacional, caracterizando assim a suportabilidade dos sistemas; e
- f) O modelo trata o custo de suporte separadamente do custo de operação na fase de serviço, o que favorece a detecção de futuros gastos que possam superar o montante de recursos destinados para seu suporte.

Portanto, com base na argumentação apresentada, a adoção do custo de suporte e da disponibilidade operacional como métricas fundamentais da suportabilidade, bem como a consideração de influências de fatores logísticos de confiabilidade e manutenibilidade, relacionados aos elementos do suporte integrado do Produto, conferem abrangência ao modelo, no sentido de aderência à literatura.

4.2.2 Teste Funcional

O teste funcional consistiu na execução de todos os passos do modelo em um caso didático genérico e simplificado, para confirmar o cumprimento do requisito que descreve a sua funcionalidade, qual seja, de fornecer como saída uma ordem classificatória de cenários, e respectivos fatores logísticos variantes, quanto ao impacto na suportabilidade.

Iniciando a implementação do modelo, o primeiro passo foi a coleta de dados do cenário inicial em sistema apropriado de informações logísticas.

Considerou-se então um sistema aeronave (Anv), representado por 15 itens reparáveis do tipo unidades substituíveis na linha (*Line Replaceable Units - LRU*), sendo 5 componentes aviônicos, selecionados pelo critério de maior taxa de falha, e 10 componentes de mecânica e elétrica geral, escolhidos pelo critério de maior demanda por manutenções corretivas ou preventivas.

Os dados dos itens encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados dos Itens das Aeronaves.

Item	Preço de Aquisição (\$)	Taxa de Falha (1/10 ⁶ HV)	Quant. por Anv	Intervalo Manut. Prevent. (HV)	Quant. em Estoque
LRU01	219.652,31	1.897	2	-----	0
LRU02	35.694,41	1.492	4	-----	3
LRU03	101.271,98	1.092	1	-----	0
LRU04	23.515,90	1.081	1	-----	1
LRU05	47.538,11	703	4	-----	2
LRU06	37.927,15	2074	1	1.000	3
LRU07	12.137,07	2029	2	-----	3
LRU08	4.731,88	1808	1	-----	2
LRU09	12.298,79	1772	1	500	6
LRU10	210.650,00	1613	1	-----	0
LRU11	23.529,33	1406	4	1.500	8
LRU12	5.969,31	1318	2	4.800	4
LRU13	24.550,40	1196	2	-----	2
LRU14	87.341,22	886	1	3.000	1
LRU15	9.031,84	616	2	-----	2

Há dois Operadores, Op_01 e Op_02, que possuem 20 e 26 aeronaves, respectivamente. A utilização da frota corresponde a uma média de 240 horas de voo (HV) por ano para cada aeronave.

E a estrutura do suporte logístico é assim descrita:

- Os Operadores não estocam itens e são suportados por um Armazém Central e uma Oficina Contratada. O item removido da aeronave, seja por falha revisão geral, é levado até o Armazém. Esse tempo de transporte é de 7 dias e de 5 dias no sentido inverso;
- Do Armazém, a LRU recolhida é levada à Oficina. Ao término do serviço, o item é enviado de volta ao Armazém. O tempo de transporte entre essas estações é de 5 dias;
- A troca de qualquer item na aeronave demora em média 4 horas e necessita de 2 técnicos, apresentando ainda um atraso administrativo de 1 hora;
- Os custos de transporte entre quaisquer estações e de estocagem anual correspondem a 0,5% e 1,5% do preço de aquisição de cada LRU, respectivamente;
- O custo do Homem-hora (H.h) é de \$200 na contratada e \$100 no parque central ou nos operadores. O reparo ou revisão geral de qualquer item requer 240 H.h, além de um kit de peças que custa 8% do preço do item novo;
- O reparo ou revisão geral de qualquer item tem um atraso administrativo de 1.200 horas; e
- As inspeções programadas de aeronaves ocorrem nos operadores, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Inspeções Programadas das Aeronaves.

Periodicidade da Inspeção	H.h Inspeção (Quant./Evento)	Kit Inspeção (\$/evento)	Tempo de Atraso Administrativo (horas)
300 HV	120	17.500,00	120

As seguintes premissas foram assumidas:

- Duração de 5 anos para o cenário analisado;
- São desconsiderados os eventos de “condenação” de itens, “canibalização” de aeronaves e suprimento lateral entre Operadores;
- Em hipótese alguma o reparo ou revisão de um item será realizado em local deferente do estabelecido ou deixará de ser feito;
- A capacidade de reparo ou revisão da oficina é ampla, logo os tempos de reparo e revisão independem da quantidade de itens que já estão sendo reparados ou revisados;
- A demanda por itens ao longo do tempo segue uma distribuição de probabilidade de Poisson;

- **A Taxa de Falha e o Tempo de Manutenção** (reparo e revisão de componentes ou inspeção de aeronaves) foram os fatores identificados para serem avaliados quanto aos impactos na suportabilidade da frota. **Considerou-se então a variação de 20% como melhoria em cada um desses parâmetros;** e
- Tipos de missão, frequência, duração e quantidades de aeronaves empregadas conforme Tabela 4.3, para construção do perfil operacional.

Tabela 4.3 – Dados do Perfil Operacional.

Operador	Tipo de Missão	Frequência	Quant. Nominal de Aeronaves	Quant. Mínima de Aeronaves	Duração da Missão (Horas)
Op_01	Instrução_Manhã	2ª a 6ª Feira, da 5ª a 48ª Semana do Ano	8	1	1,93
	Instrução_Tarde	2ª a 6ª Feira, da 5ª a 48ª Semana do Ano	8	1	1,93
Op_02	Patrulha_Manhã	Diariamente	3	1	1,94
	Patrulha_Tarde	Diariamente	3	1	1,94

O segundo passo foi a representação da estrutura de suporte, características do sistema e taxa de utilização, mediante inserção dos dados coletados do cenário inicial nos conjuntos de tabelas apropriadas do OPUS10[©], conforme Figura 4.2.

The screenshot displays the OPUS10 software interface with the following components:

- Product Breakdown:** A tree structure starting with 'ROOT, Fictive root' and branching into 'ANY' and 'GER, MECÂNICA E ELÉTRICA GERAL'. Sub-components include AV-01/LRU01 through AV-05/LRU05 and GER-01/LRU06 through GER-10/LRU15.
- Support organization:** A hierarchical diagram showing 'OFICINA CONTRATADA' at the top, leading to 'ARMAZÉM CENTRAL', which then branches into 'OP_01' and 'OP_02'. Arrows indicate relationships and quantities like '25 ANV_X (240,00)'.
- Station Table:** A table with columns: STID, DESCR, QTY, TYPE, LEVEL, LINDX, LGID, CUNIT, CVAL, MINST. It lists stations 1 through 6, including 'OP_01', 'OP_02', 'ARMAZÉM CENTRAL', and 'OFICINA CONTRATADA'.

Figura 4.2 – Modelagem Computacional no Software OPUS10[©].

O terceiro passo, apresentado na Figura 4.3, foi a plotagem do ponto que corresponde ao cenário inicial da frota no gráfico de disponibilidade operacional *versus* custo de suporte do OPUS10[®], considerando o estoque de giro informado.

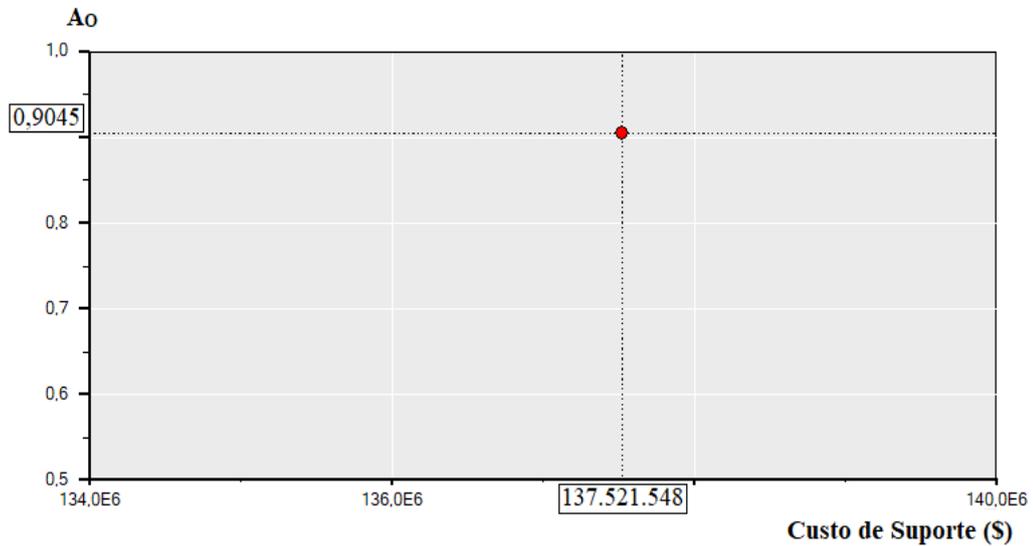


Figura 4.3 – Cenário Inicial no Gráfico de Custo-Efetividade do OPUS10[®].

O quarto passo resultou na obtenção de cenários alternativos, caracterizados pelas respectivas variações controladas nos fatores considerados, conforme Figura 4.4.

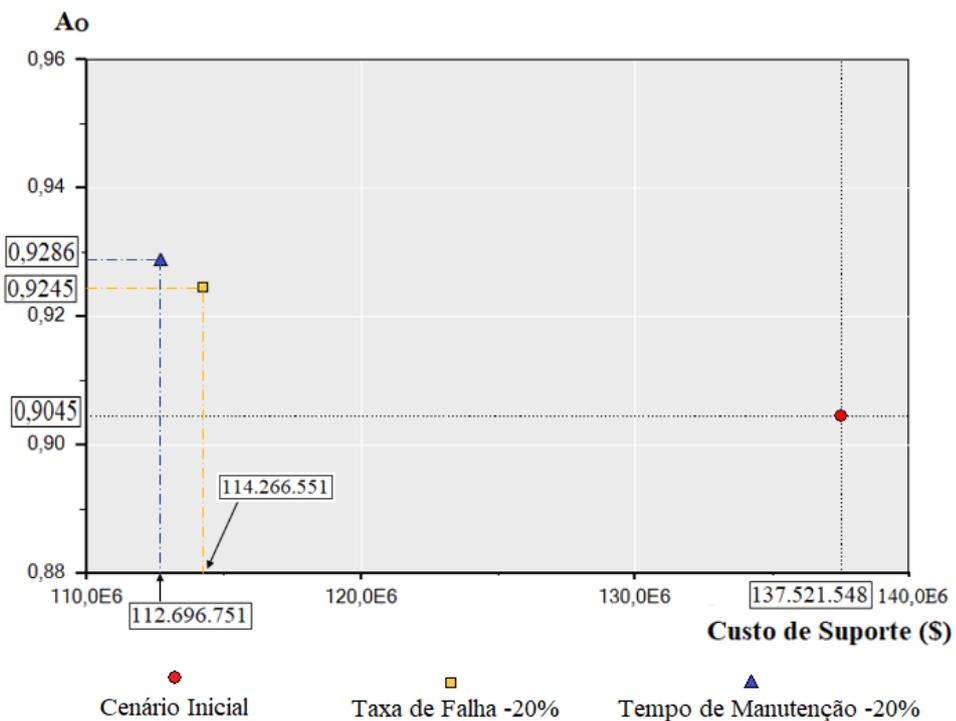


Figura 4.4 – Cenários Alternativos e Inicial no Gráfico de Custo-Efetividade do OPUS10[®].

O quinto passo foi implementado com o perfil operacional informado para os operadores Op_01 e Op_02 na Tabela 4.3. Assim, a sazonalidade da operação da frota, como um todo, foi introduzida no SIMLOX[®] para todos os cenários, conforme ilustrado na Figura 4.5.

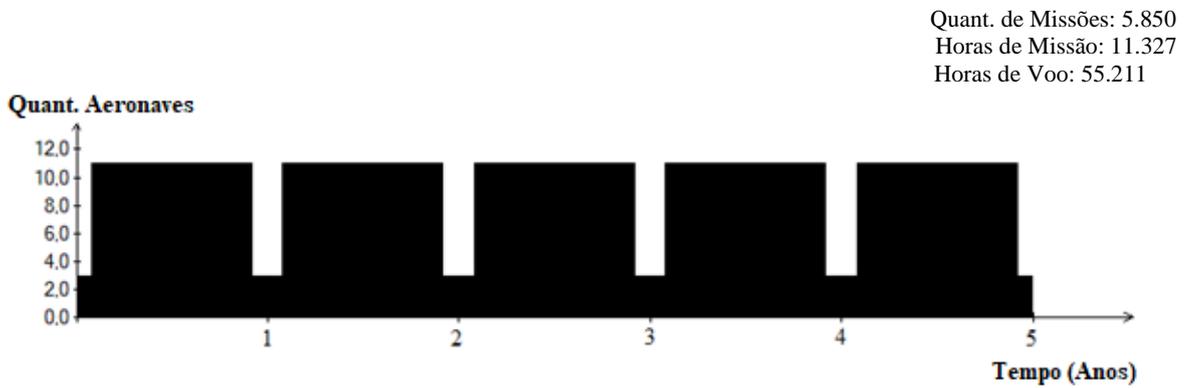


Figura 4.5 – Perfil Operacional da Fota Simulado no SIMLOX[®].

As Figuras 4.6 a 4.8 mostram os resultados estocásticos da disponibilidade operacional média e em função do tempo, obtidos ao final de 100 replicações no SIMLOX[®], para o cenário inicial e os dois cenários alternativos.

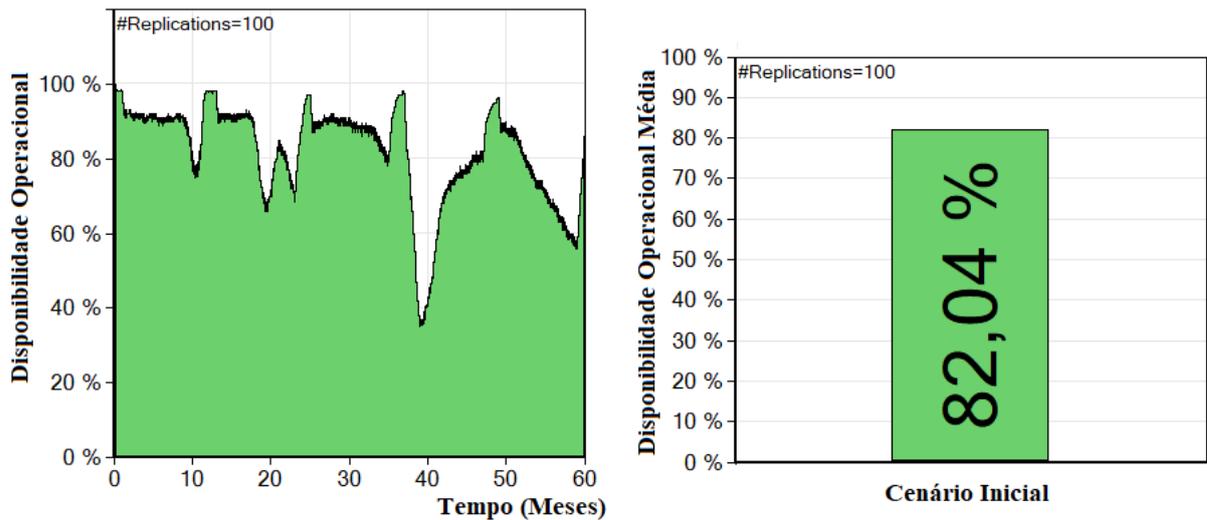


Figura 4.6 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] para o Cenário Inicial.

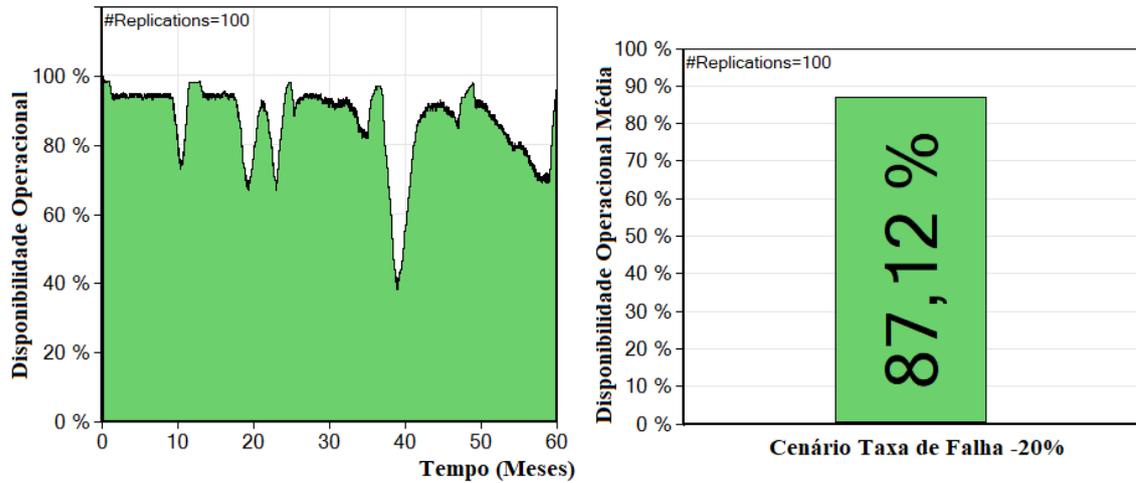


Figura 4.7 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] para Cenário Taxa de Falha -20%.

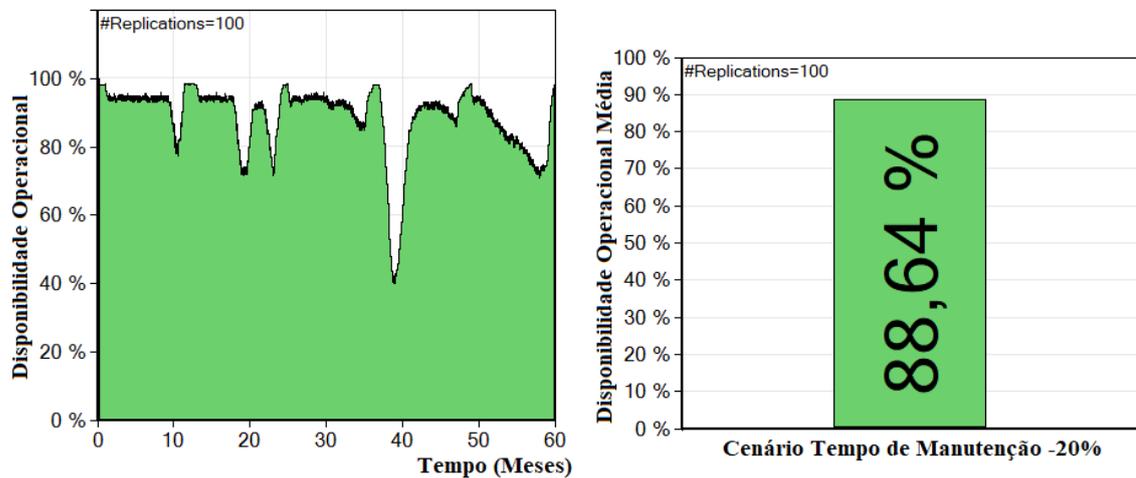


Figura 4.8 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] Cenário Tempo Manutenção -20%.

No sexto passo, foram compilados no CATLOC[®] os custos de suporte incidentes no decorrer do período simulado, para todos os cenários, conforme Figuras 4.9 a 4.11.

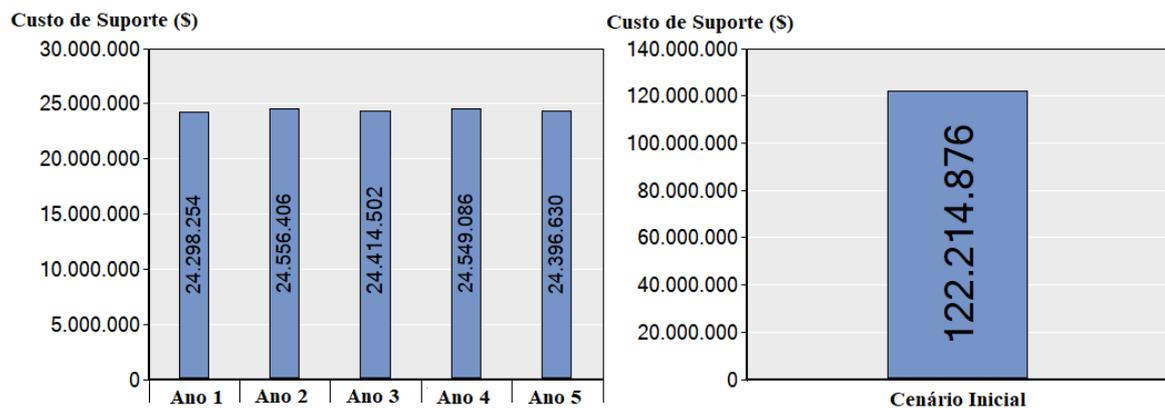


Figura 4.9 – Custo de Suporte no CATLOC[®] para o Cenário Inicial.

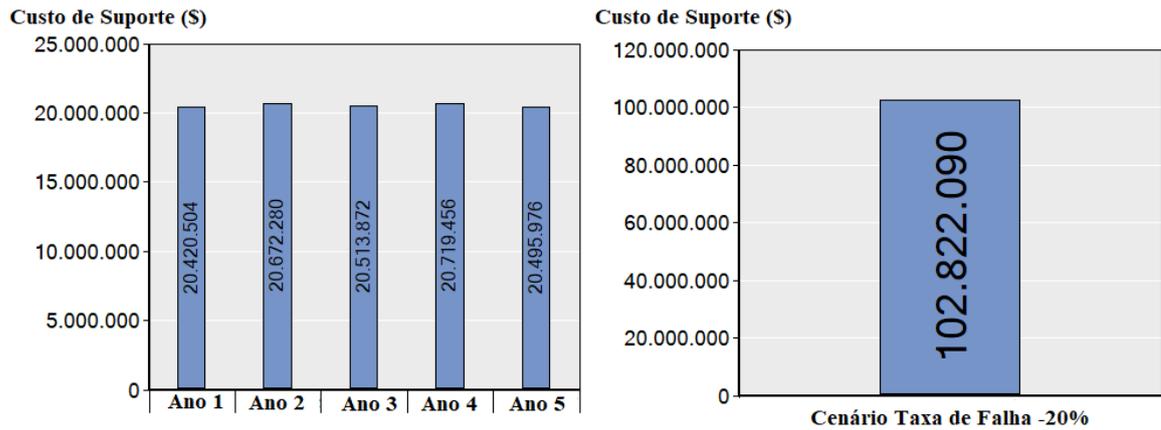


Figura 4.10 – Custo de Suporte no CATLOC[®] para o Cenário Taxa de Falha -20%.

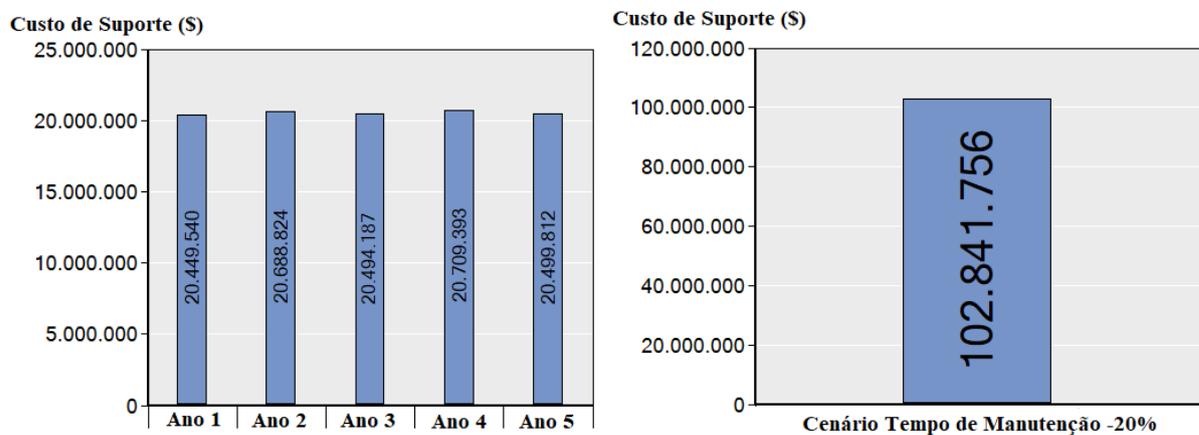


Figura 4.11 – Custo de Suporte no CATLOC[®] para Cenário Tempo de Manutenção -20%.

Chegando ao sétimo passo, calculou-se o valor de Custo-Efetividade para cada cenário, ordenando-os de acordo com o impacto na suportabilidade da frota, conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Cálculo de Custo-Efetividade e Classificação.

Cenário ou Fator Logístico Variante	Variação	Disponibilidade Operacional Média (A_i)	Custo de Suporte (C_i)	Custo-Efetividade ($\frac{A_i}{C_i} \times 10^9$)	Ranking de Impacto Positivo na Suportabilidade
Tempo de Manutenção	-20%	88,64%	\$ 102.841.756,00	861,91	1º
Taxa de Falha	-20%	87,12%	\$ 102.822.090,00	847,29	2º
Cenário Inicial	Não Aplicável	82,04%	\$ 122.214.876,00	671,28	3º

4.2.3 Teste de Sensibilidade

Para confirmar que a ordem classificatória dos cenários analisados é sensível a alterações nas variações dos fatores logísticos e a eventuais custos envolvidos, realizou-se um teste de sensibilidade do modelo, partindo dos resultados do teste funcional.

Nesta ocasião, o fator Tempo de Manutenção teve a sua variação alterada para +10%, enquanto o parâmetro taxa de falha permaneceu com a variação de -20%, mas incorporou um custo de *setup* de 25 milhões de unidades monetárias, associado às atividades necessárias para que tal melhoria pudesse ser concretizada.

Assim, retornando ao quarto passo do modelo, obtiveram-se novos cenários alternativos, conforme Figura 4.12.

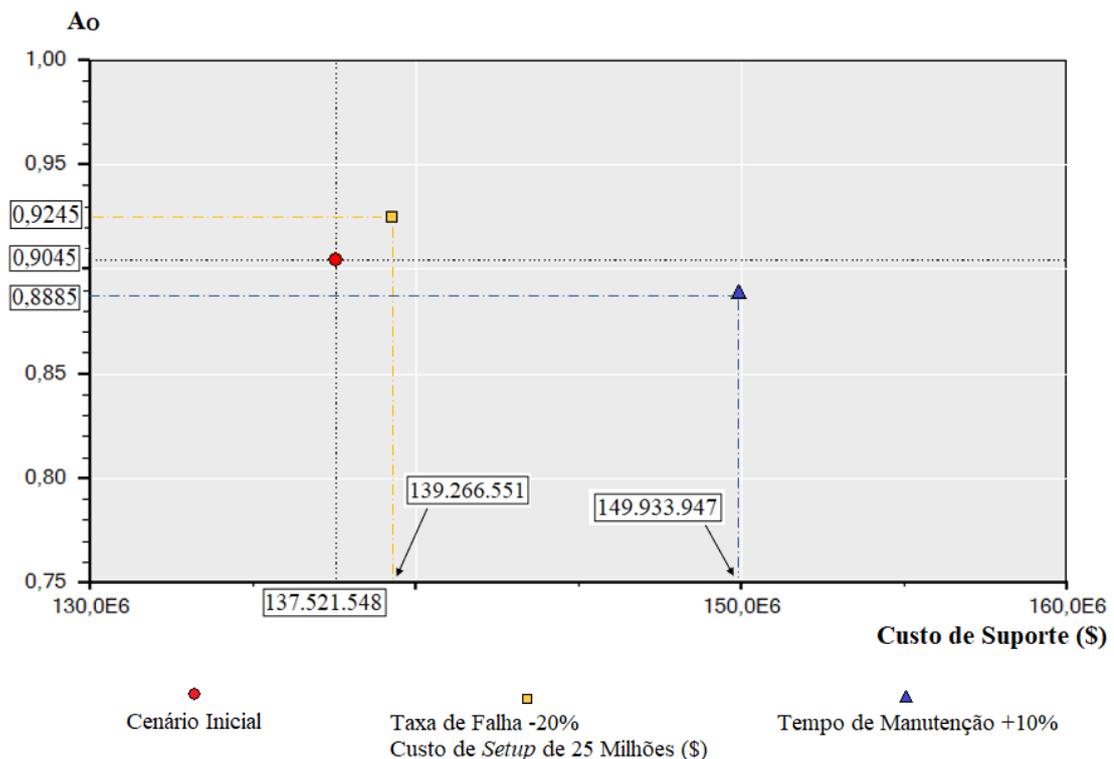


Figura 4.12 – Cenários Alternativos e Inicial no Gráfico de Custo-Efetividade do OPUS10[©].

Em seguida, os perfis operacionais dos operadores Op_01 e Op_02 foram novamente utilizados para os novos cenários alternativos, introduzindo a mesma sazonalidade de operação da frota já ilustrada na Figura 4.5.

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram os novos resultados estocásticos da disponibilidade operacional média e em função do tempo, obtidos ao final de 100 replicações no SIMLOX[©].

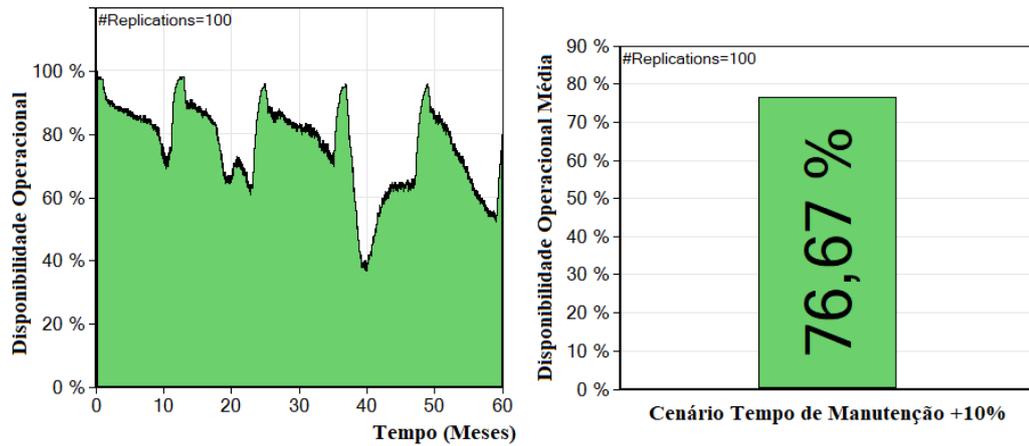


Figura 4.13 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] Cenário Tempo Manutenção +10%.

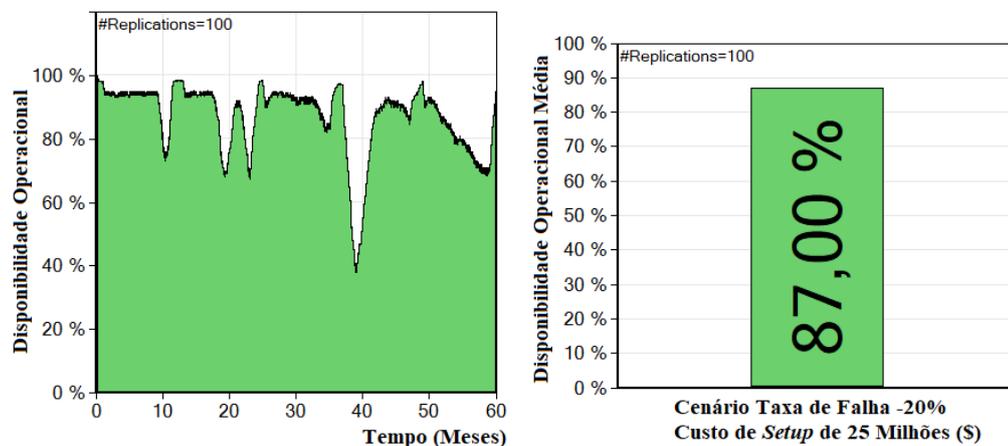


Figura 4.14 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] para o Cenário Taxa de Falha -20% e Custo de *Setup* de 25 Milhões (\$).

Ao refazer o sexto passo, os custos de suporte incidentes no decorrer do período simulado, para os novos cenários, foram compilados no CATLOC[®], obtendo-se os resultados das Figuras 4.15 e 4.16.

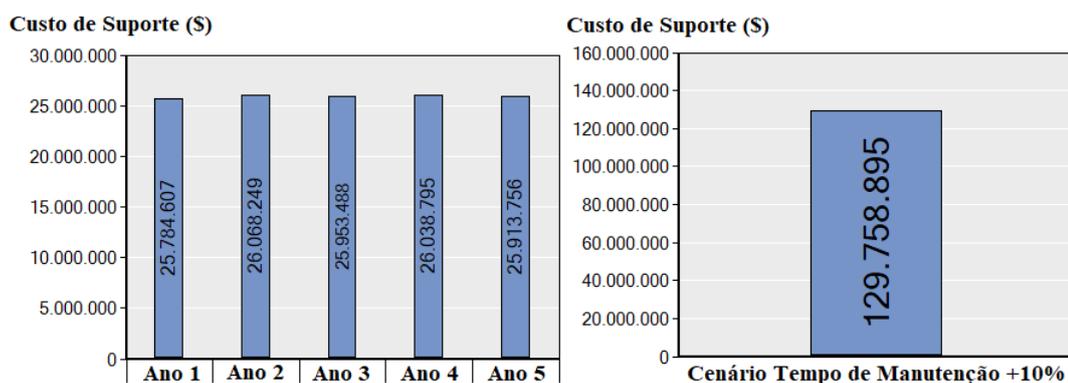


Figura 4.15 – Custo de Suporte no CATLOC[®] para Cenário Tempo de Manutenção +10%.

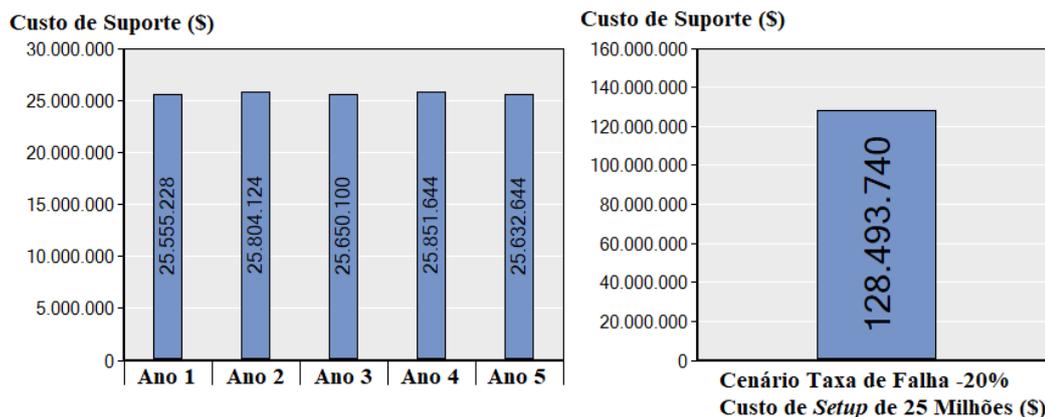


Figura 4.16 – Custo de Suporte no CATLOC[®] para o Cenário Taxa de Falha -20% e Custo de Setup de 25 Milhões (\$).

Finalmente, recalculando o valor de Custo-Efetividade dos cenários alternativos e reordenando conforme impacto positivo na suportabilidade da frota, obtém-se a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Cálculo do Valor de Custo-Efetividade e Classificação dos Novos Cenários Quanto ao Impacto na Suportabilidade da Frota.

Cenário ou Fator Logístico Variante	Variação	Disponibilidade Operacional Média (A_i)	Custo de Suporte (C_i)	Custo-Efetividade $(\frac{A_i}{C_i}) \times (10^9)$	Ranking de Impacto Positivo na Suportabilidade
Taxa de Falha	-20% Custo de Setup de 25 Milhões (\$)	87,00%	\$ 128.493.740,00	677,08	1°
Cenário Inicial	Não Aplicável	82,04%	\$ 122.214.876,00	671,28	2°
Tempo de Manutenção	+10%	76,67%	\$ 129.758.895,00	590,87	3°

4.2.4 Estudo de Caso

O presente estudo de caso é inspirado no cenário real da frota de aeronaves A-29 Super Tucano da Força Aérea Brasileira (FAB), mas com todos os dados descaracterizados, por serem de caráter reservado.

O primeiro passo para implementação do modelo foi a coleta de dados do cenário inicial no Sistema Integrado de Logística de Material e Serviços (SILOMS), *software* de gerenciamento interno do COMAER.

A frota é composta por 70 aeronaves, sendo 24 do modelo “A” (monoposto) e 46 do modelo “B” (biposto), distribuídas em cinco operadores de diferentes localidades, dos quais quatro são esquadrões de Grupo de Aviação (GAV) e um deles é o Esquadrão de Demonstração Aérea (EDA).

Os dados de distribuição e utilização das aeronaves, em horas de voo por ano (HV/Ano), estão organizados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Dados de Distribuição e Utilização das Aeronaves.

Localidade	Operador	Modelo da Aeronave	Quant. por Operador	Taxa de Utilização (HV/Ano)
Base Aérea de Boa Vista	1º/3º GAV	A-29A	5	385
		A-29B	8	226
Base Aérea de Porto Velho	2º/3º GAV	A-29A	6	385
		A-29B	7	226
Base Aérea de Campo Grande	3º/3º GAV	A-29A	5	385
		A-29B	8	226
Base Aérea de Natal	2º/5º GAV	A-29B	20	248
Academia da Força Aérea	EDA	A-29A	8	150
		A-29B	3	283

O sistema aeronave está representado por 79 itens reparáveis do tipo unidades substituíveis na linha (*Line Replaceable Units - LRU*), os quais são cobertos por três importantes contratos de suporte logístico e cujos parâmetros estão disponíveis no Apêndice A. Foram selecionados os 10 componentes da aviação digital, 7 componentes do subsistema de motor, incluindo o próprio motor e principais acessórios, e ainda outros 62 componentes de diversos subsistemas da aeronave, escolhidos com base em uma análise ABC, seguindo o *ranking* dos itens mais significativos, de acordo com o índice calculado pela Equação 4.3.

$$IS = \lambda \times QPA \times PREÇO \times TAT, \quad (4.3)$$

Onde:

IS é o Índice de Significância;

λ é a Taxa de Falha;

QPA é a Quantidade Por Aeronave;

PREÇO é o Preço de aquisição do item; e

TAT é o *Turn-Around Time* (tempo entre a saída de um item para reparo e seu retorno).

E a estrutura do suporte logístico é assim descrita:

- Os Operadores podem estocar itens e são suportados por um Armazém Central (Parque de Material Aeronáutico - PAMA) e uma Oficina Contratada;
- O item removido da aeronave, seja por falha ou revisão, é levado diretamente à Oficina Contratada. Após ser aprovado para retorno ao serviço, o item é enviado de volta ao Armazém Central ou diretamente aos operadores, conforme demanda. O tempo médio desse transporte, em ambos os sentidos, é de 45 dias para os componentes aviônicos, 3 dias para o motor e 7 dias para os demais componentes da aeronave;
- Os custos de estocagem anual correspondem a 1,5% do preço de cada componente;
- O custo de reparo ou revisão de qualquer item na Oficina Contratada já inclui mão de obra, materiais aplicados e transporte;
- A substituição de um componente aviônico na aeronave demora em média 2 horas e 3 horas para acessórios do motor, de forma que em ambos os casos a tarefa requer apenas 1 técnico.
- A substituição do motor na aeronave leva em média 24 horas, com um atraso administrativo de 48 horas, e para os demais componentes a substituição demora em média 6 horas, de forma que em ambos os casos a tarefa requer 2 técnicos;
- O custo médio direto do Homem-hora (H.h) nos operadores, para substituição de componentes e inspeções das aeronaves, foi estimado em um valor médio de R\$ 55,62; e
- Inspeções programadas de aeronaves ocorrem sempre nos operadores, conforme Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Inspeções Programadas das Aeronaves.

Inspeção Programada	Periodicidade	H.h Inspeção (Quant./Evento)	Kit Inspeção (\$/Evento)	Tempo de Atraso Administrativo (horas)
Checks Tipo A	350 HV	60	114.524,46	364,8
Checks Tipo Y	12 Meses	20	38.174,82	40

As seguintes premissas foram assumidas neste estudo de caso:

- O requisito adotado para a disponibilidade operacional é de 65%, atual meta vigente para a frota de aeronaves A-29 na FAB;

- No modelo são desconsiderados os eventos de “condenação” de itens, “canibalização” de aeronaves ou suprimento lateral entre operadores;
- O modelo deste estudo de caso considera um escopo limitado, mas representativo da aeronave, composto somente por equipamentos reparáveis;
- Não são considerados itens de consumo, como, por exemplo, parafusos, porcas, arruelas, gaxetas, e rebites, devido às especificidades de suas políticas de estocagem, com variações em seus lotes mínimos de compra e pontos de pedido, em decorrência de seus custos menores quando comparados aos equipamentos reparáveis;
- Os componentes reparáveis em questão não sofrem descarte e não apresentam vida-limite de uso ou Tempo Limite de Vida (TLV) no horizonte temporal analisado;
- Sempre que uma falha ocorre, o equipamento falhado é enviado para a oficina de reparo e posteriormente disponibilizado no estoque em seu estado operacional;
- O modelo é composto por três escalões. O primeiro escalão contém os operadores, localizados em bases aéreas, o segundo escalão corresponde ao armazém central, localizado no parque de material aeronáutico, e o terceiro escalão é formado pelas oficinas contratadas, sejam dos fabricantes originais ou por eles autorizadas;
- Todos os operadores possuem seus próprios estoques de peças de reposição, reabastecidos somente pelo armazém central;
- A política de estoque $(s-1, 1)$ é assumida para todos os equipamentos em todos os operadores, 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;
- Somente as oficinas contratadas possuem capacidade de reparo ou revisão dos componentes.
- Todo equipamento falhado é direcionado somente para a respectiva oficina contratada, para passar pelo processo de reparo;
- Os tempos de reparo nas oficinas são conhecidos e constantes, conforme Apêndice A;
- Se ocorrer um evento de falha em algum operador 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 do operador em questão;
- Os operadores têm as mesmas condições de operação da frota e capacidades de manutenção das aeronaves em primeiro nível;
- As falhas são consideradas independentes, ou seja, uma falha em qualquer equipamento não afeta a probabilidade de falha de outro equipamento no mesmo subsistema ou em outros subsistemas da aeronave;

- Fatores ambientais, como temperatura e umidade da região, e fatores de infraestrutura, como, por exemplo, pistas não pavimentadas, não são motivadores de falhas;
- Definiu-se a duração de cinco anos para análise do cenário inicial e de todos os cenários alternativos quanto ao impacto na suportabilidade da frota, por se tratar do período máximo permitido para contratos de suporte logístico pela legislação vigente no país, além de ser tipicamente praticado no mercado aeronáutico;
- As aeronaves finalizam suas missões retornando para os mesmos locais de origem; e
- Foram assumidos, ainda, os seguintes tipos de missão, com frequência, duração e quantidades de aeronaves empregadas conforme Tabela 4.8, para construção do perfil operacional.

Tabela 4.8 – Dados do Perfil Operacional.

Operador	Tipo de Missão	Frequência	Quant. Nominal de Aeronaves	Quant. Mínima de Aeronaves	Duração da Missão (Horas)
1°/3° GAV	Interceptação_Manhã	Diariamente	4	1	1,28
	Interceptação_Tarde	Diariamente	4	1	1,28
2°/3° GAV	Interceptação_Manhã	Diariamente	4	1	1,33
	Interceptação_Tarde	Diariamente	4	1	1,33
3°/3° GAV	Interceptação_Manhã	Diariamente	4	1	1,28
	Interceptação_Tarde	Diariamente	4	1	1,28
2°/5° GAV	Instrução_Manhã	2ª a 6ª Feira, da 9ª a 48ª Semana do ano	8	1	1,55
	Instrução_Tarde	2ª a 6ª Feira, da 9ª a 48ª Semana do Ano	8	1	1,55
EDA	Treino_Demonstração	2ª a 6ª Feira, da 5ª a 48ª Semana do Ano	7	1	1,33

O segundo passo executado foi a modelagem computacional, que consistiu na inserção de dados do cenário inicial e das premissas assumidas em tabelas apropriadas do OPUS10[®]. Assim, o resultado da modelagem computacional está ilustrado na Figura 4.17, que representa um arcabouço tríplice formado pela integração das Características do Sistema, Estrutura de Suporte Logístico e Informações de Operação.

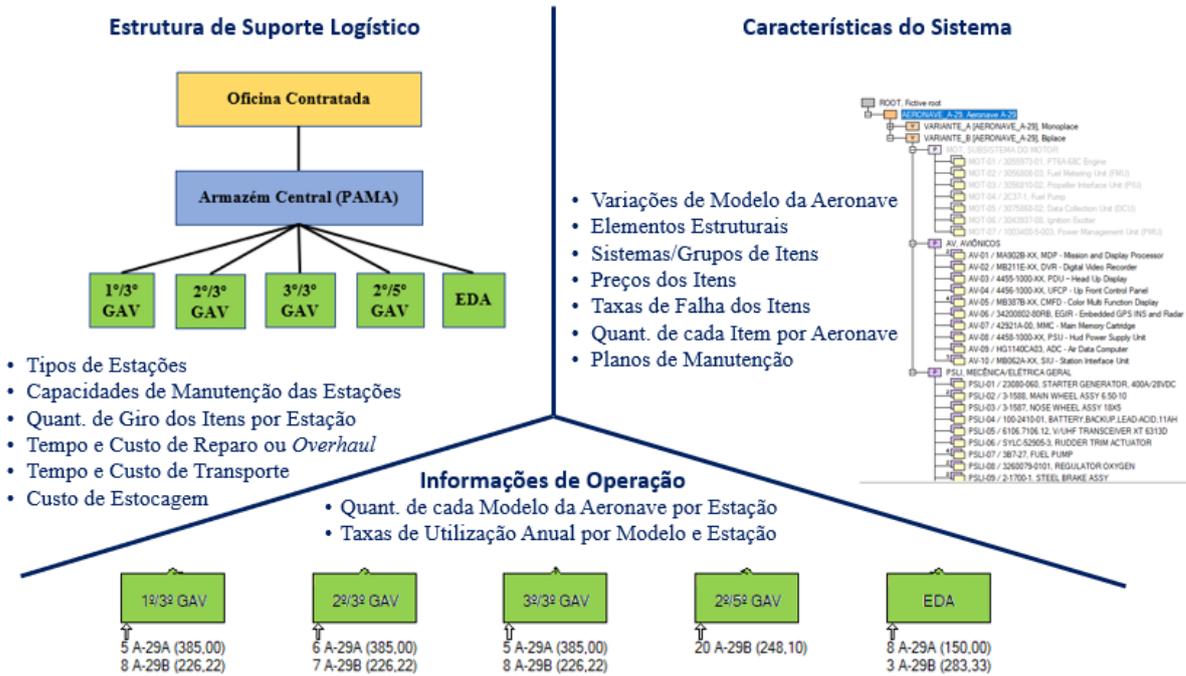


Figura 4.17 – Características do Sistema, Estrutura de Suporte e Informações de Operação.

O terceiro passo resultou na curva de custo-efetividade para o cenário inicial, conforme Figura 4.18, obtida de forma determinística, destacando-se o ponto que atende ao requisito inicial de disponibilidade (65%) com menor custo de suporte, o qual apresentou uma disponibilidade operacional de 67,19% e custo de suporte em vida de R\$ 917.738.134,26.

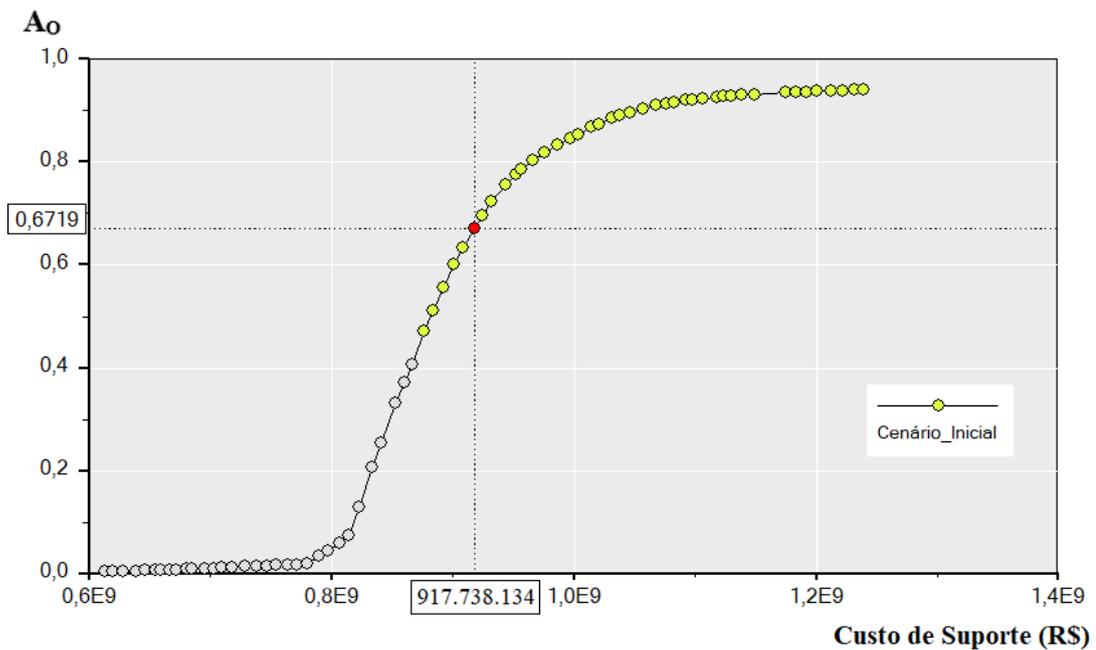


Figura 4.18 – Curva de Custo-Efetividade do Cenário Inicial e Destaque do Ponto que Atende ao Requisito de 65% de Disponibilidade Operacional com Menor Custo de Suporte.

A este ponto correspondeu uma lista específica de itens para compor o estoque de giro, com as respectivas quantidades e locais de armazenamento, conforme Apêndice B. Essa lista foi então considerada adquirida e incorporada ao modelo.

Cabe destacar também que os pontos mostrados em cinza na curva de custo-efetividade não possuem conformidade de utilização. Isto ocorre porque há um limite abaixo do qual não é mais possível compensar a baixa disponibilidade do sistema para atingir a utilização planejada.

Os custos de suporte para este primeiro ponto selecionado encontram-se resumidos na Tabela 4.9, na qual os custos de transporte dos itens foram incluídos nos custos de manutenção corretiva e preventiva e os custos referentes aos materiais de consumo das inspeções programadas das aeronaves foram inseridos nos custos de manutenção preventiva.

Tabela 4.9 – Resumo dos Custos de Suporte para o Ponto Selecionado.

Custo Total de Suporte	R\$ 917.738.134,26	
Custos Não Recorrentes	R\$ 289.978.141,92	
Custo de Aquisição de Componentes		R\$ 289.978.141,92
Custos Recorrentes	R\$ 627.759.992,34	
Custo de Armazenamento de Componentes		R\$ 14.498.907,10
Custos de Manutenção Corretiva		R\$ 303.167.103,70
Custos de Manutenção Preventiva		R\$ 310.093.981,54

O quarto passo foi a obtenção de cenários alternativos. Mediante pesquisa documental em estudos previamente realizados, foram levantados os seguintes parâmetros, com as respectivas variações, para avaliação quanto ao impacto na suportabilidade da frota.

- Tempo Médio de Atraso Administrativo: redução do tempo médio de indisponibilidade das aeronaves durante as inspeções programadas do tipo Check “A”, de 17,7 para 12,8 dias corridos, conforme verificado por Xavier (2022), o que correspondeu a uma redução do tempo médio de atraso administrativo de 364,8 para 247,2 horas. Não houve custo adicional relacionado, pois a melhoria foi obtida pela implantação interna do modelo de gestão visual para planejamento e controle das atividades de manutenção. No presente estudo de caso, foi incorporada, ainda, uma estimativa de projeção dessa melhoria no Check “Y” e na tarefa de substituição do motor, conforme Apêndice C.
- Tempo Médio entre Inspeções da Aeronave: aumento do intervalo entre inspeções Check "A", de 300 para 350 horas de voo, o que reduziu a frequência de intervenções programadas e causou alteração nas taxas de falha de alguns sistemas da aeronave, conforme Tabela 4.10

verificada por Sousa (2022) dois anos após uma modificação no Programa de Manutenção das aeronaves A-29 pelo fabricante. Não houve custo para a FAB, pois foi iniciativa do próprio fabricante. Neste trabalho, considerou-se que todos os componentes reparáveis de um dado sistema da aeronave variam a taxa de falha igualmente. Os itens afetados, com as respectivas taxas de falha já alteradas, encontram-se listados no Apêndice C.

Tabela 4.10 – Variação da Taxa de Falha por Sistema (adaptado de Sousa, 2022).

Sistema	Varição Taxa de Falha
Ar-condicionado	33,33%
Comunicação	-83,33%
Elétrico	-25,00%
Controles de Voo	-33,33%
Combustível	250%
Trem de Pouso	-21,05%
Navegação	-33,33%
Portas	-20,00%

Além dos fatores supracitados, levou-se em consideração no presente estudo de caso outros dois fatores e respectivas variações esperadas, levantados por meio de pesquisa documental em instrumentos contratuais, conforme a seguir.

- Tempo Médio de Transporte de Itens: redução de 45 dias para 7 dias no tempo médio de transporte dos itens aviônicos, mediante inclusão do serviço de transporte com esta meta de desempenho em novo contrato de suporte logístico dedicado a tais componentes e recentemente celebrado com empresa especializada. Os custos envolvidos nessa melhoria estão disponíveis no Apêndice C.
- Tempo Médio de Reparo e Revisão de Itens: redução dos tempos médios de reparo e revisão de alguns itens dos diversos sistemas da aeronave, de modo a atender aos respectivos TAT máximos contratuais fixados, conforme disponível no Apêndice C, por iniciativa da empresa contratada, em razão de haver penalidades contratuais mais severas, associadas ao não cumprimento das metas de desempenho do novo contrato de suporte logístico dedicado a tais componentes. Não se considerou custo direto nessa melhoria.

O gráfico da Figura 4.19 adiante apresenta as curvas de custo-efetividade dos quatro cenários alternativos, além do próprio cenário inicial. A curva do cenário de alteração nas taxas de falha foi a única plotada à direita da curva do cenário inicial, indicando maior custo de suporte para um determinado nível de disponibilidade, enquanto as demais curvas dos cenários alternativos foram plotadas à esquerda, indicando melhoria de custo-efetividade.

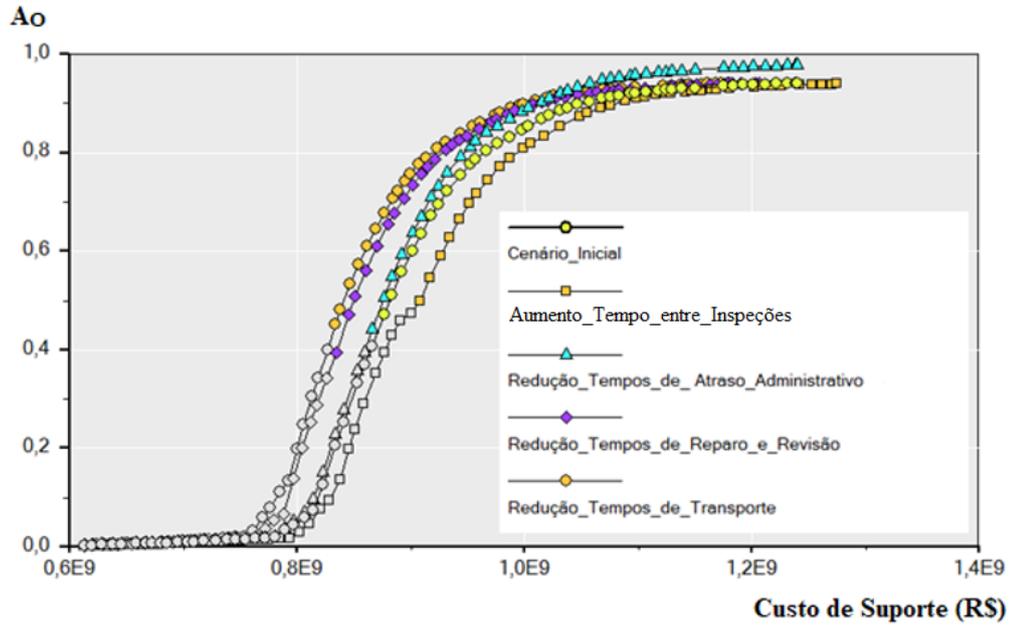


Figura 4.19 – Curvas de Custo-Efetividade dos Cenários Alternativos e do Cenário Inicial.

O gráfico da Figura 4.20 indica o custo de suporte para cada cenário alternativo, tendo como referência o nível de 67,19% de disponibilidade operacional do cenário inicial.

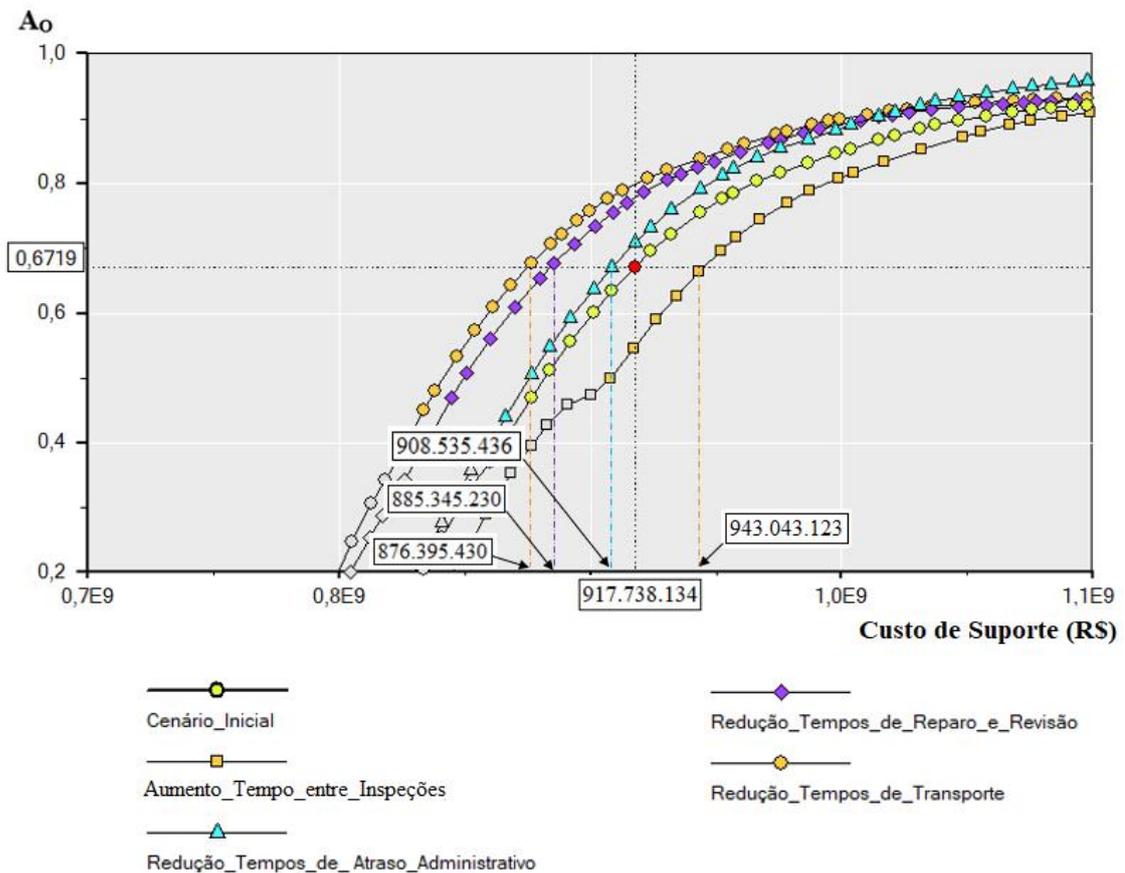


Figura 4.20 – Custos de Suporte dos Cenários Alternativos e do Cenário Inicial.

Não obstante já haver um resultado estático e determinístico, faz-se necessário agregar dinamismo à análise, incorporando aspectos peculiares à sazonalidade da operação da frota.

Assim, no quinto passo, os pontos de interesse das curvas de custo-efetividade de todos os cenários modelados do OPUS10[®] foram carregados no SIMLOX[®], juntamente com os dados do perfil operacional já descrito na Tabela 4.8, para o horizonte de cinco anos, o qual resultou no total de 14.050 missões, 18.761,5 horas de missão e 91.835 horas de voo, com uma demanda de aeronaves conforme ilustrado na Figura 4.21.

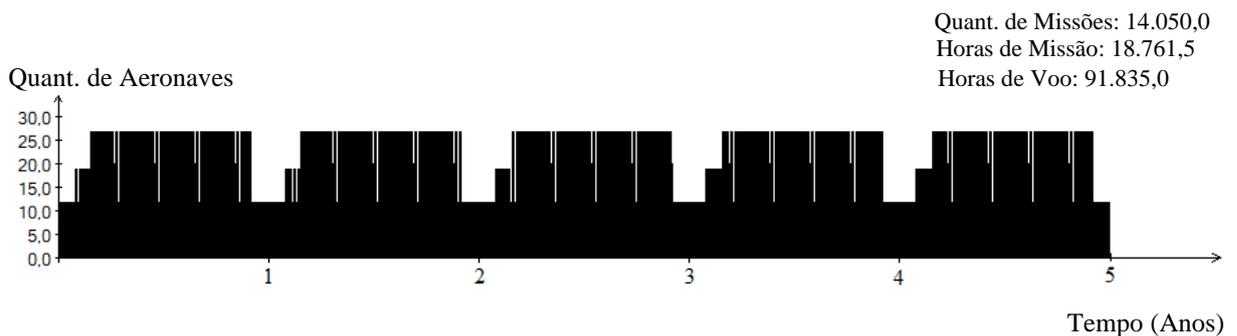


Figura 4.21 – Ilustração do Perfil Operacional Construído no SIMLOX[®].

Aplicando-se este perfil operacional sazonal, todos os modelos determinísticos do OPUS10[®] foram simulados no SIMLOX[®] com apenas uma replicação, em razão da limitação apresentada pela licença do *software* para a quantidade de missões e eventos simulados no estudo de caso em tela. As Figuras 4.22 a 4.26 apresentam, para o requisito de 65% de disponibilidade, os resultados estocásticos da disponibilidade operacional média no período de cinco anos e a sua variação em função do tempo, referentes a todos os cenários.

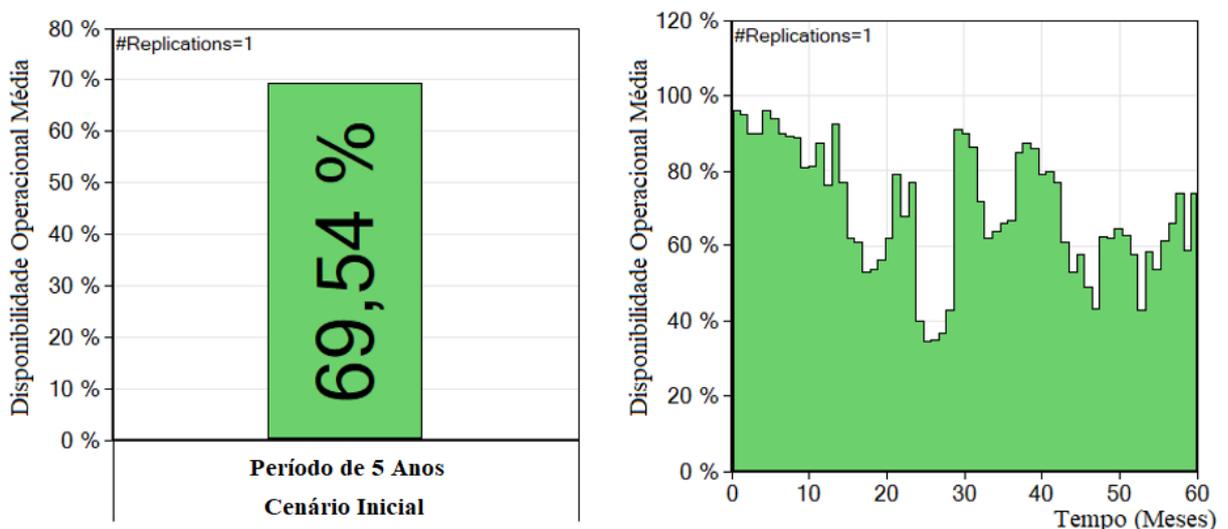


Figura 4.22 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] (Cenário Inicial).

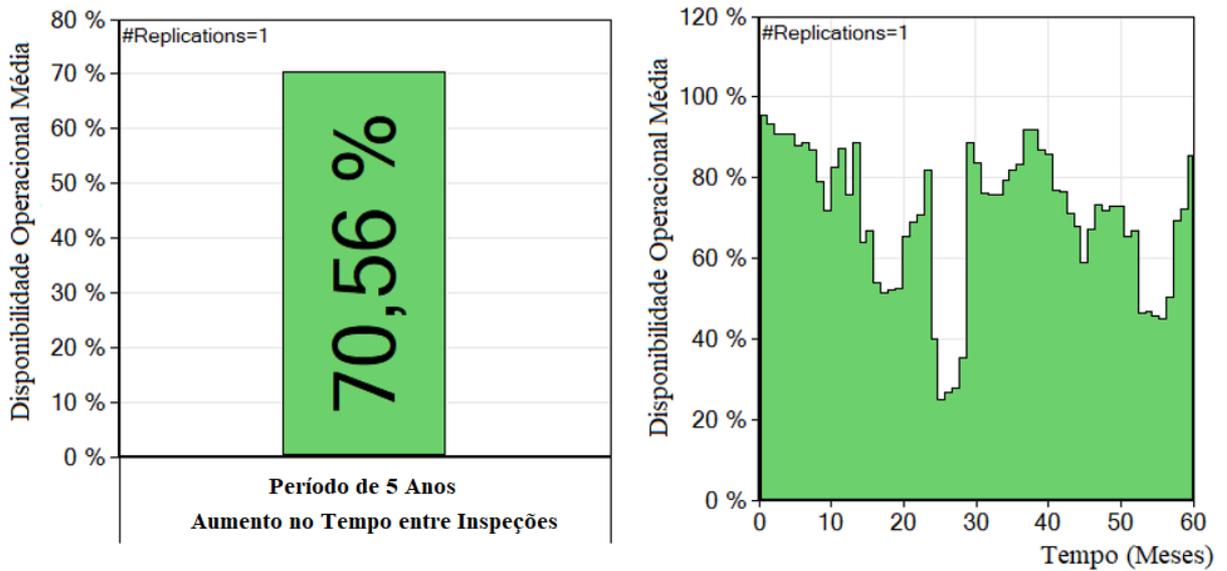


Figura 4.23 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] (Cenário de Aumento no Tempo Médio entre Inspeções).

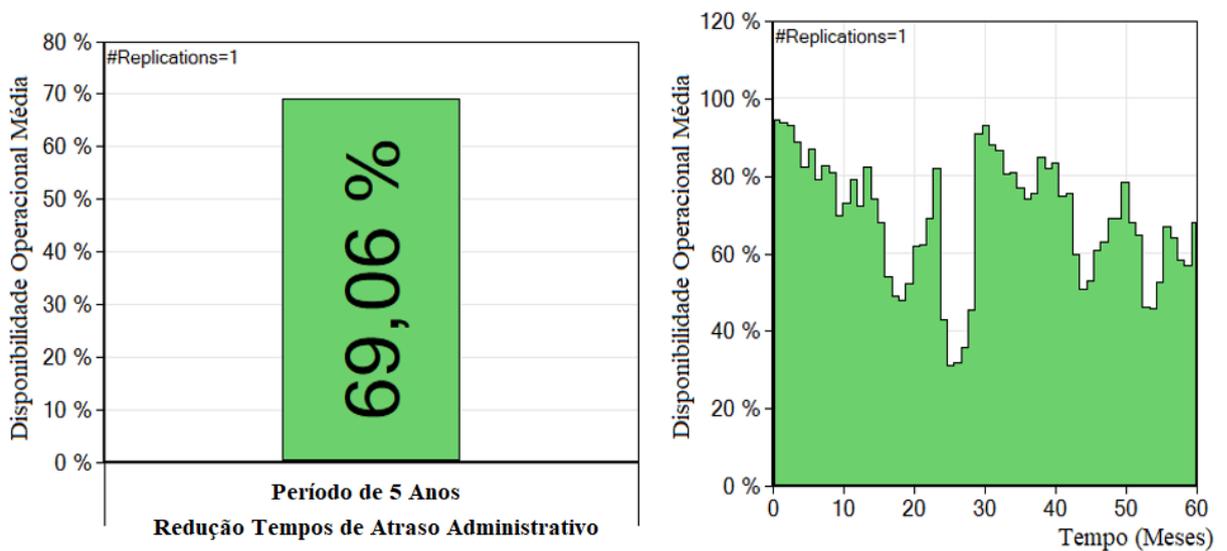


Figura 4.24 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] (Cenário de Redução dos Tempos Médios de Atraso Administrativo).

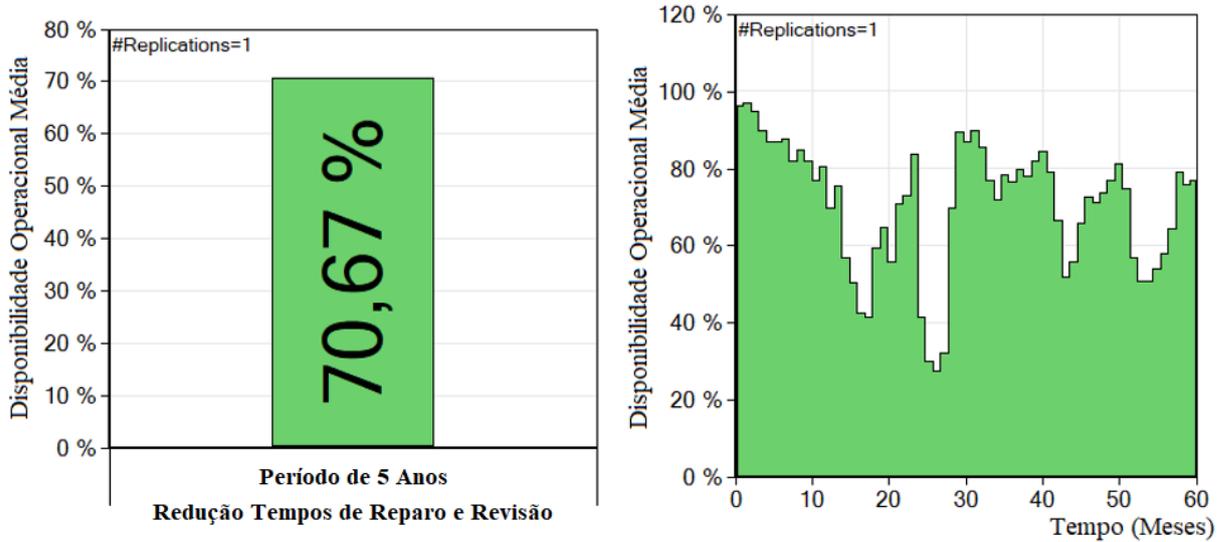


Figura 4.25 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] (Cenário de Redução dos Tempos Médios de Reparo e Revisão).

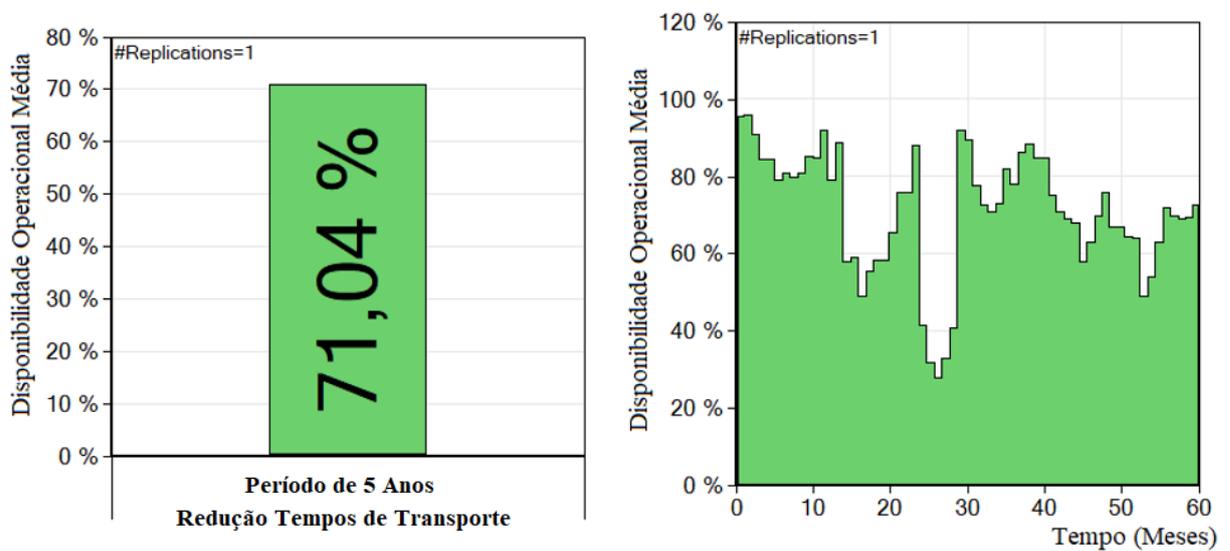


Figura 4.26 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] (Cenário de Redução dos Tempos Médios de Transporte).

No sexto passo, foram compilados no CATLOC[®] os custos de suporte incidentes no decorrer do período simulado, para o cenário inicial e todas as alternativas, como ilustrado nas Figuras 4.27 a 4.31.

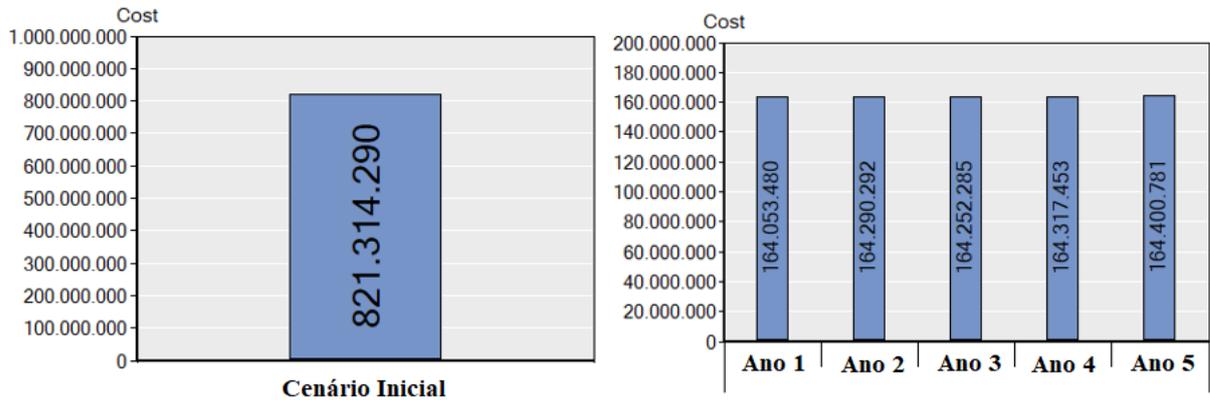


Figura 4.27 – Custos de Suporte no CATLOC® (Cenário Inicial).

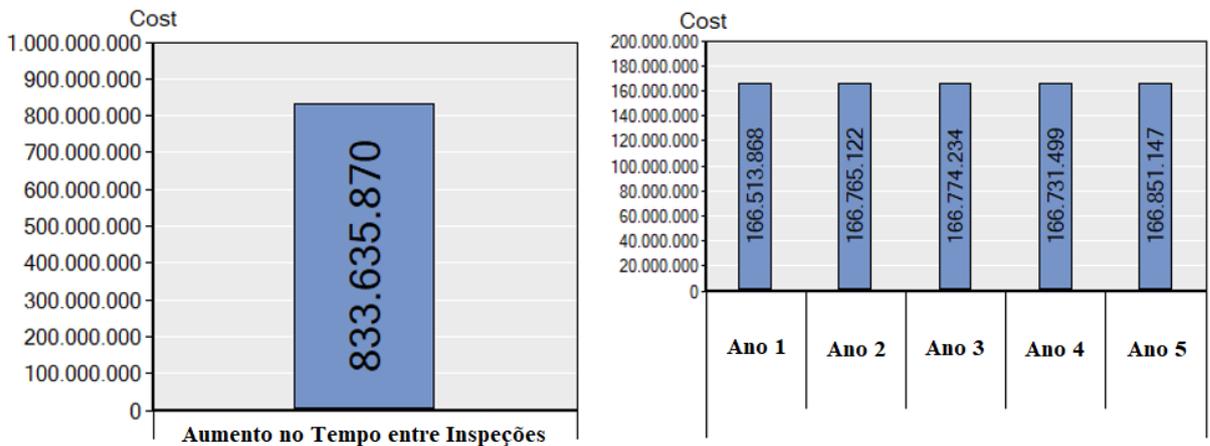


Figura 4.28 – Custos de Suporte no CATLOC® (Cenário de Aumento no Tempo Médio entre Inspeções).

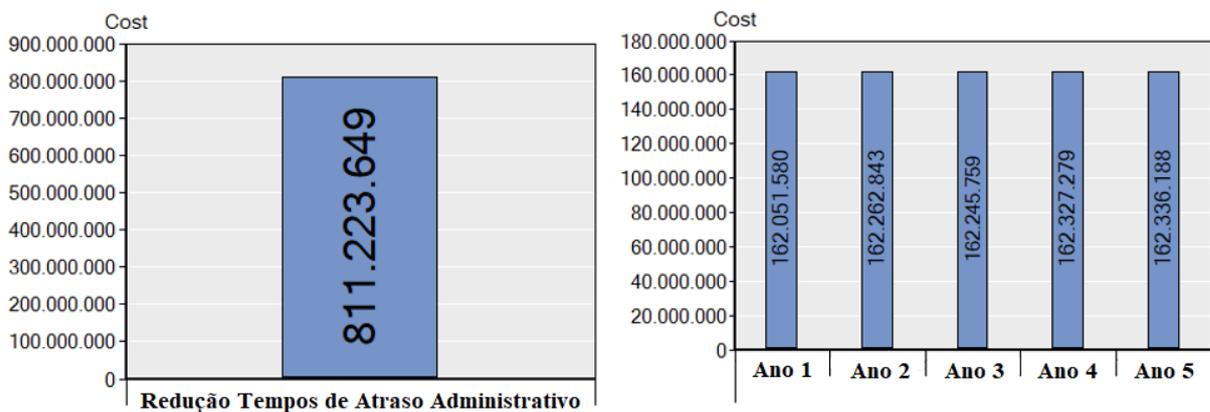


Figura 4.29 – Custos de Suporte no CATLOC® (Cenário de Redução dos Tempos Médios de Atraso Administrativo).

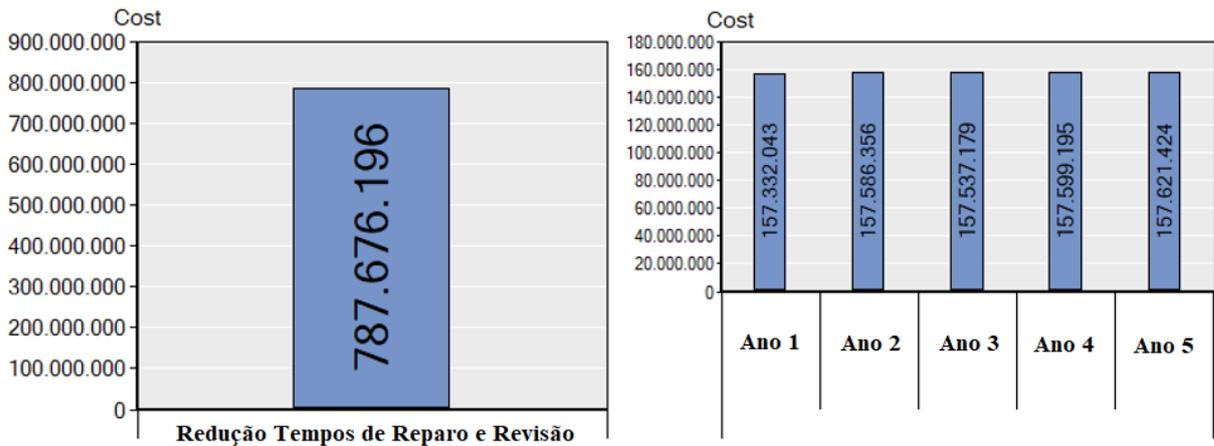


Figura 4.30 – Custos de Suporte no CATLOC[®] (Cenário Redução Tempos Médios de Reparo e Revisão).

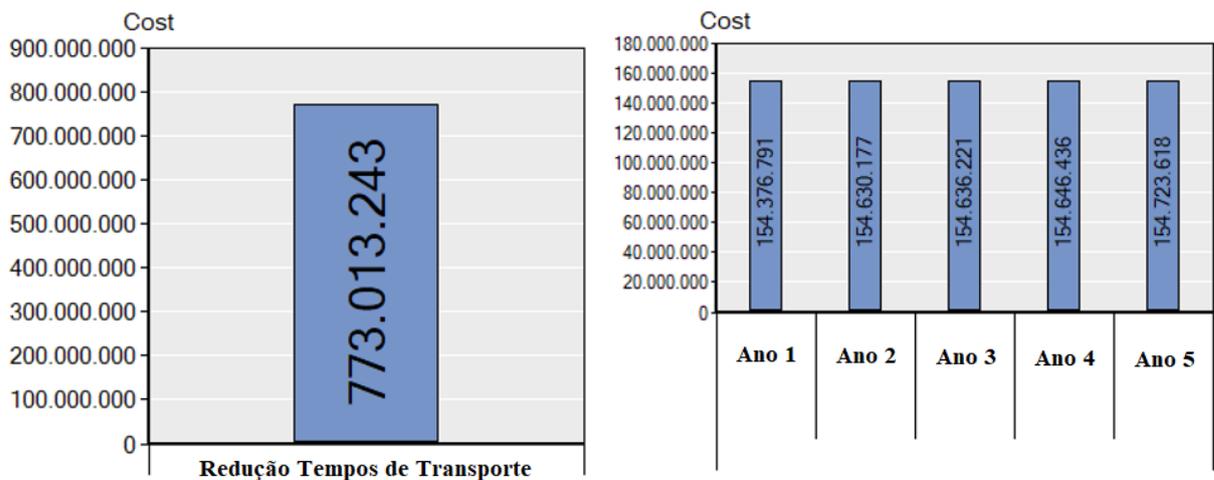


Figura 4.31 – Custos de Suporte no CATLOC[®] (Cenário Redução Tempos Médios de Transporte).

Finalmente, chegando-se ao sétimo passo, calculou-se o valor de Custo-Efetividade para o cenário inicial e cada um dos cenários alternativos, levando-se em consideração as métricas de custo de suporte e disponibilidade operacional, conforme Equação 4.1. Também neste último passo realizou-se a organização de todos os cenários de acordo com os respectivos valores de Custo-Efetividade calculados, classificando-se assim os fatores logísticos e suas respectivas variações em um *ranking* de impacto positivo na suportabilidade, obtendo-se os resultados da Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Classificação dos Fatores Logísticos Quanto ao Impacto na Suportabilidade.

Cenário ou Fator Logístico Variante	Descrição da Variação	Disponibilidade Operacional Média (%)	Custo de Suporte no Período (R\$)	Custo-Efetividade (Disponib. Oper./Custo de Suporte)x(10⁹)	Ranking de Impacto Positivo na Suportabilidade
Tempo Médio de Transporte de Itens	Redução de 45 dias para 7 dias no tempo médio de transporte dos itens aviônicos	71,04	773.013.243,00	91,9	1°
Tempo Médio de Reparo e Revisão de Itens	Redução dos tempos médios de reparo e revisão de diversos itens, observando-se o TAT Máximo Contratual	70,67	787.676.196,00	89,7	2°
Tempo Médio de Atraso Administrativo	Redução dos tempos médios de atraso administrativo nas inspeções programadas das aeronaves	69,06	811.223.649,00	85,1	3°
Cenário Inicial	Não Aplicável	69,54	821.314.290,00	84,7	4°
Tempo Médio entre Inspeções da Aeronave	Aumento do intervalo entre inspeções Check "A", de 300 para 350 horas de voo, causando alteração nas taxas de falha dos itens de alguns sistemas	70,56	833.635.870,00	84,6	5°

Portanto, neste estudo de caso, os fatores de manutenibilidade apresentaram os maiores impactos positivos na suportabilidade da frota. Enquanto o cenário de aumento do tempo médio entre inspeções da aeronave mostrou-se o menos vantajoso, inclusive quando comparado ao cenário inicial, o cenário de redução do tempo médio de transporte de itens ocupou a primeira posição no *ranking*, mesmo incorporando um custo de *setup* associado.

Ainda no âmbito do estudo de caso em tela, analisou-se um eventual cenário pessimista caracterizado pelo aumento de 17% no tempo médio de manutenções corretivas e preventivas de todos os componentes, bem como das inspeções programadas das aeronaves, combinado com o mesmo aumento percentual no tempo médio de transporte de todos os itens. O gráfico da Figura 4.32 indica o custo de suporte para esse cenário de degradação da suportabilidade, tendo como referência o nível de 67,19% de disponibilidade operacional do cenário inicial.

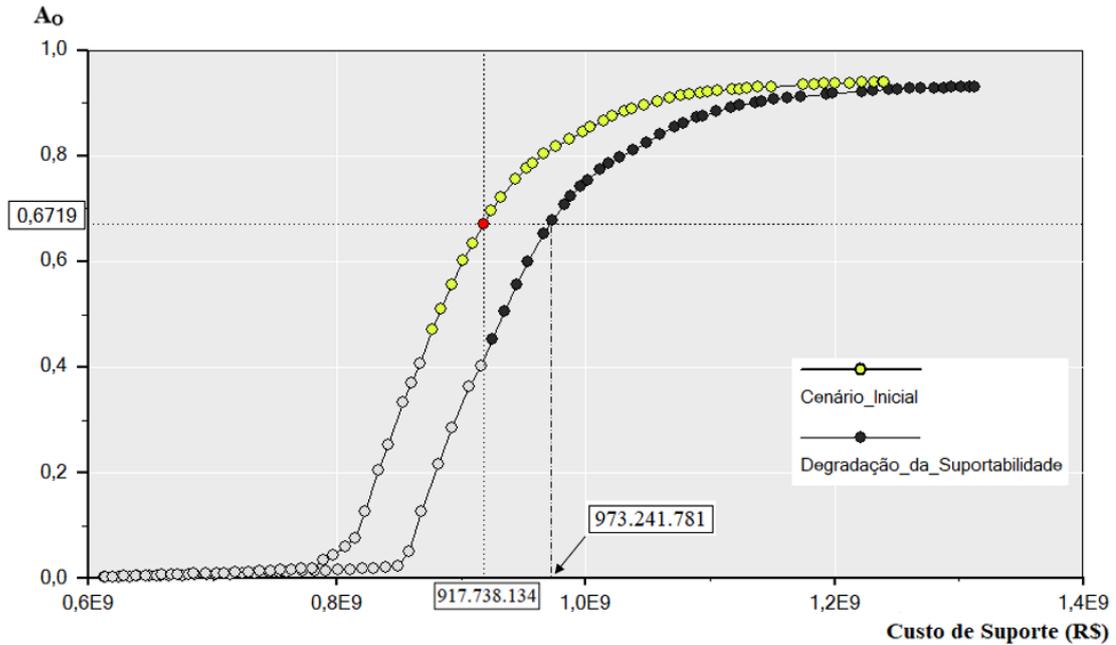


Figura 4.32 – Custos de Suporte do Cenário de Degradação da Suportabilidade.

Aplicando-se o mesmo perfil operacional, o modelo do OPUS10[®] foi simulado no SIMLOX[®]. A Figura 4.33 apresenta o resultado estocástico referente ao novo cenário analisado.

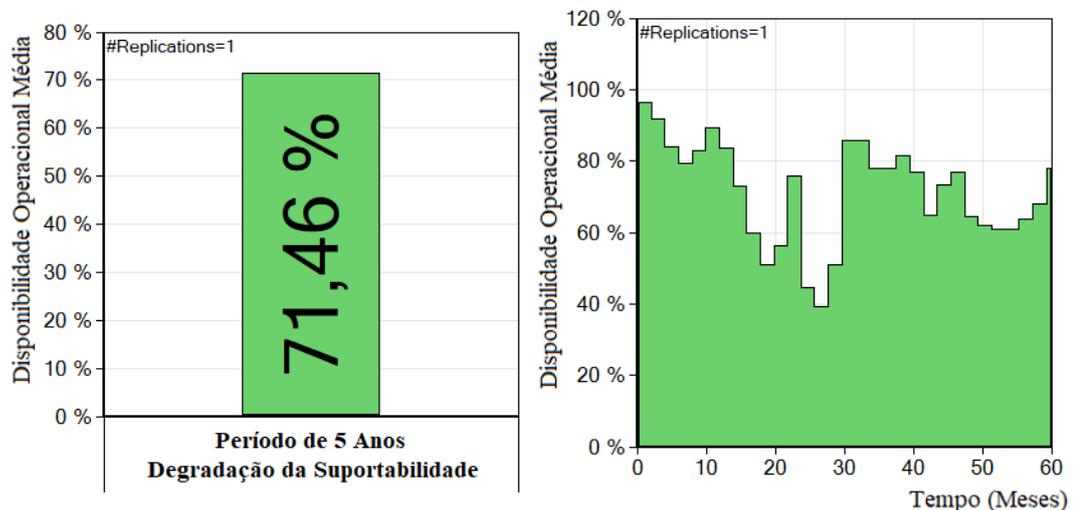


Figura 4.33 – Disponibilidade Média no SIMLOX[®] (Degradação da Suportabilidade).

Em seguida, foram compilados no CATLOC[®] os custos de suporte incidentes no decorrer do período simulado, como ilustrado na Figura 4.34.

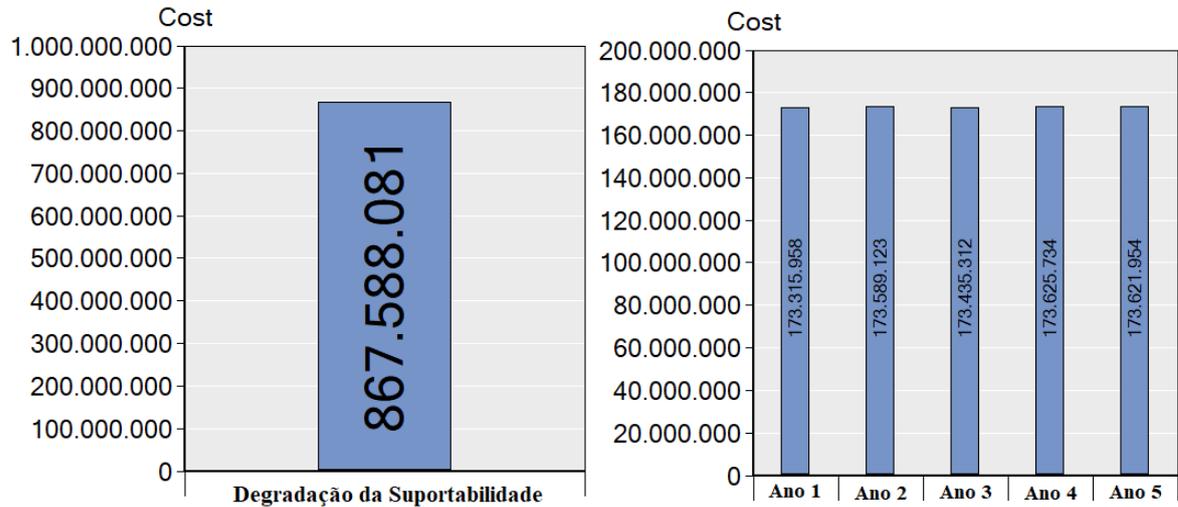


Figura 4.34 – Custos de Suporte no CATLOC[®] (Degradação da Suportabilidade).

Por fim, calculou-se então o valor de Custo-Efetividade para esse cenário, obtendo-se o resultado da Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Custo-Efetividade do Cenário de Degradação da Suportabilidade.

Cenário	Descrição da Variação	Disponibilidade Operacional Média (%)	Custo de Suporte no Período (R\$)	Custo-Efetividade (Disponib. Oper./Custo de Suporte)x(10 ⁹)
Degradação da Suportabilidade	Aumento de 17% no tempo médio de manutenções corretivas e preventivas dos componentes, bem como das inspeções programadas das aeronaves; Aumento de 17% no tempo médio de transporte dos itens	71,46	867.588.081,00	82,4

Observa-se, portanto, que o valor de custo-efetividade deste último cenário analisado é inferior a todos aqueles registrados na Tabela 4.11.

A obtenção deste resultado indica que o modelo desenvolvido também serve para avaliar impactos negativos na suportabilidade da frota, permitindo não somente análises de cenários de melhoria, mas também de eventuais degradações do desempenho de suporte.

4.3 Avaliação do Modelo por Especialistas

A última etapa da estratégia de desenvolvimento do modelo de processo, para classificar fatores de confiabilidade e manutenibilidade quanto ao impacto na suportabilidade de aeronaves de defesa, foi a sua avaliação por especialistas, por meio de dois instrumentos.

As áreas de conhecimento ou experiência elencadas para seleção dos participantes da avaliação foram as seguintes:

- Aquisição de sistemas complexos de defesa;
- Gestão da operação de sistemas complexos de defesa;
- Logística de sistemas complexos de defesa;
- Desenvolvimento de sistemas complexos de defesa; e
- Gestão da manutenção de sistemas complexos de defesa.

O primeiro instrumento de avaliação utilizado foi um formulário Google semelhante ao empregado por Assumpção (2020), elaborado de forma a registrar a impressão de especialistas sobre o modelo de processo proposto, no que diz respeito aos seguintes aspectos:

- **Estrutura e apresentação gráfica**

O modelo deve apresentar clareza na descrição da estrutura e apresentação gráfica para pessoas com conhecimento na área;

- **Conformidade com a literatura acadêmica**

O modelo deve ter conformidade com a literatura acadêmica, especialmente no que diz respeito à avaliação da influência de fatores de confiabilidade e manutenibilidade no suporte a sistemas complexos;

- **Abrangência**

O modelo deve cobrir todos os aspectos relevantes para avaliar a suportabilidade de uma frota de aeronaves de defesa sob a influência de fatores de confiabilidade e manutenibilidade;

- **Coerência**

O modelo deve ser coerente com a finalidade a que se propõe;

- **Aplicabilidade**

O modelo deve ser aplicável a processos de avaliação da suportabilidade de aeronaves de defesa quando há variações em fatores de confiabilidade e manutenibilidade;

- **Relevância**

O modelo deve contribuir para robustecer a análise de cenários alternativos e apoiar a tomada de decisão quanto à alocação de recursos, trazendo ganhos para a suportabilidade do sistema.

A partir dos parâmetros citados, o formulário de avaliação foi elaborado e disponibilizado em uma base digital, viabilizando assim o preenchimento *on-line*. Tal recurso foi utilizado para evitar que o avaliador fosse eventualmente induzido pelo solicitante.

Em função da especificidade do tema, o universo de especialistas foi restrito. No total, oito participantes responderam este primeiro instrumento de avaliação e os respectivos currículos resumidos encontram-se disponíveis no Apêndice D.

Inicialmente, duas perguntas coletaram informações a respeito das áreas de conhecimento/experiência e dos graus de escolaridade dos avaliadores.

Em seguida, foram apresentadas seis afirmativas acerca do modelo, para que os participantes o avaliassem quanto ao aspecto abordado e conforme o seu grau de concordância, assinalando sua escolha na escala de 1 a 5, sendo o grau 1 para “discordo totalmente” e o grau 5 para “concordo totalmente”.

Por fim, foi disponibilizado um campo para que o avaliador pudesse expressar livremente suas impressões, se assim desejasse.

Adiante, serão apresentadas e analisadas as figuras retiradas do relatório gerado no aplicativo Google Formulários[®], com as perguntas/afirmativas e as respectivas respostas objetivas em forma de gráfico. Na sequência, os comentários pertinentes registrados serão transcritos.

Conforme Figura 4.35, as respostas indicam que a maioria dos participantes, 75%, tem envolvimento com a Logística de Sistemas Complexos de Defesa, área diretamente abordada no presente trabalho. Alguns ainda assinalaram mais de uma área de conhecimento/experiência, enriquecendo a avaliação.

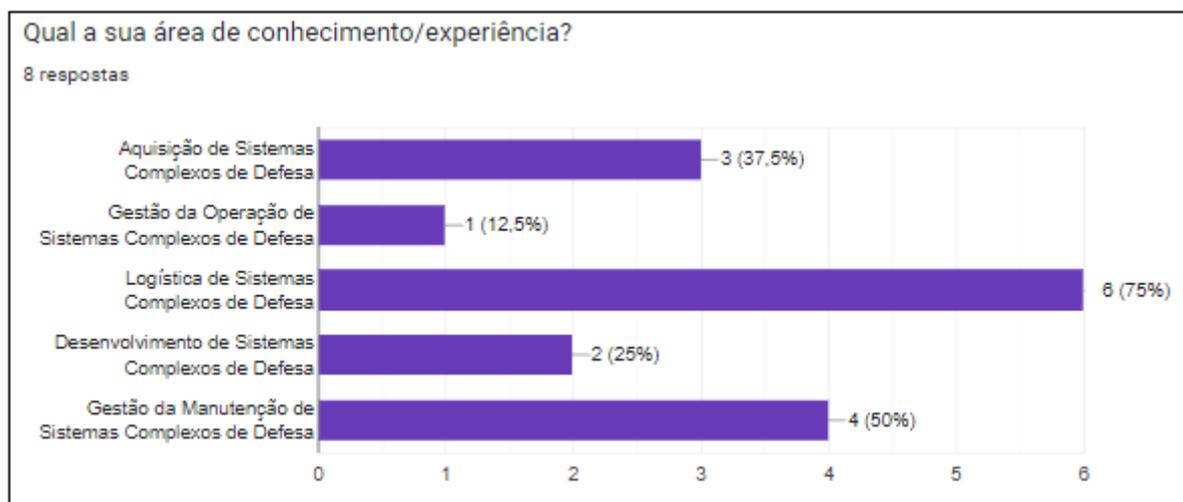


Figura 4.35 – Áreas de Conhecimento/Experiência dos Participantes da Avaliação.

Como pode ser observado na Figura 4,36, as respostas revelam que a maioria dos participantes, também 75%, possui o nível de escolaridade de Mestrado.

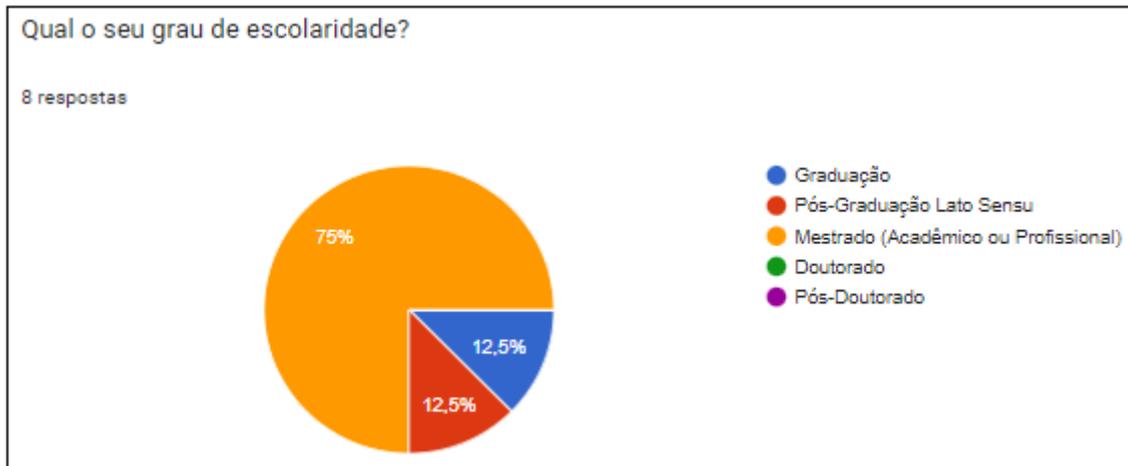


Figura 4.36 – Graus de Escolaridade dos Participantes da Avaliação.

Quanto à clareza na descrição da estrutura e apresentação gráfica do modelo de processo proposto, as respostas da Questão 1 (ilustradas na Figura 4.37) apontam para uma avaliação relativamente positiva por parte da maioria dos participantes, já que 50% assinalaram a opção “Concordo parcialmente” e 37,5% registraram “Concordo totalmente”. No entanto, cabe observar que 12,5% dos avaliadores discordaram parcialmente, indicando que tal aspecto apresenta uma oportunidade de melhoria.

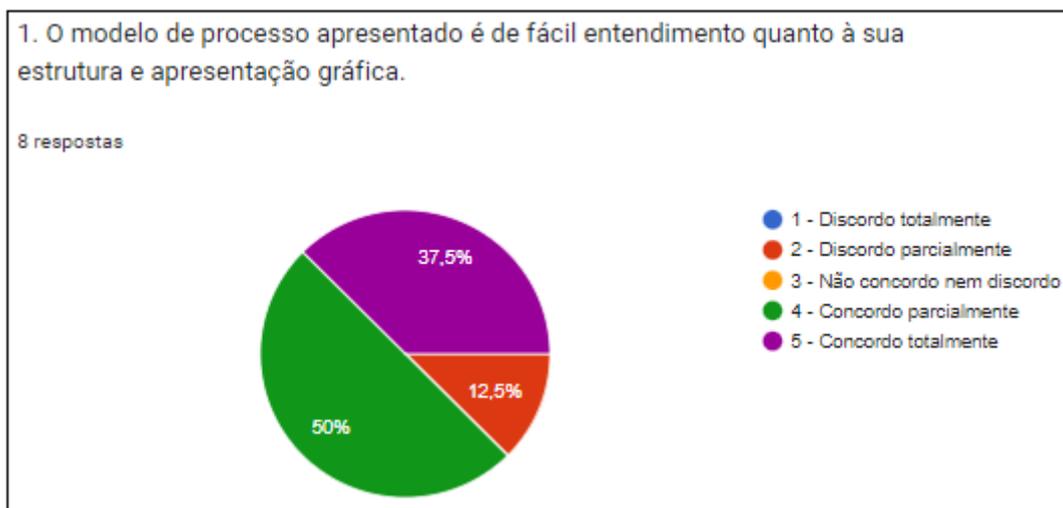


Figura 4.37 – Questão 1 do Formulário de Avaliação.

Em relação à conformidade com a literatura acadêmica, a Figura 4.38 mostra que a grande maioria (87,5%) dos participantes assinalou “Concordo totalmente” e os demais informaram que concordam parcialmente, o que revela uma avaliação positiva.

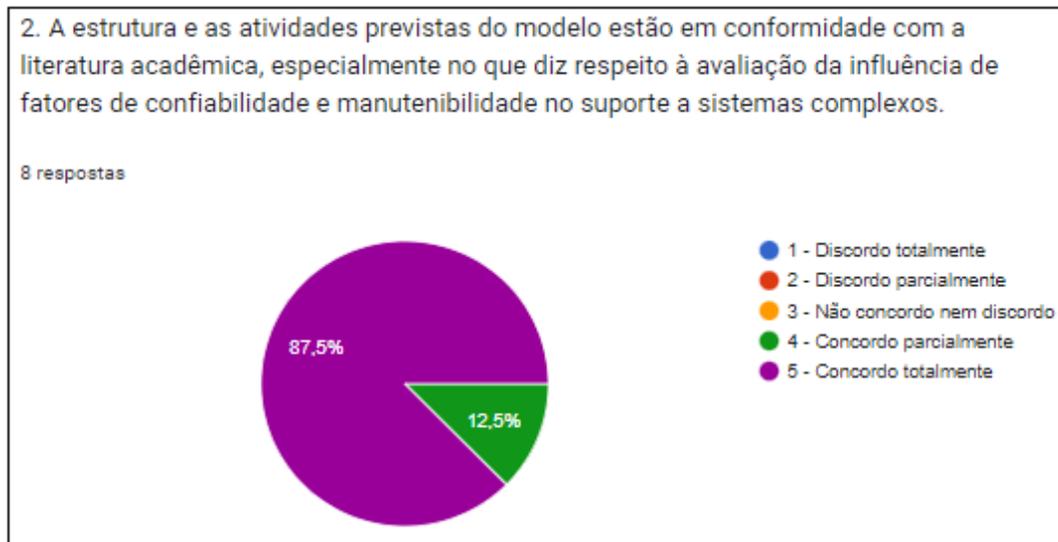


Figura 4.38 – Questão 2 do Formulário de Avaliação.

As respostas da Questão 3, conforme Figura 4.39, apontam que 25% dos avaliadores assinalaram “Concordo totalmente” e 62,5% concordam parcialmente que o modelo de processo apresentado cobre todos os aspectos relevantes para avaliar a suportabilidade de uma frota de aeronaves de defesa, sob a influência de fatores de confiabilidade e manutenibilidade. Os demais participantes registraram “Não concordo nem discordo”. Apesar da diversidade das respostas, entende-se que a avaliação do aspecto de abrangência também foi positiva.



Figura 4.39 – Questão 3 do Formulário de Avaliação.

Nas Questões 4, 5 e 6, que tratam respectivamente da coerência, aplicabilidade e relevância do modelo de processo proposto, as respostas indicam que houve concordância de avaliação positiva por parte dos participantes, como pode ser observado nas Figuras 4.40, 4.41 e 4.42. Nesses últimos aspectos abordados, 75% concordaram totalmente e 25% concordaram parcialmente.

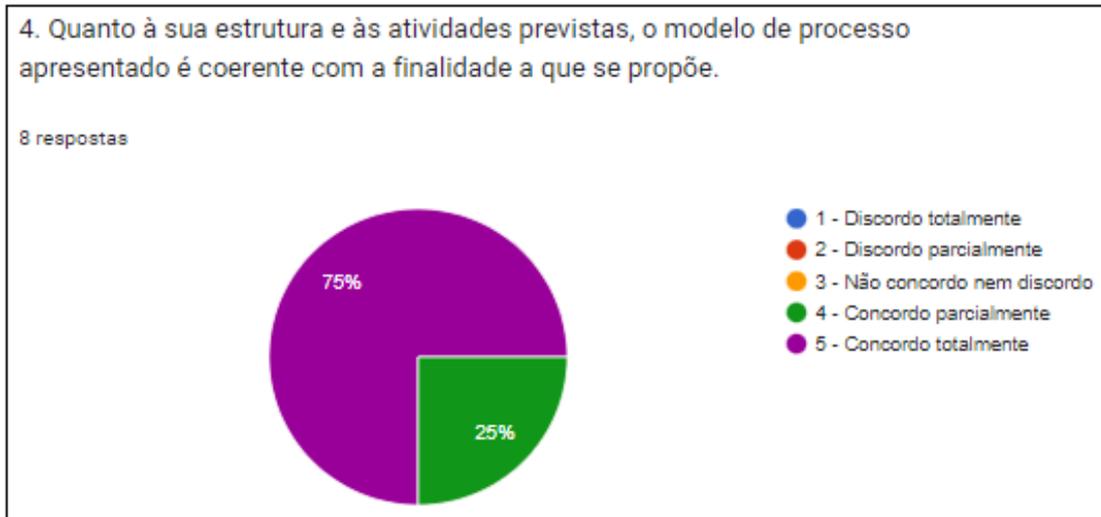


Figura 4.40 – Questão 4 do Formulário de Avaliação.

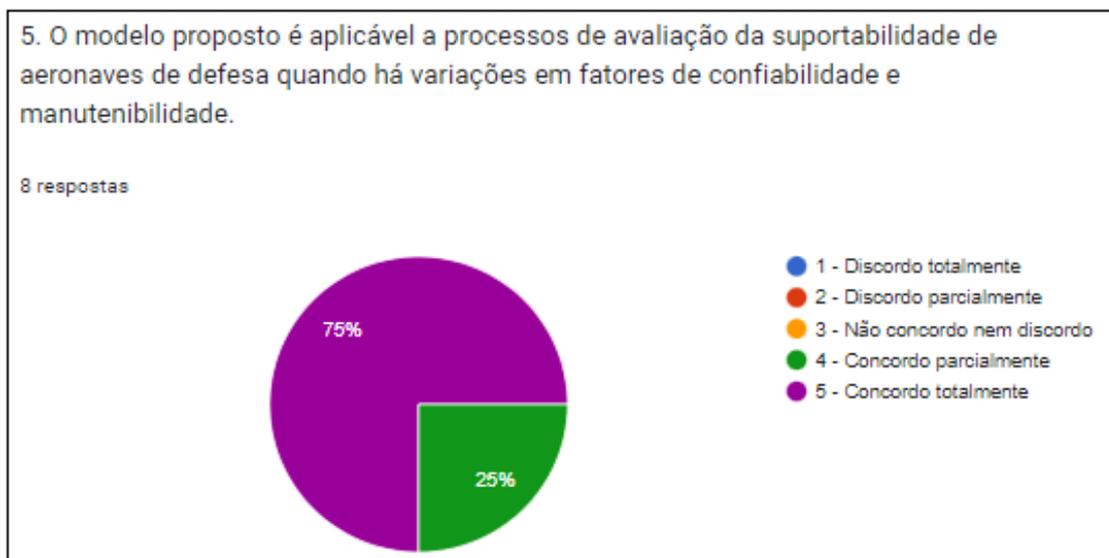


Figura 4.41 – Questão 5 do Formulário de Avaliação.

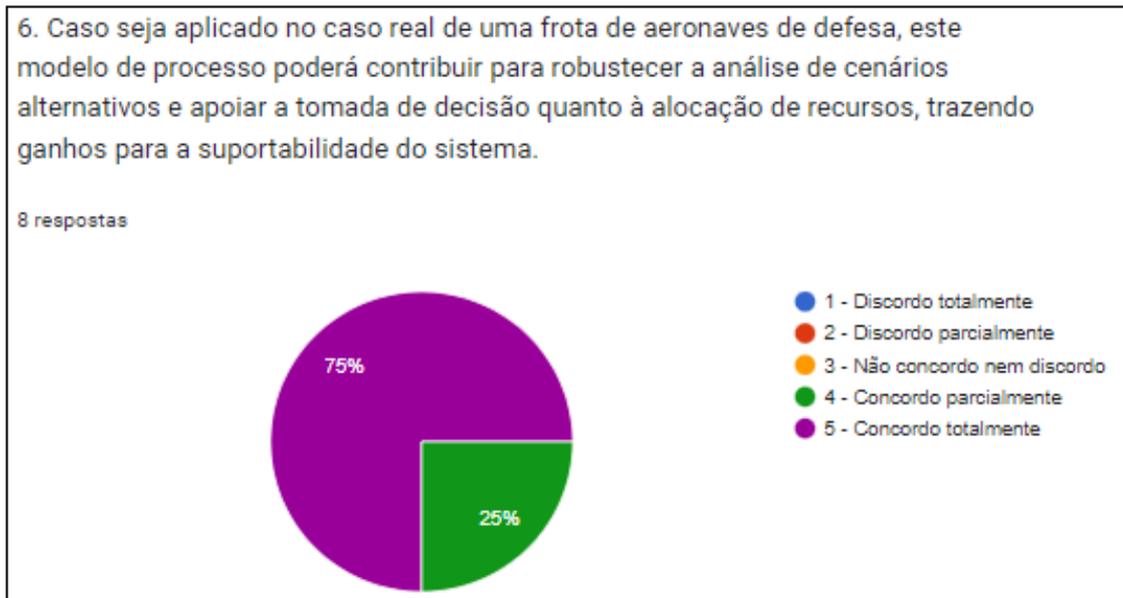


Figura 4.42 – Questão 6 do Formulário de Avaliação.

No espaço destinado aos comentários, críticas e sugestões, um dos participantes da avaliação registrou que a máxima efetividade em aplicar as técnicas de projeto para a manutenibilidade é atingida quanto for considerada desde o início do desenvolvimento do produto. Pontuou ainda que, combinando a manutenibilidade com a confiabilidade e considerando os requisitos de suportabilidade, o produto pode atingir os maiores índices de disponibilidade com o menor custo de manutenção.

Outro avaliador afirmou que, em relação aos parâmetros utilizados, existem variáveis do dia a dia que não foram consideradas, mas que também seriam de difícil modelagem matemática, tais como os fatores relativos à disponibilidade de mão de obra em um ambiente militar e o fator político envolvido em contratos de suporte de frotas de defesa. Além disso, acrescentou que, no que se refere às variáveis diretamente ligadas à confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade operacional, em função do cenário considerado, acredita que o modelo responde bem ao seu propósito.

Um terceiro especialista pontuou que a influência de cada fator é medida por meio de variações controladas no próprio fator, mantendo-se todos os demais estáveis. Desta forma, de acordo com o seu entendimento, o modelo possivelmente está de acordo com a literatura, mas não abrangeria casos mais genéricos, em que a influência de um determinado fator depende de outro fator. Segundo o participante, em tais casos, a análise tende a ser precisa, mas somente para variações partindo do cenário inicial.

Já no segundo instrumento de avaliação, utilizou-se uma planilha Excel[®] semelhante à empregada por Irigon (2020) em sua aplicação do método Delphi, para que cada avaliador tivesse a oportunidade de ratificar ou divergir do *ranking* de cenários obtido no Teste de Sensibilidade da seção 4.2.3 deste trabalho, de acordo com o próprio entendimento.

Desta forma, os participantes foram convidados a analisar uma aplicação completa do modelo de processo proposto e o resultado decorrente, com liberdade para modificar a classificação atribuída, bem como explicar ou comentar resumidamente o motivo de sua eventual divergência. Dos oito participantes que responderam o primeiro formulário de avaliação, sete responderam este segundo instrumento.

A Tabela 4.13 a seguir reúne as classificações atribuídas pelos avaliadores para cada cenário ou fator logístico variante, bem como a soma das classificações atribuídas pelos avaliadores para cada alternativa. Na sequência, os comentários registrados estão transcritos.

Tabela 4.13 – Resultado das Classificações Atribuídas pelos Participantes da Avaliação.

Cenário / Fator Logístico Variante (Ordem Alfabética)	Variação	Classificações Atribuídas pelos Avaliadores								Soma das Classificações Atribuídas pelos Avaliadores
		A	B	C	D	E	F	G	H	
Cenário Inicial	Não Aplicável	2	NA	2	2	3	2	2		13
Taxa de Falha	-20% Custo de \$ 25 Milhões	1	2	1	1	2	1	1		9
Tempo de Manutenção	+10%	3	1	3	3	1	3	3		17

O avaliador B contribuiu sugerindo que o Cenário Inicial poderia ter sua suportabilidade utilizada como *status quo* (671,28). Assim, o aumento do tempo de manutenção, de acordo com os parâmetros estabelecidos neste caso, teria maior impacto na suportabilidade, caso fosse considerada a variação de custo-efetividade em relação ao *status quo* (671,28 - 590,87), em vez de considerar o valor de custo-efetividade do cenário alternativo analisado (590,87). Da mesma forma ocorreria com a redução da taxa de falha, que de acordo com os parâmetros estabelecidos, teria menor impacto na suportabilidade, caso fosse considerada a variação de custo-efetividade

em relação ao *status quo* (677,08 - 671,28), em vez de considerar o valor de custo-efetividade do cenário alternativo analisado (677,08).

O avaliador D comentou que, embora concorde com o resultado da aplicação apresentada, existem fatores que não podem ser considerados neste modelo, tais como os fatores políticos relativos ao investimento necessário para aplicar um outro cenário e a disponibilidade de mão de obra.

O avaliador E argumentou que, do seu ponto de vista, o tempo de manutenção é o fator causador de maior impacto na suportabilidade, influenciando tanto a disponibilidade quanto o custo de manutenção, e a confiabilidade é o segundo fator mais relevante, pois há limitações tecnológicas e de custo de aquisição de componentes e sistemas com menor taxa de falha.

O avaliador G explicou que, embora entenda que a classificação esteja coerente, faz-se necessário mostrar como seriam viáveis as alterações nas taxas de falha e no tempo de manutenção, tendo em vista que esses parâmetros são de projeto. Acrescentou que, no seu entendimento, o que se pode fazer é trabalhar em uma possível baixa eficiência da manutenção, de modo a reduzir os tempos com a melhoria nos processos de manutenção. Da mesma forma, com relação às taxas de falha, pode-se realizar estudos para identificar "*rogue units*" e removê-las dos estoques, além de identificar possíveis questões relacionadas ao ambiente operacional que possam estar aumentando a taxa de falha quando comparada com a de projeto.

Por fim, a Tabela 4.14 organiza as alternativas avaliadas em ordem crescente do resultado obtido na coluna "Soma das Classificações Atribuídas pelos Avaliadores" da Tabela 4.13, classificando também em ordem crescente o impacto positivo na suportabilidade da frota.

Tabela 4.14 – Ordenação das Alternativas.

Cenário / Fator Logístico Variante	Variação	Soma das Classificações Atribuídas pelos Avaliadores	Ranking de Impacto Positivo na Suportabilidade
Taxa de Falha	-20% Custo de \$ 25 Milhões	9	1º
Cenário Inicial	Não Aplicável	13	2º
Tempo de Manutenção	+10%	17	3º

Observa-se, portanto, que o resultado geral da aplicação deste segundo instrumento de avaliação corresponde ao apresentado na Tabela 4.5, obtido ao final do Teste de Sensibilidade da seção 4.2.3 deste trabalho.

4.4 Discussão

A diversidade de componentes e seus níveis de reparo, a coexistência de diferentes tipos de aeronaves e localidades de operação, bem como a variabilidade das taxas de falha, frequências de manutenção preventiva, tempos efetivos de manutenção, preços, recursos demandados e eventuais atrasos, logísticos ou administrativos, influenciam a suportabilidade de tal maneira que implicam a construção de modelos matemáticos complexos, eventualmente intratáveis de forma manual.

Por outro lado, a atual mudança de paradigma devido ao uso crescente de ferramentas computacionais na engenharia logística, levou à busca por uma solução que já comportasse as vantagens dessas novas tecnologias, o que inspirou o uso de modelagem, otimização, simulação e compilação de custos com o Opus Suite[®].

O desenvolvimento de um modelo de processo representativo e objetivo, esquematizado e descrito em etapas, foi propiciado pela fundamentação teórica acerca do conceito de suportabilidade e dos fatores de confiabilidade e manutenibilidade que a influenciam, aliada à revisão da literatura em busca de trabalhos precedentes na área, abordando conceitos, métodos e ferramentas aplicáveis à solução do problema de pesquisa.

A análise de aderência à literatura demonstrou a abrangência do modelo desenvolvido, de modo que a argumentação realizada destacou a adoção do custo de suporte e da disponibilidade operacional como métricas fundamentais da suportabilidade, bem como considerou a influência de fatores logísticos de confiabilidade e manutenibilidade, relacionados aos elementos do IPS.

Os testes de funcionalidade e de sensibilidade estabeleceram uma prova de conceito para avaliação quantitativa do modelo desenvolvido, voltada à verificação de consistência e coerência, mas com dados genéricos e fictícios, cabendo destacar a alteração no *ranking* dos fatores analisados, ao comparar os resultados obtidos nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Já o estudo de caso, além de manter a natureza quantitativa dos primeiros testes realizados, incorporou um caráter realístico, com dados descaracterizados de uma frota de aeronaves da FAB, para verificar a aplicabilidade em campo.

Logo, em ambos os tipos de experimento foi possível analisar diferentes cenários quanto à melhoria ou degradação da suportabilidade, para ambientes e contextos simulados da fase de serviço, a partir de variações nos fatores analisados. Os arquivos das modelagens no Opus Suite[®] estão disponíveis *on-line*, no endereço <https://www.aerologlab.ita.br/datafiles.html>.

Desta forma, todos os procedimentos de verificação realizados resultaram na confirmação de que o modelo de processo desenvolvido atende aos respectivos requisitos especificados, conforme correlação prevista na Tabela 3.1 do capítulo anterior.

Quanto à avaliação do modelo por especialistas, os resultados também foram favoráveis, pois no primeiro instrumento de avaliação aplicado os participantes apresentaram concordância majoritária em relação ao atendimento dos aspectos abordados, com exceção da oportunidade de melhoria identificada em “clareza na descrição da estrutura e apresentação gráfica”.

Já no segundo instrumento aplicado, o resultado foi o mesmo obtido ao final do Teste de Sensibilidade da seção 4.2.3, destacando-se a sugestão do avaliador B, de que o Cenário Inicial poderia ter sua suportabilidade utilizada como *status quo*, e a crítica do avaliador G, de que se faz necessário mostrar como seriam viáveis as alterações nas taxas de falha e no tempo de manutenção durante a fase de serviço, tendo em vista que esses parâmetros são de projeto.

Conforme sugerido pelo próprio avaliador G, quanto aos fatores de manutenibilidade, uma eventual baixa eficiência da manutenção pode ser trabalhada, de modo a reduzir os tempos demandados nas atividades, mediante melhoria dos processos. Com relação aos fatores de confiabilidade, o especialista apontou a possibilidade de realização de estudos para identificar a existência de unidades com taxas de falha destoantes das demais, conhecidas como "*rogue units*", e assim removê-las do estoque, bem como identificar possíveis questões relacionadas ao ambiente operacional que possam estar contribuindo para uma taxa de falha em campo significativamente maior que a de projeto.

Destaca-se então neste trabalho a relevância de cinco fatores vinculados aos aspectos de confiabilidade ou manutenibilidade, conforme a seguir, de modo que para cada um deles é exemplificada uma atividade correlata que pode impactar positivamente a suportabilidade de uma frota de aeronaves de defesa na fase de serviço:

- Tempo Médio entre Falhas ou Taxa de Falhas: substituição de componentes críticos por alternados disponíveis no mercado, com maiores MTBF e menores taxas de falha, ;
- Tempo Médio entre Manutenções Preventivas: modificações de projeto e alterações no plano de manutenção mediante estudo de confiabilidade;
- Tempo Médio de Manutenções Corretivas e Preventivas: utilização de ferramentas especiais e de acesso digital a publicações técnicas nas oficinas e na linha de manutenção;

- Tempo Médio de Transporte de Material: contratação específica de empresa especializada para o serviço de transporte de material entre operadores, armazéns e oficinas contratadas; e
- Tempo Médio de Atraso Administrativo: implantação da prática de gestão visual e de um sistema computadorizado de gerenciamento da manutenção.

Nesse sentido, uma importante contribuição deste trabalho é a correlação entre variações de fatores logísticos de confiabilidade e manutenibilidade, vinculados aos elementos do IPS, e a suportabilidade de um sistema complexo, em uma visão holística, mas sintetizada pela métrica de custo-efetividade, considerando custo de suporte e disponibilidade operacional.

A natureza de aplicação operacional do trabalho, apresentando a sistematização de um modelo de referência em etapas e a visualização gráfica dos impactos de fatores logísticos na suportabilidade, é aqui destacada como mais uma contribuição, devido à importância do assunto e necessidade de assessoramento a decisões de alto nível.

Assim, entende-se que o modelo proposto é de uso prático, uma vez que além de apresentar uma visão de processo em etapas, também possui uma abordagem baseada em dados de campo para atualização de requisitos e estratégias de suporte, oferecendo um caminho a ser seguido ou integrado aos já existentes, para aumentar a maturidade de suporte ao produto.

Portanto, a partir do modelo desenvolvido neste trabalho, as decisões do gestor ou do gerente de suporte ao produto podem ser baseadas na análise de cenários com dados reais, mediante o emprego de ferramentas computacionais de modelagem e simulação, para corrigir degradações da relação custo-efetividade durante a fase de operação e suporte.

4.5 Considerações Finais do Capítulo

O Capítulo 4 alcançou o ponto mais alto do presente trabalho, com a aplicação da metodologia. Os resultados obtidos foram apresentados de forma a viabilizar uma discussão, balizada quanto à funcionalidade e aplicabilidade do modelo de processo desenvolvido. Assim, o encerramento deste capítulo permite a realização de uma conclusão, exposta no Capítulo 5.

5 Conclusão

Para fechar o ciclo deste trabalho, diante dos resultados e em decorrência da discussão do capítulo anterior, conclui-se que a hipótese formulada é verdadeira e factível, tendo como estratégia uma combinação do Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida, proposto por Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018), com o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor, desenvolvido por Cruyt, Ghobbar e Curran (2014), mas substituindo o modelo matemático dessa segunda técnica pelo Cálculo de Custo-Efetividade explanado por Blanchard (2014), para eliminar subjetividades.

Assim, o problema de pesquisa foi solucionado e a respectiva pergunta geral foi respondida, bem como os objetivos geral e específicos delineados foram atingidos, pois o modelo desenvolvido mostrou-se útil e viável de ser aplicado para classificar fatores logísticos de confiabilidade e manutenibilidade quanto ao impacto na suportabilidade de aeronaves de defesa, de modo a ordená-los em um *ranking* indicativo daqueles que devem ser priorizados na alocação de recursos.

À luz da literatura, foi possível observar que uma abordagem completa de suporte logístico integrado deve sempre levar em consideração aspectos relacionados aos doze Elementos do IPS, sobretudo quando se tratar de assessoramento para a tomada de decisão.

Ficou evidente, ainda, que a aplicação de técnicas de modelagem e simulação a um cenário de suporte logístico, de determinada frota de aeronaves de defesa, contribui para a elevação de seus indicadores de desempenho, especificamente no que diz respeito às métricas de disponibilidade operacional e custo de suporte durante a fase de serviço do ciclo de vida.

5.1 Contribuição Acadêmica

O trabalho mostrou sua contribuição acadêmica mediante a abordagem do modelo proposto de apoio à decisão, relacionado aos elementos do IPS denominados Gerenciamento de Suporte ao Produto (*Product Support Management*) e Suporte Continuado de Engenharia (*Sustaining Engineering*), bem como voltado a gerar um *ranking* de fatores de confiabilidade e manutenibilidade quanto ao impacto na suportabilidade de sistemas aeroespaciais de defesa, de modo a permitir a priorização mais adequada, com o fito de incrementar a eficiência de suporte logístico.

Destaca-se então, como um todo, a importância desta pesquisa no campo da Engenharia Logística para sistemas aeroespaciais, uma vez que visa a aprimorar os meios para que as decisões do gerente de suporte ao produto possam ser baseadas na análise de cenários com dados reais, mediante o emprego de ferramentas computacionais de gerenciamento do ciclo de vida de sistemas complexos.

5.2 Aplicação Operacional

Identifica-se, ainda, uma aplicação operacional deste trabalho durante revisões da solução de suporte a uma frota de aeronaves de defesa, na medida em que o modelo proposto pode ser utilizado como guia de análise e assessoramento em processos decisórios quanto à alocação de recursos, visando à melhoria da suportabilidade, que pode ser expressa pela relação entre as métricas fundamentais de disponibilidade operacional e custo de suporte.

Desta forma, o modelo de processo desenvolvido é passível de expansão para abranger todos os componentes de uma aeronave de defesa, além de estruturas de suporte logístico mais complexas que a utilizada no estudo de caso.

Ademais, embora os testes tenham sido realizados com aeronaves de defesa, entende-se que a sua aplicação é cabível a outros sistemas complexos.

5.3 Sugestões de Trabalhos Futuros

A título de trabalhos futuros, sugere-se a incorporação de componentes descartáveis no modelo, desde que sejam significativos para o custo de suporte em vida e a disponibilidade da frota.

Outra sugestão diz respeito à expansão da análise para horizontes de médio e longo prazo, como por exemplo 15 e 30 anos, respectivamente, para observar eventuais alterações de posicionamento dos fatores logísticos no *ranking* de impacto na suportabilidade, obtido no resultado do estudo de caso deste trabalho, cuja análise limitou-se ao prazo de cinco anos para o cenário inicial e alternativas.

Por fim, sugere-se que níveis percentuais de credibilidade sejam incorporados ao modelo, o que pode resultar na geração de soluções mais robustas para a tomada de decisão na gestão de sistemas aeroespaciais de defesa.

Referências

ABRAHÃO, F. T. M.; MATA FILHO, J. N. ; DUARTE NETO, L. P.; MESQUITA, A. C. P. Development of the AeroLogLabTOOL. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA*, 19., 2019, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Centro de Análises de Sistemas Navais, 2019.

AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE (ASD); AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA (AIA). **SX000i**: International specification for Integrated Product Support (IPS). Issue 3.0. Brussels: ASD / AIA, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSUMPÇÃO, Leandro da Fonseca. **Modelo de referência para avaliação de suportabilidade em aquisições de sistemas complexos de defesa, inspirado no conceito de gêmeos digitais**. 2020. 129 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.

BLANCHARD, B. S. **Logistics engineering and management**. 5th ed. New Jersey: Pearson, 1998.

BLANCHARD, B. S. **Logistics engineering and management**. 6th ed. Harlow: Pearson, 2014. 414 p.

BLANCHARD, B. S.; BLYLER, J. E. **System engineering management**. 5th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 554 p.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico. **TCA 400-2**: Anuário Estatístico da Logística. Rio de Janeiro: Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico, 2014.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico. **TCA 400-2**: Anuário Estatístico da Logística. Rio de Janeiro: Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico, 2018.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico. **TCA 400-2**: Anuário Estatístico da Logística. São Paulo: Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico, 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. **DCA 400-6**: Ciclo de Vida de Sistemas e Materiais da Aeronáutica. Brasília, DF: COMAER, 2007. 75 p.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas. **MD40M-01**: Manual de Boas Práticas para a Gestão do Ciclo de Vida de Sistemas de Defesa. Brasília, DF: Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas, 2020. 177 p.

CHHAJED, D.; LOWE, T. J. (eds.). **Building intuition: insights from basic operations management models and principles**. New York: Springer-Verlag, 2008.

CHITALE, A. K.; GUPTA, R. C. **Product design and manufacturing**. 6th ed. New Delhi: PHI Learning Private, 2013.

CRUYT, L.M.; GHOBBAR, A. A.; CURRAN, R. A Value-based assessment method of the supportability for a new aircraft entering into service. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 63, n. 4, p. 817-829, Dec. 2014.

CURRAN, R. *et. al.* A value operations methodology for value driven design: range passenger airliner validation. *In: AIAA AEROSPACE SCIENCES MEETING INCLUDING THE NEW HORIZONS FORUM AND AEROSPACE EXPO*, 48th., 2010. **Proceedings [...]** Reston: AIAA, 2010.

DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY (DAU). **Integrated Product Support element guidebook**. Fort Belvoir, Virginia: DAU Press, 2011.

DEFENSE SYSTEMS MANAGEMENT COLLEGE (DSMC). **Integrated Logistics Support guide**. Fort Belvoir, VA: DSMC, 1994.

DHILLON, B. S. **Life cycle costing**. Amsterdam: Gordon & Brown Science, 1989.

DUARTE, A. H.; SANTOS, A. C. dos. A gestão do custo do ciclo de vida no desenvolvimento de produtos de defesa nas forças armadas brasileiras. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO*, 12., 2019, Brasília, DF. **Anais [...]** São Paulo: Blucher, 2019.

FIGUEIREDO-PINTO, D. G.; ABRAHÃO, F.T.M. Custo do ciclo de vida: proposta de método de cálculo prospectivo e análise de sensibilidade a fatores de confiabilidade e manutenibilidade. *In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA*, 20., 2018, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA (FAB). Centro de Comunicação Social da Aeronáutica. **A-29 completa 15 anos de operação na FAB**. Brasília: CECOMSAER, 2019. Notícias. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/34766/>. Acesso em: 12 jul. 2023.

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.

HOBDAV, M. Product complexity, innovation and industrial organization. **Research Policy**, v. 26, n. 6, p. 689-710, 1998.

INCOSE. **Systems engineering handbook**. New York: Wiley, 2015.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std 1220–1998**: standard for application and management of the systems engineering process. New York: IEEE Computer Society, 1999.

IRIGON, Alexandre Dias. **Model design recommendations for treating Rogue Units**. 2020. 174 f. Dissertation of master's in science in the Program Space Sciences and Technologies – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2020.

JONES, G. *et al.* Investigation into the ratio of operating and support costs to life-cycle costs for DoD Weapon Systems. **Defense ARJ**, v. 21, n. 1, p. 442-464, 2014.

LAFRAIA, J. R.B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualimark, 2001.

MARQUES, H. C.; ABRAHÃO, F. T. M.; NOGUEIRA FILHO, J.; MOTA, D. C. Amadurecimento da Confiabilidade de Sistemas em Desenvolvimento: Análise de impacto nos custos de aquisição pelas Forças Armadas Brasileiras. *In*: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 2017, São José dos Campos, SP. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017.

NOWLAN, F. S.; HEAP, H. F. **Reliability-centered maintenance**. San Francisco: United Airlines, 1978. 495 p.

O'CONNOR, P. D. T.; KLEYNER, A. **Practical reliability engineering**. 5th ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Son, 2012.

OLIVEIRA, Talitha Cruz de. **Design of a tool for the Integrated Logistics Support development of aerospace complex systems: embryo digital twin**. 2022. 87f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

OLIVIER L. W.; DANIEL R.; MAGEE C. L. **Engineering systems: meeting human needs in a complex technological world**. Cambridge: MIT Press, 2011. 230p.

PRZMIENIECKI, J. S. **Acquisition of defense systems**. Washington, DC: AIAA, 1993.

REBOUÇAS, S.; ABRAHÃO, F.T.M. Planejamento estratégico de programa de manutenção preventiva de aeronaves. *In*: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 21., 2019, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2019.

RUSSEL, S. H. *In*: Supply chain management: more than integrated logistics. **Air Force Journal of Logistics**, v. 31, n. 2, p. 56-63, 2007.

SAE INTERNATIONAL. **RMS: Reliability, Maintainability and Supportability guidebook**. 2nd. ed. Warrendale: SAE International, RMS Committee (G-11), 1992.

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

SILVA, Jardel Figueira. **Aplicação de algoritmo genético e programação de metas no problema de planejamento de manutenção de aeronaves militares**. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Tecnológica) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Tecnológicas Espaciais, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

SOUSA, Jefferson Rodrigues. **Avaliação da alteração do programa de manutenção das Aeronaves A-29 da Força Aérea Brasileira**. 2022. 18 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Logística) – Instituto de Logística da Aeronáutica, Guarulhos, 2022.

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 (Mestrado em Transporte Aéreo e Aeroportos) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2021.

SYSTECON. **Opus Suite 2022**. Stockholm: Systecon, 2022. Disponível em: <https://www.systecongroup.com/gl/opus-suite-rdm>. Acesso em: 18 jun. 2023.

UNITED STATES. Department of Defense. **Operating and support cost-estimating guide**. Washington, DC: Cost Assessment and Program Evaluation, Office of the Secretary of Defense., 2020.

XAVIER, Jônatas Barros. **Ferramenta de gestão visual: instrumento estratégico para o gerenciamento da manutenção em Aeronaves A-29 (Super Tucano)**. 2022. 48 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Potiguar, Natal, 2022.

Apêndice A – Parâmetros dos Componentes das Aeronaves

Este apêndice apresenta os parâmetros básicos dos componentes aeronáuticos selecionados referentes ao estudo de caso do capítulo 4.

Componentes da Aviônica Digital

Item	Sistema da Aeronave	QPA A-29A	QPA A-29B	Taxa de Falha (1/10 ⁶ HV)	Intervalo Manut. Preventiva	Tempo de Reparo (Dias)	Preço de Aquisição (R\$)	Preço Médio do Reparo (R\$)
AV-01	Aviônica	2	2	2407	Não Aplicável (NA)	57	1.053.089,30	150.954,65
AV-02	Aviônica	1	1	1893	NA	61	242.654,72	38.994,20
AV-03	Aviônica	1	1	1385	NA	67	630.752,88	138.210,24
AV-04	Aviônica	1	1	1372	NA	61	146.463,03	18.676,34
AV-05	Aviônica	2	4	1076	NA	50	281.271,34	39.310,90
AV-06	Aviônica	1	1	658	NA	189	956.718,02	230.453,08
AV-07	Aviônica	1	1	1180	NA	50	77.393,65	6.898,52
AV-08	Aviônica	1	1	137	NA	30	94.763,59	31.935,54
AV-09	Aviônica	1	1	137	NA	96	111.327,97	44.653,68
AV-10	Aviônica	5	5	107	NA	47	23.998,83	9.265,18

Componentes do Sistema de Motor

Item	Sistema da Aeronave	QPA A-29A	QPA A-29B	Taxa de Falha (1/10 ⁶ HV)	Intervalo Manut. Preventiva	Tempo de Reparo ou Revisão (Dias)	Preço de Aquisição (R\$)	Preço Médio do Reparo ou Revisão (R\$)
MOT-01	Motor	1	1	381	2.250HV (Inspeção) e 4.500 HV (Revisão)	30 (Reparo e Inspeção) ou 150 (Revisão)	10.331.000,00	350.000,00 (1) 1.000.000,00 (2) 5.000.000,00 (3) (1) – Reparo (2) – Inspeção (3) – Revisão
MOT-02	Motor	1	1	177	300 HV	222	1.094.175,74	218.835,15
MOT-03	Motor	1	1	89	NA	178	706.077,72	141.215,54
MOT-04	Motor	1	1	200	1.500 HV	73	116.547,42	23.309,48
MOT-05	Motor	1	1	124	300 HV	198	126.734,97	25.346,99
MOT-06	Motor	1	1	620	NA	226	57.416,44	11.483,29
MOT-07	Motor	1	1	124	300 HV	174	469.750,98	93.950,20

Componentes dos Diversos Sistemas

Item	Sistema da Aeronave	QPA A-29A	QPA A-29B	Taxa de Falha (1/10 ⁶ HV)	Intervalo Manut. Preventiva	Tempo de Reparo ou Revisão (Dias)	Preço de Aquisição (R\$)	Preço Médio do Reparo ou Revisão (R\$)
PSLI-01	Comunicação	1	1	1.613	Não Aplicável (NA)	78	1.088.112,58	217.622,52
PSLI-02	Combustível	5	4	1.406	1.500 HV	121	121.540,75	24.308,15
PSLI-03	Combustível	1	0	689	10 Anos	200	2.431.814,09	486.362,82
PSLI-04	Navegação	1	2	806	NA	166	290.096,34	58.019,27
PSLI-05	Hélices	1	1	886	3.000 HV ou 5 Anos	65	451.161,07	90.232,21
PSLI-06	Hidráulico	1	1	922	1.200 HV	81	217.572,77	43.514,55
PSLI-07	Indicação	1	1	514	5 Anos	186	476.899,67	95.379,93
PSLI-08	Elétrico	1	1	2.074	1.000 HV ou 4 Anos	72	195.912,69	39.182,54
PSLI-09	Comunicação	1	1	284	NA	131	420.161,87	84.032,37
PSLI-10	Trem de Pouso	1	1	301	5.000 Pousos ou 6 Anos	231	390.693,37	78.138,67
PSLI-11	Trem de Pouso	2	2	1.196	NA	99	126.815,09	25.363,02
PSLI-12	Controles de Voo	1	1	603	NA	169	264.908,02	52.981,60
PSLI-13	Trem de Pouso	1	1	284	NA	119	357.572,18	71.514,44
PSLI-14	Trem de Pouso	2	2	2.029	NA	75	62.694,04	12.538,81
PSLI-15	Oxigênio	1	1	762	4.800 HV	136	189.563,52	37.912,70
PSLI-16	Controles de Voo	1	1	1.436	NA	165	100.256,05	20.051,21
PSLI-17	Ar-Condicionado	1	1	106	NA	200	1.257.889,23	251.577,85
PSLI-18	Piloto Automático	1	1	248	NA	179	510.706,01	102.141,20
PSLI-19	Oxigênio	1	2	216	NA	258	340.983,54	68.196,71
PSLI-20	Comunicação	1	1	230	NA	166	337.196,09	67.439,22
PSLI-21	Controles do Motor	1	1	266	NA	200	291.291,33	58.258,27
PSLI-22	Sangria de Ar	2	2	443	NA	136	85.470,12	17.094,02
PSLI-23	Elétrico	1	1	1.772	02 Anos	122	63.529,40	12.705,88

PSLI-24	Trem de Pouso	1	1	213	5.000 Pousos ou 6 Anos	200	318.197,18	63.639,44
PSLI-25	Trem de Pouso	1	1	496	NA	83	207.570,81	41.514,16
PSLI-26	Navegação	1	1	620	NA	127	165.486,14	33.097,23
PSLI-27	Hidráulico	1	1	284	NA	139	219.669,96	43.933,99
PSLI-28	Trem de Pouso	1	1	301	5.000 Pousos ou 6 Anos	199	181.910,73	36.382,15
PSLI-29	Trem de Pouso	1	1	195	5.000 Pousos ou 6 Anos	156	257.444,18	51.488,84
PSLI-30	Controles de Voo	1	1	673	NA	189	111.429,70	22.285,94
PSLI-31	Trem de Pouso	1	1	160	5.000 Pousos ou 6 Anos	161	291.390,25	58.278,05
PSLI-32	Oxigênio	1	2	1.318	4.800 HV	121	30.834,47	6.166,89
PSLI-33	Hidráulico	1	1	301	4.000 HV	166	222.607,22	44.521,44
PSLI-34	Indicação	1	2	346	NA	118	108.147,13	21.629,43
PSLI-35	Ar-Condicionado	1	1	496	NA	50	117.590,54	23.518,11
PSLI-36	Elétrico	1	1	106	NA	166	350.405,21	70.081,04
PSLI-37	Trem de Pouso	1	1	142	5.000 Pousos ou 6 Anos	158	257.630,14	51.526,03
PSLI-38	Trem de Pouso	1	1	53	NA	189	675.198,26	135.039,65
PSLI-39	Sangria de Ar	1	1	177	NA	189	287.327,17	57.465,43
PSLI-40	Trem de Pouso	1	1	177	5.000 Pousos ou 6 Anos	182	174.968,24	34.993,65
PSLI-41	Navegação	1	2	378	NA	130	76.026,55	15.205,31
PSLI-42	Comunicação	1	2	616	NA	138	46.653,97	9.330,79
PSLI-43	Navegação	1	1	868	NA	53	91.547,18	18.309,44
PSLI-44	Navegação	1	1	479	NA	130	92.785,45	18.557,09
PSLI-45	Portas	1	1	160	NA	135	173.909,99	34.782,00
PSLI-46	Portas	2	2	133	NA	127	103.838,28	20.767,66
PSLI-47	Navegação	1	1	425	NA	63	175.265,11	35.053,02
PSLI-48	Ar-Condicionado	1	1	142	NA	121	280.306,32	56.061,26

PSLI-49	Controles de Voo	2	2	354	2.000 HV ou 5 Anos	136	54.838,86	10.967,77
PSLI-50	Hidráulico	1	1	922	NA	89	38.061,88	7.612,38
PSLI-51	Trem de Pouso	1	1	1.914	NA	66	31.450,51	6.290,10
PSLI-52	Controles de Voo	1	1	390	NA	131	85.716,26	17.143,25
PSLI-53	Combustível	1	1	89	NA	203	226.905,44	45.381,09
PSLI-54	Comunicação	1	1	337	NA	52	147.275,48	29.455,10
PSLI-55	Controles de Voo	1	2	400	NA	229	43.036,57	8.607,31
PSLI-56	Hidráulico	1	1	106	NA	122	134.823,53	26.964,71
PSLI-57	Hidráulico	1	1	106	NA	114	132.225,49	26.445,10
PSLI-58	Elétrico	1	1	18	NA	166	747.845,65	149.569,13
PSLI-59	Comunicação	1	1	124	NA	61	278.746,19	55.749,24
PSLI-60	Combustível	1	1	18	NA	344	688.394,87	137.678,97
PSLI-61	Hidráulico	1	1	35	NA	210	290.317,84	58.063,57
PSLI-62	Indicação	1	1	408	NA	135	39.408,17	7.881,63

Apêndice B – Lista de Itens do Estoque de Giro

Este apêndice apresenta a lista de itens do estoque de giro para o ponto que atende ao requisito inicial de disponibilidade (65%) com menor custo de suporte, na curva de custo-efetividade para o cenário inicial, referente ao estudo de caso do capítulo 4.

Tamanho e Alocação do Estoque

Item	Estoque Total	Quantidade por Estação					
		1º/3º GAV	2º/3º GAV	3º/3º GAV	2º/5º GAV	EDA	PAMA
AV-01	41	4	4	4	5	2	22
AV-02	25	3	3	3	4	2	10
AV-03	16	2	2	2	2	1	7
AV-04	22	3	3	3	3	2	8
AV-05	37	4	4	4	6	2	17
AV-06	12	1	1	1	1		8
AV-07	21	3	3	3	3	2	7
AV-08	6	1	1	1	1	1	1
AV-09	7	1	1	1	1	1	2
AV-10	15	2	2	2	3	2	4
MOT-01	0						
MOT-02	44	1	1	1	1		40
MOT-03	2						2
MOT-04	9	1	1	1	1	1	4
MOT-05	42	1	1	1	1	1	37
MOT-06	16	1	1	1	1	1	11
MOT-07	37	1	1	1	1	1	32
PSLI-01	8						8
PSLI-02	78	3	3	3	3	2	64
PSLI-03	3				-		3
PSLI-04	18	1	1	1	1		14
PSLI-05	11	1	1	1	1	1	6
PSLI-06	14	1	1	1	1	1	9
PSLI-07	17	1	1	1	1		13
PSLI-08	21	1	1	1	2	1	15
PSLI-09	4						4
PSLI-10	14				1		13
PSLI-11	23	1	1	1	2	1	17
PSLI-12	11	1	1	1	1		7
PSLI-13	4						4
PSLI-14	32	2	2	2	3	2	21
PSLI-15	14	1	1	1	1	1	9
PSLI-16	22	1	1	1	1	1	17

PSLI-17	1						1
PSLI-18	4						4
PSLI-19	7						7
PSLI-20	4						4
PSLI-21	5						5
PSLI-22	15	1	1	1	1	1	10
PSLI-23	37	2	2	2	2	1	28
PSLI-24	14	1	1	1	1	1	9
PSLI-25	5						5
PSLI-26	11	1	1	1	1	1	6
PSLI-27	4						4
PSLI-28	16	1	1	1	1	1	11
PSLI-29	12	1	1	1	1	1	7
PSLI-30	14	1	1	1	1	1	9
PSLI-31	9				1		8
PSLI-32	30	2	2	2	3	1	20
PSLI-33	7						7
PSLI-34	10	1	1	1	1	1	5
PSLI-35	7	1	1	1	1	1	2
PSLI-36	2						2
PSLI-37	11	1	1	1	1	1	6
PSLI-38	1						1
PSLI-39	4						4
PSLI-40	13	1	1	1	1	1	8
PSLI-41	12	1	1	1	1	1	7
PSLI-42	17	1	1	1	2	1	11
PSLI-43	9	1	1	1	1	1	4
PSLI-44	10	1	1	1	1	1	5
PSLI-45	3						3
PSLI-46	7	1	1	1	1		3
PSLI-47	4						4
PSLI-48	2						2
PSLI-49	25	1	1	1	2	1	19
PSLI-50	13	1	1	1	1	1	8
PSLI-51	19	2	2	2	2	1	10
PSLI-52	9	1	1	1	1	1	4
PSLI-53	3						3
PSLI-54	3						3
PSLI-55	17	1	1	1	1	1	12
PSLI-56	2						2
PSLI-57	2						2
PSLI-58	0						
PSLI-59	1						1
PSLI-60	1						1
PSLI-61	1						1
PSLI-62	10	1	1	1	1	1	5

Apêndice C – Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade

Este apêndice apresenta os fatores de confiabilidade e manutenibilidade pós-variação, referentes ao estudo de caso do capítulo 4.

Itens Envolvidos e Respectivas Taxas de Falha Pós-Variação

Item	Nova Taxa de Falha (1/10⁶ HV)	Item	Nova Taxa de Falha (1/10⁶ HV)
AV-06	439	PSLI-31	126
AV-08	103	PSLI-35	662
AV-09	91	PSLI-36	80
PSLI-01	269	PSLI-37	112
PSLI-02	4.923	PSLI-38	42
PSLI-03	2.412	PSLI-40	140
PSLI-04	538	PSLI-41	252
PSLI-08	1.555	PSLI-42	103
PSLI-09	47	PSLI-43	579
PSLI-10	238	PSLI-44	319
PSLI-11	944	PSLI-45	128
PSLI-12	402	PSLI-46	106
PSLI-13	224	PSLI-47	284
PSLI-14	1.602	PSLI-48	189
PSLI-16	957	PSLI-49	236
PSLI-17	142	PSLI-51	1.511
PSLI-20	38	PSLI-52	260
PSLI-23	1.329	PSLI-53	310
PSLI-24	168	PSLI-54	56
PSLI-25	392	PSLI-55	267
PSLI-26	414	PSLI-58	13
PSLI-28	238	PSLI-59	21
PSLI-29	154	PSLI-60	62
PSLI-30	449		

Redução dos Tempos Médios de Atraso Administrativo

<u>Atividade</u>	<u>Gestão Tradicional</u>		<u>Gestão Visual</u>	
	Tempo de Indisponibilidade da Aeronave (Dias)	Atraso Administrativo (Horas)	Tempo de Indisponibilidade da Aeronave (Dias)	Atraso Administrativo (Horas)
Check A	17,7	364,8	12,8	247,2
Check Y	2,5	40	1	4
Troca do Motor	3	48	2	24

Custos da Redução do Tempo Médio de Transporte de Itens Aviônicos (de 45 para 7 dias)

Item	Preço Unitário de Transporte (Frete + Seguro)
AV-01	R\$ 3744,51
AV-02	R\$ 890,37
AV-03	R\$ 2392,93
AV-04	R\$ 490,37
AV-05	R\$ 892,80
AV-06	R\$ 5512,66
AV-07	R\$ 606,20
AV-08	R\$ 795,93
AV-09	R\$ 909,17
AV-10	R\$ 617,30

Itens Envolvidos e Respectiveos Tempos de Reparo e Revisão Reduzidos

Item	Tempo de Reparo ou Revisão (Dias)	Item	Tempo de Reparo ou Revisão (Dias)
MOT-01	90 (Apenas Revisão)	PSLI-28	166
MOT-02	166	PSLI-30	106
MOT-03	166	PSLI-32	106
MOT-05	166	PSLI-33	106
MOT-06	166	PSLI-34	106
MOT-07	166	PSLI-38	166
PSLI-03	166	PSLI-39	106
PSLI-07	106	PSLI-40	166
PSLI-08	61	PSLI-41	106
PSLI-10	166	PSLI-42	106
PSLI-11	61	PSLI-44	106
PSLI-12	106	PSLI-47	61
PSLI-14	61	PSLI-48	106
PSLI-15	106	PSLI-49	106
PSLI-16	106	PSLI-51	61
PSLI-17	106	PSLI-52	106
PSLI-18	106	PSLI-53	166
PSLI-19	106	PSLI-55	106
PSLI-21	166	PSLI-60	166
PSLI-23	106	PSLI-61	166
PSLI-24	166	PSLI-62	106
PSLI-26	106		

Apêndice D – *Curriculum Vitae* dos Especialistas

Este apêndice apresenta o *Curriculum Vitae* dos participantes da avaliação do modelo de processo desenvolvido neste trabalho.

Os dados pessoais confiados estão sob a responsabilidade do autor, sendo garantido o anonimato dos participantes.

A ordem de apresentação não obedece a nenhum critério específico, não dá importância às respostas dos participantes e foi transcrita tal como informada, com descaracterização dos dados pessoais.

D.1 Participante A

Formação Acadêmica

- Graduação em Engenharia Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2003);
- Curso de Engenheiro de Ensaios em Voo, Modalidade Asa Fixa, no Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (2004);
- Especialização em Confiabilidade Industrial pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2013);
- Mestrado em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica, pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2018).

Atuação Profissional

- Engenheiro de Ensaios em Voo de asa fixa, no Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo, de 2004 a 2009;
- Assessor Técnico da frota de aeronaves T-25 Universal da Força Aérea Brasileira, no Parque de Material Aeronáutico de Lagoa Santa, de 2010 a 2015;
- Chefe da Subdivisão de Consultoria Logística no Instituto de Logística da Aeronáutica, de 2018 a 2020;
- Chefe da Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento no Instituto de Logística da Aeronáutica, em 2021;
- Chefe da Seção de Logística do Grupo de Acompanhamento e Controle na empresa SAAB, organização vinculada à Comissão Coordenadora do Programa Aeronave de Combate da Força Aérea Brasileira, para assuntos relacionados ao Projeto F-39 Gripen, desde abril de 2022 até a presente data.

D.2 Participante B

Formação Acadêmica

- Graduação em Ciências Navais pela Escola Naval, com habilitação em Administração de Sistemas (2009);
- Especialização em Gestão Pública pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2014);
- Mestrado em Gestão do Suporte Logístico pela Naval Postgraduate School (2022).

Atuação Profissional

- Experiência de dois anos embarcado na Fragata Independência (2010 e 2011);
- Encarregado da Divisão de Licitações e Contratos no Instituto de Pesquisas da Marinha, de 2012 a janeiro de 2014;
- Adjunto de Compensação e Cooperação Industrial do Grupo de Acompanhamento e Controle na empresa Helibras, do Projeto H-XBR (helicópteros H225M adquiridos para as Forças Armadas Brasileiras), de setembro de 2015 até julho de 2021;
- Chefe do Departamento de Administração do Centro de Munição da Marinha, desde janeiro de 2023 até a presente data.

D.3 Participante C

Formação Acadêmica

- Graduação em Engenharia Aeronáutica pela Universidade de Taubaté (2011);
- Mestrado em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura Aeronáutica, na Área de Transporte Aéreo e Aeroportos, pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2021).

Atuação Profissional

- Engenheiro de Suporte ao Cliente na empresa Embraer S.A., atuando no planejamento de peças de reposição para a Aviação Comercial, de janeiro de 2012 a dezembro de 2014;
- Engenheiro de Suporte ao Cliente na Embraer S. A., atuando no planejamento de peças de reposição, no programa da aeronave E2, de janeiro de 2015 a março de 2018;
- Gerente de Suporte Logístico Integrado e Analista de Logística, na empresa Saab, em Linköping, Suécia), realizando *on-the-job training* no Programa Gripen E/F, de abril de 2018 a julho de 2018;
- Engenheiro de Suporte ao Cliente na Embraer S. A., atuando no planejamento de peças de reposição dos programas KC-390, A-29 e F-X2, de março de 2018 a fevereiro de 2021;

- Gerente de Planejamento de Material de Defesa, na Embraer S. A., de fevereiro de 2021 a dezembro de 2022;
- Gerente de Engenharia de Suporte e Recomendação de Material, na área de Defesa e Segurança, na empresa Embraer S. A., de janeiro de 2023 até a presente data.

D.4 Participante D

Formação Acadêmica

- Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Fluminense (1987);
- Estágio de Adaptação de Oficiais Engenheiros da Aeronáutica, no Centro de Instrução Especializada da Aeronáutica (1989);
- Especialização em Logística pela Universidade Federal Fluminense (2007).

Atuação Profissional

- Chefe da Oficina de Revisão de Motores e do Banco de Provas de Motores, no Parque de Material Aeronáutico de São Paulo;
- Engenheiro Responsável Técnico dos Motores Curtiss-Wright R 1820, Allison 250 C20 e C20F, Lycoming T-53-L-13B e Turbomeca Ariel 1B, do Parque de Material Aeronáutico de São Paulo;
- Chefe da Oficina de Componentes Rotativos de Helicópteros, no Parque de Material Aeronáutico dos Afonsos (Rio de Janeiro – RJ);
- Engenheiro Responsável Técnico pelas Aeronaves Helibrás Esquilo Mono-Turbina (H-50), Helibrás Esquilo Bi-Turbina (CH-55), Eurocopter Super Puma (V/CH-34), Bell UH-1H (H-1H), Bell Jet Ranger (UH-4) e Helibrás EC 135 (VH-35), no Parque de Material Aeronáutico dos Afonsos;
- Chefe da Subdivisão de Engenharia do Parque de Material Aeronáutico dos Afonsos;
- Assessor Técnico de Suporte Logístico no Grupo de Acompanhamento e Controle junto à Eurocopter France, em Marignane – França;
- Gerente Logístico dos Projetos H-34, H-1H, AH-2 e H-36 (respectivamente Eurocopter Super Puma, Bell UH-1H, Mi-35 e Eurocopter EC-725), na Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico (Rio de Janeiro – RJ);
- Chefe da Divisão de Organização e Normatização da Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico;
- Atualmente é Diretor Vice-Presidente da Associação Brasileira de Manutenção Aeronáutica.

D.5 Participante E

Formação Acadêmica

- Graduação em Engenharia Elétrica - Sistemas de Potência e Eletrotécnica, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1986).

Atuação Profissional

- Experiência de 30 anos na área de Engenharia Aeronáutica, com ênfase em Engenharia de Manutenção de Aeronaves Comerciais, Executivas e de Defesa;
- Realizou Curso de Confiabilidade pela Associação Brasileira de Manutenção e Cursos de Sistemas das seguintes aeronaves Embraer: EMB-120, AMX, EMB-312, ERJ145, ERJ 170;
- Atualmente é Engenheiro de Desenvolvimento do Produto, na empresa Embraer S.A., responsável pela Tecnologia de Manutenibilidade e atuando nos seguintes projetos: Implantação da Gestão do Conhecimento na Engenharia, Harmonização e Melhoria de Processos da Engenharia de Manutenção de Aeronaves e Gestão da Capacitação e Prontidão Técnica;
- Atualmente também é Coordenador e Mentor da Carreira de *Design for Maintainability*, no Programa de Especialização Embraer (PEE Mestrado Profissional Embraer - ITA), na Área de Engenharia de Manutenção e Suporte Técnico Aeronáutico.

D.6 Participante F

Formação Acadêmica

- Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Londrina (2018);
- Curso de Formação de Oficiais da Marinha do Brasil (2018);
- Mestrado Profissional em Engenharia Aeronáutica, área de Sistemas Aeronáuticos, pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2022).

Atuação Profissional

- Encarregado da Seção de Manutenção e Reparo de Embarcações na Base Naval do Rio de Janeiro, de janeiro de 2019 a janeiro de 2020;
- Engenheiro na Seção Técnica do Escritório de Gestão Logística do Projeto H-XBR (helicópteros H225M adquiridos para as Forças Armadas Brasileiras), desde agosto de 2022 até a presente data.

D.7 Participante G

Formação Acadêmica

- Graduação em Engenharia Eletrônica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2005);
- Extensão Universitária em Logística, pela Universidade do Sul de Santa Catarina (2010).
- Especialização em Gestão Pública, pela Universidade da Força Aérea (2014);
- Mestrado em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica, pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2018).

Atuação Profissional

- Assessor Técnico da frota de aeronaves A-29 Super Tucano da Força Aérea Brasileira, no Parque de Material Aeronáutico de Lagoa Santa, de 2010 a 2016;
- Chefe da Subdivisão de Aeronavegabilidade Continuada, na Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico (São Paulo – SP), 2019 até a presente data;
- Adjunto da Divisão de Engenharia de Manutenção, na Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico (São Paulo – SP), de janeiro de 2023 até a presente data.

D.8 Participante H

Formação Acadêmica

- Bacharel em Aplicações Militares pela Academia Militar das Agulhas Negras (1999);
- Mestrado em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica, no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2020).

Atuação Profissional

- Gestor de Operação Aeroportuária e Segurança do Comando de Aviação do Exército, de 2016 a 2018;
- Servindo no Comando de Aviação do Exército, desde março de 2021 até a presente data.

Apêndice E – Formulários de Avaliação do Modelo

Este apêndice apresenta os formulários de avaliação do modelo de processo desenvolvido no presente trabalho, cujos resultados da aplicação encontram-se no capítulo 4.

Formulário de Avaliação por Especialistas (1ª Etapa). Suportabilidade de Aeronaves de Defesa: Modelo de Processo para Avaliação dos Impactos de Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade na Fase de Serviço.

Olá, sou o Capitão Lucas Martins, aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

Convido o(a) senhor(a) a participar desta 1ª etapa da avaliação de um modelo de processo proposto, que tem por finalidade identificar a ordem classificatória dos fatores de confiabilidade e manutenibilidade quanto ao impacto que exercem na suportabilidade de aeronaves de defesa, em determinado contexto da fase operacional do ciclo de vida.

O tempo estimado para ler as instruções e preencher este formulário de avaliação é de 15 minutos.

Desde já, agradeço sua disponibilidade e contribuição.

Lucas Sales Martins - Cap Eng Mec
e-mail: lucas.sales.martins@gmail.com

Esclarecimentos

I - Dados sobre o Trabalho de Conclusão de Curso

Tema do Trabalho: Suportabilidade de Aeronaves de Defesa: Modelo de Processo para Avaliação dos impactos de Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade.

Pesquisador/Aluno Responsável: Lucas Sales Martins - Cap Eng Mec.

Prof. Orientador: Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão - Cel Av R1.

Instituição: Programa de Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

II - Registro das Explicações do Pesquisador/Aluno aos Avaliadores

Justificativa da Avaliação: Obter resultados que forneçam subsídios para análise e discussão a respeito do modelo de processo desenvolvido.

Objetivo: O objetivo desta avaliação é registrar a impressão de especialistas sobre o modelo de processo proposto, no que diz respeito aos aspectos de clareza na descrição da estrutura, apresentação gráfica, aderência à literatura, coerência com a finalidade a que se propõe, funcionalidade, aplicabilidade e relevância.

Procedimentos: Preencher o formulário seguindo as instruções nele contidas.

Desconfortos e Riscos: As informações coletadas neste formulário serão utilizadas estritamente para fins acadêmicos. O risco será mínimo para os participantes, podendo haver apenas algum incômodo referente à dedicação do tempo necessário para o preenchimento do questionário. Caso não tenha interesse em concluir a avaliação, sintase totalmente à vontade para interromper o preenchimento, cancelando assim a sua contribuição. O participante poderá ainda, quando quiser, contatar o pesquisador/aluno responsável pelo formulário de avaliação para obter novas informações ou esclarecer quaisquer dúvidas, pelo e-mail lucas.sales.martins@gmail.com.

Benefícios Esperados: O(A) senhor(a) não terá nenhum benefício com a participação nesta avaliação.

E-mail *

Seu e-mail

Registro da Área de Conhecimento/Experiência e Grau de Escolaridade dos Avaliadores

Qual a sua área de conhecimento/experiência?

- Aquisição de Sistemas Complexos de Defesa
- Gestão da Operação de Sistemas Complexos de Defesa
- Logística de Sistemas Complexos de Defesa
- Desenvolvimento de Sistemas Complexos de Defesa
- Gestão da Manutenção de Sistemas Complexos de Defesa

Qual o seu grau de escolaridade?

- Graduação
- Pós-Graduação Lato Sensu
- Mestrado (Acadêmico ou Profissional)
- Doutorado
- Pós-Doutorado

Contextualização

A suportabilidade é definida por Blanchard (2014) como o grau em que um sistema pode ser efetivamente suportado, tanto em termos das características de projeto dos principais componentes relacionados à sua missão, quanto em termos dos aspectos da infraestrutura geral de suporte.

Referência:

BLANCHARD, B. S. **Logistics Engineering and Management**. Sixth edition. Harlow: Pearson Education Limited, 2014.

A tabela a seguir ilustra eventuais relacionamentos de alguns fatores de confiabilidade e manutenibilidade aos elementos do Suporte Integrado do Produto, inspirada na abordagem do Guia SX000i, *International specification for Integrated Product Support (IPS)*, edição 3.0 (2021), disponível em www.sx000i.org.

Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade Versus Elementos do IPS.

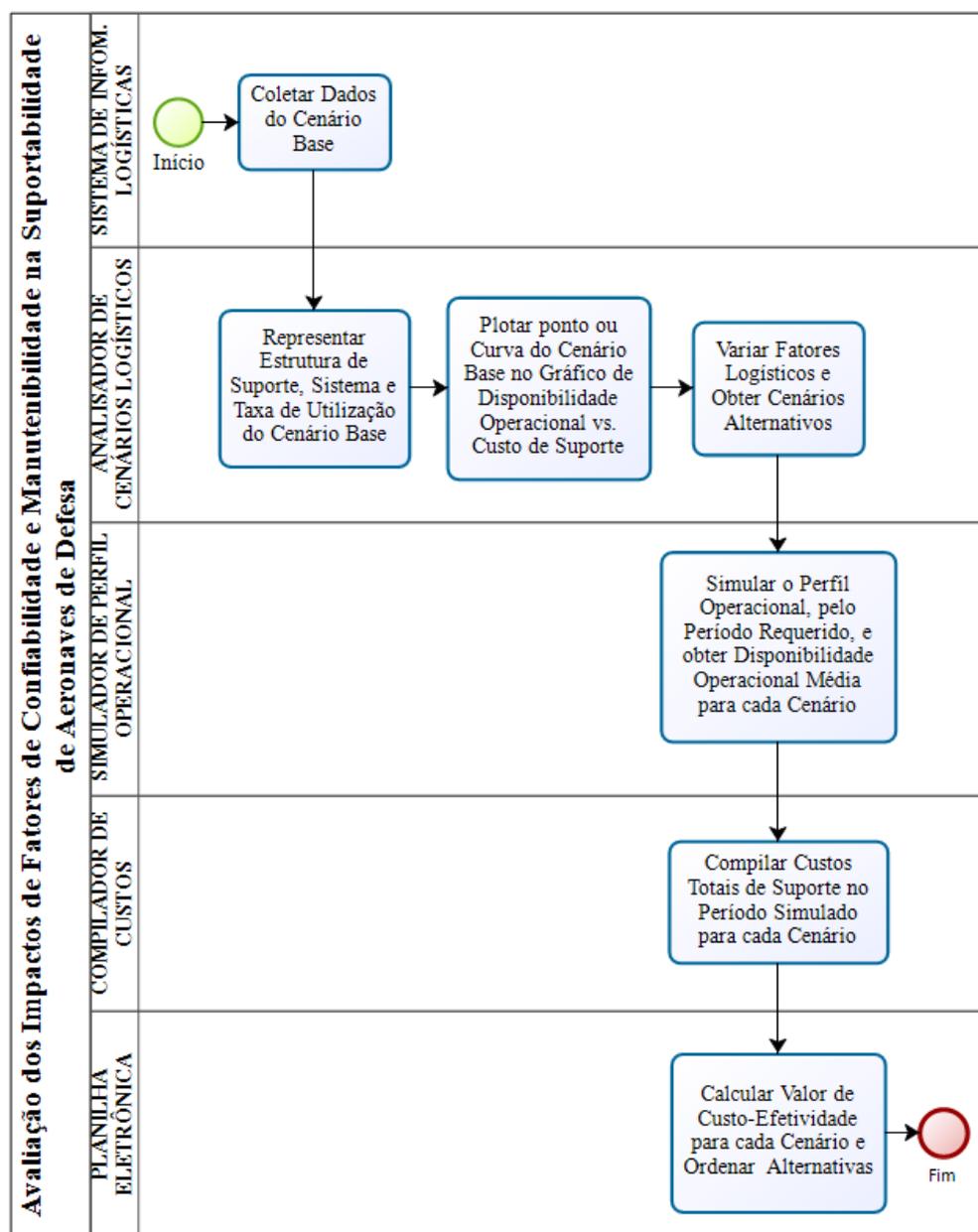
Elementos do IPS	Fatores Logísticos				
	Confiabilidade		Manutenibilidade		
	Tempo Médio entre Falhas	Tempo Médio entre Manutenções Preventivas	Tempo Médio de Manutenções Corretivas e Preventivas	Tempo Médio de Transporte de Material	Tempo Médio de Atraso Administrativo
Manutenção		X	X		X
Suprimento				X	X
Operações Logísticas				X	X
Gestão de Suporte ao Produto	X	X	X	X	X
Dados Técnicos		X	X		X
Suporte Cont. de Engenharia	X	X	X		X
Recursos Computacionais			X	X	X
Influência do Design	X	X	X	X	
Equipamentos de Suporte	X		X		X
Instalações e Infraestrutura			X		
Pessoal e Mão de Obra			X		X
Treinamento			X		X

Apresentação do Modelo de Processo Proposto

O modelo de processo proposto consiste na análise comparativa entre um cenário de referência e projeções de cenários alternativos, decorrentes de variações controladas em determinados fatores logísticos, para viabilizar o cálculo dos respectivos valores de custo-efetividade e a elaboração de um *ranking* dos fatores analisados quanto ao impacto na suportabilidade do sistema.

A figura em anexo apresenta o fluxograma do modelo desenvolvido no presente estudo, formando uma sequência lógica de implementação.

Fluxograma do Modelo de Processo



A seguir, é apresentada uma descrição detalhada de cada passo do modelo.

O primeiro passo é a coleta de dados do cenário base em sistema apropriado de informações logísticas da aeronave. Assim, devem ser considerados três importantes conjuntos de informações, quais sejam: Características do Sistema; Estrutura de Suporte Logístico e Informações de Operação.

O segundo passo é a representação computacional do cenário base em um analisador de cenários. Nesta representação, as Características do Sistema correspondem a parâmetros de projeto, como variantes do produto, elementos estruturais, dados de confiabilidade, preços e requisitos de manutenção associados aos componentes e subsistemas. A Estrutura de Suporte Logístico diz respeito à arquitetura formada por bases operacionais, armazéns ou estoques, oficinas, seus respectivos recursos e capacidades de manutenção, bem como a dinâmica logística envolvida, como por exemplo os tempos e custos de transporte e reparo ou revisão dos itens. Em complemento, as Informações de Operação refletem os parâmetros de quantidade e alocação das aeronaves, bem como a taxa de utilização no horizonte de tempo requerido.

O terceiro passo, também no analisador de cenários, inclui a plotagem determinística de um ponto que reflete determinado estoque de giro inicial, ou ainda, de uma curva no gráfico de disponibilidade operacional versus custo de suporte, na qual todos os pontos são soluções ótimas, ou seja, com máxima efetividade de custo. No caso da curva de máxima efetividade de custo, deve-se realizar a escolha do ponto que atende ao requisito de disponibilidade operacional. A este ponto corresponde uma lista específica de itens para compor o estoque de giro, com as respectivas quantidades e locais de armazenamento.

O quarto passo, ainda no mesmo ambiente, requer a indução de variações controladas em fatores de confiabilidade e manutenibilidade, sendo um por vez, mantendo-se os demais parâmetros, para obter novos pontos de custo-efetividade com o mesmo estoque inicial ou novas curvas de máxima efetividade de custo, que em ambos os casos representam cenários alternativos. Nesta segunda opção, observando-se o requisito de disponibilidade operacional.

O quinto passo deve ocorrer em um simulador de perfil operacional, levando em consideração a sazonalidade e o dinamismo das missões, de modo a obter a média de disponibilidade operacional nesse período e a sua variação em função do tempo.

O sexto passo requer um compilador de custos, pois consiste na soma dos custos totais de suporte para cada cenário no período requerido, considerando as simulações realizadas.

Finalizando, o sétimo passo é o cálculo do valor de Custo-Efetividade em planilha eletrônica, para cada cenário, em termos de custo de suporte e disponibilidade operacional, conforme Equação 1 adaptada de Blanchard (2014), bem como a classificação das alternativas em um *ranking* segundo o impacto que exercem na suportabilidade da frota.

$$\text{Custo-Efetividade} = \text{Disponibilidade Operacional/Custo de Suporte} \quad (1)$$

Desta forma, a função objetivo para apoiar a tomada de decisão corresponde à maximização do valor de Custo-Efetividade.

Avaliação do Modelo de Processo Proposto

Sobre as afirmativas seguintes, de acordo com o seu grau de concordância, assinale o item a sua escolha na escala de 1 a 5, em que:

- 1 - Discordo totalmente
- 2 - Discordo parcialmente
- 3 - Não concordo nem discordo
- 4 - Concordo parcialmente
- 5 - Concordo totalmente

1. O modelo de processo apresentado é de fácil entendimento quanto à sua estrutura e apresentação gráfica.

- 1 - Discordo totalmente
- 2 - Discordo parcialmente
- 3 - Não concordo nem discordo
- 4 - Concordo parcialmente
- 5 - Concordo totalmente

2. A estrutura e as atividades previstas do modelo estão em conformidade com a literatura acadêmica, especialmente no que diz respeito à avaliação da influência de fatores de confiabilidade e manutenibilidade no suporte a sistemas complexos.

- 1 - Discordo totalmente
- 2 - Discordo parcialmente
- 3 - Não concordo nem discordo
- 4 - Concordo parcialmente
- 5 - Concordo totalmente

3. O modelo apresentado abrange todos os aspectos relevantes para avaliar a suportabilidade de uma frota de aeronaves de defesa sob a influência de fatores de confiabilidade e manutenibilidade.

- 1 - Discordo totalmente
- 2 - Discordo parcialmente
- 3 - Não concordo nem discordo
- 4 - Concordo parcialmente
- 5 - Concordo totalmente

4. Quanto à sua estrutura e às atividades previstas, o modelo de processo apresentado é coerente com a finalidade a que se propõe.

- 1 - Discordo totalmente
- 2 - Discordo parcialmente
- 3 - Não concordo nem discordo
- 4 - Concordo parcialmente
- 5 - Concordo totalmente

5. O modelo proposto é aplicável a processos de avaliação da suportabilidade de aeronaves de defesa quando há variações em fatores de confiabilidade e manutenibilidade.

- 1 - Discordo totalmente
- 2 - Discordo parcialmente
- 3 - Não concordo nem discordo
- 4 - Concordo parcialmente
- 5 - Concordo totalmente

6. Caso seja aplicado no caso real de uma frota de aeronaves de defesa, este modelo de processo poderá contribuir para robustecer a análise de cenários alternativos e apoiar a tomada de decisão quanto à alocação de recursos, trazendo ganhos para a suportabilidade do sistema.

1 - Discordo totalmente

2 - Discordo parcialmente

3 - Não concordo nem discordo

4 - Concordo parcialmente

5 - Concordo totalmente

Caso deseje, o campo abaixo está disponível para o(a) senhor(a) expressar livremente suas impressões a respeito do modelo de processo apresentado.

Sua resposta _____

[Voltar](#) [Enviar](#) [Limpar formulário](#)

Google Formulários

Texto de E-mail Enviado aos Participantes da Avaliação – 2ª Etapa

Prezado(a) Senhor(a),

Convido-o(a) a participar desta avaliação de um modelo de processo proposto, o qual tem por finalidade identificar a ordem classificatória dos fatores de confiabilidade e manutenibilidade quanto ao impacto que exercem na suportabilidade de aeronaves de defesa, em determinado contexto da fase operacional do ciclo de vida.

O tempo estimado para ler as instruções e preencher o formulário em Excel desta 2ª (e última) etapa da avaliação é de aproximadamente 20 minutos.

Anexos a esta mensagem encontram-se os seguintes arquivos:

- Apresentação do Modelo de Processo;
- Aplicação do Modelo de Processo ao Estudo de Caso – 2ª Etapa; e
- Formulário de Avaliação do Modelo de Processo – 2ª Etapa

Ao término do preenchimento, solicito ao(a) senhor(a) responder este e-mail anexando o arquivo Excel (Formulário de Avaliação do Modelo de Processo – 2ª Etapa) com suas respostas.

Desde já, agradeço sua disponibilidade e contribuição.

Respeitosamente,

Lucas Sales Martins

Esclarecimentos

I - Dados sobre o Trabalho de Conclusão de Curso

Tema do Trabalho: Suportabilidade de Aeronaves de Defesa: Modelo de Processo para Avaliação dos impactos de Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade na Fase de Serviço.

Pesquisador/Aluno Responsável: Lucas Sales Martins - Cap Eng Mec.

Prof. Orientador: Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão - Cel Av R1.

Instituição: Programa de Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Gestão Tecnológica, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

II - Registro das Explicações do Pesquisador/Aluno aos Avaliadores

Justificativa da Avaliação: Obter resultados que forneçam subsídios para análise e discussão a respeito do modelo de processo desenvolvido.

Objetivo: O objetivo desta avaliação é registrar a impressão de especialistas sobre o modelo de processo proposto, no que diz respeito aos aspectos de clareza na descrição da estrutura, apresentação gráfica, aderência à literatura, coerência com a finalidade a que se propõe, funcionalidade, aplicabilidade e relevância.

Procedimentos: Preencher o formulário seguindo as instruções nele contidas.

Desconfortos e Riscos: As informações coletadas neste formulário serão utilizadas estritamente para fins acadêmicos. O risco será mínimo para os participantes, podendo haver apenas algum incômodo referente à dedicação do tempo necessário para o preenchimento do formulário. Caso não tenha interesse em concluir a avaliação, sinta-se totalmente à vontade para interromper o preenchimento, cancelando assim a sua contribuição. O participante poderá ainda, quando quiser, contatar o pesquisador/aluno responsável pelo formulário de avaliação para esclarecer quaisquer dúvidas, por meio do e-mail lucas.sales.martins@gmail.com.

Benefícios Esperados: O(A) Senhor(a) não terá nenhum benefício com a participação nesta avaliação.

Apresentação do Modelo de Processo

O modelo de processo proposto consiste na análise comparativa entre um cenário de referência e projeções de cenários alternativos, decorrentes de variações controladas em determinados fatores logísticos, para viabilizar o cálculo dos respectivos valores de custo-efetividade e a elaboração de um *ranking* dos fatores analisados quanto ao impacto na suportabilidade do sistema. A Figura 1 apresenta o fluxograma do modelo de processo desenvolvido no presente estudo.

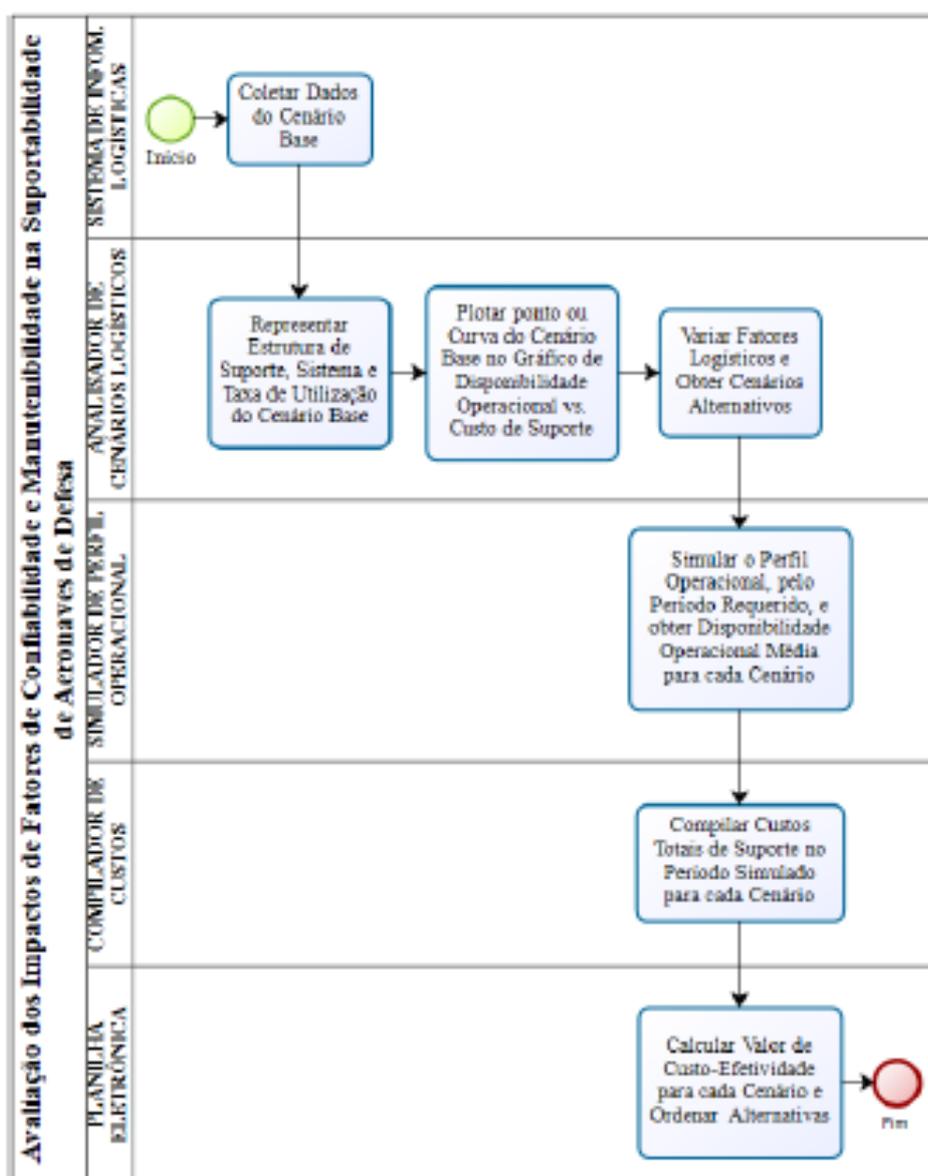


Figura 1 – Fluxograma do Modelo de Processo.

Assim, devem ser considerados três importantes conjuntos de informações, quais sejam: Características do Sistema; Estrutura de Suporte Logístico e Informações de Operação.

O segundo passo é a representação computacional do cenário base em um analisador de cenários. Nesta representação, as Características do Sistema correspondem a parâmetros de projeto, como variantes do produto, elementos estruturais, dados de confiabilidade, preços e requisitos de manutenção associados aos componentes e subsistemas. A Estrutura de Suporte Logístico diz respeito à arquitetura formada por bases operacionais, armazéns ou estoques, oficinas, seus respectivos recursos e capacidades de manutenção, bem como a dinâmica logística envolvida, como por exemplo os tempos e custos de transporte e reparo ou revisão dos itens. Em complemento, as Informações de Operação refletem os parâmetros de quantidade e alocação das aeronaves, bem como a taxa de utilização no horizonte de tempo requerido.

O terceiro passo, também no analisador de cenários, inclui a plotagem determinística de um ponto que reflete determinado estoque de giro inicial, ou ainda, de uma curva no gráfico de disponibilidade operacional *versus* custo de suporte, na qual todos os pontos são soluções ótimas, ou seja, com máxima efetividade de custo. No caso da curva de máxima efetividade de custo, deve-se realizar a escolha do ponto que atende ao requisito de disponibilidade operacional. A este ponto corresponde uma lista específica de itens para compor o estoque de giro, com as respectivas quantidades e locais de armazenamento.

O quarto passo, ainda no mesmo ambiente, requer a indução de variações controladas em fatores de confiabilidade e manutenibilidade, sendo um por vez, mantendo-se os demais parâmetros, para obter novos pontos de custo-efetividade com o mesmo estoque inicial ou novas curvas de máxima efetividade de custo, que em ambos os casos representam cenários alternativos. Nesta segunda opção, observando-se o requisito de disponibilidade operacional.

O quinto passo deve ocorrer em um simulador de perfil operacional, levando em consideração a sazonalidade e o dinamismo das missões, de modo a obter a média de disponibilidade operacional nesse período e a sua variação em função do tempo.

O sexto passo requer um compilador de custos, pois consiste na soma dos custos totais de suporte para cada cenário no período requerido, considerando as simulações realizadas.

Finalizando, o sétimo passo é o cálculo do valor de Custo-Efetividade em planilha eletrônica, para cada cenário, em termos de custo de suporte e disponibilidade operacional, conforme Equação 1 adaptada de Blanchard (2014), bem como a classificação das alternativas em um *ranking* segundo o impacto que exercem na suportabilidade da frota.

$$\text{CustoEfetividade} = \frac{A_i}{C_i} \quad (1)$$

Onde,

A_i representa a disponibilidade operacional do cenário i ; e

C_i representa o custo de suporte do cenário i .

Desta forma, a função objetivo para apoiar a tomada de decisão corresponde à maximização do valor de Custo-Efetividade.

Referência

BLANCHARD, B. S. *Logistics Engineering and Management*. Sixth edition. Harlow: Pearson Education Limited, 2014.

Aplicação do Modelo de Processo (2ª Etapa)

Como aplicação do modelo, procedeu-se à execução de todos os passos em um caso didático genérico e simplificado, para confirmar o cumprimento do requisito que descreve a sua funcionalidade, qual seja, de fornecer como saída uma ordem classificatória de cenários, e respectivos fatores logísticos variantes, quanto ao impacto na suportabilidade.

Iniciando a implementação do modelo, o primeiro passo foi a coleta de dados do cenário inicial em sistema apropriado de informações logísticas. Considerou-se então um sistema aeronave (Anv), representado por 15 itens reparáveis do tipo unidades substituíveis na linha (*Line Replaceable Units - LRU*), sendo 5 componentes aviônicos, selecionados pelo critério de maior taxa de falha, e 10 componentes de mecânica e elétrica geral, escolhidos pelo critério de maior demanda por manutenções corretivas ou preventivas. Os dados dos itens encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados dos Itens das Aeronaves.

Item	Preço de Aquisição (\$)	Taxa de Falha (1/10 ⁴ HV)	Qtde. por Anv	Intervalo Manut. Prevent. (HV)	Qtde. em Estoque
LRU01	219.652,31	1.897	2	-----	0
LRU02	35.694,41	1.492	4	-----	3
LRU03	101.271,98	1.092	1	-----	0
LRU04	23.515,90	1.081	1	-----	1
LRU05	47.538,11	703	4	-----	2
LRU06	37.927,15	2074	1	1.000	3
LRU07	12.137,07	2029	2	-----	3
LRU08	4.731,88	1808	1	-----	2
LRU09	12.298,79	1772	1	500	6
LRU10	210.650,00	1613	1	-----	0
LRU11	23.529,33	1406	4	1.500	8
LRU12	5.969,31	1318	2	4.800	4
LRU13	24.550,40	1196	2	-----	2
LRU14	87.341,22	886	1	3.000	1
LRU15	9.031,84	616	2	-----	2

Há dois Operadores, Op_01 e Op_02, que possuem 20 e 26 aeronaves, respectivamente. A utilização da frota corresponde a uma média de 240 horas de voo (HV) por ano para cada aeronave.

E a estrutura do suporte logístico é assim descrita:

- Os Operadores não estocam itens e são suportados por um Armazém Central e uma Oficina Contratada. O item removido da aeronave, seja por falha revisão geral, é levado até o Armazém. Esse tempo de transporte é de 7 dias e de 5 dias no sentido inverso;
- Do Armazém, a LRU recolhida é levada à Oficina. Ao término do serviço, o item é enviado de volta ao Armazém. O tempo de transporte entre essas estações é de 5 dias;
- A troca de qualquer item na aeronave demora em média 4 horas e necessita de 2 técnicos, apresentando ainda um atraso administrativo de 1 hora;
- Os custos de transporte entre quaisquer estações e de estocagem anual correspondem a 0,5% e 1,5% do preço de aquisição de cada LRU, respectivamente;
- O custo do Homem-hora (H.h) é de \$200 na contratada e \$100 no parque central ou nos operadores. O reparo ou revisão geral de qualquer item requer 240 H.h, além de um kit de peças que custa 8% do preço do item novo;
- O reparo ou revisão geral de qualquer item tem um atraso administrativo de 1.200 horas;
- As inspeções programadas de aeronaves ocorrem nos operadores, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Inspeções Programadas das Aeronaves.

Periodicidade da Inspeção	H.h Inspeção (quant./evento)	Kit Inspeção (\$/evento)	Tempo Atraso Administrativo (horas)
300 HV	120	17.500,00	120

As seguintes premissas foram assumidas:

- Duração de 5 anos para o cenário analisado;
- São desconsiderados os eventos de “condenação” de itens, “canibalização” de aeronaves e suprimento lateral entre Operadores;
- Em hipótese alguma o reparo ou revisão de um item será realizado em local deferente do estabelecido ou deixará de ser feito;
- A capacidade de reparo ou revisão da oficina é ampla, logo os tempos de reparo e revisão independem da quantidade de itens que já estão sendo reparados ou revisados;
- A demanda por itens ao longo do tempo segue uma distribuição de probabilidade de Poisson;
- O Tempo de Manutenção (reparo e revisão de componentes ou inspeção de aeronaves) e a Taxa de Falha foram os fatores identificados para serem avaliados quanto aos

impactos na suportabilidade da frota. Considerou-se então o aumento de 10% no Tempo de Manutenção, enquanto para a Taxa de Falha atribuiu-se uma redução de 20%, mas incorporando um custo de setup de 25 milhões de unidades monetárias, associado às atividades necessárias para que tal melhoria pudesse ser concretizada;

- Tipos de missão, frequência, duração e quantidades de aeronaves empregadas conforme Tabela 3, para construção do perfil operacional.

Tabela 3 – Dados do Perfil Operacional.

Operador	Tipo de Missão	Frequência	Otd. Nominal de Aeronaves	Otd. Mínima de Aeronaves	Duração da Missão (Horas)
Op_01	Instrução_Manhã	2ª a 6ª Feira, da 5ª a 48ª Semana do Ano	8	1	1,93
	Instrução_Tarde	2ª a 6ª Feira, da 5ª a 48ª Semana do Ano	8	1	1,93
Op_02	Patrulha_Manhã	Diariamente	3	1	1,94
	Patrulha_Tarde	Diariamente	3	1	1,94

O segundo passo foi a representação da estrutura de suporte, características do sistema e taxa de utilização, mediante inserção dos dados coletados do cenário inicial em conjuntos de tabelas apropriadas do OPUS10[©], conforme Figura 1.

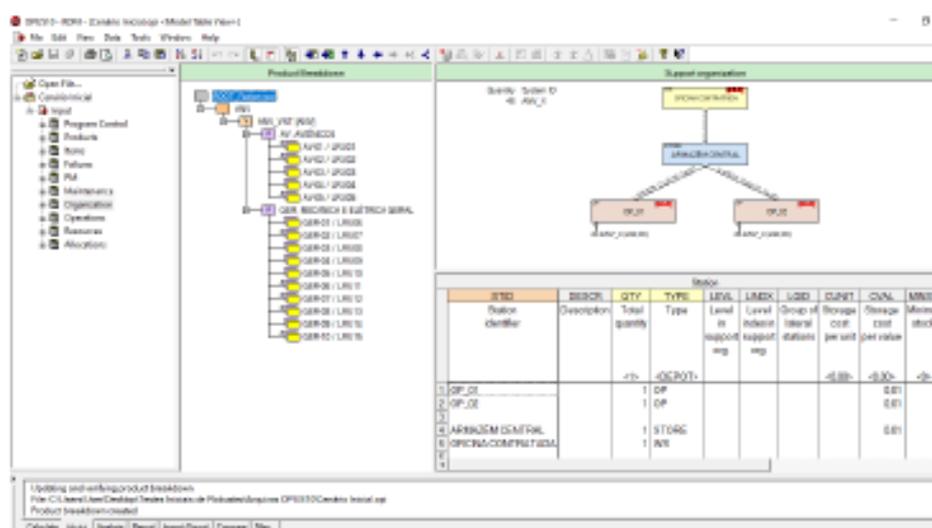


Figura 1 – Modelagem Computacional no Software OPUS10[©].

O terceiro passo foi a plotagem do ponto que corresponde ao cenário inicial da frota no gráfico de disponibilidade operacional *versus* custo de suporte do OPUS10©, considerando o estoque de giro informado, conforme Figura 2.

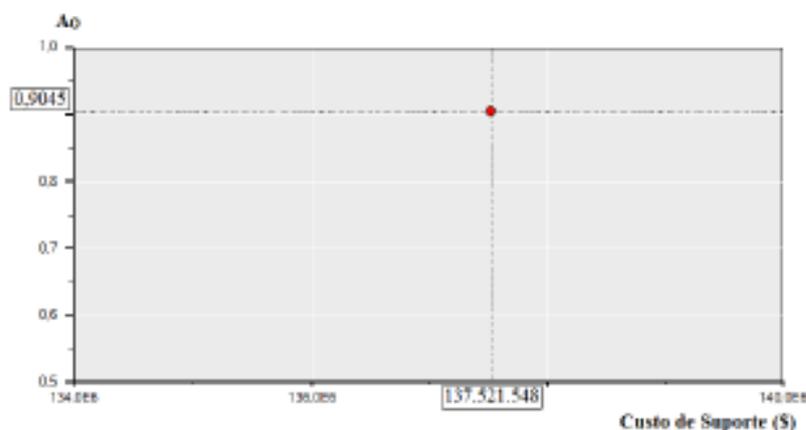


Figura 2 – Cenário Inicial no Gráfico de Custo-Efetividade do OPUS10©.

Assim, o quarto passo resultou na obtenção de cenários alternativos, caracterizados pelas respectivas variações controladas nos fatores considerados, conforme Figura 3.

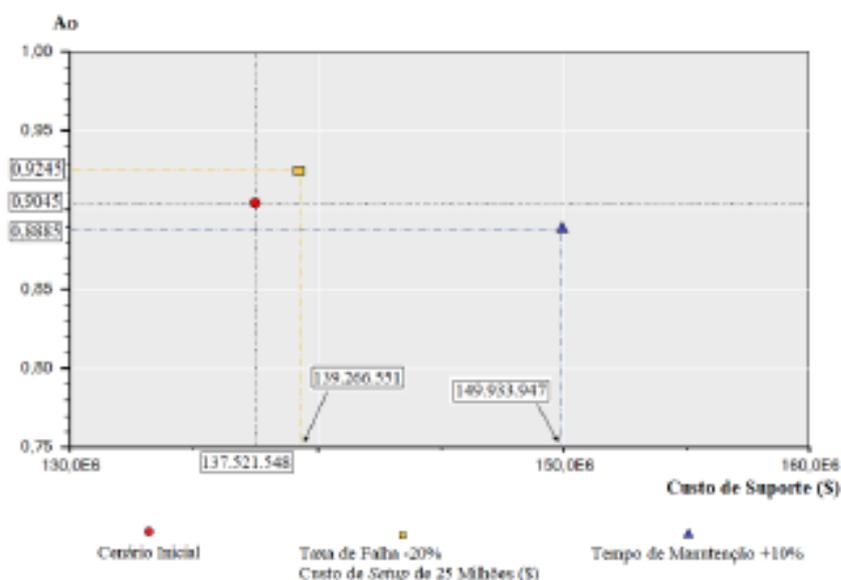


Figura 3 – Cenários Alternativos no Gráfico de Custo-Efetividade do OPUS10©.

O quinto passo foi implementado utilizando-se os perfis operacionais já informados para os operadores Op_01 e Op_02. Assim, a sazonalidade da operação da frota, como um todo, foi introduzida no SIMLOX[®] para todos os cenários, conforme ilustrado na Figura 4.

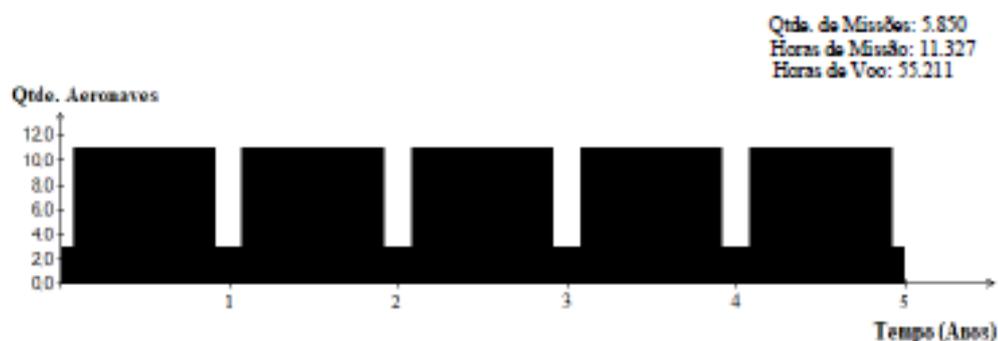


Figura 4 – Perfil Operacional da Fota Simulado no SIMLOX[®].

As Figuras 5 a 7 mostram os resultados estocásticos da disponibilidade operacional média e em função do tempo, obtidos ao final de 100 replicações no SIMLOX[®], para o cenário inicial e os dois cenários alternativos.

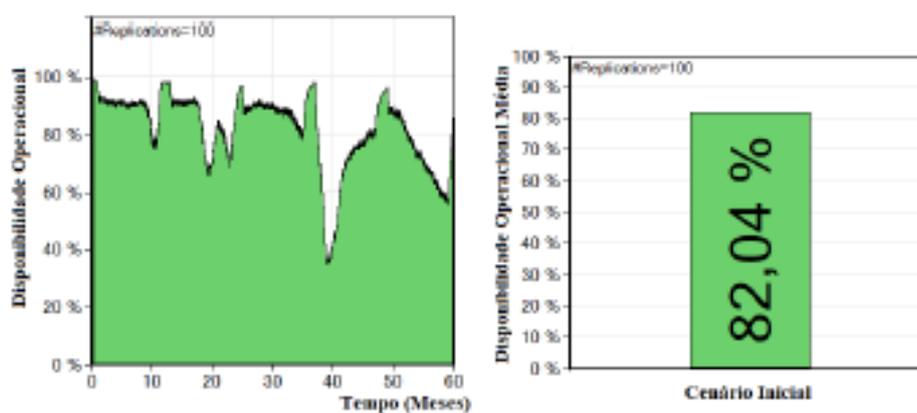


Figura 5 – Disponibilidade Operacional no SIMLOX[®] para o Cenário Inicial.

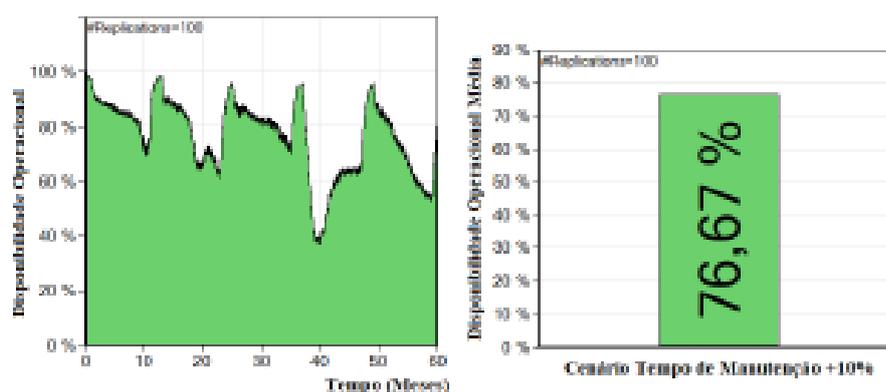


Figura 6 – Disponibilidade no SIMLOX[®] para o Cenário Tempo Manutenção +10%.

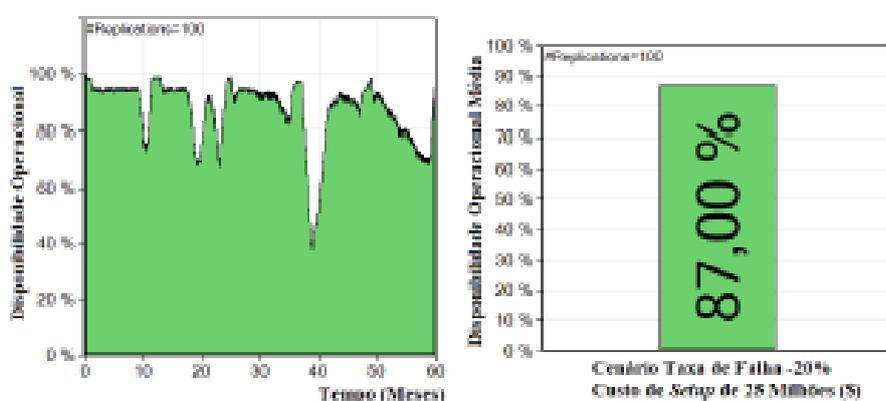


Figura 7 – Disponibilidade Operacional no SIMLOX[®] para o Cenário Taxa de Falha - 20% e Custo de Setup de 25 Milhões (\$).

No sexto passo, foram compilados no CATLOC[®] os custos de suporte incidentes no decorrer do período simulado, para todos os cenários, conforme Figuras 8 a 10.

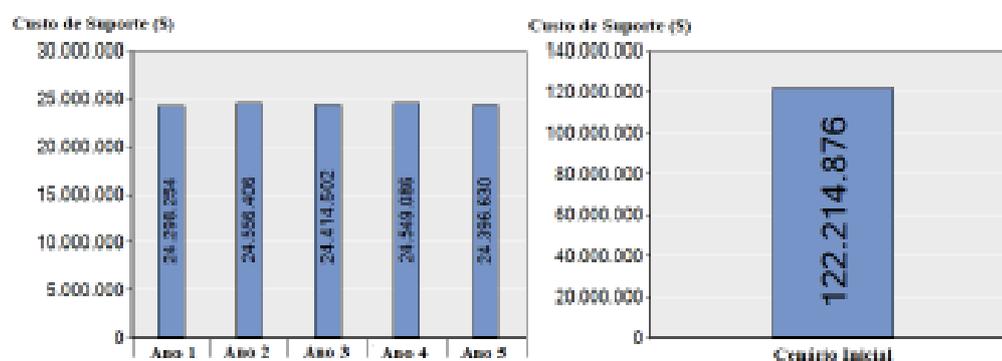


Figura 8 – Custo de Suporte no CATLOC[®] para o Cenário Inicial.

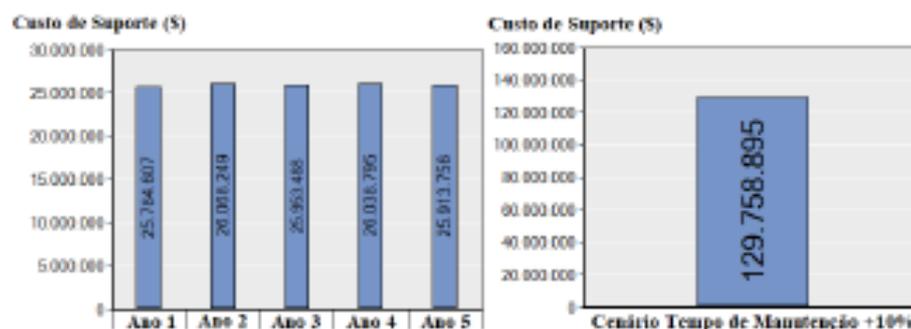


Figura 9 – Custo de Suporte no CATLOC® (Cenário Tempo de Manutenção +10%).

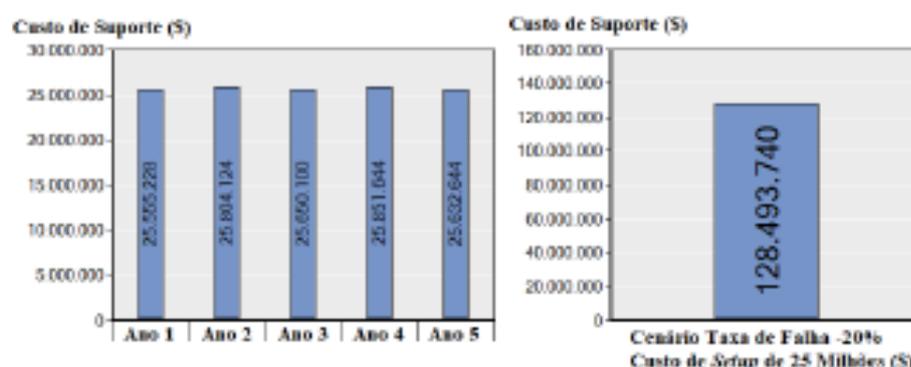


Figura 10 – Custo de Suporte no CATLOC® para o Cenário Taxa de Falha -20% e Custo de Setup de 25 Milhões (\$).

Por fim, no sétimo passo, calculou-se o valor de Custo-Efetividade para cada cenário, ordenando-os de acordo com o impacto positivo na suportabilidade da frota, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo de Custo-Efetividade e Classificação dos Cenários ou Fatores.

Cenário ou Fator Logístico Variante	Varição	Disponibilidade Operacional Média (A_i)	Custo de Suporte (C_i)	Custo-Efetividade $\left(\frac{A_i}{C_i}\right) \times (10^9)$	Ranking de Impacto Positivo na Suportabilidade
Taxa de Falha	-20% (Custo de Setup de 25 Milhões (\$))	87,00%	\$ 128.493.740,00	677,08	1°
Cenário Inicial	Não Aplicável	82,04%	\$ 122.214.876,00	671,28	2°
Tempo de Manutenção	+10%	76,67%	\$ 129.758.895,00	590,87	3°

Formulário de Avaliação do Modelo de Processo - 2a Etapa			
<p>Introdução: Este formulário se propõe a reunir informações substanciais sobre a opinião de especialistas. Suas informações pessoais permanecerão confidenciais durante e após todo este processo, bem como refletirão apenas sua opinião pessoal. Sua contribuição será muito importante para o desenvolvimento deste trabalho de mestrado, cujo objetivo é desenvolver um modelo de avaliação dos impactos de fatores de confiabilidade e manutenibilidade na suportabilidade de aeronaves de defesa, de modo que indique, sistemicamente, a prioridade de alocação de recursos em determinado contexto da vida em serviço. O(a) senhor(a) encontrará nas demais planilhas algumas definições e conceitos e um resumo da dissertação. Todas as definições, quando não especificado, foram transcritas da Especificação SX000i, edição 3.0 (2021), disponível em www.sx000i.org. Esta segunda etapa refere-se à oportunidade de ratificar ou divergir da hierarquização de cenários e respectivos fatores de confiabilidade e manutenibilidade apresentados no estudo de caso em tela, de acordo com o seu entendimento. Por favor, se possível, devolva este formulário respondido até 08 de junho. Agradeço sua disponibilidade para contribuir com esta pesquisa.</p>			
<p>Instruções: A lista a seguir contempla o cenário inicial e dois fatores, sendo um de confiabilidade e outro de manutenibilidade. O(a) senhor(a) está convidado a analisar o resultado da aplicação do modelo ao estudo de caso, com liberdade para modificar a classificação atribuída, bem como explicar ou comentar resumidamente o motivo de sua eventual discordância.</p>			
Cenário ou Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade (Ordem Alfabética)	Classificação de 1 (maior impacto) a 3 (menor impacto), resultante da aplicação do modelo ao estudo de caso.	O(A) senhor(a) concorda com o resultado da aplicação do modelo proposto ao estudo de caso? Sim (S) ou Não (N).	Caso não concorde com o resultado apresentado, qual seria sua classificação de 1 (maior impacto) a 3 (menor impacto). Caso concorde, por favor deixe em branco.
Cenário Inicial	2		Se houver discordância, por favor, explique ou comente resumidamente o motivo.
Taxa de Falha	1		
Tempo de Manutenção	3		

Definições e Conceitos

Suportabilidade: é definida por Blanchard (2014) como o grau em que um sistema pode ser efetivamente suportado, tanto em termos das características de projeto dos principais componentes relacionados à sua missão, quanto em termos dos aspectos da infraestrutura geral de suporte.

Fase de Serviço: Operação ou utilização do sistema; Fornecimento dos serviços necessários com efetividade operacional e de custo, de forma continuada; Avaliação, decisão e eventual implementação de modificações, atualizações e melhorias; Avaliação contínua da eficácia e eficiência do sistema; Provimento contínuo do Suporte logístico ao sistema (ASD/AIA, 2021).

Fatores de Confiabilidade e Manutenibilidade *Versus* Elementos do IPS.

A tabela a seguir relaciona alguns fatores de confiabilidade e manutenibilidade aos elementos do Suporte Integrado do Produto (IPS), inspirada na abordagem do Guia SX000i, Especificação Internacional para Suporte Integrado do Produto (ASD/AIA, 2021).

Elementos do IPS	Fatores Logísticos				
	Confiabilidade		Manutenibilidade		
	Tempo Médio entre Falhas	Tempo Médio entre Manutenções Preventivas	Tempo Médio de Manutenções Corretivas e Preventivas	Tempo Médio de Transporte de Material	Tempo Médio de Atraso Administrativo
Manutenção		X	X		X
Suprimento				X	X
Operações Logísticas				X	X
Gestão de Suporte ao Produto	X	X	X	X	X
Dados Técnicos		X	X		X
Suporte Cont. de Engenharia	X	X	X		X
Recursos Computacionais			X	X	X
Influência do <i>Design</i>	X	X	X	X	
Equipamentos de Suporte	X		X		X
Instalações e Infraestrutura			X		
Pessoal e Mão de Obra			X		X
Treinamento			X		X

Resumo da Dissertação

O problema desta pesquisa emerge do desafio enfrentado por gestores de aeronaves de defesa nos processos de decisão quanto à alocação de recursos, inclusive financeiros, para aumentar a relação custo-benefício do Suporte Integrado ao Produto (Integrated Product Support – IPS). Assim, este trabalho propõe um modelo para avaliar os impactos que fatores de confiabilidade e manutenibilidade exercem na suportabilidade desses sistemas, caracterizada pela relação entre disponibilidade operacional e custo de suporte, de modo a indicar, sistemicamente, as prioridades de alocação de recursos em determinado contexto da vida em serviço. A estratégia para atingir o objetivo traçado utiliza otimização de estoque e simulação, consistindo numa combinação do Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida com o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor, substituindo-se, no entanto, a expressão matemática desta segunda técnica pelo Cálculo de Custo-Efetividade. São apresentados testes de funcionalidade e de sensibilidade do modelo desenvolvido, bem como um estudo de caso inspirado na frota de aeronaves A-29 da Força Aérea Brasileira. Em ambos os experimentos foi possível analisar diferentes cenários quanto à melhoria ou degradação da suportabilidade, em ambientes e contextos simulados da fase de serviço, a partir de variações nos seguintes fatores analisados: tempo médio entre falhas; tempo médio entre manutenções preventivas; tempo médio de manutenções corretivas e preventivas; tempo médio de transporte de material; e tempo médio de atraso administrativo. O trabalho mostrou sua contribuição acadêmica mediante a abordagem do modelo proposto de apoio à decisão, relacionado aos elementos do IPS denominados como Gerenciamento de Suporte ao Produto (Product Support Management) e Suporte Continuado de Engenharia (Sustaining Engineering), permitindo ainda uma aplicação operacional como guia de alto nível em revisões da solução de suporte a uma frota. Embora os testes tenham sido realizados com aeronaves de defesa, a aplicação é cabível a outros sistemas complexos.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">DM</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">25 de julho de 2023</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/DM-055/2023</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">138</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Suportabilidade de aeronaves de defesa: modelo de processo para avaliação dos impactos de fatores de confiabilidade e manutenibilidade na fase de serviço.			
6. AUTOR(ES): Lucas Sales Martins			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Suportabilidade. 2. Aeronaves de Defesa. 3. Engenharia Logística.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Suporte logístico integrado; Engenharia do valor; Manutenção de aeronaves; Sistemas de apoio à decisão; Ciclo de vida; Estudo de caso; Pesquisa operacional.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais. Área de Gestão Tecnológica. Orientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão. Defesa em 04/07/2023. Publicada em 2023.			
11. RESUMO: O problema desta pesquisa emerge do desafio enfrentado por gestores de aeronaves de defesa nos processos de decisão quanto à alocação de recursos, inclusive financeiros, para aumentar a relação custo-benefício do Suporte Integrado ao Produto, do inglês <i>Integrated Product Support</i> (IPS). Assim, este trabalho propõe um modelo para avaliar os impactos que fatores de confiabilidade e manutenibilidade exercem na suportabilidade desses sistemas, caracterizada pela relação entre disponibilidade operacional e custo de suporte, de modo a indicar, sistemicamente, as prioridades de alocação de recursos em determinado contexto da vida em serviço. A estratégia para atingir o objetivo traçado utiliza otimização de estoque e simulação, consistindo numa combinação do Método de Cálculo Prospectivo de Custos do Ciclo de Vida com o Método de Avaliação da Suportabilidade Baseado em Valor, substituindo-se, no entanto, a expressão matemática desta segunda técnica pelo Cálculo de Custo-Efetividade. São apresentados testes de funcionalidade e de sensibilidade do modelo desenvolvido, bem como um estudo de caso inspirado na frota de aeronaves A-29 da Força Aérea Brasileira (FAB). Em ambos os experimentos foi possível analisar diferentes cenários quanto à melhoria ou degradação da suportabilidade, em ambientes e contextos simulados da fase de serviço, a partir de variações nos seguintes fatores analisados: tempo médio entre falhas; tempo médio entre manutenções preventivas; tempo médio de manutenções corretivas e preventivas; tempo médio de transporte de material; e tempo médio de atraso administrativo. O trabalho mostrou sua contribuição acadêmica mediante a abordagem do modelo proposto de apoio à decisão, relacionado aos elementos do IPS denominados como Gerenciamento de Suporte ao Produto e Suporte Continuado de Engenharia, permitindo ainda uma aplicação operacional como guia de alto nível em revisões da solução de suporte a uma frota. Embora os testes tenham sido realizados com aeronaves de defesa, a aplicação é cabível a outros sistemas complexos.			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO</p>			