

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.

**Daniel Buch**

**MODELAGEM DA SUPORTABILIDADE E SIMULAÇÃO DE  
CENÁRIOS OPERACIONAIS COMO FERRAMENTAS PARA  
O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS COMPLEXOS**

**Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:**



Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão  
Orientador

Prof<sup>a</sup>. Dra. Emília Villani  
Pró-Reitor de Pós-Graduação

Campo Montenegro  
São José dos Campos, SP – Brasil  
2023

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão de Informação e Documentação**

Buch, Daniel  
Modelagem da suportabilidade e simulação de cenários operacionais como ferramentas para o desenvolvimento de sistemas complexos / Daniel Buch.  
São José dos Campos, 2023.  
149f.

Dissertação de mestrado – Curso de 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. Ciclo de vida. 3. Logística (administração). I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Modelagem da suportabilidade e simulação de cenários operacionais como ferramentas para o desenvolvimento de sistemas complexos

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

**BUCH, Daniel. Modelagem da suportabilidade e simulação de cenários operacionais como ferramentas para o desenvolvimento de sistemas complexos. 2023. 149 f.**  
Dissertação de mestrado em Gestão Tecnológica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2023.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Daniel Buch

TÍTULO DO TRABALHO: Modelagem da suportabilidade e simulação de cenários operacionais como ferramentas para o desenvolvimento de sistemas complexos

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 (do autor).

---

Daniel Buch  
Rua H19B, 110 – Campus do CTA  
CEP: 12228-500, São José dos Campos - SP

**MODELAGEM DA SUPORTABILIDADE E SIMULAÇÃO DE  
CENÁRIOS OPERACIONAIS COMO FERRAMENTAS PARA  
O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS COMPLEXOS**

**Daniel Buch**

Composição da Banca Examinadora:

Profª Dra.	Mischel Carmen Neyra Belderrain	Presidente	-	ITA
Prof. Dr.	Fernando Teixeira Mendes. Abrahão	Orientador	-	ITA
Prof. Dr.	Henrique Costa Marques	Membro Interno	-	ITA
Dr.	Ricardo Augusto Tavares Santos	Membro Externo	-	CTR3SM

**ITA**

Aos meus pais, Ilson e Lourdes, que tanto dedicaram-se à criação de seus filhos, à minha amada esposa Denise e à minha querida filha Isabelle, luzes que guiam meu caminhar.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da vida que transcende a matéria, pela força vital, pela saúde física e mental, bem como pelas pessoas colocadas no meu caminho em diferentes momentos desta jornada.

Agradeço aos meus pais que me orientaram nos passos iniciais da minha existência, provendo as condições necessárias para meu desenvolvimento e me ajudando a consolidar importantes valores, dentre eles a dedicação à família e o respeito ao próximo.

À minha amada esposa Denise, pelo seu amor, apoio e companheirismo. Ela possui o dom de me fazer refletir sobre as coisas mais importantes da vida, como o motivo maior da existência. Agradeço à minha filha Isabelle, que trouxe aos seus pais outra dimensão do amor. Ela é, segundo suas próprias palavras, a “luz forte” de nossas vidas. Mesmo em tenra idade, mostrou-se sábia e inspiradora, como quando afirmou, aos 6 anos de idade, que “a inteligência vem do coração, porque inteligência é amor”.

Agradeço à figura que tanto respeito, a do professor. Mestres, orientadores e facilitadores da busca pelo saber, tendência natural do homem segundo Aristóteles. Agradeço a todos os professores que tive, em especial ao Coronel Aviador e Professor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão, por ter me orientado no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos demais professores e alunos com os quais interagi durante o período de desenvolvimento deste trabalho, em especial aos vinculados ao Laboratório de Engenharia Logística do ITA (AeroLogLab-ITA).

Agradeço à Força Aérea Brasileira por ter me acolhido em suas fileiras, amparado minha família, permitido conhecer e trabalhar com pessoas extraordinárias e altamente capacitadas, e por ter acreditado em mim e investido em meu desenvolvimento profissional.

Por fim, agradeço 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 AB pelo suporte fornecido aos pesquisadores do AeroLogLab-ITA.

*"A humildade é o primeiro degrau para a sabedoria".*

(São Tomás de Aquino)

## Resumo

A evolução tecnológica impulsionou o surgimento de sistemas de alta complexidade, que são formados pela integração de diversos componentes e que requerem o envolvimento de várias disciplinas da engenharia ao longo do seu ciclo de vida, normalmente marcado por uma longa fase de operação e suporte. Tal fase pode ser considerada a mais importante do ciclo de vida, visto ser a razão da existência do produto. Os custos decorrentes do suporte de sistemas de alta complexidade gerencial representam uma parcela significativa do custo do ciclo de vida. Devido ao relevante impacto do suporte, é desejável que esta parcela de custo seja minimizada. As principais referências das áreas de Engenharia Logística e de Engenharia de Sistemas defendem que as oportunidades de economia no custo do ciclo de vida concentram-se nas fases iniciais do desenvolvimento. Dessa forma, esse trabalho propõe um método, a ser aplicado na concepção do produto, que modela o conceito de suporte de distintas alternativas de projeto, obtendo resultados otimizados que permitem comparar o desempenho logístico de cada alternativa, considerando, por meio de simulação, o dinamismo do cenário operacional. A métrica de desempenho logístico adotada nas análises comparativas é a relação entre o custo de suporte e a disponibilidade operacional. O método emprega a otimização simultânea da composição, localização e níveis de estoques de itens sobressalentes, da alocação de níveis de manutenção e seus recursos, bem como suas quantidades, dentro da estrutura de suporte. Para tanto, foram utilizados modelos matemáticos implementados em ferramentas comerciais, sendo empregado o OPUS10© para a fase de modelagem e otimização do suporte e o SIMLOX© para a fase de simulação de cenários operacionais. O método requer a integração da abordagem do IPS (*Integrated Product Support*) ao processo de Engenharia de Sistemas no desenvolvimento do produto, de modo que os dados para a modelagem possam ser gerados e amadurecidos pelas atividades do IPS. A aplicação do método em casos de estudos de integração de motores com distintos conceitos de manutenção, em aeronaves não tripuladas, com distintos perfis operacionais, apontou sua capacidade de fornecer previsões de desempenho logístico, considerando o impacto ocasionado pelo dinamismo do cenário operacional simulado. O método é capaz de apontar as vantagens e desvantagens na formação do custo de suporte das alternativas de projeto avaliadas, concretizando-se como uma ferramenta com potencial para aumentar a consciência situacional nas análises de compensação que apoiam a tomada de decisões de integração de alternativas de projeto, na fase de concepção do produto.

## Abstract

The technological evolution had driven the emergence of highly complex systems, which are formed by the integration of different components, and which require the involvement of various engineering disciplines throughout their life cycle, usually marked by a long phase of operation and support. This phase can be considered the most important of the life cycle since it is the reason for the existence of the product. The costs incurred in supporting of highly complex management systems represent a significant portion of the life cycle cost. Due to the significant impact of support, it is desirable that this cost portion be minimized. The main references in the areas of Logistics Engineering and Systems Engineering argue that savings opportunities in the cost of the life cycle are concentrated in the early stages of development. Thus, this work proposes a method, to be applied in product design phase, which models the support concept of different design alternatives, obtaining optimized results that allow comparing the logistical performance of each alternative, considering, through simulation, the dynamism of the operational scenario. The logistical performance metric adopted in the comparative analyzes is the relationship between support cost and operational availability. The method employs the simultaneous optimization of the composition, location and stock levels of spare parts, the allocation of maintenance levels and their resources, as well as their quantities, within the support structure. For this purpose, mathematical models implemented in commercial tools were used, using OPUS10© for the support modeling and optimization phase and SIMLOX© for the operational scenario simulation phase. The method requires the integration of the IPS (Integrated Product Support) approach to the Systems Engineering process in product development, so that data for modeling can be generated and matured by the IPS activities. The application of the method in case studies of engine integration with different maintenance concepts, in unmanned aircraft, with different operational profiles, pointed out its ability to provide forecasts of logistical performance, considering the impact caused by the dynamism of the simulated operational scenario. The method is capable to point out the advantages and disadvantages in the formation of the support cost of the evaluated project alternatives, materializing as a tool with potential to increase the situational awareness in the trade-off analysis that support the decision making of integration of project alternatives, in the product design phase.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Comportamento do LCC (adaptado de BLANCHARD, 2014). .....	20
Figura 1.2 – Comportamento dos custos decorrentes de mudanças de projeto (adaptado de BLANCHARD; BLYLER, 2016). .....	21
Figura 1.3 – Representatividade dos custos com manutenção de motores aeronáuticos (adaptado de FEDELE; DI VITO; RAMUNDO, 2020). .....	24
Figura 2.1 – Maturidade dos fatores RAM (adaptado de ABRAHÃO <i>et al.</i> , 2019). .....	30
Figura 2.2 – Evolução do SML ao longo do ciclo de vida (adaptado de ASD/AIA, 2021b). ..	31
Figura 2.3 – Tempos associados à manutenibilidade (adaptado de BLANCHARD, 2014). ...	41
Figura 2.4 – Disponibilidade e custos para o fabricante (adaptado de SMITH, 2011). .....	43
Figura 2.5 – Disponibilidade e custos para o operador ou cliente (adaptado de SMITH, 2011). .....	43
Figura 2.6 – Modelo de custo-efetividade (adaptado de ASD/AIA, 2021b). .....	44
Figura 2.7 – Elementos do IPS (adaptado de DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2011). .....	47
Figura 2.8 – LSA no projeto do sistema de suporte (adaptado de BLANCHARD, 2014). .....	55
Figura 2.9 – Exemplo de estrutura modular em níveis para um sistema de alta complexidade. .....	56
Figura 2.10 – Estrutura de suporte logístico multi-escalão. ....	57
Figura 2.11 – Representação de um ciclo de estoque de materiais de consumo (adaptado de BLANCHARD, 2014). .....	60
Figura 2.12 – Forma de apresentação dos resultados da análise marginal (adaptado de SHERBROOKE, 2004). .....	63
Figura 3.1 – Caminho para a definição de um objetivo de pesquisa (WAZLAWICK, 2009). ..	66

Figura 3.2 – Posicionamento do método proposto no processo de IPS.....	67
Figura 3.3 – Curva de custo-efetividade (adaptado dos resultados do OPUS10©). ....	70
Figura 3.4 – Mapeamento da fase A do método proposto.....	71
Figura 3.5 – Representação da fase B do método proposto (adaptado dos resultados do OPUS10©).....	72
Figura 3.6 – Representação da fase C do método proposto.....	73
Figura 3.7 – Fluxograma do processo de aplicação do método proposto.....	74
Figura 4.1 – Perfil semanal de operação construído para UCAV. ....	77
Figura 4.2 – Perfil semanal de operação construído para ISTAR. ....	77
Figura 4.3 – Estrutura de suporte e distribuição da frota.....	78
Figura 4.4 – Configuração para um motor aeronáutico não modular.....	79
Figura 4.5 – Configuração para um motor aeronáutico modular. ....	79
Figura 4.6 – Resultados da otimização do suporte logístico aplicando a LORA (OPUS10©).84	
Figura 4.7 – Demonstração da comparação entre estratégias de suporte (adaptado dos resultados do OPUS10©).....	85
Figura 4.8 – Aplicação do método em momentos distintos do desenvolvimento do sistema de suporte (adaptado dos resultados do OPUS10©). ....	87
Figura 4.9 – Fatores multiplicadores aplicados sobre os parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade (adaptado dos resultados do OPUS10©). ....	88
Figura 4.10 – Resultados da fase A e seleção da fase B para o caso 1 (adaptado dos resultados do OPUS10©).....	90
Figura 4.11 – Resultados da primeira iteração para o motor não modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).....	91
Figura 4.12 – Resultados da primeira iteração para o motor modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).....	91

Figura 4.13 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor não modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do OPUS10©).....	92
Figura 4.14 – Resultados da fase C para a última iteração realizada para o motor não modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).....	93
Figura 4.15 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do OPUS10).....	93
Figura 4.16 – Resultados da fase C para a última iteração realizada para o motor modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).....	94
Figura 4.17 – Iteração com taxa média de cumprimento de missões abaixo do requisito para o motor não modular (adaptado dos resultados do SIMLOX©). ....	95
Figura 4.18 – Taxa média de cumprimento de missões para o motor modular (adaptado dos resultados do SIMLOX©). ....	96
Figura 4.19 – Pontos resultantes da aplicação do método (adaptado dos resultados do OPUS10©).....	96
Figura 4.20 – Efeito dos distintos planos de manutenção. ....	98
Figura 4.21 – Resultados da fase A e seleção da fase B para o caso 2 (adaptado dos resultados do OPUS10©).....	99
Figura 4.22 – Resultados da primeira iteração para o motor não modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).....	99
Figura 4.23 – Resultados da primeira iteração para o motor modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).....	100
Figura 4.24 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor não modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do OPUS10).....	100
Figura 4.25 – Resultados da fase C para a última iteração realizada para o motor não modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).....	101

Figura 4.26 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do OPUS10©).....	101
Figura 4.27 – Resultados da fase C para a última iteração realizada para o motor modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).....	102
Figura 4.28 – Resultados da fase A e seleção da fase B para o caso 3 (adaptado dos resultados do OPUS10©).....	104
Figura 4.29 – Resultados da primeira iteração para o motor modular com perfil operacional de um UCAV para o caso 3 (adaptado dos resultados do SIMLOX©). ....	105
Figura 4.30 – Resultados da primeira iteração para o motor modular com perfil operacional de um ISTAR para o caso 3 (adaptado dos resultados do SIMLOX©). ....	105
Figura 4.31 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor modular operado com o perfil UCAV modelado (adaptado dos resultados do OPUS10).....	106
Figura 4.32 – Resultados da última iteração para o motor modular com perfil operacional de um UCAV para o caso 3 (adaptado dos resultados do SIMLOX©). ....	106
Figura 4.33 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor modular operado com o perfil ISTAR modelado (adaptado dos resultados do OPUS10©). ....	107
Figura 4.34 – Resultados da última iteração para o motor modular com perfil operacional de um ISTAR para o caso 3 (adaptado dos resultados do SIMLOX©). ....	107
Figura 4.35 – Sensibilidade ao dinamismo do cenário operacional. ....	109

## Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Marcos definidos para a avaliação do SML (adaptado de ASD/AIA, 2021b). ...	31
Tabela 2-2 – Tabela comparativa entre demais pesquisas e o presente trabalho. ....	35
Tabela 2-3 – Modelos de ciclo de vida. ....	46
Tabela 2-4 – Natureza integrada das atividades do IPS (adaptado de ASD/AIA, 2021b). ....	49
Tabela 4-1 – Principais parâmetros dos perfis operacionais. ....	77
Tabela 4-2 – Dados de falha e custo dos componentes do modelo de motor não modular. ....	80
Tabela 4-3 – Dados de falha e custo dos componentes do modelo de motor modular. ....	81
Tabela 4-4 – Plano de manutenção para o motor não modular. ....	81
Tabela 4-5 – Plano de manutenção para o motor modular. ....	82
Tabela 4-6 – Níveis de manutenção adotados nos casos de estudo. ....	82
Tabela 4-7 – Alternativas para a estratégia de suporte. ....	83
Tabela 4-8 – Alternância da estratégia de suporte ótima ao longo dos pontos da curva. ....	84
Tabela 4-9 – Comparação entre as soluções de cada estratégia de suporte avaliada. ....	85
Tabela 4-10 – Impacto dos fatores multiplicadores sobre o LSC. ....	88
Tabela 4-11 – Combinação entre conceito de manutenção e cenário operacional. ....	89
Tabela 4-12 – Comparações dos casos de estudo. ....	89
Tabela 4-13 – Resultados do método para o caso 1 (adaptado dos resultados do OPUS10© e do SIMLOX©). ....	97
Tabela 4-14 – Resultados do método para o caso 2 (adaptado dos resultados do OPUS10© e do SIMLOX©). ....	103
Tabela 4-15 – Resultados do método para o caso 3 (adaptado dos resultados do OPUS10© e do SIMLOX©). ....	108

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ADT	Tempo de atraso administrativo (do inglês <i>Administrative Delay Time</i> )
AIA	Associação das Indústrias Aeroespaciais da América (do inglês <i>Aerospace Industries Association of America</i> )
ASD	Associação das Indústrias Aeroespaciais e de Defesa da Europa (do inglês <i>Aerospace and Defense Industries Association of Europe</i> )
BID	Base Industrial de Defesa
ConOps	Conceito de Operações (do inglês <i>Concept of Operations</i> )
FAB	Força Aérea Brasileira
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
ILS	Suporte Logístico Integrado (do inglês <i>Integrated Logistics Support</i> )
IPS	Suporte Integrado ao Produto (do inglês <i>Integrated Product Support</i> )
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LCC	Custo do Ciclo de Vida (do inglês <i>Life Cycle Cost</i> )
LDT	Tempo de atraso logístico (do inglês <i>Logistics Delay Time</i> )
LORA	Análise de nível de reparo (do inglês <i>Level of Repair Analysis</i> )
LRU	Unidade substituível na linha de voo (do inglês <i>Line Replaceable Unit</i> )
LSC	Custo de Suporte em Vida (do inglês <i>Life Support Cost</i> )
$\bar{M}$	Tempo médio de manutenção ativa
MDT	Tempo de inatividade por manutenção (do inglês <i>Maintenance Downtime</i> )
MLDT	Tempo médio de atraso logístico (do inglês <i>Mean Logistics Delay Time</i> )

$\bar{M}pt$	Tempo médio de manutenção preventiva (do inglês <i>Mean Preventive Maintenance Time</i> )
MTBF	Tempo médio entre falhas (do inglês <i>Mean Time Between Failure</i> )
MTBM	Tempo médio entre manutenções (do inglês <i>Mean Time Between Maintenance</i> )
MTTR	Tempo médio para o reparo (do inglês <i>Mean Time To Repair</i> )
OEM	Fabricante original do equipamento (do inglês <i>Original Equipment Manufacturer</i> )
PBS	Estrutura de produto (do inglês <i>Product Breakdown Structure</i> )
PED	Produto Estratégico de Defesa
PDR	Revisão do projeto preliminar (do inglês <i>Preliminary Design Review</i> )
PHM	Sistema de prognóstico e gerenciamento da saúde, conhecido como PHM (do inglês <i>Prognostics &amp; Health Management</i> )
PHS&T	Embalagem, manuseio, estocagem e transporte (do inglês em inglês <i>Packaging, Handling, Storage and Transportation</i> )
RAM	Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade (do inglês <i>Reliability, Availability and Maintainability</i> )
RAMS	Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade e Segurança (do inglês <i>Reliability, Availability, Maintainability and Safety</i> )
RDM	Modelo Refinado de Dados (do inglês <i>Refined Data Model</i> )
SML	Nível de Maturidade do Suporte (do inglês <i>Support Maturity Level</i> )
SRU	Unidade substituível em oficina (do inglês <i>Shop Repleaceble Unit</i> )
WT	Tempo de atraso (do inglês <i>Waiting Time</i> )

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3</b>	<b>Problema de pesquisa.....</b>	<b>25</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>26</b>
1.4.1	Objetivo geral .....	26
1.4.2	Objetivos específicos .....	27
<b>1.5</b>	<b>Hipótese .....</b>	<b>28</b>
<b>1.6</b>	<b>Estrutura do trabalho .....</b>	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA E REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>O problema de suportabilidade.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Conceito de operações .....</b>	<b>35</b>
<b>2.3</b>	<b>Conceito de manutenção e suporte .....</b>	<b>36</b>
<b>2.4</b>	<b>Métricas de suportabilidade .....</b>	<b>37</b>
2.4.1	Confiabilidade .....	37
2.4.2	Manutenibilidade .....	39
2.4.3	Disponibilidade.....	41
<b>2.5</b>	<b>O custo-benefício no desenvolvimento de sistemas.....</b>	<b>42</b>
2.5.1	Custo-efetividade.....	44
<b>2.6</b>	<b>O Suporte Integrado ao Produto (IPS) no desenvolvimento de sistemas de alta complexidade.....</b>	<b>44</b>
2.6.1	O ciclo de vida de sistemas de alta complexidade.....	45
2.6.2	O processo de IPS e seus elementos .....	47
2.6.2.1	Operações Logísticas .....	48
2.6.2.2	Manutenção .....	48
2.6.2.3	Gerenciamento do Suporte ao Produto .....	49
2.6.2.4	Suporte de Suprimento .....	49
2.6.2.5	Recursos Computacionais .....	50
2.6.2.6	Influência no Projeto .....	50
2.6.2.7	Suporte Continuado de Engenharia .....	50
2.6.2.8	Dados Técnicos .....	51

2.6.2.9	Instalações e Infraestrutura .....	51
2.6.2.10	Mão de Obra e Recursos Humanos .....	52
2.6.2.11	Equipamentos de Suporte .....	52
2.6.2.12	Treinamento e Suporte ao Treinamento .....	53
<b>2.7</b>	<b>Atividades do processo de IPS no desenvolvimento de sistemas de alta complexidade.....</b>	<b>53</b>
2.7.1	Análise de Suporte Logístico (LSA) .....	54
2.7.2	Análise de Nível de Reparo (LORA) .....	55
2.7.2.1	LORA econômica e não econômica .....	58
<b>2.8</b>	<b>Gestão de estoque .....</b>	<b>59</b>
2.8.1	Análise marginal na gestão de estoque.....	62
<b>2.9</b>	<b>Sistemas computadorizados de assistência ao desenvolvimento de produtos... 63</b>	
<b>2.10</b>	<b>Motores aeronáuticos .....</b>	<b>64</b>
2.10.1	O conceito de manutenção modular .....	65
<b>2.11</b>	<b>Considerações finais do capítulo .....</b>	<b>65</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>66</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações sobre o método proposto .....</b>	<b>67</b>
<b>3.2</b>	<b>As fases do método.....</b>	<b>69</b>
3.2.1	Fase A: Modelagem e otimização do suporte logístico.....	69
3.2.2	Fase B: Seleção pelo requisito e alocação de recursos para simulação.....	72
3.2.3	Fase C: Modelagem e simulação do cenário operacional .....	72
<b>3.3</b>	<b>Fluxograma do método .....</b>	<b>74</b>
<b>3.4</b>	<b>Considerações finais do capítulo .....</b>	<b>75</b>
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO, RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>76</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações sobre os casos de aplicação do método.....</b>	<b>76</b>
<b>4.2</b>	<b>Impacto da análise de nível de reparo .....</b>	<b>82</b>
<b>4.3</b>	<b>O método aplicado ao longo do desenvolvimento .....</b>	<b>86</b>
<b>4.4</b>	<b>Casos de estudo .....</b>	<b>89</b>
4.4.1	Caso 1 .....	89
4.4.2	Caso 2 .....	98
4.4.3	Caso 3 .....	103
<b>4.5</b>	<b>Discussões sobre a aplicação do método.....</b>	<b>108</b>
<b>4.6</b>	<b>Considerações finais do capítulo .....</b>	<b>110</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>111</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos futuros .....</b>	<b>113</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE A – PESQUISAS E MODELAGEM MATEMÁTICA DA LORA .....</b>	<b>121</b>
<b>A.1 Trabalhos explorando a LORA .....</b>	<b>121</b>
<b>A.2 Exemplo de modelagem matemática da LORA .....</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICE B – TABELAS COM OS PARÂMETROS EMPREGADOS.....</b>	<b>124</b>
<b>B.1 Descrição do produto .....</b>	<b>125</b>
<b>B.2 Componentes e grupos.....</b>	<b>127</b>
<b>B.3 Falhas e reparo.....</b>	<b>130</b>
<b>B.4 Manutenção preventiva .....</b>	<b>133</b>
<b>B.5 Modelagem das tarefas de manutenção e atividades de manutenção .....</b>	<b>135</b>
<b>B.6 Modelagem dos recursos de manutenção .....</b>	<b>140</b>
<b>B.7 Modelagem da estrutura de suporte .....</b>	<b>142</b>
<b>B.8 Modelagem das alternativas para estratégias de suporte .....</b>	<b>146</b>
<b>B.9 Modelagem da operação do sistema .....</b>	<b>147</b>

# 1 Introdução

As revoluções industriais, termo empregado para definir mudanças rápidas, generalizadas e disruptivas nos métodos de produção de bens e serviços, são importantes marcos da evolução tecnológica. A primeira revolução industrial, iniciada no século XVIII, teve como característica a mecanização da produção e o emprego da energia a vapor. A energia elétrica e a modernização da indústria possibilitaram a produção em massa no final do século XIX, caracterizando a segunda revolução. A introdução de equipamentos eletrônicos, de telecomunicação e a tecnologia da computação marcaram a terceira revolução, na segunda metade do século XX. A quarta revolução, em curso, é marcada por sistemas de produção inteligentes e conectados, baseados em tecnologias de informação e comunicação (SPERINGER; SHNELZER, 2019).

A evolução tecnológica trouxe enormes benefícios para a humanidade e o surgimento de produtos de engenharia que integram diversas tecnologias, criando sistemas de alta complexidade gerencial, como os aeroespaciais, que serão objeto deste trabalho de pesquisa.

## 1.1 Contextualização

Sistema de alta complexidade é aquele formado por elementos variados que se interrelacionam e envolvem diversas disciplinas da engenharia para seu desenvolvimento, fabricação, operação e suporte (BEN-DAYA *et al.*, 2009). Por vezes emprega-se o termo sistema complexo, usado para refletir o número de componentes customizados e a dimensão da integração de competências para o gerenciamento de seu ciclo de vida, resultando em sistemas de alta tecnologia e valor agregado (HOBDAY, 1998).

Melhor entendimento dos custos que cercam os sistemas de alta complexidade gerencial pode ser obtido ao se introduzir o conceito de ciclo de vida, possibilitando alocar os custos decorrentes de cada fase desse ciclo. Assim, obtém-se o Custo do Ciclo de Vida, mais conhecido pela sigla LCC (do inglês *Life Cycle Cost*), que pode ser dividido em categorias e níveis, formando uma estrutura detalhada de custos (BLANCHARD, 2014).

A literatura apresenta diversos modelos de ciclo de vida aplicáveis aos sistemas de alta complexidade gerencial. De acordo com ASD/AIA (2021b), o ciclo de vida de um sistema é dividido em 5 fases: preparação, desenvolvimento, produção, serviço e descarte. A estruturação

do ciclo de vida em fases fornece uma visibilidade de alto nível dos pontos de decisão e auxilia no controle do projeto e dos processos técnicos envolvidos (ASD/AIA, 2021b). A fase de serviço é alternativamente denominada por DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY (2021) de operação e suporte, nomenclatura que melhor traduz as atividades que ocorrem nessa fase, de forma que ao longo do texto do trabalho, será dada preferência ao emprego dessa nomenclatura.

A fase de operação e suporte tem grande importância dentro do ciclo de vida, visto que é a razão da existência do produto, além de ser responsável por uma porção significativa do LCC de um sistema de alta complexidade (BLANCHARD, 2014). Tendo o suporte à operação tamanho impacto no LCC, é importante considerar o sistema de suporte como parte integrante do produto, desde a fase de preparação (ASD/AIA, 2021b).

A Figura 1.1 ilustra o comportamento dos custos nas fases iniciais do ciclo de vida de um sistema de alta complexidade gerencial. Observa-se que, apesar dos desembolsos reais (curva na cor laranja) que ocorrem até o término da fase de desenvolvimento representarem uma parcela pequena do LCC, são nas fases iniciais que ocorre grande parte do comprometimento dos custos do sistema (curva em verde), por meio das decisões de projeto tomadas nestas fases. De acordo com NASA (2016), quando se alcança o PDR (do inglês *Preliminary Design Review*), que ocorre aproximadamente na metade da fase de desenvolvimento, apenas 15% do LCC foi de fato desembolsado, no entanto, 75% deste já foi comprometido pelas decisões até então tomadas. Por fim, a curva em azul traduz o comportamento da oportunidade de economia no LCC.

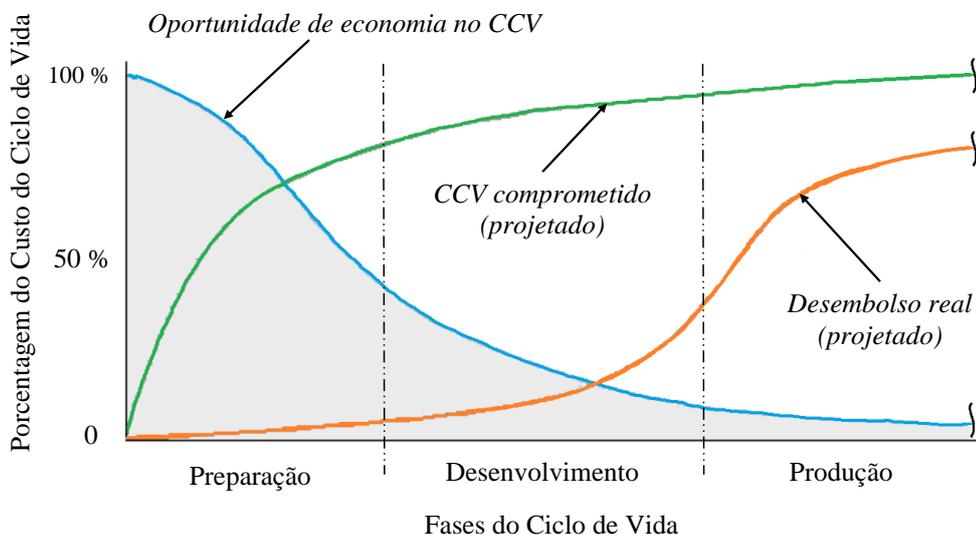


Figura 1.1 – Comportamento do LCC (adaptado de BLANCHARD, 2014).

Outro aspecto relevante do comportamento dos custos no desenvolvimento de produtos é a tendência de aumento expressivo do custo para se introduzir modificações de projeto, conforme se avança nas fases do ciclo de vida, efeito ilustrado na Figura 1.2.

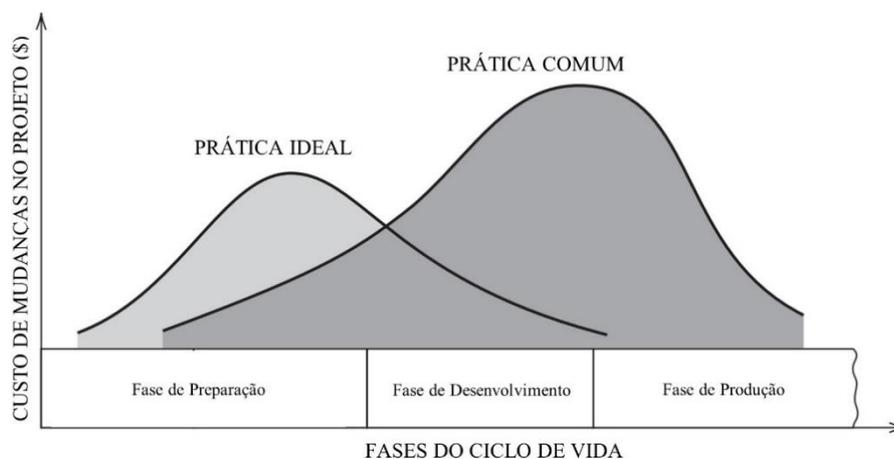


Figura 1.2 – Comportamento dos custos decorrentes de mudanças de projeto (adaptado de BLANCHARD; BLYLER, 2016).

Diante do contexto exposto, este trabalho situará os esforços de pesquisa na exploração de análises que dimensionem o impacto de decisões de projeto, tomadas nas fases iniciais do desenvolvimento, sobre o LCC, por meio de técnicas que possibilitem obter previsões do Custo de Suporte em Vida, conhecido pela sigla LSC (do inglês *Life Support Cost*), que ocorrem na fase de operação e suporte que, em geral, é a mais duradoura e onerosa do ciclo de vida.

Para tanto, serão exploradas as abordagens e técnicas que compõe a Engenharia Logística, disciplina na qual se insere a linha de pesquisa do trabalho e que é responsável, de acordo com o Conselho de Profissionais de Engenharia Logística, pela integração de considerações de suporte em todas as fases do ciclo de vida, definindo e influenciando a infraestrutura de suporte (CLEP, 2022).

O sistema de suporte, que deve ser integrado elaborado em compasso com o desenvolvimento do produto, é composto por 12 elementos, que serão abordados em detalhes no próximo capítulo. Nesse ponto pode-se definir o conceito de suportabilidade, que é o grau em que o sistema de suporte do produto atende aos requisitos operacionais do sistema de alta complexidade (ASD/AIA, 2021b). Ou seja, a suportabilidade mede a eficiência do sistema de suporte.

As principais medidas de desempenho relacionadas à suportabilidade são a confiabilidade, a disponibilidade e a manutenibilidade. Este conjunto de métricas é conhecido

como fatores RAM (do inglês *Reliability, Availability and Maintainability*). Os fatores RAM são os grandes influenciadores do comportamento operacional e logístico de um sistema de alta complexidade gerencial (ABRAHÃO *et al.*, 2019).

Tendo em vista que o presente trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de produtos custo-efetivos, serão adotadas abordagens robustas disponíveis na literatura, em particular o modelo de Suporte Integrado ao Produto, conhecido como IPS (do inglês *Integrated Product Support*).

Ao longo desse texto será largamente empregado o termo “logística”. Devido a tendência de associar esse termo às operações de transporte, cabe ressaltar que, no contexto desse trabalho, o termo é empregado para refletir as atividades de suporte ao produto, cobrindo características como gerenciamento, manutenção, equipamentos de suporte, capacitação, dados técnicos, embalagem, estocagem, transporte, entre outras atividades (ASD/AIA, 2021a).

Outro aspecto que se pretende agregar ao trabalho é a consideração do cenário operacional do sistema, bem como seu impacto sobre o desempenho logístico. A aplicação de um produto pode variar consideravelmente, requerendo que o conceito de operações seja levado em consideração em seu desenvolvimento. Um exemplo é o motor turbojato denominado J85, desenvolvido na década de 1950 pela General Electric para equipar um veículo aéreo não tripulado, concebido pela McDonnell, que tinha o objetivo de ser lançado de bombardeiros pesados da Força Aérea Americana, como a aeronave B-52, para confundir e degradar as defesas aéreas inimigas. No entanto, este mesmo motor foi posteriormente empregado nas aeronaves de treinamento avançado T-38, desenvolvidos pela Northrop (WERRELL, 1985).

## 1.2 Motivação

Uma característica marcante dos sistemas de alta complexidade é a longa expectativa de vida em serviço, o que potencializa o impacto do LSC sobre o LCC. Para os setores de defesa e aeroespacial, os sistemas podem permanecer em serviço por mais de 20 anos, com casos que excedem os 40 anos de operação (ROJO, ROY, SHEHAB, 2010).

Um exemplo emblemático de longevidade em serviço é o da aeronave B-52 *Stratofortress*, um bombardeiro pesado fabricado pela Boeing. Em 29 de junho de 2005 o B-52 completou 50 anos de sua entrada em serviço (UNITED STATES, 2005). O plano atual da Força Aérea Americana é manter o B-52 em operação até 2050, o que o deixaria bem perto de alcançar a marca de 100 anos em serviço. O B-52 operado hoje passou por várias modernizações

para atualizar suas capacidades operacionais e manter-se economicamente viável. Dentre as características responsáveis pelo longo tempo em serviço destacam-se seus bons indicadores de disponibilidade operacional e seus baixos custos de operação e suporte, frente às de outros bombardeiros como o B-1 e o B-2 (THOMPSON, 2020).

Conforme mencionado anteriormente, o desenvolvimento do sistema de suporte em compasso com o desenvolvimento do produto é um fator preponderante para o atingimento da custo-efetividade para sistemas de alta complexidade. Apesar de haver vasta literatura recomendando a integração do sistema de suporte ao ciclo de vida do produto, a prática mostra que, com raras exceções, a suportabilidade de sistemas alta complexidade gerencial é considerada tardiamente pela indústria, operadores e organizações de manutenção. A própria academia tem ignorado o tema ao deixar de incluí-lo na grade curricular da maioria dos cursos de engenharia (ABRAHÃO *et al.*, 2019).

Um exemplo que retrata a realidade acima mencionada é o da aeronave Convair B-58 *Hustler* que, após diversos atrasos no seu desenvolvimento, entrou em serviço em 1961, sendo operado somente até 1970 (GRANT, 2002). O B-58 exigia para sua operação e suporte um alto nível de habilidade e treinamento, além de equipamentos altamente especializados para sua manutenção, resultando num enorme custo por hora de voo, o que motivou o precoce início de sua retirada de serviço em 1965. O B-58 demonstrou a necessidade da consideração dos aspectos logísticos como a confiabilidade, a manutenibilidade e o gerenciamento do LCC no desenvolvimento dos projetos demandados pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (RUSSELL, 2007).

A previsão do LCC de sistemas de alta complexidade é um desafio de pesquisa, devido às incertezas associadas aos processos logísticos e aos cenários dinâmicos de operação e suporte. O setor de defesa tem grande preocupação e interesse na previsão do LCC, visto que necessita operar sistemas de alta complexidade para cumprir suas diversas missões, restrito a limites orçamentários (FIGUEIREDO-PINTO; ABRAHÃO, 2018).

Sistemas de emprego militar, como aeronaves e carros de combate, compõem um grupo denominado Produto Estratégico de Defesa (PED), termo definido na Lei 12.589, de 21 de março de 2012. Esse trabalho busca concentrar-se nas fases iniciais do desenvolvimento de um PED, seguindo a tendência nacional de atribuir, nas últimas décadas, maior grau de importância ao desenvolvimento dessa categoria de produtos, dada a percepção da relevância do fortalecimento da Base Científica, Tecnológica, Industrial e Logística de Defesa, termo usualmente simplificado para Base Industrial de Defesa, ou BID (CUNHA; AMARANTE, 2011).

O potencial de contribuição para o desenvolvimento de sistemas de defesa custo-efetivos e o contexto nacional de expansão e fortalecimento da BID motivaram a concepção dessa pesquisa e o foco no desenvolvimento de sistemas de defesa.

Para a realização das análises desse trabalho, fez-se necessária a seleção de um sistema de alta complexidade para a construção de casos de estudo. Para tanto, foi escolhido o sistema de propulsão empregado em meios aeronáuticos, com propósitos relacionados à defesa.

Dentre os componentes e sistemas de uma aeronave, o sistema de propulsão é, na grande maioria dos casos, o que apresenta o maior custo, do ponto de vista de aquisição e de suporte. A Figura 1.3 apresenta a divisão dos custos recorrentes de um operador de linha aérea, indicando que os custos de manutenção correspondem a 21% do custo total, sendo que os serviços relacionados ao sistema de motores representam 32% dos custos de manutenção (FEDELE; DI VITO; RAMUNDO, 2020). Esses dados motivaram a escolha do sistema de propulsão como foco dos casos a serem estudados, visto seu relevante impacto no LSC.

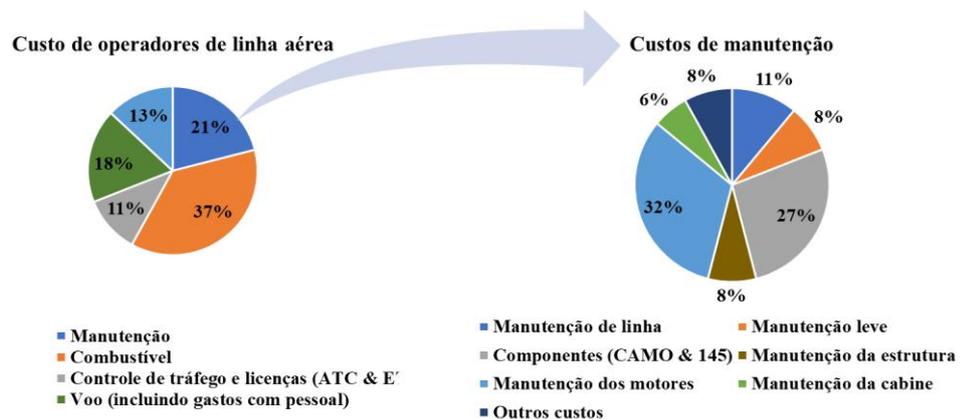


Figura 1.3 – Representatividade dos custos com manutenção de motores aeronáuticos

(adaptado de FEDELE; DI VITO; RAMUNDO, 2020).

Outro fator motivador é que o Brasil não domina o desenvolvimento de componentes aeronáuticos, apesar de sua relevante representatividade no cenário global da indústria aeronáutica, atrelado principalmente a atuação da Embraer, que é uma grande importadora de componentes que são integrados às suas aeronaves, visto o escasso desenvolvimento nacional destes produtos (GOMES, 2012). Os motores aeronáuticos estão entre os componentes com carência de desenvolvimento nacional, o que é um fator motivador de pesquisas, tendo em vista sua aplicação estratégica em setores como o de defesa.

Um exemplo específico de PED são os propulsores com empuxo na faixa utilizada em mísseis de cruzeiro, que possuem comercialização controlada, visto tratar-se de tecnologia sensível. Um dos mecanismos de controle é o acordo internacional denominado Regime de Controle de Tecnologia de Mísseis, conhecido pela sigla MTCR (do inglês *Missile Technology Control Regime*), estabelecido com o objetivo de limitar a proliferação de sistemas de transporte não tripulados que possam ser empregados como vetores para ataques de destruição em massa. O Brasil é membro do MTCR desde 1995, estando sujeito ao controle imposto pelo regime (IAE, 2019).

Esforços para o desenvolvimento de sistemas de propulsão nacionais têm sido empreendidos por empresas privadas e por parcerias público-privadas, a exemplo do Projeto Turborreator de 5000 Newtons (TR-5000), desenvolvido pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), em parceria com uma empresa interveniente nacional, e que conta com a participação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). O objetivo é desenvolver um motor turbojato nacional, atendendo aos requisitos de propulsão de aeronaves não tripuladas, além de ampliar a infraestrutura de ensaios de turbinas a gás do IAE (IAE, 2019).

Os fatos acima expostos demonstram a relevância de serem conduzidas pesquisas para viabilizar o desenvolvimento nacional de sistemas de propulsão empregados em meios aeronáuticos, especialmente nos meios de defesa. Iniciativas de desenvolvimento serão beneficiadas ao incorporarem requisitos de suportabilidade, possibilitando a entrega de produtos nacionais maduros do ponto de vista de seu suporte logístico, para uso militar ou civil.

### **1.3 Problema de pesquisa**

É consenso na literatura de Engenharia Logística e de Engenharia de Sistemas a importância de considerar-se a suportabilidade desde as fases iniciais do desenvolvimento de um sistema de alta complexidade, dado o relevante impacto do suporte sobre o LCC e sobre o desempenho logístico do produto. Portanto, pesquisas que explorem ferramentas e métodos para apoiar decisões de projeto desde sua concepção apresentam significativa relevância, devido ao potencial de contribuir para o desenvolvimento de sistemas alta complexidade custo-efetivos e maduros, do ponto de vista das métricas de suportabilidade.

A vastidão de parâmetros a serem considerados na modelagem da suportabilidade de um sistema de alta complexidade gerencial e as diversas variáveis associadas ao processo de otimização do suporte torna esta tarefa desafiadora, de forma que a literatura apresenta modelos

que focam em aspectos específicos. Autores como Barros e Riley (2001) e Saranga e Kumar (2006) preocuparam-se com a decisão sobre o reparo ou descarte de componentes do sistema ao apresentarem falha, bem como com a alocação ótima dos níveis de manutenção dentro da estrutura de suporte. Alfredsson (1997) acrescentou o dimensionamento do estoque de componentes sobressalentes, além de otimizar a alocação de recursos de manutenção. Brick e Uchoa (2009) adicionaram o dimensionamento da quantidade dos recursos de manutenção.

Marques *et al.* (2017) modelaram a suportabilidade no desenvolvimento de sistemas, porém focando no amadurecimento da confiabilidade, tendo uma abordagem limitada dos elementos do IPS e considerando apenas a otimização dos estoques para suportar a operação. Já Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018) incluíram a simulação de cenários operacionais. Alguns desses trabalhos, bem como outros relacionados, serão apresentados com maiores detalhes no próximo capítulo.

Dessa forma, o problema de pesquisa consiste em como estruturar um método, ou modelo, que cubra as lacunas dos trabalhos estudados, visando a modelar a suportabilidade de alternativas de projeto, na fase de concepção do produto, que considerem os dados gerados pelas atividades do IPS, levando em conta a otimização simultânea da composição, localização e níveis de estoques de itens sobressalentes, da alocação de níveis de manutenção e seus recursos, bem como suas quantidades, dentro da estrutura de suporte, considerando ainda as possibilidades de políticas de suporte e o impacto do dinamismo dos cenários operacionais do sistema sobre as alternativas de projeto, com o propósito de obter previsões do desempenho logístico e do custo de suporte na fase de operação do sistema para cada alternativa de projeto analisada, elevando assim o nível de consciência situacional nas tomadas de decisão das fases iniciais do desenvolvimento do produto.

## **1.4 Objetivos**

Dado o contexto apresentado e o problema de pesquisa, foram definidos os objetivos do trabalho, dividindo-se em objetivo geral e específicos, conforme apresentado a seguir.

### **1.4.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e aplicar em casos de estudo um método para obter previsões do LSC de alternativas de projeto nas fases iniciais do desenvolvimento de

sistemas de alta complexidade gerencial, permitindo a realização de análises de compensação e influenciando processos decisórios de projeto. O método deverá permitir que se leve em consideração alternativas de conceitos de manutenção e estimar o impacto dos variados cenários de operação, empregando os dados gerados pelas atividades do IPS. Para tanto, os modelos observarão os aspectos de suportabilidade das alternativas a serem analisadas, tornando o método uma ferramenta para avaliar o desempenho do sistema de suporte, permitindo que este seja levado em consideração, em conjunto com o desempenho do produto, desde as fases iniciais do ciclo de vida, contribuindo para a obtenção de sistemas custo-efetivos.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

Os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos como meio de se atingir o objetivo geral:

- Explorar o problema do suporte logístico.
- Explorar na literatura as abordagens para a integração de requisitos de suportabilidade no desenvolvimento de sistemas de alta complexidade gerencial.
- Explorar as análises dos modelos de integração de requisitos de suportabilidade, buscando obter parâmetros que possam ser empregados na construção de modelos para o suporte logístico de um sistema de alta complexidade gerencial em desenvolvimento.
- Identificar ferramentas que permitam modelar a suportabilidade de sistemas de alta complexidade em desenvolvimento, obtendo estimativas para o LSC, permitindo modelar o desempenho logístico de alternativas de projeto.
- Identificar ferramentas que permitam modelar e simular o cenário de operação e suporte, com base no conceito de operação e no conceito de manutenção.
- Modelar a suportabilidade e otimizar o desempenho logístico das alternativas de projeto, permitindo comparar o melhor desempenho que cada alternativa de projeto pode fornecer. Para tanto, propõe-se otimizar a localização de estoque de sobressalentes, o nível destes estoques, o dimensionamento dos recursos e a estratégia de suporte.
- Simular cenários operacionais, avaliando os impactos sobre o desempenho do suporte logístico.

- Gerar resultados que permitam apoiar estudos de compensação nas fases iniciais do desenvolvimento de sistemas de alta complexidade, aumentando o nível de consciência situacional na tomada de decisões de desenvolvimento.

## **1.5 Hipótese**

Com base na revisão da literatura, a hipótese deste trabalho é que, dada a aplicação da abordagem do IPS no processo de Engenharia de Sistemas para o desenvolvimento do produto, é possível estruturar um método que modele o suporte logístico do sistema considerando o conceito de operação, o conceito de manutenção e a dinâmica do cenário operacional, fornecendo previsões do LSC de alternativas de projeto durante as fases de preparação e desenvolvimento, permitindo que análises de LCC influenciem decisões de projeto. As comparações serão feitas por meio da obtenção do melhor desempenho logístico de cada alternativa de projeto, aplicando-se otimização. Para considerar a dinâmica do cenário operacional, será aplicada a simulação do perfil de operações do sistema.

## **1.6 Estrutura do trabalho**

A dissertação está estruturada em cinco capítulos. O capítulo introdutório apresenta o problema de pesquisa, seu contexto e sua relevância, bem como a motivação e os objetivos do trabalho. O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, com tópicos essenciais para a compreensão do trabalho, bem como seus principais referenciais teóricos. No terceiro capítulo discorre-se sobre a estratégia de pesquisa adotada, bem como é apresentado e detalhado o método desenvolvido neste trabalho. O capítulo 4 apresenta a aplicação do método em casos de estudo, que adotam como objeto um motor aeronáutico empregado em sistemas de defesa, ressaltando suas capacidades e limitações no atendimento do objetivo do trabalho.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações finais do trabalho, com indicação de oportunidades de pesquisas futuras, baseadas nos pontos relevantes abordados, mas não investigados a fundo, por estarem fora do escopo do trabalho.

## 2 Revisão da Literatura e Referencial Teórico

Com o objetivo de aprofundar o entendimento do contexto do problema de pesquisa, além de identificar as abordagens e ferramentas de análises relevantes para o atingimento do objetivo do trabalho, foi realizada uma revisão da literatura que resultou no texto desse capítulo, onde são registradas as bases teóricas, os principais conceitos relacionados ao desenvolvimento do sistema de suporte do produto, desde sua fase de preparação, levando em conta as métricas de suportabilidade e destacando os efeitos da estrutura de suporte logístico no desempenho do sistema de suporte.

### 2.1 O problema de suportabilidade

A suportabilidade é o grau em que o sistema de suporte atende aos requisitos operacionais do produto (ASD/AIA, 2021b), podendo ser entendida como a eficácia e a eficiência do sistema de suporte no atendimento de métricas de desempenho do suporte.

De acordo com Blanchard (2014), o sistema de suporte ao produto deve ser considerado como um elemento integrante do produto, desde a sua concepção, não devendo ser tratado de forma separada no seu desenvolvimento. No entanto, conforme mencionado na introdução deste trabalho, a indústria, com algumas exceções, tem tratado do assunto tardiamente (ABRAHÃO *et al.*, 2019).

Os fatores RAM, que serão abordados com maiores detalhes no presente capítulo, são métricas de desempenho com grande impacto na suportabilidade de sistemas de alta complexidade gerencial (ABRAHÃO *et al.*, 2019), possibilitando monitorar e controlar a evolução da suportabilidade ao longo do ciclo de vida, conforme está representado na Figura 2.1, onde:

- a) A curva “1” representa o comportamento desejável para a evolução dos fatores RAM ao longo das fases iniciais do desenvolvimento até a entrega do primeiro produto ao primeiro cliente, no ponto “A”. Após a entrada em serviço, é esperado que haja uma oscilação dos fatores RAM (linha tracejada iniciada em “A”) em torno da meta, mas sem grandes quedas, graças à atuação do elemento do IPS de Suporte Continuado de Engenharia; e

- b) A curva “2” representa o comportamento observado quando os requisitos de suportabilidade são considerados tardiamente, fazendo com que o primeiro produto seja entregue ao primeiro cliente no ponto “B”, sem atender os requisitos para os fatores RAM. A continuação desta curva ao longo da fase de operação e suporte terá o aspecto representado pela linha tracejada que se inicia em “B”, exigindo um esforço do elemento do IPS de Suporte Continuado de Engenharia para alcançar os requisitos dos fatores RAM. Esse esforço acarreta custos extras, ilustrados pela região sombreada em vermelho. Cabe ressaltar que alguns sistemas de alta complexidade sequer conseguem atingir os requisitos, operando aquém dos mesmos até a retirada de serviço, como o caso da aeronave B-58, mencionado no Capítulo 1.

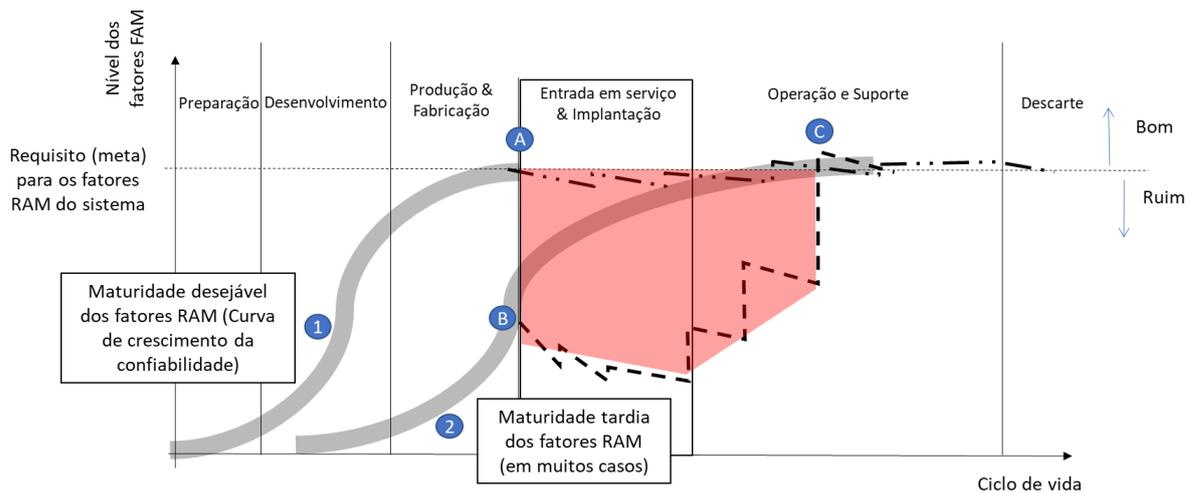


Figura 2.1 – Maturidade dos fatores RAM (adaptado de ABRAHÃO *et al.*, 2019).

A consideração do IPS no processo de Engenharia de Sistemas apresenta-se como uma abordagem para que desenvolvedores de sistemas de alta complexidade entreguem o primeiro produto ao primeiro cliente com o nível requerido de maturidade dos fatores RAM, dotado de um sistema de suporte custo-efetivo e atendendo aos requisitos operacionais.

Para acompanhar a evolução do IPS no desenvolvimento de sistemas é empregado o conceito de nível de maturidade do suporte ou do IPS, denominado de SML (do inglês *Support Maturity Level*), que é um método que auxilia na identificação do nível de maturidade do IPS a ser atingido em cada um dos marcos definidos, descrevendo as capacidades do programa de IPS em cada ponto do ciclo de vida do sistema (ASD/AIA, 2021b). A Figura 2.2 apresenta um

modelo de evolução do SML ao longo do ciclo de vida, bem como os marcos definidos para cada nível.



Figura 2.2 – Evolução do SML ao longo do ciclo de vida (adaptado de ASD/AIA, 2021b).

Os marcos ou portas de decisão normalmente corresponde a documentos formais decorrentes da integração do IPS no processo de Engenharia de Sistemas no desenvolvimento do produto. Os marcos indicados na Figura 2.2 são descritos na Tabela 2-1.

Tabela 2-1 – Marcos definidos para a avaliação do SML (adaptado de ASD/AIA, 2021b).

SML	Marco/Porta de decisão	Definição	SML	Marco/Porta de decisão	Definição
1	<i>Operational Requirements Document (ORD)</i>	Estabelecimento qualitativo e quantitativo dos requisitos operacionais, dos quais se desenvolverão os requisitos de suporte.	7	<i>Critical Design Review (CDR)</i>	Requisitos dos elementos do IPS integrados e consistentes com projeto do sistema.
2	<i>Usage Requirements Document (URD)</i>	Garantia do adequado uso do produto considerando os requisitos logísticos.	8	<i>Final Acceptance Review (FAR)</i>	Plano de IPS completo. Envolvidos identificados e prontos para a implementação do sistema.
3	<i>System Requirements Document (SRD)</i>	Definição dos requisitos do sistema que atendam as necessidades do operador.	9	<i>Support Solution Review (SSR)</i>	Capacidades de suporte provadas em ambiente operacional. Medição de indicadores e comparação com metas.
4	<i>Guidance Conference Document (GCD)</i>	Estabelecimento de acordos entre gerentes e especialistas vinculados ao desempenho das atividades do IPS.	10	<i>Product Delivery/In-Service Date (ISD)</i>	Sistema de IPS implantado, entregue e operacional.
5	<i>System Requirements Review (SRR)</i>	Capacidades do sistema e requisitos de suporte analisados e alocados. Estratégia formulada e integrada para RAMS.	11	<i>In-Service Review (ISR)</i>	Verificação do sistema de IPS. Adoção de ações corretivas. Melhorias e modificações.
6	<i>Preliminary Design Review (PDR)</i>	Determinação da solução ótima para o conceito de IPS sustentada por análises.	12	<i>Out of Service Date</i>	Adoção do plano de descarte.

Diversos autores dedicaram-se a estudar meios de modelar a suportabilidade de sistemas de alta complexidade, com abordagens que variam entre os elementos do suporte abordados e as fases do ciclo de vida nas quais o estudo focou. Cabe ressaltar que os trabalhos publicados

variam também com relação aos objetivos, sendo que alguns autores se preocuparam em obter modelos matemáticos que ampliam a abrangência da análise, agregando capacidades ainda não implementadas em outros modelos, de forma isolada ou combinada. Outros autores focaram na viabilização e na eficiência da obtenção de soluções oriundas dos modelos matemáticos, por meio de técnicas como o emprego de heurísticas ou meta-heurísticas. Por fim, alguns autores preocuparam-se com a obtenção de métodos ou modelos para uso em casos de aplicação prática, focando em suas capacidades de análise, buscando propor meios de auxílio para a tomada de decisões em diversas fases do ciclo de vida de sistemas de alta complexidade.

Alfredsson (1997) modelou matematicamente um sistema de suporte que minimiza o número esperado de pedidos pendentes de itens do estoque para um determinado LCC. O modelo abrange decisões de tipo e nível de reparo, nível e localização de estoque, além de abranger a localização e configuração de equipamentos de teste. A modelagem matemática valeu-se de modelos e teoremas que serão abordados adiante neste capítulo, dentre os quais citam-se o METRIC, o VARI-METRIC e o teorema de Palm, além do conceito de convexificação, que não será abordado neste trabalho. O autor fez diversos testes com várias instâncias que permitiram avaliar a robustez do modelo.

Sandberg e Strömber (1999) abordaram o foco em LSC adotado no desenvolvimento da aeronave Gripen e a forma como isso aconteceu, apontando que para o desenvolvimento do Gripen, foram impostos requisitos específicos relacionados à suportabilidade da aeronave, atendendo aos requisitos operacionais da Força Aérea Sueca. Os requisitos ligados à suportabilidade foram inseridos no contrato e acompanhados ao longo do desenvolvimento do projeto do Gripen. As autoras ainda abordaram a importância do monitoramento contínuo do atendimento dos requisitos de suporte e do LSC ao longo da operação, apontando os atributos integrados no programa Gripen que facilitam este monitoramento.

Brick e Uchoa (2009) elaboraram um modelo de programação inteira para o problema de análise de nível de reparo, que será tratada com maiores detalhes ainda no presente capítulo. O modelo é capaz de considerar diversos parâmetros, tais como taxas de falha distintas para cada modo de falha de cada componente do sistema, associar a ação de manutenção requerida para cada modo de falha, associar custos de transporte e de recursos necessários para a realização da ação de manutenção. O modelo é capaz de determinar a localização ótima dos recursos e a possibilidade de realização da ação de manutenção em instalação orgânica ou pertencente a terceiros.

Tysseland (2009) comparou o resultado do gerenciamento de projetos de defesa da Noruega que adotaram uma ferramenta comercial de modelagem da suportabilidade, com os

resultados apresentados por projetos que não empregaram essa ferramenta, valendo-se da experiência dos gerentes de suporte e da sugestão dos fabricantes para a composição dos estoques de componentes sobressalentes. Os estudos apontaram uma clara redução nos investimentos em estoque, acompanhado de um ganho em disponibilidade dos sistemas, ao aplicar-se a modelagem da suportabilidade apoiada por uma ferramenta computacional no gerenciamento do suporte.

Van Baaren e Curran (2013) propuseram um método genérico de projeto dirigido por fatores RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability and Supportability*), denominado *RAMS Driven Design* (RDD), buscando considerar os requisitos de todos os envolvidos (*stakeholders*), em todas as fases do ciclo de vida. O trabalho traz um estudo de caso da aplicação do método no domínio de aeronaves militares, comparando com a indústria de aeronaves comerciais. Os autores citam que, para os estudos, foram utilizados casos envolvendo projetos de aquisição, novos desenvolvimentos e programas de grandes modificações de aeronaves de transporte de asas fixas, de helicópteros militares e aeronaves não tripuladas, entre 2000 e 2012. O estudo aponta uma falta de procedimentos padronizados para integrar os fatores RAMS ao desenvolvimento de projetos militares. Citam ainda que, devido as características de competitividade e regulação, a indústria da aviação comercial demonstra um processo de desenvolvimento focado na entrega de um produto final que atenda todos os requisitos já na entrada em serviço.

Cruyt, Ghobbar e Curran (2014) focaram no problema da suportabilidade na entrada em serviço de uma nova aeronave, fase caracterizada por baixa maturidade logística. O objetivo dos autores foi desenvolver e implementar um método de avaliação da suportabilidade com base em valor, empregando a estrutura geral de análise de compensação e a Metodologia de Valor Operacional (VOM - *Value Operations Methodology*), que é um método de Engenharia de Valor que visa a facilitar a tomada de decisões. A modelagem ainda envolveu a aplicação de outros conceitos amplamente difundidos, como o método AHP (*Analytical Hierarchical Process*), técnicas de simulação e análises estatísticas. O modelo construído permitiu avaliar a suportabilidade em diferentes cenários, relacionando o nível de estoque e a capacidade de reparo com a disponibilidade da frota, avaliando o custo do suporte. A ferramenta possibilita uma avaliação rápida da estratégia de suporte, sempre comparando-a com um caso básico.

Tsai e Liu (2015) desenvolveram dois algoritmos para solucionar o problema de decisão do nível de estoque em uma estrutura de suporte multi-escalão, visando encontrar uma solução que minimize o custo total do estoque enquanto satisfaz a meta de tempo de resposta de cada base, onde ocorrem as demandas. O primeiro algoritmo é baseado em procedimentos de seleção

e classificação, conhecido como R&S (do inglês *Ranking and Selection*). O segundo é baseado no Algoritmo Genético Estocástico, conhecido como SGA (do inglês *Stochastic Genetic Algorithm*). O primeiro algoritmo foca em um conjunto pequeno de soluções candidatas, já o segundo algoritmo abrange um número maior de soluções candidatas geradas durante o processo de busca adaptada do SGA. O primeiro algoritmo é capaz de prover uma garantia estatística na escolha de soluções de compromisso, já o segundo algoritmo entrega valores objetivos levemente inferiores comparado a outras técnicas convencionais de otimização.

Marques *et al.* (2017) abordaram os impactos do amadurecimento da confiabilidade no custo de suporte de um sistema em desenvolvimento, por meio de um estudo de caso em que se avaliou os resultados de alterações nas taxas de falha dos itens reparáveis no custo da lista de provisionamento inicial de sobressalentes e na disponibilidade operacional esperada para o sistema em análise. Como resultado, os autores disponibilizaram um método de acompanhamento do amadurecimento da confiabilidade, que pode ser empregado por gerentes de suporte de frotas para tomada de decisões de ajustes de estoque de giro de itens reparáveis.

Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018) empregaram dados reais descaracterizados de 23 itens de uma frota de aeronaves da Força Aérea Brasileira (FAB), os quais foram carregados numa ferramenta comercial de modelagem da suportabilidade. Os autores implementaram uma metodologia de análise prospectiva de LCC e do custo por hora de voo, parâmetro amplamente empregado para avaliar o desempenho logístico dos sistemas operados pela FAB. Os autores ainda analisaram a sensibilidade a fatores de confiabilidade, variando a taxa de falha, e a fatores de manutenibilidade, variando os tempos de espera por manutenção. O trabalho inclui a simulação do impacto causado pelo dinamismo dos cenários operacionais do sistema. A metodologia aplicada resultou numa ferramenta útil para o apoio à tomada de decisão em novos projetos, que não permitem lançar mão de dados históricos.

A Tabela 2-2 apresenta um comparativo dos estudos abordados anteriormente com o presente trabalho, destacando as lacunas que se pretende cobrir. A tabela também ilustra que poucos estudos se concentraram na fase de desenvolvimento do produto, e poucos aplicaram a simulação de cenários operacionais. Observa-se também que a relação entre o custo de suporte e a disponibilidade operacional está presente em diversos estudos como indicador do desempenho logístico.

Tabela 2-2 – Tabela comparativa entre demais pesquisas e o presente trabalho.

Referências	Suporte Integrado ao Produto (IPS)	Aplicação no desenvolvimento do produto	Relação custo-benefício como: LSC-Disponibilidade	Estrutura de Suporte Multi-escalação	Alocação dos níveis de manutenção	Composição e nível de estoque	Localização dos estoques	Alocação de recursos	Dimensionamento dos recursos	Política de suporte (orgânicas ou terceirizada)	Simulação de cenário operacional
Alfredsson (1997)				X	X	X	X	X			
Sandberg e Strömber (1999)	X	X	X								
Brick e Uchoa (2009)				X	X			X	X	X	
Tysseland (2009)			X	X	X	X	X				
Van Baaren e Curran (2013)		X									
Cruyt, Ghobbar e Curran (2014)			X			X	X				X
Tsai e Liu (2015)						X	X				
Marques <i>et al.</i> (2017)		X	X			X	X				
Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018)			X	X		X	X				X
Este trabalho (2023)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

## 2.2 Conceito de operações

O conceito de operações, conhecido por ConOps (do inglês *Concept of Operations*), é um documento destinado ao registro formal da descrição antecipada dos requisitos operacionais do sistema, com base na identificação das necessidades do usuário ou operador (BLANCHARD; BLYLER, 2016). O ConOps deve ser revisado e atualizado periodicamente para refletir a evolução do projeto do sistema e promover um entendimento detalhado e comum aos envolvidos (IEEE, 2007).

De acordo com Blanchard e Blyler (2016), o ConOps deve incluir as seguintes informações:

- Distribuição dos sistemas: número de bases operacionais, quantidade de sistemas por base, distribuição geográfica e tempos envolvidos nos deslocamentos;
- Cenário e perfil de missão: descrição da missão principal e das missões secundárias do sistema, ilustrando os aspectos dinâmicos da operação;
- Parâmetros de desempenho operacional: definição quantitativa das características operacionais básicas, incluindo parâmetros de desempenho técnico e logístico;
- Requisitos de utilização: taxa de utilização do sistema e seus elementos necessária para o cumprimento da missão;

- e) Requisitos de efetividade: requisitos do sistema descritos, sempre que aplicável, de forma quantitativa, incluindo fatores como custo-efetividade, disponibilidade operacional (que também deve ser incluída nos parâmetros de desempenho operacional mencionados anteriormente), confiabilidade do sistema, tempo médio entre manutenções, nível de segurança, entre outros;
- f) Interfaces do sistema ou requisitos de interoperabilidade: interfaces primárias com outros sistemas; e
- g) Ambiente operacional: definição do ambiente no qual o sistema deve operar de forma eficaz e efetiva, incluindo informações tais como faixa de temperatura, vibração, ruído, umidade, detalhes do terreno, entre outras informações.

Além do objetivo geral do ConOps, de fornecer um entendimento comum a respeito do sistema e sua integração com o seu ambiente operacional, ACQNOTES (2023) ainda elenca as seguintes finalidades e razões para a elaboração do ConOps:

- a) Auxiliar no desenvolvimento dos requisitos técnicos e logísticos;
- b) Fornecer um meio de rastreabilidade dos requisitos;
- c) Auxiliar na validação dos requisitos;
- d) Prover critérios a serem empregados para testes, verificações e validação do sistema;
- e) Definir o ambiente em que o sistema será operado;
- f) Manter um entendimento comum entre os envolvidos a respeito de como o sistema será operado;
- g) Definir responsáveis pelas ações; e
- h) Definir as linhas de comunicação.

### **2.3 Conceito de manutenção e suporte**

Os termos conceito de manutenção e conceito de suporte, ou ainda conceito logístico de manutenção e conceito de suporte logístico, são empregados nas literaturas de referência, tais como Blanchard (2014), UNITED STATES (2022) e Blanchard e Blyler (2016).

O conceito de manutenção ou de suporte estabelece critérios relacionados aos níveis de manutenção do sistema, as principais funções realizadas em cada nível de manutenção, as políticas básicas de suporte, métricas de efetividade e requisitos de suportabilidade. O conceito de manutenção é uma das fontes de informações que abastece o banco de dados da Análise de Suporte Logístico (BLANCHARD, 2014), que será abordada ainda no presente capítulo.

De acordo com ASD/AIA (2021b), a definição do conceito de manutenção inicia-se ainda na fase de preparação, devendo estar maduro por volta da metade da fase de desenvolvimento, visto que definirá muitas características do projeto do produto e do sistema de suporte. A atividade de desenvolvimento do conceito de manutenção está inserida no elemento Manutenção do IPS.

O ConOps e o conceito de manutenção identificam as restrições sobre as quais o sistema será operado e suportado, afetando o desempenho dos fatores RAM (UNITED STATES, 2022).

## 2.4 Métricas de suportabilidade

Diversas são as métricas que podem ser relacionadas à suportabilidade de um sistema, tendo a finalidade de medir o grau em que o sistema de suporte atende aos requisitos do produto. Para esse trabalho, os fatores RAM, descritos a seguir, serão empregados como meio de mensurar a suportabilidade.

### 2.4.1 Confiabilidade

A confiabilidade é a probabilidade de o sistema cumprir suas funções satisfatoriamente, num dado intervalo de tempo, quando operado de acordo com condições especificadas, sendo uma característica inerente do item ou sistema (BLANCHARD, 2014). Se a confiabilidade é a probabilidade de o sistema não apresentar falhas num dado intervalo de tempo, existe uma probabilidade complementar, que é a probabilidade do sistema ou item falhar para o mesmo intervalo de tempo. Assim, Blanchard (2014) expressa a função confiabilidade de acordo com a Equação 2.1.

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.1)$$

Onde:  $R(t)$  é a confiabilidade em função do tempo; e

$F(t)$  é a probabilidade de falha em função do tempo.

Ainda de acordo com Blanchard (2014), se a variável aleatória  $t$  tem uma função densidade de probabilidade de falha  $f(t)$ , então é possível expressar a confiabilidade de acordo com a Equação 2.2.

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (2.2)$$

Quando um componente está sujeito a falhas que ocorrem aleatoriamente, e o número esperado de falhas é o mesmo para iguais intervalos de tempo, sua função densidade de probabilidade de falha  $f(t)$  e sua confiabilidade  $R(t)$  podem ser definidas por funções exponenciais, conforme expressa a Equação 2.3, que é aplicável para determinar a confiabilidade de um componente que apresente taxa de falha constante (STAPELBERG, 2009).

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta} dt = e^{-t/\theta} \quad (2.3)$$

Onde:  $\theta$  é a vida média, que para uma função exponencial é equivalente ao tempo médio entre falhas, conhecido como MTBF (do inglês *Mean Time Between Failure*) (BLANCHARD, 2014).

De acordo com Blanchard (2014), a taxa de falha  $\lambda$  e o MTBF são relacionados pela Equação 2.4. Assim, substituindo a vida média  $\theta$ , que corresponde ao MTBF, pela taxa de falha, obtêm-se a expressão para determinar a confiabilidade de um componente cuja função densidade de probabilidade de falha segue uma distribuição exponencial, conforme a Equação 2.5.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (2.4)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

Adotar taxa de falha constante para tratar da confiabilidade de componentes e sistemas pode parecer uma simplificação não realista. No entanto, um amplo estudo de campo realizado junto à companhia aérea *United Airlines* apontou que a taxa de falha constante foi o comportamento predominante dentre os componentes das aeronaves, indicando que 14% dos componentes apresentaram taxa de falha constante ao longo de toda a vida em serviço e 81% apresentaram taxa de falha constante na maior porção de suas vidas em serviço, após um período de variação desta taxa devido à mortalidade infantil (NOWLAN; HEAP, 1978).

Existem ao menos oito métricas associadas à confiabilidade, porém, dadas as considerações acima, é possível afirmar que o MTBF é uma métrica representativa da confiabilidade de um componente ou sistema, podendo ser expressa pela Equação 2.6 (ASD/AIA, 2021b).

$$MTBF = \frac{\text{Tempo total de operação}}{\text{Total de falhas durante o tempo total de operação}} \quad (2.6)$$

#### 2.4.2 Manutenibilidade

O termo em inglês *maintainability* tem sido traduzido para o português como manutenibilidade por autores, como Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018), mas a literatura também apresenta a tradução manutenibilidade, como em ABNT (1994). Para este trabalho, será adotado o termo manutenibilidade.

A manutenibilidade é a probabilidade da ação de manutenção de um item, sob dadas condições de uso, ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob determinadas condições e com o emprego de procedimentos e recursos prescritos (ABNT, 1994).

Assim como a confiabilidade, a manutenibilidade é uma característica inerente do sistema, estando relacionada com a facilidade, precisão, segurança e economia na execução das ações de manutenção. Como característica de projeto, pode ser expressa em termos de frequência, tempos e custos de manutenção (BLANCHARD, 2014).

De acordo com ASD/AIA (2021b), ao menos 24 métricas podem ser associadas à manutenibilidade, destacando-se, para efeito de fundamentação teórica, as seguintes:

- a) Tempo de atraso administrativo, designado pela sigla ADT (do inglês *Administrative Delay Time*): é a soma dos atrasos não diretamente envolvidos com tarefas ou processos de manutenção. Não inclui o tempo ativo de manutenção. As esperas devido à priorização para a designação de recursos para a execução de tarefas e restrições organizacionais são exemplos de ADT (ASD/AIA, 2021b);
- b) Tempo de atraso logístico, designado pela sigla LDT (do inglês *Logistics Delay Time*): é a soma dos atrasos resultantes de espera por peças, equipamentos, transporte entre outros atrasos logísticos. O LDT não inclui o tempo ativo de manutenção. Constitui um dos atrasos mais relevantes para o desempenho do sistema de suporte (BLANCHARD, 2014);

- c) Tempo médio para o reparo, designado por MTTR (do inglês *Mean Time To Repair*): é o tempo médio desde o início do reparo até a restauração das condições operacionais do item ou do sistema, incluindo o tempo de reparo, ensaios e testes (ASD/AIA, 2021b). Pode ser alternativamente denominado de tempo médio de manutenção corretiva (BLANCHARD, 2014);
- d) Tempo médio de manutenção preventiva, designado por  $\bar{M}_{pt}$  (do inglês *Mean Preventive Maintenance Time*): tempo médio para a execução das tarefas de manutenção programadas, também denominadas de tarefas de manutenção preventiva (BLANCHARD, 2014);
- e) Tempo médio entre manutenções, designado por MTBM (do inglês *Mean Time Between Maintenance*): é o tempo médio entre todas as ações de manutenção, considerando tanto as ações corretivas quanto preventivas (BLANCHARD, 2014);
- f) Tempo médio de manutenção ativa, designado por  $\bar{M}$ : corresponde ao lapso de tempo médio requerido para a execução das atividades e processos de manutenção, incluindo manutenções corretivas e preventivas. O  $\bar{M}$  não inclui o ADT nem o LDT (BLANCHARD, 2014);
- g) Tempo de inatividade por manutenção, designado por MDT (do inglês *Maintenance Downtime*): corresponde ao lapso de tempo decorrido desde que o sistema passa a ficar indisponível por manutenção, seja corretiva ou preventiva, até seu retorno ao estado operacional. O MDT inclui o  $\bar{M}$ , o ADT e o LDT. A soma do ADT e do LDT é conhecida pela sigla WT, decorrente do termo em inglês *Waiting Time*, conforme expressa a Equação 2.7 (BLANCHARD, 2014); e
- h) Tempo médio de atraso logístico: tempo médio dos atrasos decorrentes de todos os processos logísticos como atrasos administrativos e tempo de resposta do suprimento (ASD/AIA, 2021b). É conhecido pela sigla MLDT (do inglês *Mean Logistics Delay Time*).

$$MDT = \bar{M} + ADT + LDT = \bar{M} + WT \quad (2.7)$$

A Figura 2.3 apresenta uma visão geral dos vários intervalos ou parcelas de tempo associadas à manutenibilidade de um sistema, com destaque para as métricas acima descritas.

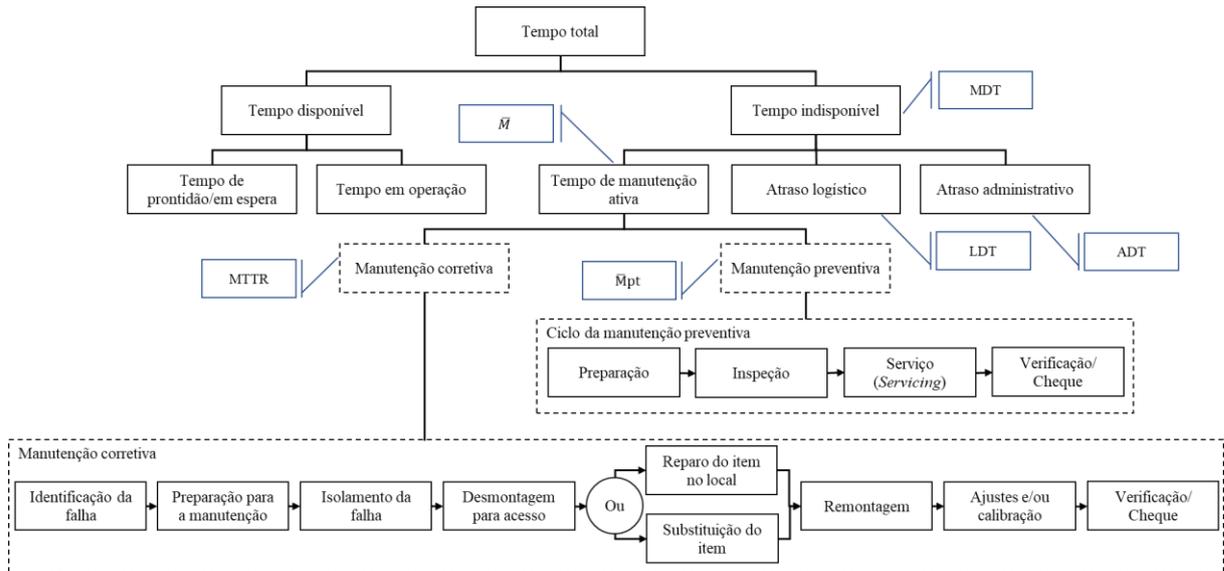


Figura 2.3 – Tempos associados à manutenibilidade (adaptado de BLANCHARD, 2014).

### 2.4.3 Disponibilidade

A disponibilidade pode ser conceituada como a probabilidade do sistema ou equipamento operar de forma satisfatória em qualquer ponto no tempo, quando empregado dentro de condições especificadas (STAPELBERG, 2009). A disponibilidade é usada como uma métrica de prontidão do sistema. A seguir serão apresentadas três abordagens para a disponibilidade, que complementam a definição geral acima.

- a) Disponibilidade inerente ( $A_i$ ): é a probabilidade do sistema ou equipamento operar satisfatoriamente quando requerido em qualquer ponto no tempo, desde que empregado dentro de condições especificadas e dispondo de um sistema de suporte ideal. A disponibilidade inerente não considera as ações de manutenção preventiva nem os atrasos logísticos e administrativos. A Equação 2.8 apresenta a expressão matemática para a disponibilidade inerente (BLANCHARD, 2014).

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.8)$$

- b) Disponibilidade atingida ( $A_a$ ): similar à  $A_i$ , exceto pelo fato de considerar as ações de manutenção preventiva, conforme expressa a Equação 2.9. Os atrasos logísticos e administrativos não são considerados (BLANCHARD, 2014).

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} \quad (2.9)$$

- c) Disponibilidade operacional ( $A_o$ ): é a probabilidade do sistema ou equipamento operar satisfatoriamente quando requerido em qualquer ponto no tempo, desde que empregado dentro de condições especificadas e no seu ambiente real de operação e suporte. A Equação 2.10 é uma das formas de expressar matematicamente a disponibilidade operacional de um sistema (BLANCHARD, 2014).

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (2.10)$$

Sendo o MTBF uma das principais métricas para a confiabilidade, e o MTTR uma das principais métricas para a manutenibilidade, a Equação 2.8 demonstra que, conforme afirmado por Blanchard (2014), a disponibilidade é uma função da confiabilidade e da manutenibilidade. Adiante, ainda no Capítulo 2, será retomada a formulação matemática da disponibilidade para demonstrar como ela também sofre influência da gestão de estoques, importante elemento do suporte logístico que será tratado a frente.

De acordo com Blanchard (2014), a disponibilidade é uma métrica chave para medir o desempenho de um sistema. Dentre as abordagens apresentadas acima, a disponibilidade operacional é a que contempla tanto os aspectos inerentes ao projeto do sistema (confiabilidade e manutenibilidade), quanto os aspectos inerentes ao sistema de suporte do produto, justificando a adoção da disponibilidade operacional para os estudos deste trabalho.

## 2.5 O custo-benefício no desenvolvimento de sistemas

Do ponto de vista do suporte logístico de sistemas de alta complexidade, os fatores RAM figuram como elementos centrais para os quais esforços devem ser direcionados nas fases iniciais do desenvolvimento, com o objetivo de obter reduções no LSC. É evidente que o LCC será reduzido ao se otimizar os fatores RAM, no entanto é natural que estes esforços de otimização sejam restringidos por limites de custo para o desenvolvimento do sistema. Assim, faz-se necessário encontrar um conjunto ótimo de requisitos que minimize o LCC (SMITH, 2011).

Do ponto de vista de fabricantes de sistemas de alta complexidade, considerando a disponibilidade como sendo uma função da confiabilidade e da manutenibilidade, a relação entre a disponibilidade e os custos pode ser ilustrada de acordo com a Figura 2.4, onde a minimização do custo ocorre no ponto onde a soma do custo antes da entrega (desenvolvimento e produção) e após a entrega do produto (suporte) é mínima (SMITH, 2011).

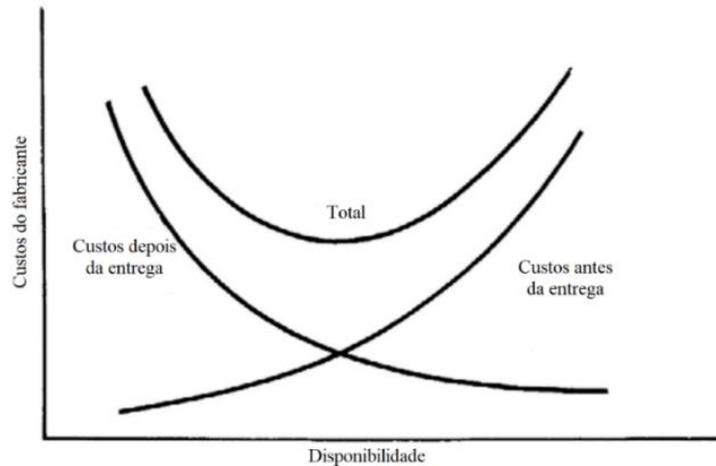


Figura 2.4 – Disponibilidade e custos para o fabricante (adaptado de SMITH, 2011).

Do ponto de vista do operador ou cliente, considerando apenas os fatores de confiabilidade e manutenibilidade, o custo mínimo resulta da menor soma entre o custo de aquisição e o custo decorrente da falha, conforme ilustrado na Figura 2.5 (SMITH, 2011).

Diante do exposto, fica evidente que avaliar a relação custo-benefício é fundamental no apoio a tomadas de decisão nas fases iniciais do desenvolvimento de um produto.

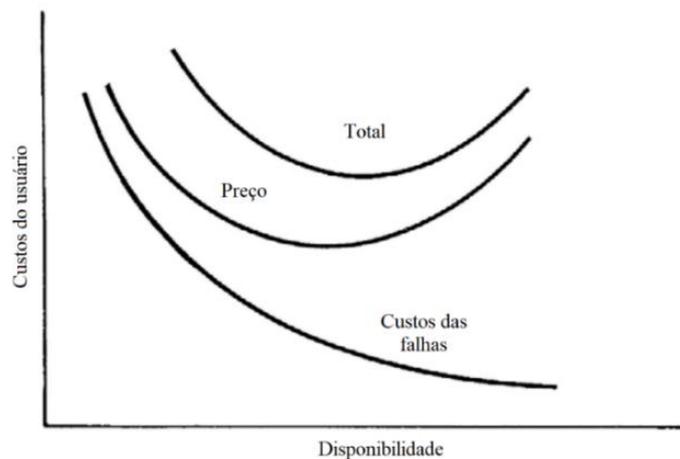


Figura 2.5 – Disponibilidade e custos para o operador ou cliente (adaptado de SMITH, 2011).

### 2.5.1 Custo-efetividade

No contexto abordado, a custo-efetividade é uma característica que reflete o melhor ponto de equilíbrio entre a efetividade do sistema e o custo do seu ciclo de vida, conforme ilustra a Figura 2.6, onde aponta-se que a efetividade do sistema não depende apenas de seu desempenho técnico, mas também do comportamento da sua disponibilidade. Na figura é possível identificar que o desempenho de disponibilidade é função da confiabilidade, da manutenibilidade e do suporte logístico. Fica então evidente a influência do sistema de suporte na custo-efetividade do produto, apontando para a importância da busca por modelos de integração de requisitos de suporte no desenvolvimento de sistemas de alta complexidade.

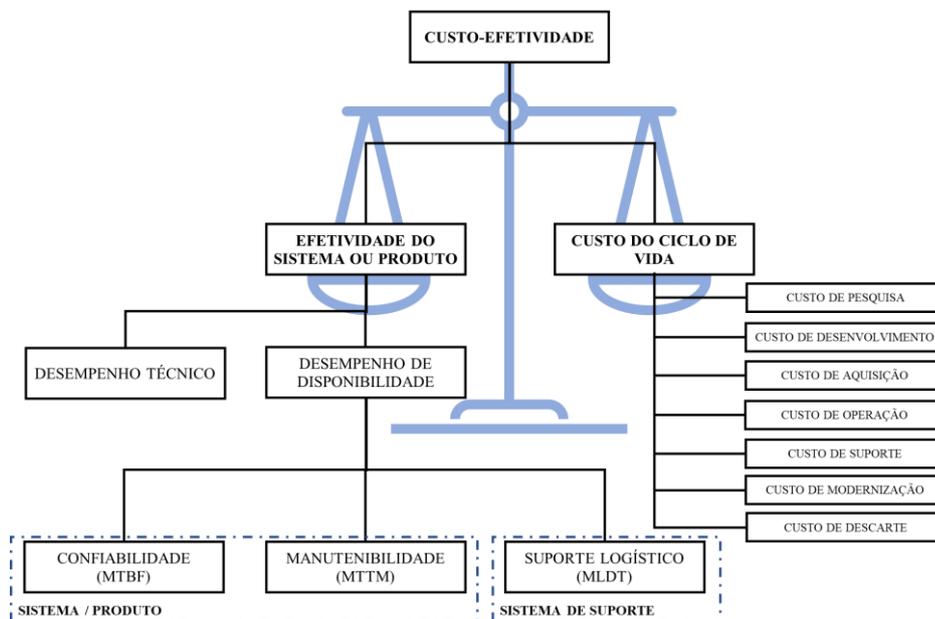


Figura 2.6 – Modelo de custo-efetividade (adaptado de ASD/AIA, 2021b).

## 2.6 O Suporte Integrado ao Produto (IPS) no desenvolvimento de sistemas de alta complexidade

O Suporte Integrado ao Produto, denominado IPS, é uma abordagem por meio da qual as atividades de suporte e seus elementos são planejados, adquiridos, implementados, testados e entregues no momento certo e de uma forma custo-efetiva. O objetivo do IPS é então desenvolver soluções de suporte que otimizem a suportabilidade e o LCC do produto, enquanto este atende aos seus requisitos operacionais (ASD/AIA, 2021b).

Os autores e instituições que tradicionalmente tratam do IPS, como a *Defense Acquisition University* (DAU), a *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe* (ASD) e a *Aerospace Industries Association of America* (AIA), realizaram uma adaptação da nomenclatura dada a esta abordagem, a qual era anteriormente denominada Suporte Logístico Integrado ou ILS (do inglês *Integrated Logistics Support*). Algumas referências ainda se utilizam da nomenclatura ILS, porém trata-se da mesma abordagem.

O IPS participa do processo de Engenharia de Sistemas para garantir que os requisitos de suportabilidade sejam integrados ao projeto do produto, por meio de atividades em cada uma das fases do ciclo de vida do sistema (ASD/AIA, 2021b).

Cabe aqui uma definição para a abordagem de Engenharia de Sistemas que, de acordo com Blanchard e Blyler (2016), é a aplicação de esforços científicos e de engenharia para:

- a) Transformar uma necessidade operacional numa descrição do desempenho dos parâmetros do sistema e sua configuração, por meio do uso de um processo iterativo de definição, sínteses, análises, projeto, testes, avaliações e validação;
- b) Integrar parâmetros técnicos e garantir a compatibilidade de todas as interfaces físicas e funcionais; e
- c) Integrar confiabilidade, manutenibilidade, segurança e outros fatores em um esforço de engenharia que atenda custos, prazos e metas de desempenho.

### **2.6.1 O ciclo de vida de sistemas de alta complexidade**

O ciclo de vida de um sistema de alta complexidade descreve e agrupa em fases os eventos que ocorrem desde a concepção do produto até sua retirada de serviço. São modelos funcionais que fornecem uma visibilidade de alto nível para os processos envolvidos. Para cada fase são atribuídas atividades e definidos pontos de decisão, garantindo o fluxo de informações (ASD/AIA, 2021b).

Diversos modelos para o ciclo de vida de sistemas de alta complexidade estão disponíveis na literatura, com propostas que variam no número de fases e nas suas nomenclaturas, bem como nas atividades e processos atribuídos a elas. A Tabela 2-3 apresenta quatro modelos de diferentes referências que foram sobrepostos, indicando a correspondência aproximada entre as fases do ciclo de cada modelo.

Apesar dos modelos de ciclo de vida estabelecerem uma sequência de fases, é comum a ocorrência de sobreposições entre elas, sem prejuízo do fluxo dos processos (ASD/AIA, 2021b).

Tabela 2-3 – Modelos de ciclo de vida.

REFERÊNCIA	FASES DO CICLO DE VIDA									
(ASD/AIA, 2021b)	Fase de preparação			Fase de desenvolvimento		Fase de produção		Fase de serviço		Fase de descarte
(BLANCHARD, 2014)	Fase de projeto conceitual		Fase de projeto preliminar do sistema	Fase de desenvolvimento e projeto detalhado		Fase de produção/construção		Fase de utilização e suporte		Fase de retirada de serviço e descarte
(NASA, 2016)	Pré-fase A		Fase A	Fase B	Fase C		Fase D	Fase E		Fase F
(BRASIL, 2007)	Concepção	Viabilidade	Definição	Desenvolvimento/Aquisição		Produção		Implantação	Utilização Revitalização/ Modernização/Melhoria	Desativação

Para essa pesquisa será adotado o modelo proposto por ASD/AIA (2021b), visto ser oriundo de uma especificação internacional para o IPS, elaborada por associações de indústrias da Europa e dos Estados Unidos da América, com forte representação no setor aeroespacial, tanto civil quanto militar. Este modelo, detalhado a seguir, divide o ciclo de vida em cinco fases, endereçando para cada uma delas as principais atividades do IPS, conforme descrito a seguir.

- a) Fase de preparação: nessa fase o IPS é responsável por desenvolver o conceito de manutenção, definindo as estratégias e os requisitos básicos de suporte, com base nos requisitos operacionais e nos cenários de emprego. O conceito de manutenção pode incluir fatores como viabilidade econômica e métricas de suportabilidade. Diferentes alternativas de conceitos de manutenção podem ser analisadas e avaliadas (ASD/AIA, 2021b).
- b) Fase de desenvolvimento: durante essa fase o IPS suporta os processos de desenvolvimento, endereçando os objetivos do conceito de manutenção, por meio de: análises de compensação com base no desempenho da suportabilidade; participação na seleção de subsistemas; proposição de previsões de disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade; participação nas revisões progressivas de projeto, avaliações, testes e validações dos modelos de engenharia e protótipos de equipamentos (ASD/AIA, 2021b).
- c) Fase de produção: nessa fase o IPS é responsável por entregas como: treinamento inicial de operação e manutenção; documentação técnica; provisionamento inicial de sobressalentes e equipamentos de suporte; serviços de manutenção, incluindo equipamentos de missão e de teste; instalações e infraestrutura (ASD/AIA, 2021b).
- d) Fase de serviço: nessa fase o IPS é responsável por uma vasta gama de atividades, tais como: análises operacionais, de suportabilidade e de segurança; investigação de ocorrências; serviços de suporte; entrega de equipamentos de suporte, teste e treinamento; entrega de peças sobressalentes e materiais de consumo; participação

em modificações, melhorias e modernizações do sistema e revisões do sistema de suporte (ASD/AIA, 2021b). Conforme exposto no Capítulo 1, no presente trabalho será adotada a nomenclatura de operação e suporte para se referir a esta fase.

- e) Fase de descarte: fase na qual o IPS atua na desativação de estoques, de equipamentos de suporte, de serviços e de instalações, em fase com o cronograma de desativação. Preocupa-se em disponibilizar os recursos necessários, respeitando os processos de reciclagem e a correta destinação de materiais (ASD/AIA, 2021b).

## 2.6.2 O processo de IPS e seus elementos

O IPS é um meio para que os requisitos de suportabilidade sejam integrados ao processo de Engenharia de Sistemas, definindo uma estrutura organizada na qual ocorre o planejamento, o desenvolvimento, a implementação, o gerenciamento e a execução das atividades de suporte (ASD/AIA, 2021b). O processo é composto por elementos que possuem uma relação com alto grau de integração. Na Figura 2.7 é possível identificar os 12 elementos do IPS formando uma estrutura, ilustrando sua característica integrada.



Figura 2.7 – Elementos do IPS (adaptado de DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2011).

A seguir serão apresentados os elementos do IPS, acompanhados de uma breve definição.

### 2.6.2.1 Operações Logísticas

Este elemento cobre atividades como a identificação de riscos e requisitos relacionados a pessoal, equipamentos de suporte, materiais de consumo, peças sobressalentes, instalações, documentação técnica e treinamento. Algumas destas atividades devem ser consideradas desde as fases iniciais do ciclo de vida, enquanto outras podem ser consideradas em fases mais avançadas, quando, por exemplo, haja um protótipo do produto (ASD/AIA, 2021b).

As operações de embalagem, manuseio, estocagem e transporte estão inseridas neste elemento e são denominadas de PHS&T, decorrente do termo em inglês *Packaging, Handling, Storage and Transportation*. Consiste na combinação de recursos, processos, considerações e métodos para garantir que todo o sistema, seus equipamentos de suporte e os suprimentos sejam adequadamente preservados, embalados, manuseados e transportados, incluindo considerações ambientais e temporais (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

As operações de PHS&T têm importante papel no desempenho logístico do produto, afetando significativamente o setor de defesa, visto que a operação militar impõe requisitos e restrições, tais como a necessidade de estocar materiais em ambientes extremos por longos períodos, transporte para regiões remotas não atendidas por operadoras comerciais, requisitos de inspeção, alfândega e envio e recebimento rotineiro de cargas perigosas, como explosivos (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

### 2.6.2.2 Manutenção

Manutenção é o mais proeminente dentre os 12 elementos do IPS, dado que todos os demais elementos podem ser vistos como incluídos nele (OLIVEIRA, 2022). Também é o elemento com maior impacto no planejamento, desenvolvimento e aquisição de sistemas de alta complexidade (ASD/AIA, 2021b).

O objetivo deste elemento é identificar, planejar, prover recursos e implementar o conceito de manutenção e seus requisitos para todo o ciclo de vida, de forma a garantir a melhor disponibilidade do sistema, com o menor custo possível (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

As atividades de um elemento do IPS possuem uma natureza iterativa (ASD/AIA, 2021b), de forma que uma determinada atividade pode requerer o resultado de uma segunda atividade, e esta pode requerer o resultado da primeira, evidenciando que a relação, além de ser

integrada, é dinâmica e iterativa. Essa característica pode ser observada na Tabela 2-4 para duas atividades do elemento Manutenção.

Tabela 2-4 – Natureza integrada das atividades do IPS (adaptado de ASD/AIA, 2021b).

ENTRADA	ATIVIDADE	SAÍDA
Contrato	Análise de nível de reparo (LORA)	Relatório da LORA
Dados de engenharia de projeto		
Plano de IPS		
Relatório da MTA		
Relatórios da engenharia de suporte		
Conceito de suporte		
Contrato	Análise de tarefas de manutenção (MTA)	Relatório da MTA
Dados de engenharia de projeto		
Plano de IPS		
Relatório da LORA		
Relatórios da engenharia de suporte		
Conceito de suporte		

### 2.6.2.3 Gerenciamento do Suporte ao Produto

Elemento que tem o objetivo de gerenciar os custos e o desempenho do suporte do sistema, desde as fases iniciais até sua retirada de serviço. É nesse elemento que são desenvolvidas e implementadas as estratégias de suporte que assegurarão que a suportabilidade será considerada ao longo de todo o ciclo de vida, buscando reduzir custos e otimizar as métricas de desempenho tais como disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

### 2.6.2.4 Suporte de Suprimento

Elemento do IPS que tem o objetivo de identificar, planejar, providenciar os recursos necessários e gerenciar todas as ações para a aquisição de todas as classes de suprimento, desde itens de consumo, até componentes reparáveis, garantindo que os requisitos operacionais do sistema sejam atendidos de forma custo-efetiva (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

O Suporte de Suprimento consiste em ações de gerenciamento, procedimentos e técnicas necessárias para determinar requisitos, catalogar, adquirir, receber, estocar, transferir e descartar insumos, materiais de consumo e itens reparáveis (ASD/AIA, 2021b).

### **2.6.2.5 Recursos Computacionais**

O objetivo deste elemento é identificar, planejar, adquirir, descartar e atualizar os componentes de recursos computacionais para a execução do suporte, tais como instalações, *hardware*, *software*, *firmware*, documentação, mão de obra e capacitação (ASD/AIA, 2021b).

### **2.6.2.6 Influência no Projeto**

Também denominado de Interface do Projeto, este elemento influencia o projeto desde as fases iniciais do seu desenvolvimento e ao longo de todo o ciclo de vida do produto, por meio da integração de características quantitativas de projeto, como confiabilidade e manutenibilidade, levando em consideração os demais elementos do IPS. O objetivo desse elemento é otimizar a suportabilidade, maximizando disponibilidade e capacidades do sistema, com o menor LCC possível (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

É o elemento que norteia a relação entre os parâmetros de projeto, expressos em termos de requisitos operacionais, e os requisitos do sistema de suporte, que são então estabelecidos para garantir que o sistema atinja suas metas de disponibilidade e custo (ASD/AIA, 2021b). O elemento apresenta-se como um conjunto de atividades de controle e gerenciamento de decisões de projeto com impacto na suportabilidade, considerando a influência e participação dos demais elementos do IPS, além de considerar sistemas e infraestruturas legadas (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

Uma das atividades deste elemento é a Análise de Suporte Logístico, denominada pela sigla LSA, do termo em inglês *Logistics Support Analysis*. Tal atividade será tratada com maiores detalhes adiante, pois relaciona-se diretamente com a proposta de pesquisa desse trabalho.

A Influência no Projeto é um elemento do IPS com forte presença nas fases iniciais do desenvolvimento. Nos casos de aquisições de sistemas comerciais, conhecidos como COTS (do inglês *Commercial Of-The-Shelf*), a aplicação deste elemento ficará limitada, devendo ser direcionada para as soluções de implantação e integração do sistema (ASD/AIA, 2021b).

### **2.6.2.7 Suporte Continuado de Engenharia**

Elemento que tem como objetivo o suporte do sistema em seu ambiente operacional, por meio da execução de atividades técnicas que garantam a operação e a manutenção contínua,

até o descarte. Inclui atividades de identificação, investigação, análise, revisão e solução de deficiências apresentadas pelo sistema ao longo do seu ciclo de vida, visando a manter o atendimento dos requisitos operacionais, além de buscar identificar oportunidades de melhoria de desempenho e capacidade (ASD/AIA, 2021b).

A solução de deficiências resulta na necessidade de ações corretivas. O Suporte Continuado de Engenharia é o elemento do IPS responsável por propor opções para ações corretivas e selecionar a melhor por meio de análises que considerem os efeitos sobre custos e riscos. Análises econômicas do ciclo de vida e análises de custo-benefício são empregadas para esse fim (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

O Suporte Continuado de Engenharia preocupa-se também com a segurança operacional e, para o caso de sistemas aeroespaciais, com a aeronavegabilidade continuada. O aspecto de segurança, somado aos fatores RAM, formando o acrônimo RAMS (com o “S” decorrendo do termo em inglês *Safety*), tem impulsionado o monitoramento de métricas e parâmetros associados à saúde dos sistemas (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

#### **2.6.2.8 Dados Técnicos**

Dados Técnicos refere-se ao registro documental de informações de natureza técnica ou científica, independentemente do método, protocolo ou formato de registro (ASD/AIA, 2021b).

Especificações do sistema, desenhos de engenharia, relatórios de análises, registros de decisões, manuais de operação, de manutenção e de treinamento são exemplos de dados técnicos (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

#### **2.6.2.9 Instalações e Infraestrutura**

O elemento e Instalações e Infraestrutura consiste em ativos imobiliários permanentes ou semipermanentes necessários para o suporte do sistema. São exemplos as instalações destinadas à treinamento, manutenção, testes e armazenagem de diversas classes de materiais necessários ao suporte do sistema. Também compõe este elemento as instalações e infraestruturas para os recursos computacionais do sistema de suporte ao produto (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

Devido aos longos prazos envolvidos na aquisição e construção das instalações e infraestruturas, este elemento do IPS deve ser planejado e ter seus requisitos estabelecidos o mais cedo possível dentro do ciclo de vida do sistema, requerendo para tal planejamento o

resultado de análises de diversas atividades de outros elementos do IPS, como a análise de nível de reparo, do elemento Manutenção (ASD/AIA, 2021b).

Cabe ressaltar que ao se desenvolver um sistema de alta complexidade, deve-se observar as instalações e infraestruturas existentes nos operadores, visando a máxima utilização das instalações legadas.

#### **2.6.2.10 Mão de Obra e Recursos Humanos**

Dois termos são amplamente empregados ao se referir a este elemento do IPS, no entanto, de acordo com DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY (2021), estes termos possuem significados distintos, conforme descrito a seguir:

- a) Mão de obra: refere-se à quantidade de pessoas necessárias para a execução de determinada tarefa. Ao associar a mão de obra com o tempo da tarefa, é possível dimensionar a mão de obra de acordo com a demanda da tarefa, podendo ser uma tarefa administrativa, de treinamento, de operação ou de manutenção do sistema; e
- b) Recursos humanos: também conhecido pelo termo pessoal, refere-se à aptidão, habilidade, conhecimento e nível de experiência do elemento humano para a realização da atividade.

Este elemento do IPS tem o objetivo de identificar, planejar e alocar os elementos humanos, na quantidade adequada e com as habilidades, conhecimentos e níveis de experiências requeridos para a realização das tarefas de suporte (ASD/AIA, 2021b).

#### **2.6.2.11 Equipamentos de Suporte**

Equipamentos de Suporte consistem em todos os equipamentos, fixos ou móveis, necessários para suportar e operar o sistema, mas que não fazem parte dele. Exemplos são: equipamentos de manutenção, de testes, de movimentação de cargas, de manipulação de materiais, de tratamento e condicionamento de ar, de metrologia, de calibração, rebocadores, geradores e fontes de potência diversas (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

O objetivo desse elemento do IPS é identificar, planejar, prover e implementar ações de gerenciamento para adquirir e manter todos os equipamentos necessários ao suporte do sistema. As ações de gerenciamento devem levar em conta o controle da proliferação de equipamentos de suporte, evitando o desenvolvimento de novos equipamentos dedicados a um fim específico,

buscando sempre adotar medidas para o emprego de equipamentos existentes e de emprego comum (ASD/AIA, 2021b).

#### **2.6.2.12 Treinamento e Suporte ao Treinamento**

Elemento do IPS que tem o objetivo de planejar, prover e implementar uma estratégia coesa e integrada no processo de desenvolvimento do treinamento de pessoal para operação e suporte do sistema ao longo de seu ciclo de vida, de forma a maximizar a efetividade da doutrina. Parte desta estratégia preocupa-se em identificar, desenvolver e adquirir os recursos necessários para as atividades de treinamento, que incluem simuladores, manuais eletrônicos interativos, ferramentas de aprendizagem, dispositivos embarcados ou não, entre outros elementos físicos e eletrônicos destinados ao treinamento. Esses produtos de treinamento podem requerer seu próprio gerenciamento de configuração e a suportabilidade deles também deve ser considerada neste elemento do IPS (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

### **2.7 Atividades do processo de IPS no desenvolvimento de sistemas de alta complexidade**

O processo de IPS, recomendado por ASD/AIA (2021b), orienta a execução de diversas atividades associadas a cada elemento do IPS. Algumas atividades possuem curta duração, ocorrendo apenas em uma fase do ciclo de vida. Outras possuem duração maior, estendendo-se por mais de uma fase do ciclo de vida. A atividade de Análise de Custo do Ciclo de Vida, ou LCCA (do inglês *Life Cycle Cost Analysis*), do elemento Influência no Projeto, é um exemplo que permeia todo o ciclo de vida. Outras atividades, como a Análise de Nível de Reparo, conhecida como LORA (do inglês *Level of Repair Analysis*), ocorre nas fases iniciais, mas é retomada durante a fase de operação e suporte, com dados coletados da operação.

A descrição exaustiva de todas as atividades do IPS foge ao escopo do capítulo. Apenas duas atividades serão exploradas com maiores detalhes, por fazerem parte da fundamentação teórica da pesquisa:

- a) Análise de suporte logístico (LSA); e
- b) Análise de nível de reparo (LORA).

### 2.7.1 Análise de Suporte Logístico (LSA)

Esta atividade pertence ao elemento Influência no Projeto e apresenta distintas nomenclaturas, dependendo do referencial teórico, conforme a seguir:

- a) Análise de Suporte Logístico – LSA (ASD/AIA, 2021b).
- b) Análise de Suportabilidade, conhecida pela sigla SA, do termo em inglês *Supportability Analysis* (BLANCHARD, 2014).
- c) Análise de Suporte do Produto, conhecido pela sigla PSA, do termo em inglês *Product Support Analysis* (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

Como forma de padronização, para o texto deste trabalho, será adotada a sigla LSA. Ao longo do desenvolvimento de um sistema de alta complexidade, esforços de análise e otimização ocorrem continuamente, levando à definição da configuração final do projeto. Como parte do processo evolutivo, muitas alternativas de projeto distintas são identificadas e avaliadas, utilizando vários métodos e modelos analíticos para facilitar o processo de análise de compensação e avaliação, resultando na seleção da abordagem mais adequada. O processo analítico, contínuo e iterativo destinado ao projeto da infraestrutura de suporte logístico e de manutenção, ou simplesmente o projeto do sistema de suporte, é conhecido como LSA (BLANCHARD, 2014).

A LSA pode ser definida como a integração de diversas técnicas analíticas combinadas para resolver uma ampla variedade de problemas, com o objetivo de desenvolver um sistema de suporte custo-efetivo e consistente com os requisitos do sistema em desenvolvimento (BLANCHARD, 2014). A Figura 2.8 ilustra o papel da LSA, que é o caminho para que, a partir dos requisitos do produto, seja desenvolvido um sistema de suporte custo-efetivo.

Esta análise do IPS resulta num banco de dados abastecido por diversas análises, formando uma entidade única na qual todos os dados de suporte são armazenados, consistindo no roteador dos dados dos elementos do IPS, visando a garantir a consistência dos dados entre todos os elementos e domínios (ASD/AIA, 2021b).

ASD/AIA (2021a) é uma das referências disponíveis para orientar o desenvolvimento da LSA. Possui como título “Especificação Internacional para a Análise de Suporte Logístico (LSA) – S3000L”. Essa referência apresenta um detalhamento para a elaboração dos processos e dos protocolos a serem seguidos para a integração das análises de suportabilidade e a construção do banco de dados do LSA.

É importante salientar que a LSA influencia tanto o projeto do produto quanto o desenvolvimento do sistema de suporte, de forma integrada (BLANCHARD, 2014).

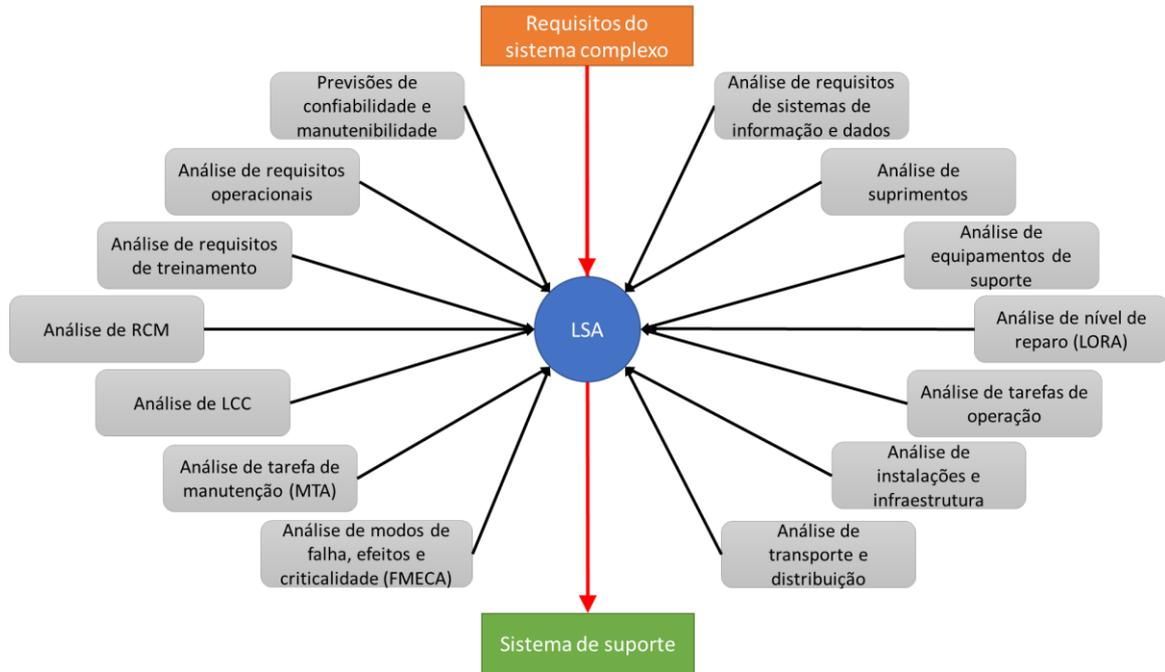


Figura 2.8 – LSA no projeto do sistema de suporte (adaptado de BLANCHARD, 2014).

### 2.7.2 Análise de Nível de Reparo (LORA)

O tempo em que um sistema de alta complexidade permanece indisponível, conhecido como *downtime*, resulta em diversos impactos negativos, normalmente traduzidos em grandes somas de custos, conhecidos como *downtime costs*. Além do impacto financeiro, o tempo de indisponibilidade pode resultar no comprometimento de missões. Portanto, o rápido reestabelecimento da condição operacional de um sistema é fundamental. Uma das estratégias tipicamente adotada para esse fim é o reparo por substituição (BASTEN, 2009).

Para que a estratégia de reparo por substituição seja implementada, os sistemas de alta complexidade são configurados de acordo com uma estrutura de produto conhecida como PBS (do inglês *Product Breakdown Structure*), que representa o particionamento do sistema numa estrutura de elementos com uma interligação comumente denominada de relação pai-filho (ASD/AIA, 2021a).

Termos como estrutura de produto, estrutura hierárquica de produto, estrutura multi-indentada (*multi-indenture*), estrutura multiníveis ou ainda estrutura modular em níveis, são comumente empregadas para tratar de PBS.

Para melhor compreensão do texto a seguir, a respeito da descrição da LORA, alguns termos associados à relação pai-filho necessitam ser definidos. Supondo um sistema de alta complexidade como uma aeronave, que é considerada o nível zero da estrutura, seus

subsistemas (filhos), ocuparão o primeiro nível, recebendo a denominação de LRU (do inglês *Line-Replaceable Unit*), fazendo referência às unidades que são removidas e substituídas da aeronave na linha de voo, ou local de operação do sistema. Os componentes do segundo nível são aqueles removidos de uma LRU, seus pais, numa oficina de manutenção, denominados de SRU (do inglês *Shop-Replaceable Unit*). Mais níveis podem ser adicionados à estrutura, ao ponto de identificar componentes isolados (SHERBROOKE, 2004). A Figura 2.9 ilustra um exemplo simplificado de estrutura modular em níveis, com o emprego dos termos descritos.

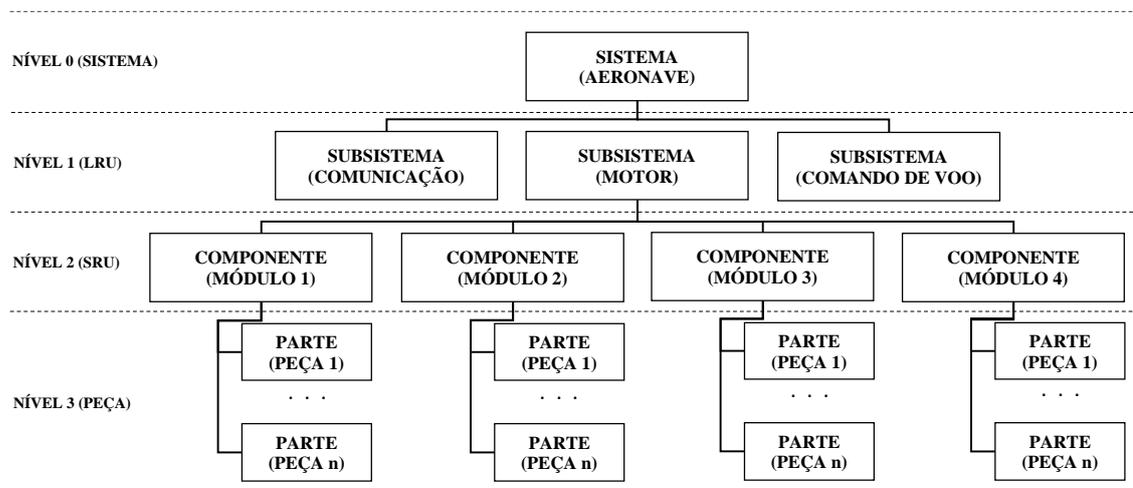


Figura 2.9 – Exemplo de estrutura modular em níveis para um sistema de alta complexidade.

Sistemas de alta complexidade como aeronaves militares e estações radar, são normalmente operados em diversas regiões, distantes entre si, de forma a ampliar o guarnecimento do território. Situações similares ocorrem em diversos outros setores, como na aviação comercial, que opera a partir de várias localidades. Este quadro requer atenção para decisões, por exemplo, de onde serão alocados os recursos necessários para suportar a operação dos sistemas, tais como estoques e as instalações de manutenção corretiva e preventiva.

Surge então o conceito de nível de manutenção, também conhecido como escalão de manutenção. A rede ou estrutura de suporte logístico de um sistema pode ser formada por um único escalão, para casos mais simples, ou por um modelo multi-escalão, caso muito comum no setor de defesa, conforme ilustrado na Figura 2.10.

O conceito de PBS e de estrutura de suporte logístico são essenciais para compreender a LORA, que é uma metodologia analítica empregada para encontrar uma solução de suporte que minimize o LCC do sistema em análise (DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY, 2021).

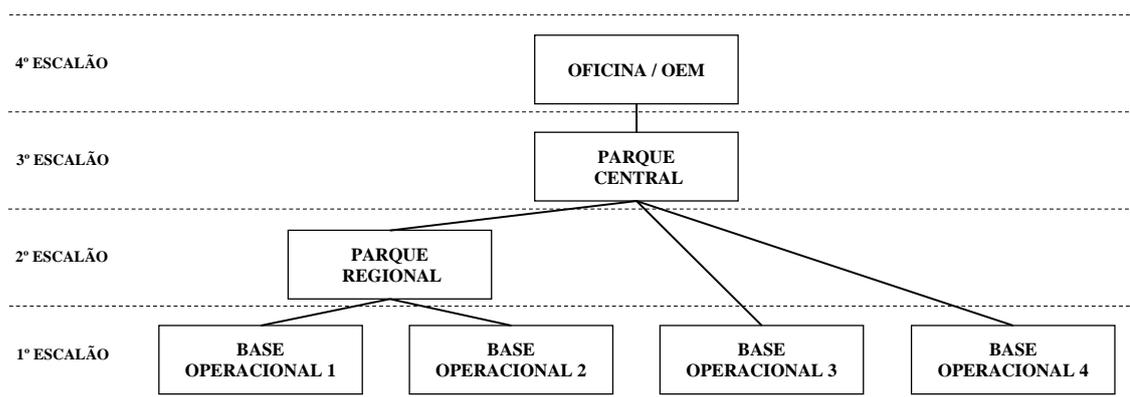


Figura 2.10 – Estrutura de suporte logístico multi-escalonado.

De acordo com Basten, van der Heijden e Shutten (2011a), dada a estrutura de suporte logístico e o PBS do sistema, os modelos empregados para a LORA buscam decidir:

- a) A ação de manutenção para cada componente em análise, decidindo se deve ser reparado ou descartado ao apresentar falha;
- b) Para cada componente em análise, onde (ou em que nível), dentro da estrutura de suporte logístico, ele deve ser reparado ou descartado; e
- c) Onde instalar os recursos necessários, como equipamentos de suporte, para executar as ações de manutenção.

A LORA é amplamente explorada por autores da área de pesquisa operacional, visto que sua formulação matemática resulta numa função para otimização de uma métrica, respeitando restrições de custo. Normalmente busca-se minimizar o custo decorrente da manutenção do sistema, caracterizando a função-objetivo. O Apêndice A apresenta um modelo matemático reproduzido da literatura, com a finalidade de demonstrar esta análise como um problema de pesquisa operacional.

Em geral, os problemas reais de LORA apresentam diversas soluções possíveis e a obtenção da solução ótima, por meio de programação inteira, pode consumir muito tempo de processamento ou exceder a capacidade computacional disponível (BARROS; RILEY, 2001). Devido a esta característica, diversos autores exploram métodos de solução com emprego de heurísticas. O Apêndice A apresenta um compêndio de trabalhos publicados em veículos de divulgação científica que exploraram a LORA, agregando decisões aos modelos tradicionais e explorando métodos de solução computacionalmente eficientes.

Ferramentas computacionais que implementam modelos para a realização da LORA estão disponíveis, caso da ferramenta EDCAS (*Equipment Designer's Cost Analysis System*),

que tem a capacidade de avaliar a melhor alternativa entre o reparo ou descarte de componentes, além de auxiliar em análises de Custo do Ciclo de Vida (BLANCHARD; BLYLER, 2016).

Outra ferramenta que implementa uma funcionalidade semelhante é o OPUS10, por meio da funcionalidade denominada pelo desenvolvedor pela sigla LORA, porém decorrente do termo em inglês *Location of Repair Analysis*. Com o emprego desta funcionalidade, o OPUS10 permite avaliar diferentes estratégias de suporte, alocando de forma ótima os níveis de manutenção e seus recursos dentro da estrutura de suporte e otimizando também, simultaneamente, a quantidade e a localização de estoques de materiais (SYSTECON, 2022a).

### 2.7.2.1 LORA econômica e não econômica

Como foi apresentado anteriormente, os modelos para a LORA resultam em decisões com base nos parâmetros de custo envolvidos, ou seja, são decisões econômicas. Na prática, nem todos os componentes da estrutura de produto de um sistema de alta complexidade são considerados na LORA e, tipicamente, uma análise não econômica é realizada previamente (BASTEN, 2009).

Basten (2009) e Ituarte-Villarreal (2010) citam alguns motivos pelos quais alguns componentes não são incluídos na análise econômica:

- a) Existência de componentes que podem ser reparados apenas no OEM;
- b) Existência de componentes cujo reparo não pode ser realizado em determinado escalão por limitações de suas instalações ou por condições ambientais inadequadas;
- c) Existência de componentes com baixo custo, que são considerados previamente descartáveis;
- d) Questões que envolvem políticas governamentais, estratégicas e de certificação;
- e) Restrições impostas pelos fabricantes dos componentes ou do sistema;
- f) Restrições relacionadas à segurança e fatores humanos; e
- g) Restrições de mobilidade, transporte e viabilidade técnica.

De acordo com Ituarte-Villarreal (2010), existem dois tipos de LORA: a LORA econômica e a LORA não econômica. Na LORA econômica são empregados modelos matemáticos para estimar o custo associado às decisões da política de reparo dos componentes do sistema. Na LORA não econômica avaliam-se outros fatores, seguindo diretrizes para estabelecer motivos significativos para a definição da política de reparo de componentes, que não sejam necessariamente econômicos.

A abordagem econômica é por vezes designada por ELORA (do inglês *Economic Level of Repair Analysis*) e normalmente é realizada por pacotes de *software*, como os mencionados anteriormente, baseados em modelos matemáticos com diferentes níveis de complexidade e acurácia (ASD/AIA, 2021a).

## 2.8 Gestão de estoque

Dado que a falha é um fenômeno esperado para os sistemas de alta complexidade, é necessário que se estabeleçam procedimentos para restaurar o estado funcional do produto. O reparo desses sistemas normalmente ocorre pela substituição do item que falhou, sendo necessário que haja itens em estoque para minimizar o tempo de indisponibilidade do sistema. É importante ressaltar que a demanda por itens em estoque não ocorre somente devido a falhas, mas também por substituições programadas, de acordo com o plano de manutenção do sistema.

Existem duas categorias de itens, os reparáveis e os não-reparáveis, também chamados de itens de consumo, que são descartados após sofrerem falha (BLANCHARD, 2014). A classificação de cada item do sistema nestas duas categorias é geralmente realizada por análises econômicas, como a LORA, mas também existem fatores não econômicos e estratégicos que influenciam nesta classificação.

A gestão de estoques de itens de consumo é baseada em modelos bastante consolidados e difundidos nas referências bibliográficas do assunto. Dado o conhecimento de uma demanda média constante  $m$ , a gestão de estoque deve preocupar-se em definir o momento de emissão de uma ordem de compra, conhecido como ponto de ressuprimento ou recompra (*reorder point*)  $B$ , e a quantidade ótima, ou lote econômico  $Q$ . O modelo determinístico mais comum para a gestão de estoques é conhecido como dente de serra. Conhecendo-se o *lead time* do item, que é o tempo de espera desde a ordem de compra até a disponibilização do item no estoque, é possível definir  $B$  (momento de emitir a ordem de compra). O lote econômico pode ser definido pela fórmula de Wilson, conforme Equação 2.11 (SHERBROOKE, 2004).

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot \Omega \cdot m}{l \cdot c}} \quad (2.11)$$

Onde:  $Q$  é o lote econômico;

$\Omega$  é o custo da ordem de compras;

$l$  é custo anual de estocagem; e  
 $c$  é o custo unitário do item.

O modelo dente de serra representa um ciclo de estoque e assume parâmetros constantes para a demanda e o *lead time*. O consumo é representado por uma função decrescente com inclinação constante. Na prática a demanda não é constante e o *lead time* pode sofrer variações. Para compensar demandas ou atrasos inesperados, é comum o emprego de um estoque de segurança (BLANCHARD, 2014). A Figura 2.11 apresenta uma situação mais realística do ciclo de estoque de um item em relação ao modelo dente de serra.

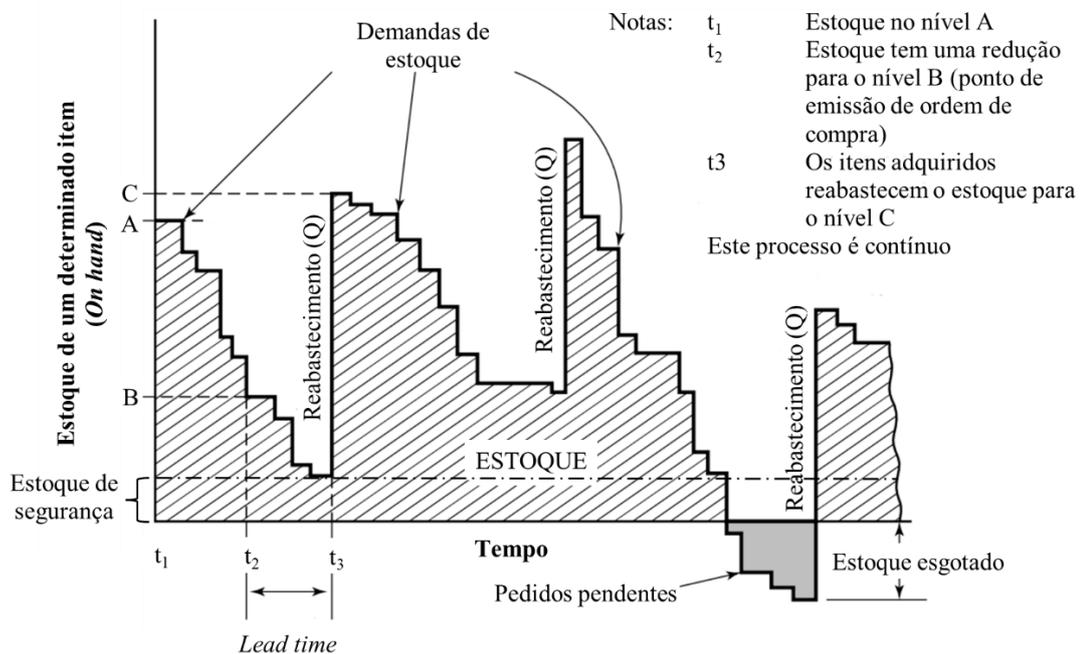


Figura 2.11 – Representação de um ciclo de estoque de materiais de consumo (adaptado de BLANCHARD, 2014).

Os itens reparáveis tendem a ter custo elevado e baixa demanda média, se comparados aos itens de consumo (SHERBROOKE, 2004), justificando a atenção dedicada neste trabalho aos itens reparáveis, dado o foco em Custo do Ciclo de Vida. A gestão de estoque de itens reparáveis envolve muitos parâmetros como o tempo de reparo, de transporte, atrasos e fenômenos como a formação de filas devido à limites na capacidade de reparo existentes na estrutura de suporte. Além dos tempos, a gestão de estoque preocupa-se com todos os custos relacionados ao reparo, transporte e estocagem.

A pedra fundamental da teoria de estoque de reparáveis é o Teorema de Palm, que afirma que se a demanda por itens obedece a um processo de Poisson com média anual  $m$ , e o tempo

de reparo para cada item é independente e identicamente distribuído de acordo com qualquer função com média  $T$ , então a distribuição de probabilidade para o número de unidades em reparo tem uma distribuição de Poisson com média  $m.T$  (SHERBROOKE, 2004).

Do ponto de vista da modelagem do suporte logístico, o Teorema de Palm tem importante relevância, pois dispensa a necessidade de coleta de dados para levantar a distribuição dos tempos de reparo em estado estacionário (SHERBROOKE, 2004).

A variável de interesse na gestão de estoque, do ponto de vista da otimização da disponibilidade do sistema, é a quantidade de itens sobressalentes ou itens de giro, simbolizado por  $s$  em decorrência do termo em inglês *spare*. A quantidade de itens de giro corresponde a soma da quantidade de itens disponíveis em estoque (denominada de OH decorrente do termo em inglês *On Hand*) com a quantidade de itens em reparo ou em ressurgimento  $X$ , subtraída da quantidade de pedidos pendentes para determinado item, designado por BO (do inglês *Backorder*), conforme indica a Equação 2.12 (SHERBROOKE, 2004).

$$s = OH + X - BO \quad (2.12)$$

Existem diversas métricas de desempenho na gestão de estoque. Dado que a ocorrência de um BO resulta em indisponibilidade do sistema, uma métrica importante, do ponto de vista do suporte logístico do sistema, é o valor esperado de BO, designado por EBO (do inglês *Expected Backorders*), que é matematicamente expresso como uma função de  $s$ , de acordo com Sherbrooke (2004), pela Equação 2.13. É importante ressaltar que  $X$  é uma variável aleatória e que o EBO reflete a média de itens faltantes no longo prazo.

$$EBO(s) = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x - s) P(X = x) \quad (2.13)$$

Pela Lei de Little, aplicada à gestão de estoque, podemos estabelecer uma relação entre o EBO e o WT, dada uma demanda média  $m$ , conforme expressa a Equação 2.14 (LITTLE; GRAVES, 2008).

$$WT = \frac{EBO}{m} \quad (2.14)$$

Para demonstrar a relação da disponibilidade do sistema com o EBO, empregaremos a Equação 2.8 para a disponibilidade inerente, considerando a parcela do WT, apresentado na Equação 2.14. O resultado da substituição é apresentado na Equação 2.15.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + WT} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + EBO/m} \quad (2.15)$$

O desafio da gestão de estoque em definir a quantidade de itens de giro, minimizando o EBO e maximizando a disponibilidade, torna-se ainda maior quando o sistema é operado em locais distintos e distantes das estações onde ocorre o reparo e com diversas posições possíveis de alocação de estoque, decorrente de uma estrutura multi-escalão, conceito anteriormente introduzido.

Para tratar deste desafio, alguns modelos foram propostos por autores como Sherbrooke (1968), que propôs a técnica conhecida como METRIC (do inglês *Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*), que busca representar a dinâmica da gestão de estoque considerando diversas estações de uma estrutura de suporte com diferentes escalões. Esta técnica visa maximizar a disponibilidade do sistema por meio da minimização do EBO nas estações.

O próprio proponente da técnica supracitada desenvolveu outro modelo baseado no METRIC, denominado VARI-METRIC. A principal diferença é que no METRIC assume-se que o número médio de itens no ciclo de reparo segue uma distribuição de Poisson. Para o VARI-METRIC, assume-se que esse número obedece a uma distribuição Binomial Negativa, o que pode representar melhor a dinâmica da gestão de estoque (SHERBROOKE, 2004).

### 2.8.1 Análise marginal na gestão de estoque

A análise marginal na gestão de estoque é uma técnica que se vale de uma formulação matemática para desenvolver uma estratégia ótima para a composição do estoque, resultando numa curva que relaciona os pedidos pendentes de itens com o custo de investimento em estoque. Apesar do emprego do termo curva, o resultado é na prática uma sequência de pontos discretos, visto que o incremento de itens ocorre em unidades inteiras. O algoritmo da análise marginal determina qual é o próximo item a ser adquirido para compor o estoque que resultará na maior redução dos pedidos pendentes de itens do estoque (SHERBROOKE, 2004).

A curva resultante da análise marginal pode expressar tanto a relação entre a quantidade de pedidos pendentes pelo custo de investimento em estoque, quanto a disponibilidade pelo mesmo custo, conforme indica a Figura 2.12.

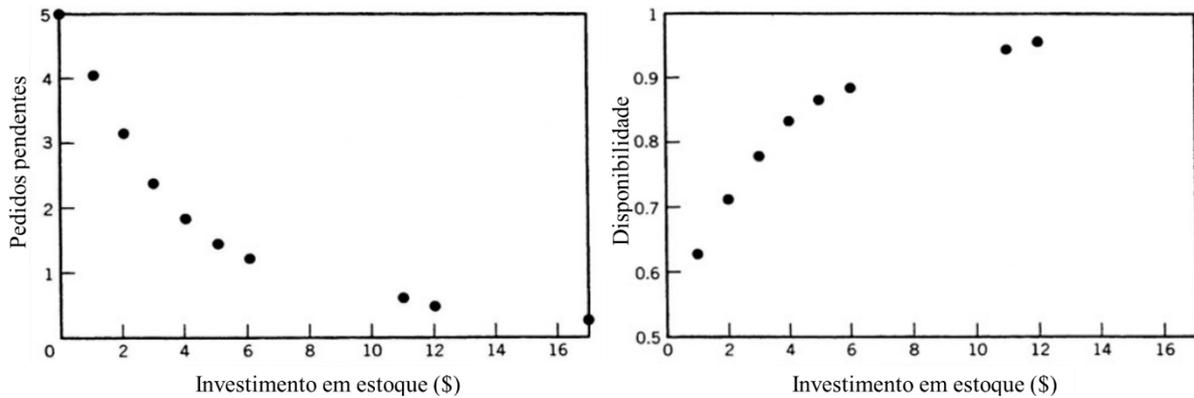


Figura 2.12 – Forma de apresentação dos resultados da análise marginal (adaptado de SHERBROOKE, 2004).

## 2.9 Sistemas computadorizados de assistência ao desenvolvimento de produtos

Existe uma ampla variedade de aplicações computadorizadas de assistência ao desenvolvimento de produtos. Os termos específicos e as definições podem variar, dependendo do emprego, porém, essas aplicações podem ser agrupadas, de forma geral, sob o termo CAE (do inglês *Computer-Aided Engineering*). As aplicações CAE podem ser classificadas em três grupos: CAD (do inglês *Computer-Aided Design*); CAM (do inglês *Computer-Aided Manufacturing*) e CAS (do inglês *Computer-Aided Support*). Apesar da evolução tecnológica ter contribuído para o rápido avanço dessas aplicações, elas raramente apresentam integração total (BLANCHARD; BLYLER, 2016).

No contexto das aplicações CAE, há a disponibilidade de diversas ferramentas, a exemplo do OPUS10©, desenvolvido pela Systecon, cuja aplicação primária é a construção de modelos para otimização da gestão de estoques. Essa ferramenta é capaz de considerar diferentes perfis de utilização média do produto, sendo possível avaliar alternativas de políticas e estruturas de suporte com base em sua custo-efetividade (BLANCHARD; BLYLER, 2016). Segundo Sherbrooke (2004), o OPUS10© incorpora a teoria VARI-METRIC, introduzida anteriormente.

A Systecon afirma que, além das aplicações já citadas, o OPUS10© pode ainda ser aplicado em análises de LCC, na otimização da estratégia de suporte e em análises de sensibilidade (SYSTECON, 2022a).

Apesar do OPUS10© permitir uma modelagem bastante detalhada do sistema de suporte e da configuração do produto, principalmente em sua versão RDM (*Refined Data Model*), sua formulação matemática é baseada em distribuições estocásticas. Para a obtenção de modelos que agreguem a dinâmica dos cenários operacionais, a Systecon desenvolveu o SIMLOX, uma ferramenta capaz de fornecer resultados considerando uma sequência de eventos gerados por simulação (SYSTECON, 2022b).

O emprego da modelagem do sistema de suporte nas fases iniciais do ciclo de vida de produtos está alinhado com o desenvolvimento do arcabouço de ferramentas digitais que consubstanciam o conceito de um Gêmeo Digital com a capacidade de explorar e simular diversas condições de contorno de um sistema, neste caso, de suportabilidade logística, mesmo antes das fases finalísticas de seu desenvolvimento, conforme a abordagem explorada por Oliveira (2022).

## **2.10 Motores aeronáuticos**

Conforme introduzido no Capítulo 1, esta pesquisa fará estudos de casos baseados na integração de motores aeronáuticos em aeronaves não tripuladas. Tais motores consistem em sistemas aeroespaciais de alta complexidade relevantes do ponto de vista de suporte logístico, justificando a apresentação de algumas considerações a respeito deste produto aeronáutico.

Ressalta-se que o conhecimento relativo às técnicas de desenvolvimento, construção e ensaios, além dos procedimentos específicos de operação e manutenção dos motores aeronáuticos são bastante restritos, havendo barreiras comerciais e estratégicas que dificultam a ampla difusão deste conhecimento.

Para os casos estudados nessa pesquisa, optou-se por abordar os motores a reação de turbina a gás, visto seu largo emprego na aviação civil e militar, diante das vantagens relevantes em relação, por exemplo, aos motores alternativos, como: melhor relação peso-potência, menor necessidade de manutenção por hora de voo, menor área frontal e, conseqüentemente, menor arrasto (EL-SAYED, 2016).

Os motores empregados atualmente na aviação possuem excelentes indicadores de confiabilidade, no entanto, conforme introduzido no Capítulo 1, o sistema de propulsão de uma

aeronave é o mais caro para ser mantido, dentre os demais sistemas, dado a exigência de instalações, equipamentos e mão de obra altamente especializadas, além do emprego de materiais com custo muito elevado. Uma das estratégias que visam a reduzir os custos de suporte dos motores aeronáuticos é o emprego do conceito de manutenção modular (EDMUNDS, 1978).

### **2.10.1 O conceito de manutenção modular**

Um motor a reação pode ser visto como sendo constituído por unidades básicas que formam o conjunto mecânico elementar, conhecido pelo termo em inglês *core engine*, que pode ser dividido em módulos individuais, tais como *fan*, compressor, câmara de combustão e turbina. Uma infinidade de modos de falha pode afetar cada uma destas unidades, podendo resultar na necessidade da remoção do motor inteiro para ser reparado numa oficina especializada. Nesse contexto surge o conceito de manutenção modular, que deriva da capacidade de isolar e reparar falhas na unidade onde ela ocorrer (EDMUNDS, 1978).

Para que um motor aeronáutico possa beneficiar-se do conceito de manutenção modular, o *core engine* deve ser constituído por módulos separáveis, permitindo que cada módulo possa ser substituído em um nível intermediário de manutenção, dentro da estrutura de suporte, sem a necessidade de operações especiais como balanceamento. O objetivo é evitar o retorno do motor completo para uma oficina especializada (SAFRAN GROUP, 2008).

A implementação do conceito de manutenção modular deve ser avaliada e planejada nas fases iniciais do desenvolvimento do motor, considerando os aspectos de precisão e intercambialidade, que tornarão possível a separação dos módulos, de forma que seja viável realizar esse procedimento fora de uma oficina especializada (EDMUNDS, 1978).

## **2.11 Considerações finais do capítulo**

O Capítulo 2 apresentou a revisão da literatura e o referencial teórico do trabalho, com o objetivo de construir um arcabouço de conhecimentos essenciais à compreensão do método proposto e que será apresentado no próximo capítulo, bem como das análises e discussões que serão apresentadas no Capítulo 4.

### 3 Metodologia

De acordo com Wazlawick (2009), o método científico ou método de pesquisa descreve o caminho para se atingir o objetivo da pesquisa. O autor defende que o método de pesquisa propriamente dito só pode ser estabelecido após a definição do objetivo.

Dada a linha de pesquisa do trabalho, de Aplicações Operacionais e Engenharia Logística, iniciou-se um processo de observação da realidade dos fatos relacionados a estes temas, por meio de uma revisão bibliográfica, com a finalidade de identificar os principais problemas e conhecer o que os pesquisadores da área têm proposto como soluções, avaliando o estado da arte e a existência de lacunas para fundamentar o problema de pesquisa.

O problema que o trabalho explora são as ineficiências no desenvolvimento da suportabilidade de sistemas de alta complexidade gerencial, responsáveis por um baixo desempenho logístico na fase de operação e suporte, fazendo com que os requisitos para os fatores RAM sejam atingidos tardiamente, ou que jamais sejam atingidos, elevando o LSC a patamares que tornam a operação do sistema excessivamente onerosa ou até inviável.

Identificado o problema dentro do tema investigado, iniciou-se a definição e o refinamento do objetivo da pesquisa, seguindo-se o caminho lógico da Figura 3.1.

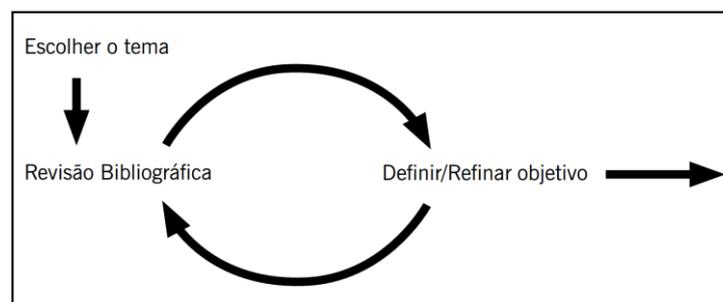


Figura 3.1 – Caminho para a definição de um objetivo de pesquisa (WAZLAWICK, 2009).

O objetivo da pesquisa é desenvolver um método que permita avaliar soluções de projeto, realizando a previsão do impacto sobre o LSC de diferentes alternativas em análise, considerando estruturas de suporte e o impacto dos cenários de operação, decorrentes do conceito de operação e do conceito de manutenção.

### 3.1 Considerações sobre o método proposto

Antes de detalhar o método proposto, será apresentado o posicionamento do método dentro do ciclo de vida do sistema e do processo de IPS, indicando quais atividades deste processo são essenciais para que o método obtenha os dados necessários para sua aplicação.

De acordo com o mapa de atividades do processo do IPS e dos marcos ou portas de decisão definidos por ASD/AIA (2021b), foi elaborada a Figura 3.2 que indica os elementos do IPS e as principais atividades que fornecem os dados para a aplicação do método, além de indicar o intervalo dentro do ciclo de vida do sistema em que se sugere a aplicação do método, visando a apoiar as decisões a serem tomadas neste intervalo do desenvolvimento. O método proposto se enquadra como uma ferramenta da atividade de análise de Custo do Ciclo de Vida, que pertence ao elemento Influência no Projeto, conforme foi representado na figura.

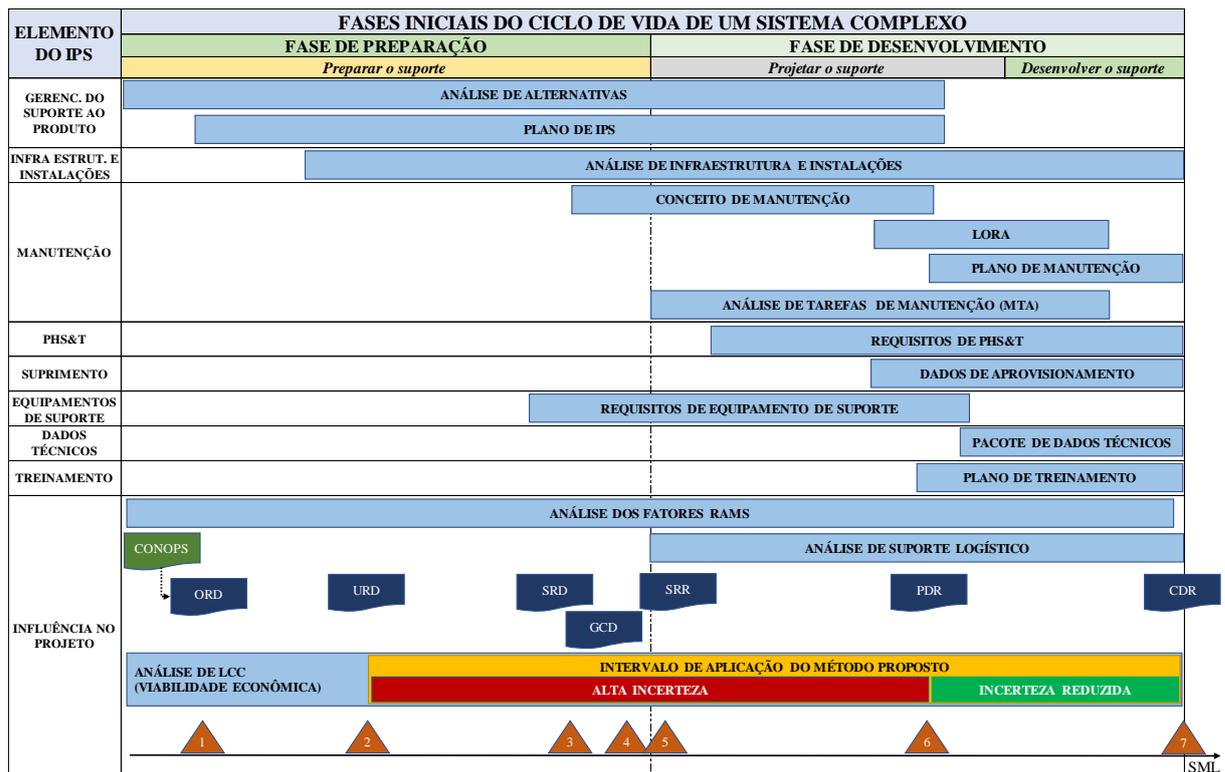


Figura 3.2 – Posicionamento do método proposto no processo de IPS.

Na medida em que as atividades dos elementos do IPS são executadas, reduz-se as incertezas dos parâmetros e novos dados são gerados. Antes do SML 2 o método tem baixa aplicabilidade por falta de dados importantes que dizem respeito ao sistema de suporte. A partir do SML 2 é possível aplicar o método, porém com a consciência situacional das limitações

relacionadas às incertezas dos seus resultados. Após o PDR, quando se atinge o SML 6, uma massa de dados significativa estará disponível, reduzindo consideravelmente as incertezas associadas à previsão do LSC de alternativas de projeto.

Mesmo que os resultados do método estejam associados a um alto nível de incerteza entre o SML 2 e 6, os resultados podem ser analisados e empregados para apoiar decisões, desde que o risco da incerteza seja mapeado. No entanto, o mapeamento e a análise dos riscos introduzidos pelas incertezas dos resultados do método não estão no escopo desta pesquisa.

Dada a característica integrada do processo de IPS, é importante ressaltar que existem outras atividades do processo, não representadas na Figura 3.2, que devem ser executadas, alimentando com seus resultados as atividades principais representadas na figura.

No Capítulo 2 os principais conceitos aplicados nesta pesquisa foram definidos, no entanto, será reforçada a definição de conceitos chave para a compreensão tanto do método quanto da posterior discussão de seus resultados, são eles:

- a) Estrutura de suporte ou estrutura de suporte logístico: no texto deste trabalho o termo representa o conjunto de estações e suas conexões. Nas estações são alocados os recursos do sistema de suporte relacionados aos níveis de manutenção;
- b) Estratégia de suporte: de acordo com ASD/AIA (2021b), refere-se a um plano que especifica como o conceito de suporte será implementado. Para este trabalho, a forma de implementação do conceito de suporte significa definir a alocação dos níveis de manutenção dentro da estrutura de suporte, alocando como consequência todos os recursos atrelados ao nível de manutenção; e
- c) Desempenho logístico: termo associado ao desempenho da relação custo-benefício na qual o custo é representado pelo LSC e o benefício por uma métrica de desempenho operacional, como a disponibilidade.

O método proposto emprega as ferramentas OPUS10© e SIMLOX©, ambas componentes do pacote de *software* denominado OPUS Suíte, em sua versão RDM 2022.1, desenvolvido pela empresa sueca Systecon. Trata-se de ferramentas comerciais destinadas ao gerenciamento do ciclo de vida de sistemas técnicos de alta complexidade. Desde 2010 a FAB adota estas ferramentas em análises avançadas que visam otimizar a prontidão de seus meios, atendendo à relação custo-benefício estabelecida para os principais programas de aeronaves, destacando-se o programa F-39 Gripen e o KC-390 Millennium (ILA, 2022).

Face ao exposto, considerou-se dispensável a inclusão de uma etapa de validação dos resultados oriundos do OPUS10© e do SIMLOX© na metodologia deste trabalho, por serem ferramentas comerciais, consolidadas e cujos resultados foram validados em aplicações práticas

conduzidas pela FAB. Ressalta-se ainda que tais ferramentas foram anteriormente empregadas em trabalhos acadêmicos, como Souza (2021), além de trabalhos publicados em veículos de divulgação científica, tais como Tysseland (2009), Marque *et al.* (2017) e Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018).

Por outro lado, faz-se necessário expressar as condições de contorno adotadas para a aplicação do método, quais sejam:

- a) Os itens reparáveis não sofrem condenação ao longo do cenário analisado;
- b) A falha de um item não induz falha nos demais;
- c) Não ocorre canibalização, que é a utilização de um componente em bom estado removido de um sistema para equipar outro sistema similar, por falta de item em estoque, ou seja, as demandas por itens são todas atendidas pelo estoque;
- d) A demanda por itens segue um processo de Poisson; e
- e) As taxas de falha são constantes.

## **3.2 As fases do método**

O método proposto foi dividido em três fases para melhor compreensão, agrupando as principais ações do método em cada uma das fases, conforme será apresentado a seguir.

### **3.2.1 Fase A: Modelagem e otimização do suporte logístico**

Nessa fase são construídos os modelos com dados provenientes do ConOps e das atividades do processo do IPS, que são armazenadas no banco de dados do LSA.

A otimização foi adotada para que comparações ocorram a partir do melhor desempenho logístico que cada modelo em análise pode oferecer. Tanto para a modelagem quanto para otimização adotou-se a ferramenta OPUS10©, que é capaz de apontar resultados ótimos de disponibilidade operacional para cada nível de investimento em LSC. O resultado do OPUS10© se concretiza por meio de uma curva denominada de curva de custo-efetividade.

Para construir a curva de custo-efetividade, o modelo matemático implementado no OPUS10© aplica uma técnica conhecida como análise marginal, também denominada de alocação marginal, para determinar a alocação ótima de itens no estoque, dentro da estrutura de suporte (SHERBROOKE, 2004). A rotina do algoritmo adiciona unidades de estoque com o maior potencial de redução do EBO sequencialmente, formando um conjunto de pontos onde

cada um corresponde a uma alocação de estoque e seu correspondente valor de LSC, conforme indica a Figura 3.3. Por este motivo, os resultados na realidade são pontos discretos e não uma curva contínua.

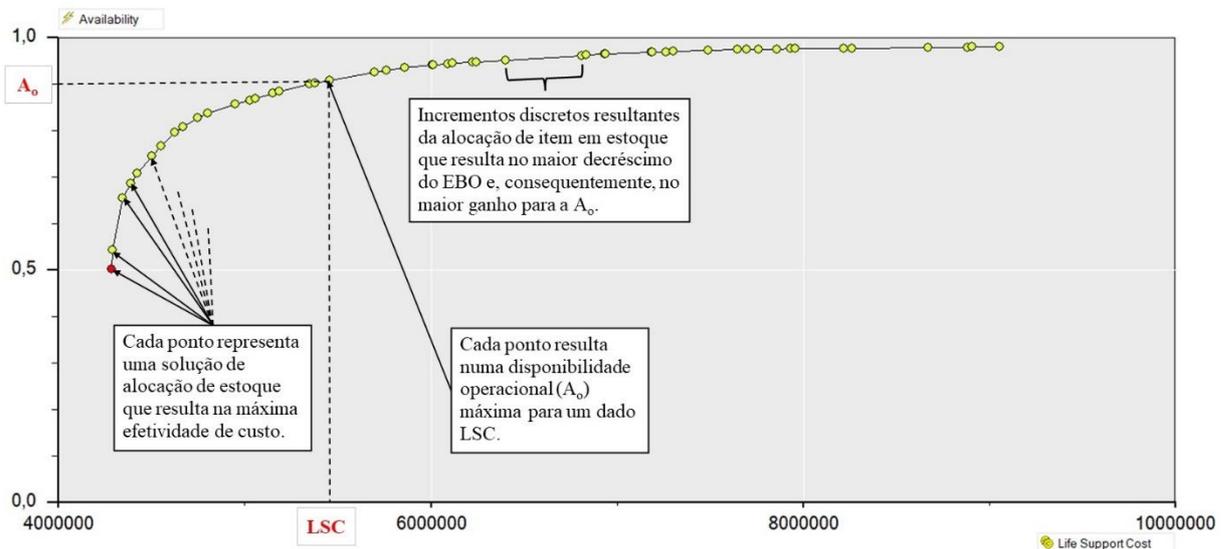


Figura 3.3 – Curva de custo-efetividade (adaptado dos resultados do OPUS10©).

O OPUS10© é capaz de otimizar a alocação dos níveis de manutenção dentro da estrutura de suporte modelada, desde que sejam inseridas as opções que se deseja avaliar. A funcionalidade é denominada pelo desenvolvedor do *software* de LORA, decorrente do termo em inglês *Location of Repair Analysis* (SYSTECON, 2022a).

Estudos preliminares realizados durante o desenvolvimento do método proposto apontaram para o potencial de redução no LSC com o uso da funcionalidade LORA, que aponta a estratégia ótima para cada nível de disponibilidade operacional (BUCH; ABRAHÃO, 2022). Desta forma a LORA foi incorporada ao método.

Outra justificativa para incorporar a LORA ao método relaciona-se a característica do sistema de suporte dos motores aeronáuticos, que apresenta expressivo custo relacionado à infraestrutura e aos equipamentos de suporte, que podem custar centenas de milhões de reais, a exemplo do banco de provas da GE Celma, na cidade de Três Rios/RJ, um investimento de cerca de 250 milhões de reais para sua implantação (GE REPORTS BRASIL, 2020), gerando ainda custos recorrentes de manutenção e atualização. Diante de números tão expressivos, decisões como a de contratar os serviços de manutenção ou capacitar-se para executá-los, além de definir onde instalar os níveis de manutenção e seus recursos, são essenciais na busca de um conceito de manutenção ótimo.

Portanto, a fase A do método considera a otimização simultânea da composição dos estoques e suas quantidades, da localização dos níveis de manutenção e alocação de recursos e suas quantidades.

Os modelos, que podem ser verificados no Apêndice B, consideram os seguintes recursos para cada um dos níveis de manutenção modelados, associando a eles os seus custos:

- a) Mão de obra;
- b) Suporte de engenharia;
- c) Treinamentos e atualizações periódicas;
- d) Infraestrutura e manutenção destas;
- e) Ferramentas e equipamentos de suporte e manutenção destes;
- f) Publicações técnicas e atualizações; e
- g) Certificação e manutenção das condições de certificação.

A Figura 3.4 apresenta o mapeamento das etapas da fase A do método proposto, na qual ocorre a modelagem e a otimização da suportabilidade da alternativa de projeto que será analisada.

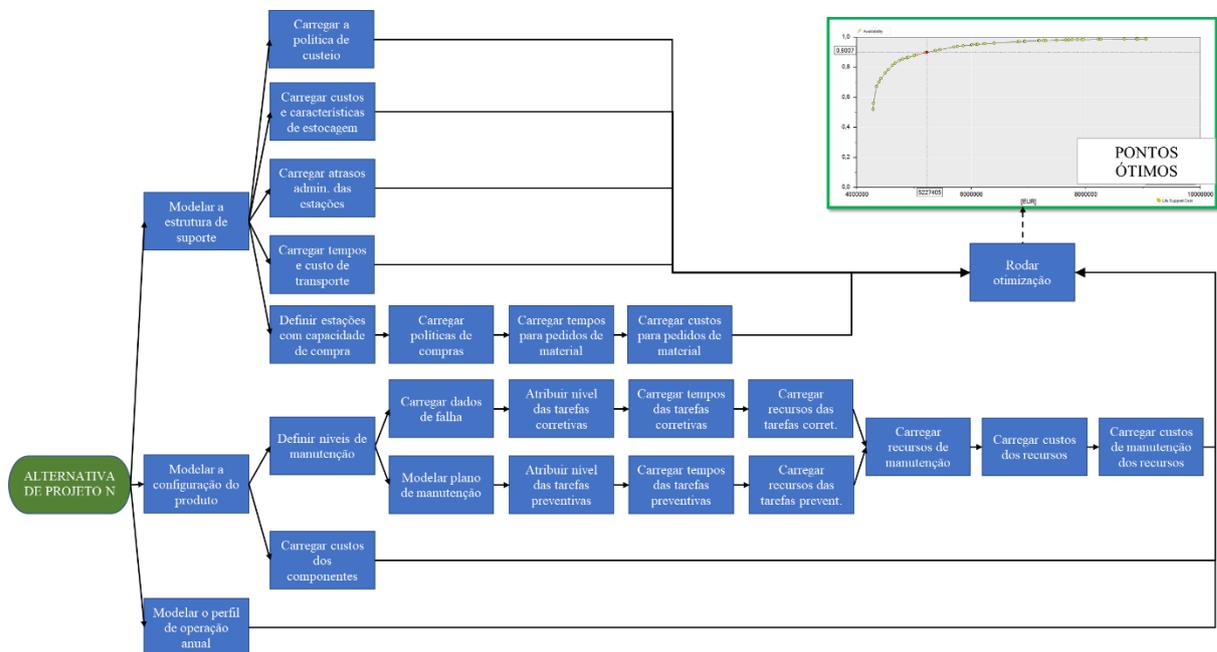


Figura 3.4 – Mapeamento da fase A do método proposto.

O resultado da fase A é submetido aos procedimentos da fase B que serão descritos a seguir.

### 3.2.2 Fase B: Seleção pelo requisito e alocação de recursos para simulação

Na fase B aplica-se o requisito de desempenho operacional escolhido, que normalmente é estabelecido como um valor esperado ou médio. Para cada modelo, seleciona-se, na curva de custo-efetividade resultante da fase A, o ponto que resulte numa disponibilidade operacional máxima igual ou ligeiramente superior ao requisito, consistindo numa aproximação inicial para o valor médio do requisito. Após a seleção do ponto, aloca-se os recursos prescritos pela fase A para este ponto num modelo de simulação de cenários operacionais.

A Figura 3.5 representa esquematicamente o procedimento de seleção de pontos da fase B do método, que prepara o modelo para a aplicação da simulação do cenário operacional da fase C, que será descrita a seguir.

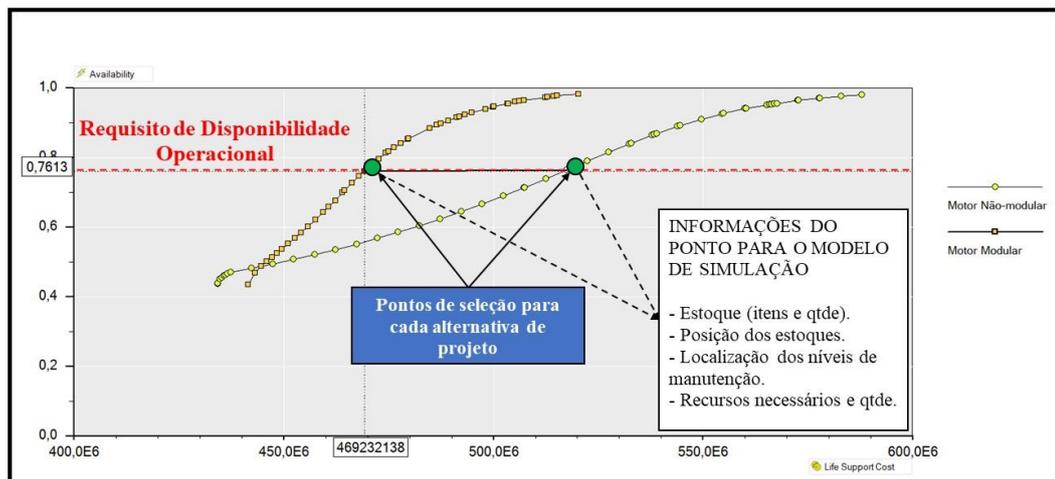


Figura 3.5 – Representação da fase B do método proposto (adaptado dos resultados do OPUS10©).

### 3.2.3 Fase C: Modelagem e simulação do cenário operacional

O *software* OPUS10© empregado na fase A apresenta seus resultados com base numa modelagem matemática que considera distribuições estocásticas, onde a operação do sistema é descrita por um fator de utilização médio (SYSTECON, 2022b), gerando resultados baseados num modelo estático e determinístico, cujos eventos são uniformemente distribuídos.

Como o objetivo do método é gerar prospecções dos custos que ocorrerão na fase de operação e suporte, buscou-se implementar maior precisão ao método, por meio da introdução do dinamismo imposto pelos cenários operacionais, com a inserção de variáveis dependentes

do tempo, como os perfis operacionais. Para tanto, a fase C do método emprega o *software* SIMLOX©, que fornece resultados coletados de uma sequência de eventos gerados por simulação (SYSTECON, 2022b).

A fase B entrega um modelo de simulação com a alocação dos recursos de um ponto que é adotado como aproximação inicial para o requisito de disponibilidade operacional média estabelecido. É importante ressaltar que o OPUS10© e o SIMLOX© são ferramentas distintas, porém integradas e pertencentes a um mesmo pacote de *software*. Assim, o modelo gerado no OPUS10© serve de base para o modelo de simulação do SIMLOX©, onde é introduzido o dinamismo do cenário operacional que se pretende analisar, por meio da modelagem do perfil operacional.

Para uma ferramenta de simulação que contém processos estocásticos, é necessário executar o cenário várias vezes para atingir-se um nível adequado de confiança dos resultados, dada a variação estocástica das diferentes simulações individuais. Os resultados totais são então calculados como uma média de todas as replicações. Quanto maior o número de replicações maior é o nível de confiança dos resultados (SYSTECON, 2022b).

O SIMLOX© requer a definição dos parâmetros que serão utilizados na simulação, tais como o número de replicações e o período de simulação. Para os casos estudados neste trabalho, foram realizadas 500 replicações, suficientes para que o desvio padrão dos valores médios dos resultados das replicações se mantivesse na ordem de  $10^{-4}$  para todas as simulações realizadas. Assim, o incremento no número de replicações não traria maiores benefícios ao estudo. O período de simulação adotado foi de um ano, dado inserido em horas (8.760 horas), visto ser um lapso temporal suficiente para representar os perfis operacionais simulados. A Figura 3.6 representa esquematicamente a fase C do método.

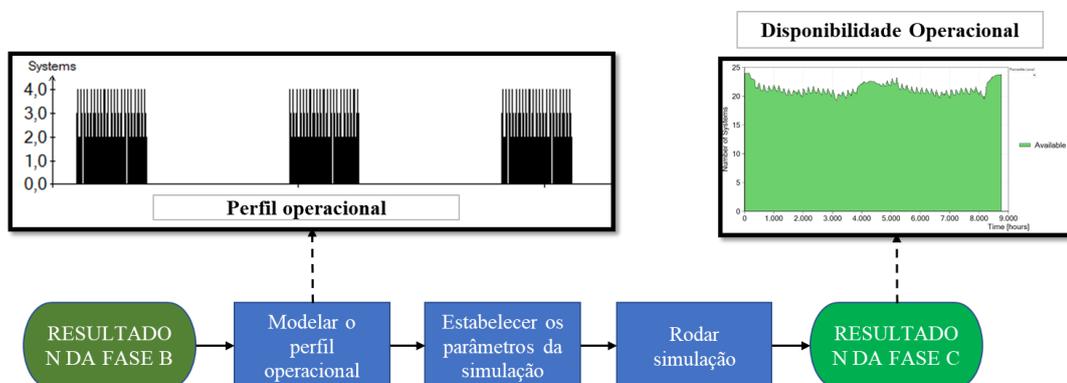


Figura 3.6 – Representação da fase C do método proposto.

### 3.3 Fluxograma do método

A Figura 3.7 apresenta o processo de aplicação do método proposto. Após a aplicação da fase C, existe um ponto de decisão que avalia se o requisito de disponibilidade operacional média é atendido após aplicada a simulação do cenário operacional. Caso a simulação aponte uma degradação do valor médio da disponibilidade operacional, um processo iterativo deve ser aplicado, no qual duas ações podem ser adotadas individualmente em cada iteração:

- Retornar à fase B do método e selecionar, na curva de custo-efetividade, um ponto à direita do anteriormente selecionado, alocando os recursos deste ponto, seguindo para a fase C. Esta ação mantém a modelagem da alternativa de projeto inalterada e pode ser repetida até se atingir o requisito; ou
- Modelar uma melhoria percentual nos fatores de confiabilidade e manutenibilidade, retornando à fase A, gerando opções de melhoria de projeto que atendam o requisito de disponibilidade ao se submeter o sistema de suporte à simulação do cenário operacional. Uma análise de sensibilidade pode ser aplicada para avaliar qual fator tem maior impacto na melhoria do desempenho logístico. Esta ação altera a modelagem da alternativa de projeto.

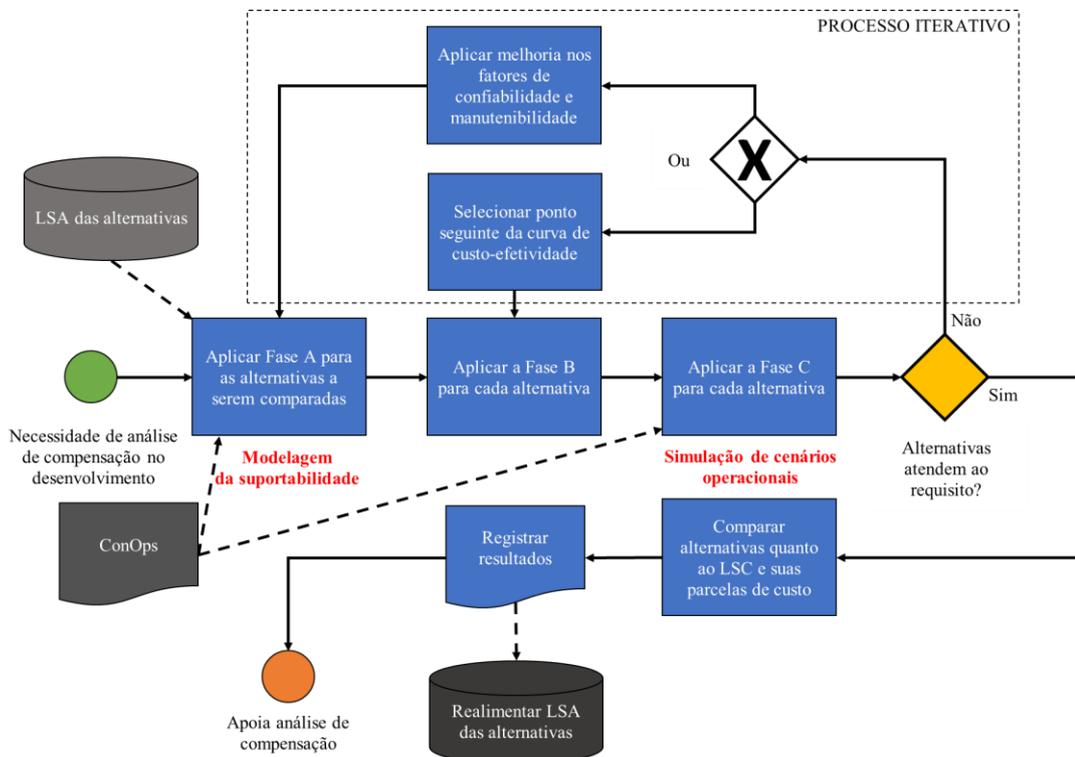


Figura 3.7 – Fluxograma do processo de aplicação do método proposto.

### **3.4 Considerações finais do capítulo**

Este capítulo apresentou o produto da pesquisa, que consiste num método que permite realizar prospecções dos custos de suporte do sistema, levando em consideração os aspectos de suportabilidade e o cenário operacional, possibilitando que essa parcela relevante do Custo do Ciclo de Vida possa influenciar decisões tomadas nas fases iniciais do desenvolvimento do sistema. Foi apresentado o sequenciamento de passos que define o processo de aplicação do método proposto, o qual será aplicado no capítulo seguinte.

## 4 Aplicação do método, resultados e discussão

No presente capítulo serão apresentados os modelos elaborados para apoiar os casos que serão estudados. Serão apresentadas as considerações empregadas para cada modelo e cada cenário de simulação. Antes de serem explorados os casos de estudo, dois aspectos importantes do método serão apresentados com maiores detalhes, que é o impacto de se considerar a otimização da estratégia de suporte e a possibilidade de emprego do método mesmo em um baixo nível de maturidade do projeto do sistema de suporte. Ao final, será realizada uma discussão do método, considerando cada caso estudado.

### 4.1 Considerações sobre os casos de aplicação do método

Para os casos que serão apresentados nesse capítulo, foi considerado uma fase de operação e suporte de 20 anos, de forma que o LSC representa o custo de suporte ao longo deste período, que representa um tempo de operação considerado razoável para sistemas de alta complexidade, conforme mencionado por Rojo, Roy e Shehab (2010).

Conforme mencionado nos capítulos iniciais do trabalho, o objeto selecionado para representar o sistema de alta complexidade cujo desenvolvimento esteja sendo apoiado pelo método é um motor aeronáutico. Como veículo aeronáutico, foi selecionado uma aeronave não tripulada com sistema de propulsão a reação.

A sigla UAV é comumente empregada para se referir as aeronaves não tripuladas, em decorrência do termo em inglês *Unmanned Aerial Vehicle*. Esses veículos aéreos podem ser classificados de acordo com o tipo de missão, dentre as quais estão a de inteligência, vigilância, aquisição de alvos e reconhecimento, conhecida como ISTAR (do inglês *Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance*) e a missão de combate, conhecida como UCAV (do inglês *Unmanned Combat Aerial Vehicle*) (ARJOMANDI *et al.*, 2016).

Dois cenários operacionais foram construídos para os casos de estudo, um compatível com a operação de um UCAV e outro compatível com a operação de um ISTAR. Diferenciou-se os cenários considerando que a operação de uma frota de UCAV apresenta mais voos ao longo de um período, porém com menor duração média dos voos, se comparado com um a operação de uma frota de ISTAR. Para estabelecer estas distinções, adotou-se como referência as diferenças entre os perfis operacionais da aviação de caça e de patrulha da FAB. A Figura

4.1 apresenta o perfil operacional de uma semana, construído para simular a operação de uma frota de UCAV e a Figura 4.2 representa o perfil operacional semanal construído para uma frota de ISTAR.

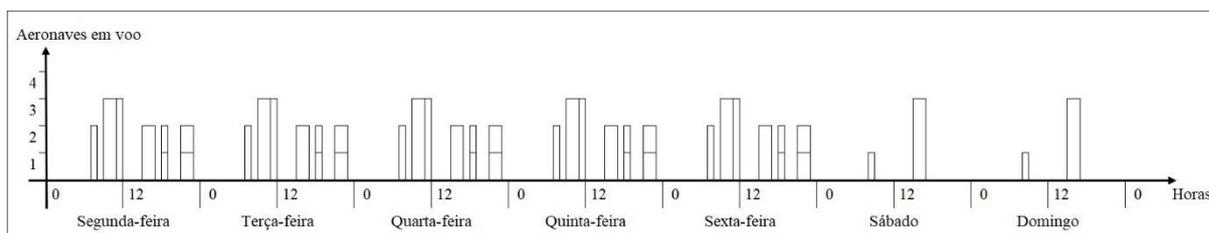


Figura 4.1 – Perfil semanal de operação construído para UCAV.

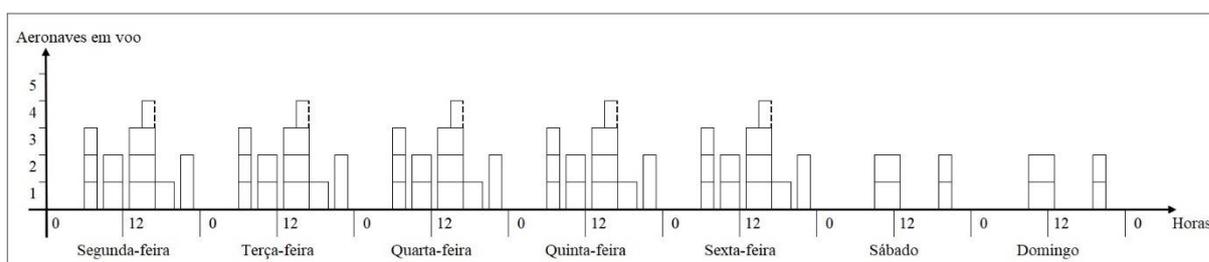


Figura 4.2 – Perfil semanal de operação construído para ISTAR.

A Tabela 4-1 apresenta as principais informações dos perfis operacionais, além de indicar a diferença percentual do perfil operacional modelado para uma frota de ISTAR em relação ao perfil modelado para uma frota de UCAV. As informações consideram a operação de uma frota de 28 aeronaves a partir de quatro bases, com sete aeronaves alocadas em cada base. Esta quantidade de aeronaves, que será empregada nos casos de estudo, foi inspirada no contrato de aquisição de 28 unidades da aeronave KC-390 Millennium, adquiridas pela FAB da Embraer, em 2014, com a aeronave ainda em desenvolvimento (AGÊNCIA FORÇA AÉREA, 2014).

Tabela 4-1 – Principais parâmetros dos perfis operacionais.

PARÂMETRO	NOMENCLATURA DO PERFIL OPERACIONAL		PERFIL ISTAR EM RELAÇÃO AO UCAV
	UCAV	ISTAR	
Taxa de utilização anual por aeronave	221 h	351 h	58,82%
Número de voos anuais	4.056	3.276	-19,23%
Tempo médio de um voo	1,53 h	3,00 h	96,08%

Cabe ressaltar que o tamanho da frota é um dos parâmetros do modelo que interferem diretamente na relação custo-benefício, aqui tratada como a relação entre o LSC e a disponibilidade operacional. No entanto, este parâmetro não será variado nos casos de estudo, visto que se pretende avaliar o desempenho logístico de uma alternativa de projeto em um determinado cenário operacional, mantendo os demais parâmetros invariáveis, permitindo comparações de desempenho logístico entre alternativas de projeto.

A estrutura de suporte adotada para os estudos de caso também foi inspirada na prática do suporte logístico de frotas da FAB, onde as bases de operação são apoiadas por um Parque de Manutenção Central, ocorrendo também contratação junto a empresas privadas dos níveis mais altos de manutenção. A Figura 4.3 apresenta a estrutura de suporte adotada para modelar os casos de aplicação do método.

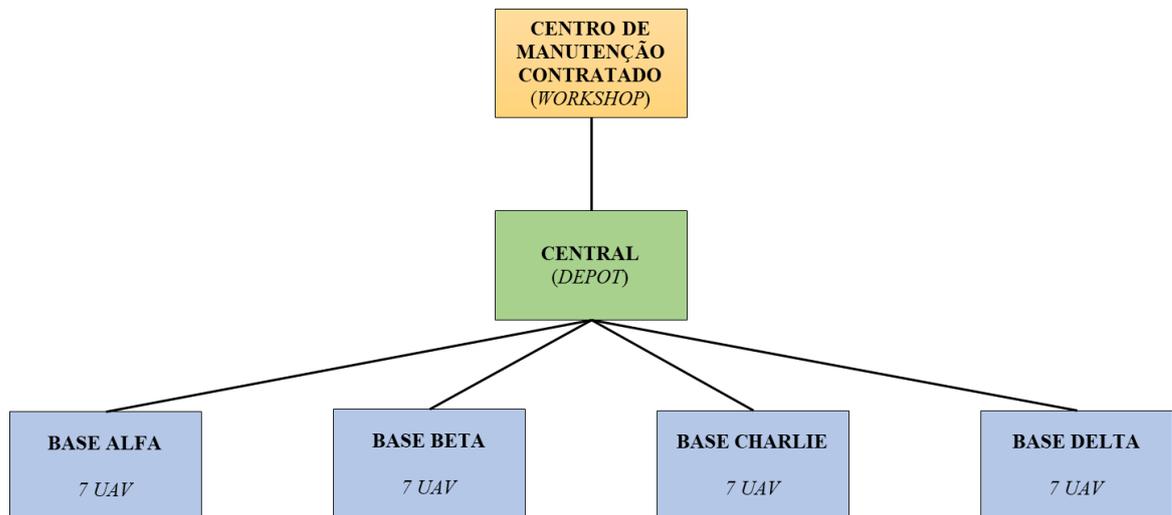


Figura 4.3 – Estrutura de suporte e distribuição da frota.

Para a definição dos parâmetros atrelados à estrutura de suporte, como tempos de transporte e atrasos administrativos, buscou-se encontrar parâmetros compatíveis com a realidade do suporte logístico de frotas da FAB.

A Figura 4.4 apresenta a configuração adotada para um motor aeronáutico genérico, que representará o motor associado ao conceito de manutenção não modular, ou motor de conjunto único, denotando que seus módulos não são construídos para serem facilmente separados num nível de manutenção de menor especialização. Para o estabelecimento da configuração, foram observadas as definições contidas em AIRPLANE (2022) e SAFRAN GROUP (2008). Ressalta-se que esta representação é simplista, com o objetivo de apoiar estudos acadêmicos.

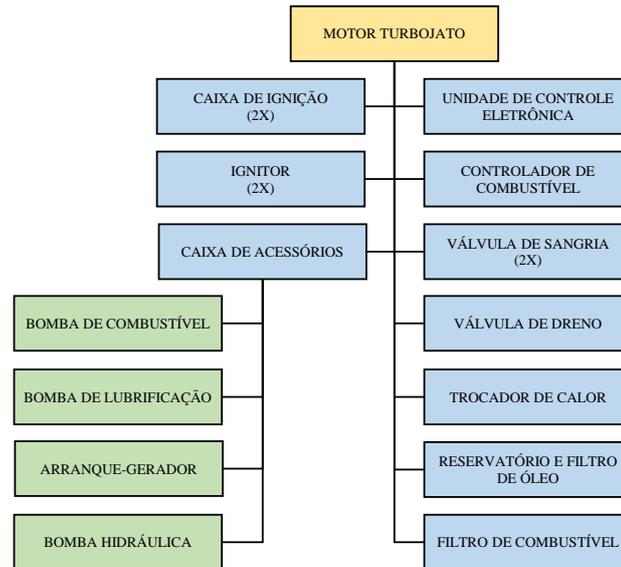


Figura 4.4 – Configuração para um motor aeronáutico não modular.

A configuração do motor modular será modelada conforme a Figura 4.5, considerando o mesmo conjunto de acessórios periféricos indicados pelos retângulos azuis e verdes da Figura 4.4.

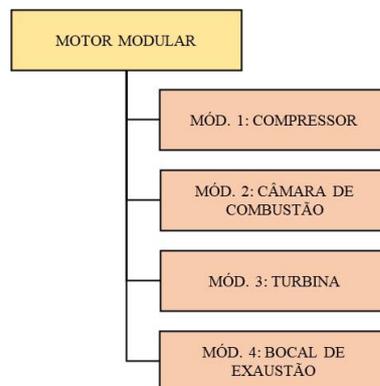


Figura 4.5 – Configuração para um motor aeronáutico modular.

A introdução da capacidade de separação de módulos em níveis intermediários de manutenção, que permita a intercambialidade destes, exige características especiais no projeto mecânico do motor e maior precisão nos processos de manufatura. Para considerar os custos introduzidos pelo conceito de manutenção modular, considerou-se um acréscimo de 20% ao custo do motor modular em relação ao motor não modular. Além disso, um conjunto de ferramentas especiais e equipamentos de apoio para a montagem e desmontagem dos módulos deve ser disponibilizado para os níveis intermediários de manutenção, que também devem

receber treinamento para a execução destes procedimentos, agregando custos extras ao modelo do motor modular.

A modelagem empregada atribui uma ação de manutenção corretiva para cada ocorrência de falha de itens reparáveis, acionando para tanto todos os recursos necessários para a execução desta ação dentro da estrutura de suporte, considerando os tempos e custos inerentes. Foi considerado apenas um modo de falha para cada componente nos casos estudados. No entanto, é possível atribuir distintos modos de falha aos componentes do modelo. Os itens do motor não modular considerados para os casos de estudo são apresentados na Tabela 4-2, indicando o preço estabelecido para cada componente, o modo de falha e a taxa de falha. As mesmas informações para o motor modular são apresentadas na Tabela 4-3. Ressalta-se que não foi atribuída uma moeda para a unidade monetária, nem tampouco serão considerados os efeitos inflacionários, de depreciação e taxas de câmbio, visto que estes efeitos não serão investigados por esta pesquisa. No entanto, é possível introduzir aos modelos estas considerações.

Tabela 4-2 – Dados de falha e custo dos componentes do modelo de motor não modular.

Descrição do componente	Preço [\$]	Modo de falha	Taxa de falha [Falha/10 <sup>6</sup> h]*
Motor turbojato	2.100.000,00	Falha do turbojato	2.730,06
Unidade de controle eletrônica (ECU)	37.920,00	Falha da ECU	337,50
Controlador de combustível (EFCU)	27.072,00	Falha do EFCU	171,72
Válvula de sangria (BDV)	4.004,00	Falha da BDV	751,34
Válvula de dreno (DNV)	2.669,33	Falha da DNV	813,94
Trocador de calor (HTEXGR)	3.248,00	Falha do HTEXGR	864,00
Reservatório e filtro de óleo (OILTK-FLTR)	9.100,00	Falha do OILTK-FLTR	96,43
Filtro de combustível (FFLTR)	1.736,00	Falha do FFLTR	122,69
Caixa de ignição (IGBX)	11.144,00	Falha da IGBX	75,60
Ignitor (IGTR)	1.400,00	Falha do I IGTR	146,88
Caixa de acessórios (AGB)	198.440,00	Falha da AGB	326,86
Bomba de combustível (FPMP)	22.941,00	Falha da FPMP	1.066,10
Bomba de lubrificação (LBPMP)	18.200,00	Falha da LBPMP	177,39
Arranque-gerador (STR-GEN)	65.576,00	Falha do STR-GEN	4.026,24
Bomba hidráulica (HYD-PMP)	19.058,00	Falha da HYD-PMP	272,16

\* Número de falhas para cada milhão (10<sup>6</sup>) de horas de voo.

Tabela 4-3 – Dados de falha e custo dos componentes do modelo de motor modular.

Descrição do componente	Preço [\$]	Modo de falha	Taxa de falha [Falha/10 <sup>6</sup> h]*
Motor modular	2.520.000,00	Falha do motor modular	136,50
Mod. 1 - Compressor	882.000,00	Falha do Mód. 1	409,51
Mod. 2 - Câmara de combustão	630.000,00	Falha do Mód. 2	682,52
Mod. 3 - Turbina	756.000,00	Falha do Mód. 3	546,01
Mod. 4 - Bocal de exaustão	252.000,00	Falha do Mód. 4	955,52
Unidade de controle eletrônica (ECU)	37.920,00	Falha da ECU	337,50
Controlador de combustível (EFCU)	27.072,00	Falha do EFCU	171,72
Válvula de sangria (BDV)	4.004,00	Falha da BDV	751,34
Válvula de dreno (DNV)	2.669,33	Falha da DNV	813,94
Trocador de calor (HTEXGR)	3.248,00	Falha do HTEXGR	864,00
Reservatório e filtro de óleo (OILTK-FLTR)	9.100,00	Falha do OILTK-FLTR	96,43
Filtro de combustível (FFLTR)	1.736,00	Falha do FFLTR	122,69
Caixa de ignição (IGBX)	11.144,00	Falha da IGBX	75,60
Ignitor (IGTR)	1.400,00	Falha do I IGTR	146,88
Caixa de acessórios (AGB)	198.440,00	Falha da AGB	326,86
Bomba de combustível (FPMP)	22.941,00	Falha da FPMP	1.066,10
Bomba de lubrificação (LBPMP)	18.200,00	Falha da LBPMP	177,39
Arranque-gerador (STR-GEN)	65.576,00	Falha do STR-GEN	4.026,24
Bomba hidráulica (HYD-PMP)	19.058,00	Falha da HYD-PMP	272,16
* Número de falhas para cada milhão (10 <sup>6</sup> ) de horas de voo.			

É importante salientar que tanto o motor não modular quanto o modular apresentam a mesma taxa de falha. Para o caso do motor modular a taxa de falha é dada pela soma das taxas de falha dos módulos e da taxa de falha direta do motor, que são falhas reparadas diretamente no motor, sem a separação dos módulos. Assim as comparações realizadas nos casos de estudo consideram motores com taxas de falha idênticas.

O processo de acionamento de tarefas para cumprir o plano de manutenção ocorre pelo vencimento dos intervalos estabelecidos para a execução de ações de manutenção programada. O plano de manutenção considerado para o motor não modular é apresentado na Tabela 4-4 e a Tabela 4-5 apresenta o plano para o motor modular. Já os níveis de manutenção considerados nos casos de estudo seguem o descrito na Tabela 4-6.

Tabela 4-4 – Plano de manutenção para o motor não modular.

Atividade de manutenção	Intervalo	Parâmetro operacional
Inspeção de corrosão	365	dias corridos
Inspeção do motor	200	horas de voo
Revisão geral do motor	1200	horas de voo
Revisão geral da caixa de acessórios	1000	horas de voo

Tabela 4-5 – Plano de manutenção para o motor modular.

Atividade de manutenção	Intervalo	Parâmetro operacional
Inspeção de corrosão	365	dias corridos
Inspeção do motor	200	horas de voo
Revisão geral do módulo 1	2000	horas de voo
Revisão geral do módulo 3	1200	horas de voo
Revisão geral da caixa de acessórios	1000	horas de voo

Tabela 4-6 – Níveis de manutenção adotados nos casos de estudo.

Nível de manutenção	Tarefas/atividades de manutenção
1	Inspeções de nível 1 e instalação e remoção do motor
2	Inspeções de nível 2 e separação/montagem de módulos (para motores modulares)
3	Inspeções de nível 3 (revisão geral) e reparo de motor, módulos e acessórios

A importância de se considerar todos os elementos do suporte logístico para condução de análises foi bastante enfatizada nos capítulos iniciais deste trabalho. Esta abordagem foi introduzida nos modelos dos casos estudados, os quais consideram, para cada nível de manutenção estabelecido, os recursos descritos no Capítulo 3. Com relação aos estoques, além dos custos de aquisição de itens, são considerados custos administrativos das operações de compras e custos de estocagem.

Para a construção dos modelos, buscou-se usar parâmetros compatíveis com a realidade observada na prática do suporte logístico aos motores e aeronaves operadas e suportadas pela FAB, incluindo a distinção entre os planos de manutenção de um motor com o conceito modular e um que não tenha este conceito integrado. Ainda assim, ressalta-se que os parâmetros estabelecidos para os modelos são hipotéticos. Porém, as comparações conduzidas nos casos estudados consideram parâmetros em comum, alterando-se o conceito de manutenção e o cenário operacional, verificando a capacidade do método em apontar diferenças, vantagens e desvantagens. Todos os dados empregados e maiores detalhes da modelagem do suporte logístico podem ser encontrados no Apêndice B.

## 4.2 Impacto da análise de nível de reparo

O método proposto incorpora a LORA, análise que avalia as estratégias de suporte, buscando encontrar uma solução que maximize a disponibilidade do sistema. Para tanto, empregou-se a funcionalidade LORA do OPUS10©.

Ao se alocar um nível de manutenção numa determinada estação da estrutura de suporte, é necessário alocar os recursos para que as tarefas de manutenção daquele nível estejam disponíveis. Assim, a LORA torna-se especialmente importante para o desenvolvimento do conceito de manutenção e a escolha da estratégia de suporte de sistemas de alta complexidade que, em geral, necessitam de uma densa estrutura de suporte logístico.

Para melhor esclarecer o exposto acima, tomemos como exemplo o suporte de motores aeronáuticos, os quais requerem uma ampla infraestrutura e equipamentos de suporte com elevado custo de implantação e manutenção, como o caso de bancos de prova.

Para evidenciar a importância do emprego da LORA, serão apresentados os resultados obtidos a partir de um modelo para uma frota de 28 UAV equipados com um motor não modular, com uma utilização média de 221 horas de voo anuais para cada UAV. O único sistema do UAV considerado é o seu sistema de propulsão. A estrutura de suporte considerada é a da Figura 4.3. Serão avaliadas cinco alternativas de suporte distintas, apresentadas na Tabela 4-7. Ressalta-se que o primeiro nível de manutenção, que contempla as ações de remoção e montagem do motor na aeronave, devem estar alocados nas bases de operação, visto que as aeronaves não se deslocam para a estação central ou para o centro de manutenção contratado.

Tabela 4-7 – Alternativas para a estratégia de suporte.

Alternativa de Estratégia de Suporte	Componente	Nível de manutenção	Estação
1	Todos	L2	Central ( <i>Depot</i> )
	Todos	L3	Centro de manutenção contratado ( <i>Workshop</i> )
2	Todos	L2	Bases
	Todos	L3	Central ( <i>Depot</i> )
3	Todos	L2	Bases
	Todos	L3	Centro de manutenção contratado ( <i>Workshop</i> )
4	Todos	L2	Central ( <i>Depot</i> )
	Todos	L3	Central ( <i>Depot</i> )
5	Todos	L2	Centro de manutenção contratado ( <i>Workshop</i> )
	Todos	L3	Centro de manutenção contratado ( <i>Workshop</i> )

A Figura 4.6 apresenta a curva de custo-efetividade resultante da otimização empregando a funcionalidade LORA do OPUS10©. A estratégia de suporte ótima varia de

acordo com o requisito de disponibilidade. A curva apresenta 86 pontos de máxima efetividade de custo e a estratégia de suporte ótima varia de acordo com a Tabela 4-8.

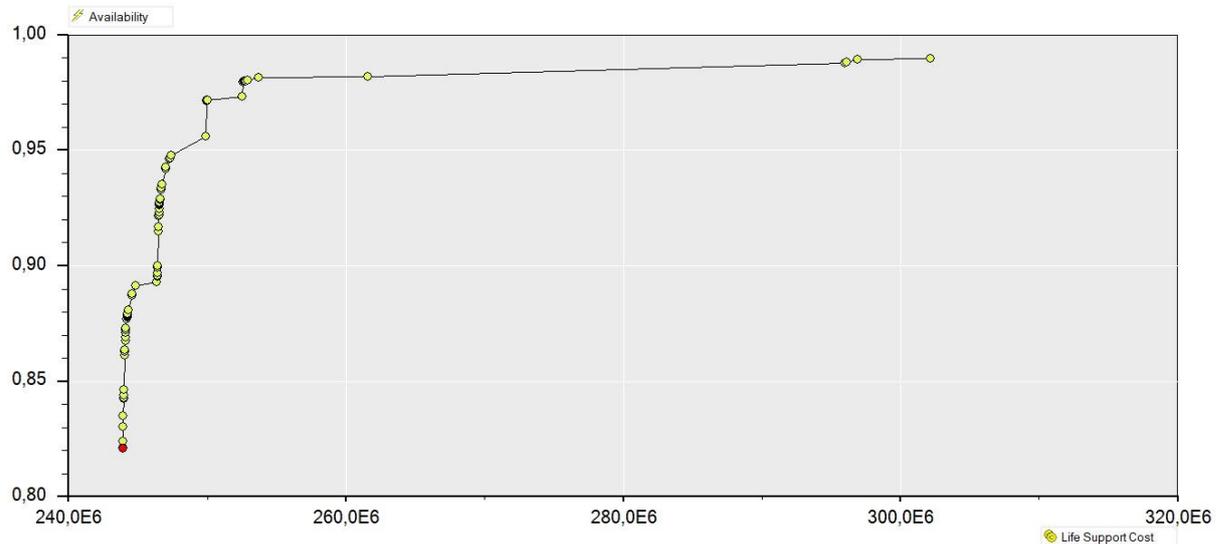


Figura 4.6 – Resultados da otimização do suporte logístico aplicando a LORA (OPUS10©).

Tabela 4-8 – Alternância da estratégia de suporte ótima ao longo dos pontos da curva.

Intervalo de pontos da curva				Estratégia de suporte ótima
Ponto inicial	Disp. do ponto(%)	Ponto final	Disp. do ponto(%)	
1	82,09	31	89,15	Alternativa 4
32	89,28	61	94,77	Alternativa 5
62	95,61	62	95,61	Alternativa 4
63	97,14	68	97,18	Alternativa 5
69	97,31	71	97,31	Alternativa 4
72	97,97	79	98,16	Alternativa 5
80	98,20	80	98,20	Alternativa 1
81	98,77	85	98,92	Alternativa 2
86	98,96	86	98,96	Alternativa 3

A Figura 4.7 apresenta as curvas para as cinco alternativas de estratégia de suporte avaliadas na LORA. Os pontos destas curvas compõem a curva da Figura 4.6, de acordo com os trechos apontados na Tabela 4-8. Na Figura 4.7 supôs-se um requisito de disponibilidade operacional de 97%. Desta forma, em cada uma das cinco curvas, avaliou-se o primeiro ponto com disponibilidade operacional máxima maior ou igual ao requisito. Os resultados estão apresentados na Tabela 4-9. Esta análise deixa evidente a relevância da LORA na otimização do suporte logístico de sistemas de alta complexidade gerencial, indicando o potencial de

economia no LSC, mostrando ainda que ao fixar-se uma estratégia de suporte, podemos prejudicar significativamente o desempenho do sistema de suporte.

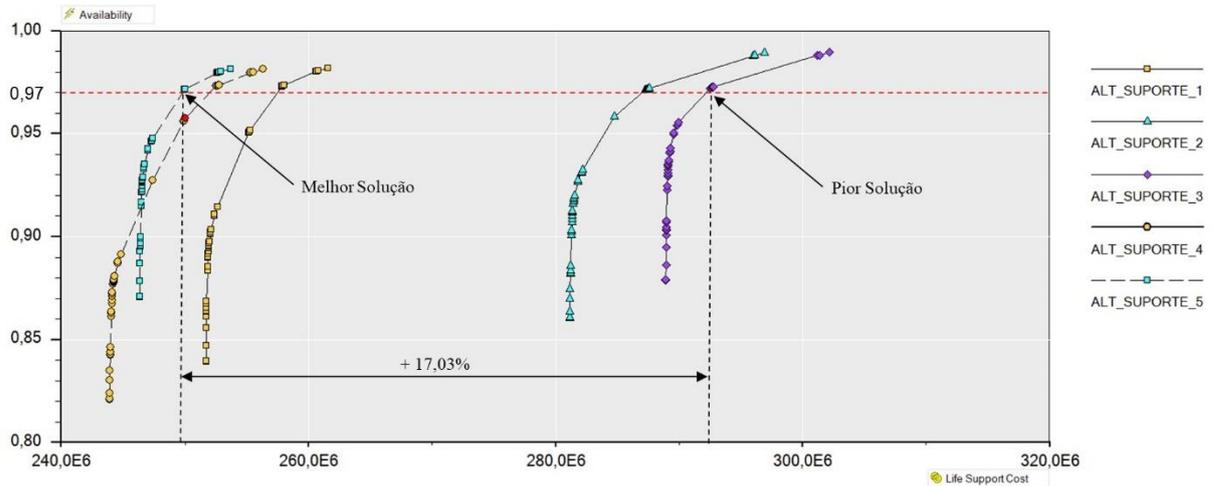


Figura 4.7 – Demonstração da comparação entre estratégias de suporte (adaptado dos resultados do OPUS10©).

Tabela 4-9 – Comparação entre as soluções de cada estratégia de suporte avaliada.

Alternativa de Estratégia de Suporte	Disp. Operac. do ponto que atende o requisito (%)	LSC do ponto (\$)	% maior que a melhor solução
1	97,30	257.813.903,00	3,16%
2	97,12	287.248.676,00	14,93%
3	97,20	292.488.922,00	17,03%
4	97,31	252.539.409,00	1,05%
5	97,14	249.924.782,00	Melhor Solução

Ressalta-se que os casos que serão apresentados a seguir, assim como o modelo utilizado para a análise acima demonstrada, apresentam uma LORA simplificada, pois reúne todos os componentes do motor em um único grupo, resultando na escolha da melhor posição dentro da estrutura de suporte para alocar-se o nível de manutenção e seus recursos, ou seja, ao selecionar a estação central para executar as atividades de nível 3, todos os componentes do motor terão as atividades deste nível executadas nesta estação. No entanto, é possível modelar grupos de componentes que guardem similaridades em suas características de suporte e otimizar a alocação de seus níveis de manutenção separadamente dos demais. Por exemplo, é possível avaliar a melhor estratégia de suporte para o sistema de combustível separadamente da estratégia de suporte para o sistema de controle. O nível de detalhamento da análise pode chegar

aos componentes individualizados, semelhante ao proposto no modelo matemático abordado no Apêndice A.

### **4.3 O método aplicado ao longo do desenvolvimento**

O nível de detalhamento do modelo dependerá da disponibilidade de dados, oriundos das diversas análises do IPS, que devem estar integradas ao processo de Engenharia de Sistemas no desenvolvimento do produto. Os dados são então gerados e amadurecidos ao longo do desenvolvimento. Estima-se que o método possa ser aplicado a partir do SML 2, contribuindo para que o SML 7 seja alcançado. Para tanto, o método deve ser aplicado para apoiar as análises de compensação ao longo do amadurecimento do sistema de suporte, de forma iterativa e retroalimentando o LSA.

Mesmo que dados importantes para os modelos não estejam disponíveis ou maduros nas fases iniciais do desenvolvimento, é possível aplicar o método para obter resultados que podem ser considerados nas análises de compensação destas fases. No entanto, a aplicação do método entre o SML 2 e 6 poderá deparar-se com ausência de dados importantes ou com incertezas associadas à baixa maturidade dos dados.

A Figura 4.8 apresenta as curvas de custo-efetividade de um modelo de motor modular e de um motor não modular, aplicados em um mesmo sistema aeronáutico sob as mesmas condições operacionais e de suporte. A análise ocorre em dois momentos distintos dentro das fases iniciais do desenvolvimento. No primeiro momento poucos dados estão disponíveis, a exemplo das ações de manutenção programadas. O segundo momento mostra uma análise que conta com um sistema de suporte mais bem delineado, que considera um plano de manutenção. É possível observar o impacto sobre o LSC causado pelo sistema de suporte, a medida em que o seu projeto amadurece. Também é possível observar que, para o caso analisado, a tendência de melhor desempenho logístico do motor modular sobre o não modular permanece, mesmo após a introdução do plano de manutenção, mas nota-se que a vantagem é reduzida, de acordo com o indicado na Figura 4.8 para o ponto de máxima disponibilidade operacional de cada modelo. Este valor percentual de redução do LSC varia de acordo com o requisito de disponibilidade operacional selecionado.

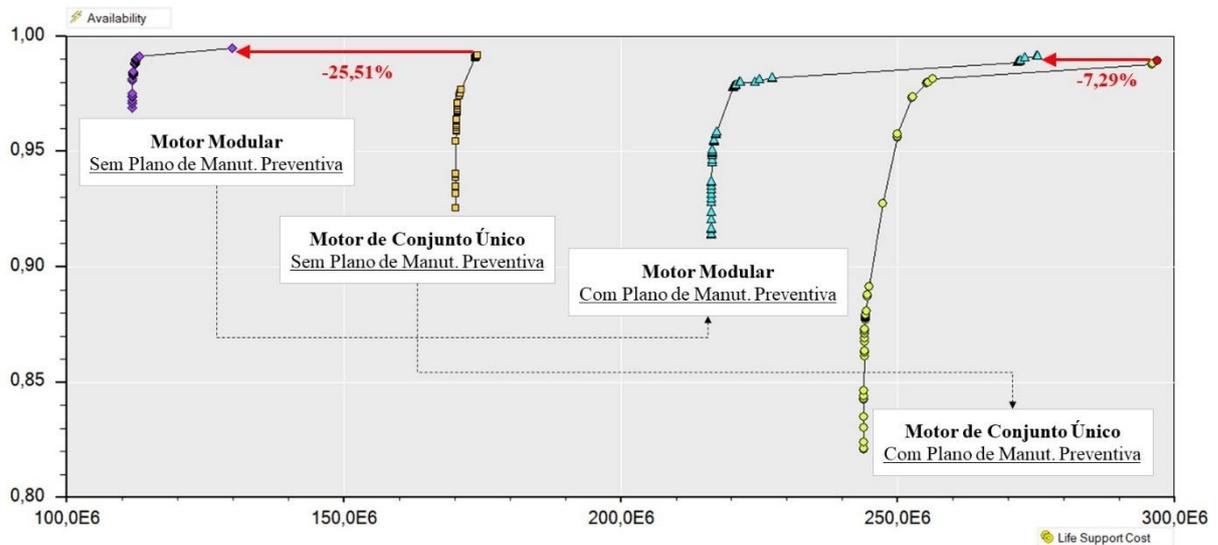


Figura 4.8 – Aplicação do método em momentos distintos do desenvolvimento do sistema de suporte (adaptado dos resultados do OPUS10©).

Para contornar as incertezas associadas à maturidade dos dados, sugere-se aplicar um fator de incerteza aos parâmetros de confiabilidade, representados pela taxa de falha, e de manutenibilidade, representado pelos tempos das tarefas de manutenção, ou TAT (*Turnaround Time*) de manutenção. As atividades do IPS de análise de confiabilidade e análise de tarefa de manutenção (MTA – *Maintenance Task Analysis*) são responsáveis por estabelecer os dados acima mencionados (ASD/AIA, 2021b), sendo que os dados seguem um processo de amadurecimento à medida que as análises evoluem.

A Figura 4.9 mostra as curvas indicando o impacto da introdução de fatores de incertezas sobre os dados de taxa de falha e TAT de manutenção. Variou-se os valores dos dados a partir de um modelo base em 5% e 10% para mais e para menos, tanto para os dados de taxa de falha, quanto para os dados de TAT de manutenção. As variações foram aplicadas por meio da funcionalidade existente no OPUS10© denominada *ScaleFactors*, que é uma tabela na qual é possível aplicar fatores multiplicadores sobre diversos parâmetros do modelo, tais como taxa de falha, TAT de manutenção, tempos e custos de transporte, entre outros.

A Tabela 4-10 apresenta maiores informações sobre os modelos analisados, bem como o impacto sobre o LSC imposto pelos fatores de incerteza aplicados, considerando o atendimento de um requisito de 97% de disponibilidade operacional.

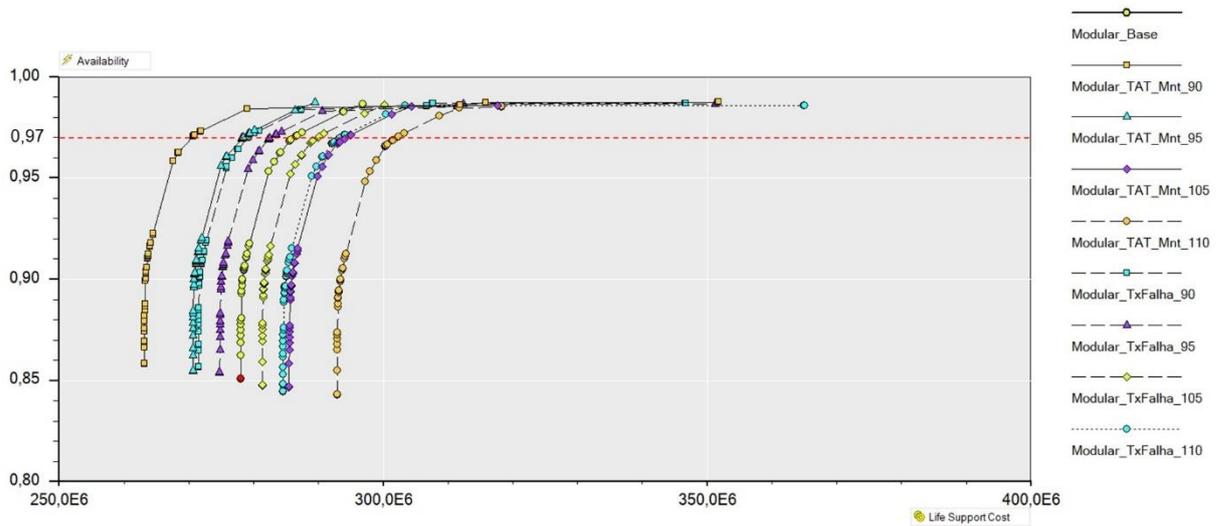


Figura 4.9 – Fatores multiplicadores aplicados sobre os parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade (adaptado dos resultados do OPUS10©).

Tabela 4-10 – Impacto dos fatores multiplicadores sobre o LSC.

Nome do modelo	Simobologia da curva	Descrição	Varição de LSC
Modular_Base		Modelo para uma frota de 28 UAV equipados com um motor modular com plano de manutenção integrado, com uma taxa de utilização de 351 horas de voo anuais por UAV.	-
Modular_TAT_Mnt_90		Modelo base com redução de 10% no TAT de manutenção.	-5,549%
Modular_TAT_Mnt_95		Modelo base com redução de 5% nos TAT de manutenção.	-2,876%
Modular_TAT_Mnt_105		Modelo base com acréscimo de 5% nos TAT de manutenção.	2,886%
Modular_TAT_Mnt_110		Modelo base com acréscimo de 10% nos TAT de manutenção.	5,480%
Modular_TxFalha_90		Modelo base com redução de 10% nas taxas de falha.	-2,616%
Modular_TxFalha_95		Modelo base com redução de 5% nas taxas de falha.	-1,144%
Modular_TxFalha_105		Modelo base com acréscimo de 5% nas taxas de falha.	1,168%
Modular_TxFalha_110		Modelo base com acréscimo de 10% nas taxas de falha.	2,620%

A abordagem acima descrita foi proposta por Figueiredo-Pinto e Abrahão (2018), a qual se vale de análises de sensibilidade à fatores de confiabilidade e manutenibilidade.

## 4.4 Casos de estudo

Para os casos de estudo foram construídos quatro modelos resultantes da combinação entre conceito de manutenção e cenário operacional, conforme indicado na Tabela 4-11, que serão comparados de acordo com a Tabela 4-12.

Tabela 4-11 – Combinação entre conceito de manutenção e cenário operacional.

Combinação	Conceito da Manutenção	Cenário operacional
1	Modular	UCAV
2	Não modular	UCAV
3	Modular	ISTAR
4	Não modular	ISTAR

Tabela 4-12 – Comparações dos casos de estudo.

Caso de Estudo	Alternativa A	Alternativa B
1	Comb. 1	Comb. 2
2	Comb. 3	Comb. 4
3	Comb. 1	Comb. 3

Um caso de estudo comparando a combinação 2 com a 4, que formaria um quarto caso de estudo, não foi analisado, pois os três primeiros casos esgotam as discussões pretendidas e são suficientes para testar a hipótese do trabalho.

Os casos consideram que o método esteja sendo aplicado com o sistema de suporte próximo do SML 6, pois contém informações do plano de manutenção e não serão aplicados fatores para mitigar a incerteza sobre os parâmetros de confiabilidade e manutenibilidade.

### 4.4.1 Caso 1

O caso 1 considera uma análise comparativa que avalia o impacto de conceitos de manutenção distintos aplicados a um mesmo cenário operacional. Compara-se o conceito de manutenção modular com o não modular para um motor aeronáutico aplicado a um UAV com o perfil operacional de um UCAV, de acordo com os modelos gerados para cada conceito de

manutenção e de operação, previamente descritos e cuja modelagem encontra-se no Apêndice B. O requisito de disponibilidade operacional média estabelecido para este caso foi de 92%.

A Figura 4.10 apresenta os resultados da fase A de ambas as alternativas em análise, além dos pontos identificados na fase B como aproximação inicial para o requisito estabelecido para o caso.

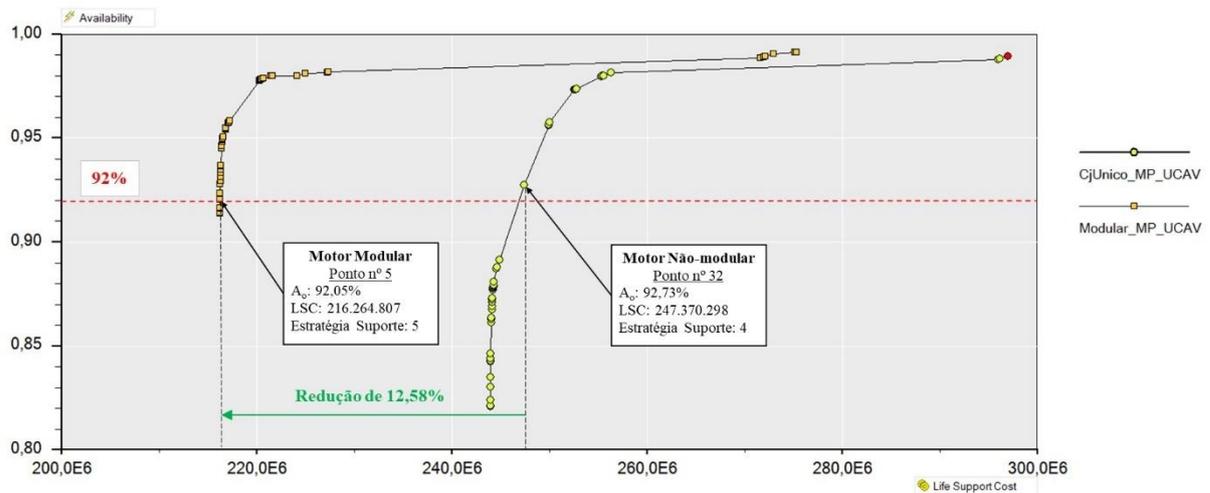


Figura 4.10 – Resultados da fase A e seleção da fase B para o caso 1 (adaptado dos resultados do OPUS10©).

A alternativa de estratégia de suporte do ponto selecionado para o motor não modular estabelece a alocação dos níveis 2 e 3 de manutenção na estação central, alternativa 4 da Tabela 4-7. O ponto selecionado para o motor modular estabelece a alocação dos níveis 2 e 3 de manutenção no centro de manutenção contratado, alternativa 5 da Tabela 4-7.

A fase A indica melhor desempenho logístico para o motor com conceito de manutenção modular, em relação ao motor que não emprega este conceito, apontando uma redução em torno de 12,58% no LSC para a mesma condição de utilização média e para aproximadamente o mesmo valor de disponibilidade operacional máxima, porém, sem ainda considerar o dinamismo do cenário de emprego.

A Figura 4.11 e a Figura 4.12 apresentam os resultados obtidos na fase C para os pontos de cada alternativa em análise selecionados na fase B, respectivamente para o motor não modular e para o motor modular. Observa-se que ao aplicar o dinamismo dos cenários operacionais, por meio de simulação, ambas as alternativas apresentaram um impacto

significativo na disponibilidade operacional média, quando comparado aos valores máximos apontados pelos respectivos pontos seleccionados na fase B.

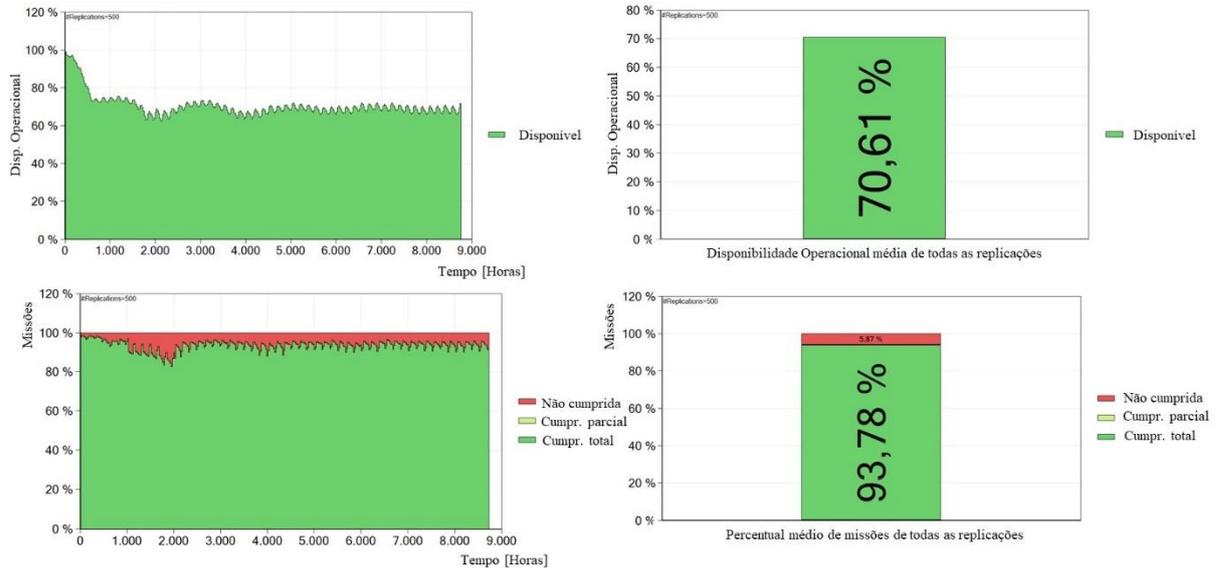


Figura 4.11 – Resultados da primeira iteração para o motor não modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

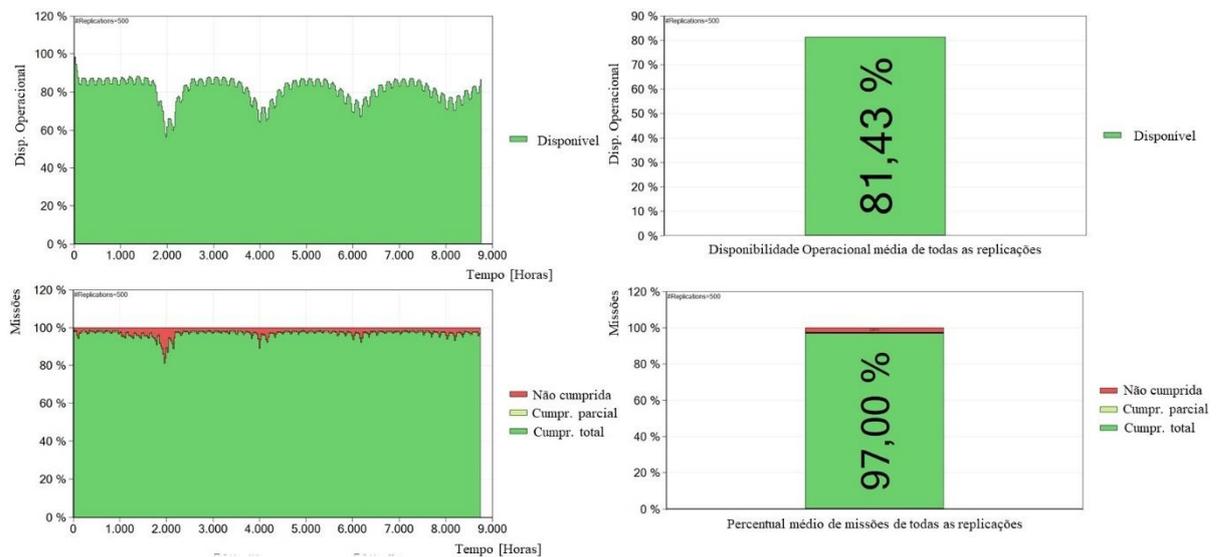


Figura 4.12 – Resultados da primeira iteração para o motor modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

O método prevê a execução de um processo iterativo para encontrar uma solução que atenda ao requisito de disponibilidade operacional média após a imposição do cenário

operacional. Foi necessário aplicar ao modelo referente ao motor não modular uma melhoria nos fatores de confiabilidade e manutenibilidade, visto que o simples aumento do investimento em LSC, concretizado pela escolha de pontos com maior LSC na fase B, não foi capaz de atingir o requisito.

Portanto, nas iterações para o motor não modular, implementou-se uma redução de 24% nas taxas de falha e de 33% nos TAT de manutenção. Além disso, na fase B foi necessário selecionar e alocar os recursos de um ponto que apresentou, na fase A, um valor de disponibilidade operacional máxima de 98,5%, conforme indica a Figura 4.13. Os resultados da fase C são apresentados na Figura 4.14. O ponto selecionado na fase B para esta iteração resulta na alternativa 1 da Tabela 4-7 para a estratégia de suporte, alocando o nível 2 de manutenção na estação central e o nível 3 no centro de manutenção contratado.

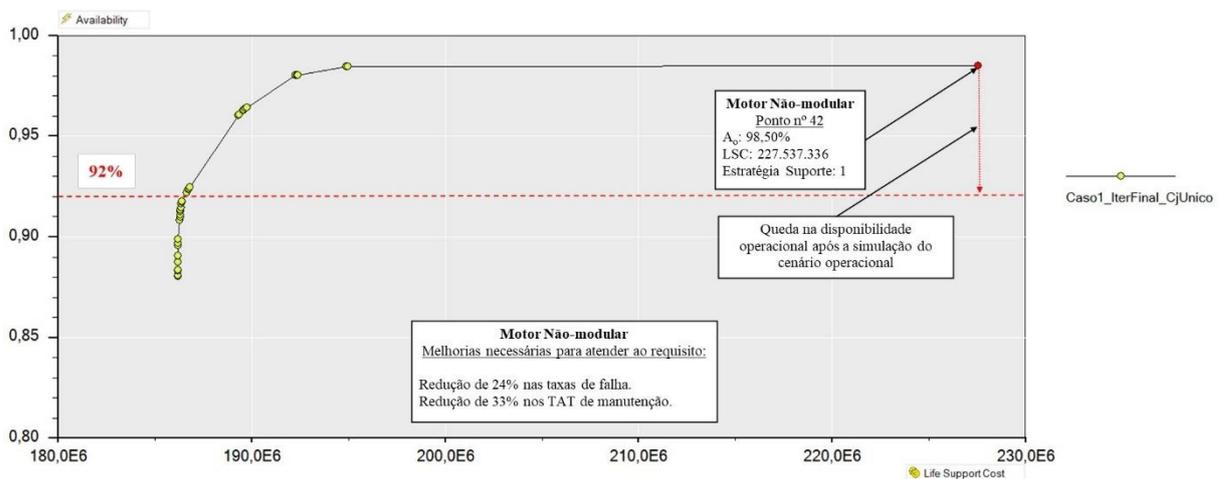


Figura 4.13 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor não modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do OPUS10©).

É importante salientar que a introdução de melhorias ao projeto, como as aplicadas ao modelo de motor não modular deste estudo, resultará na introdução de um custo e, muito provavelmente, um atraso no desenvolvimento que deve ser levado em consideração nas análises de compensação que o método pretende apoiar. Além disso, tais melhorias podem se deparar com inviabilidades técnicas e econômicas.

Para o modelo de motor com conceito de manutenção modular não foi necessária a introdução de melhorias nos fatores de confiabilidade e manutenibilidade para atender ao requisito de 92% de disponibilidade operacional média na fase C. Durante as iterações foram testados pontos da curva de custo-efetividade, resultante da fase A, com maior investimento em

LSC. Na última iteração, selecionou-se o ponto número 33, que resultou numa disponibilidade operacional máxima na fase A de 97,76%, conforme indicado na Figura 4.15. Esse ponto resulta na alternativa 5 da Tabela 4-7 para a estratégia de suporte, alocando o nível 2 e 3 de manutenção no centro de manutenção contratado.

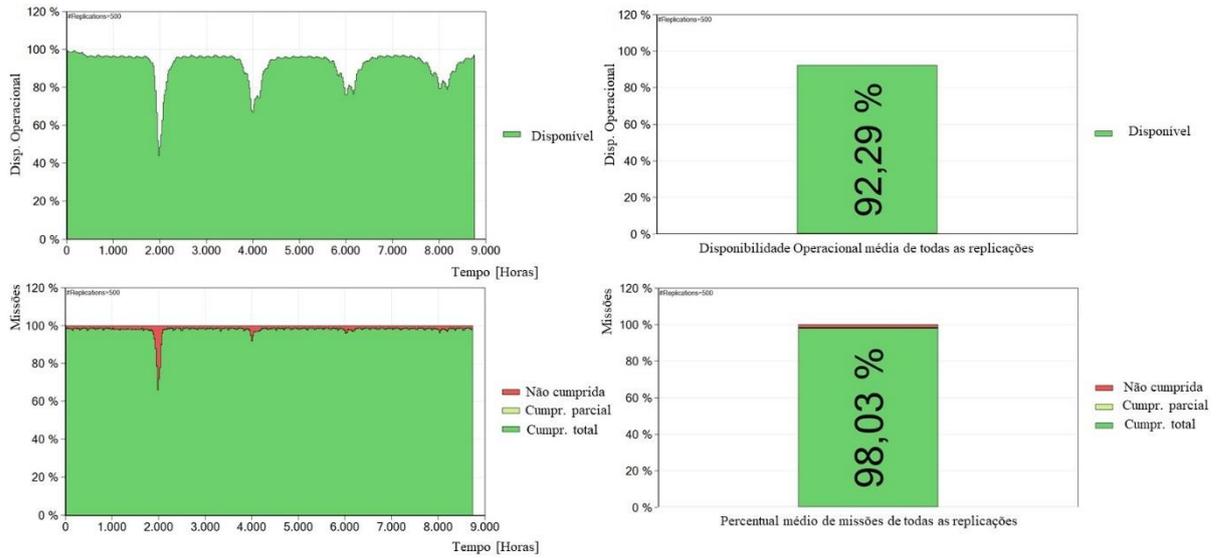


Figura 4.14 – Resultados da fase C para a última iteração realizada para o motor não modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

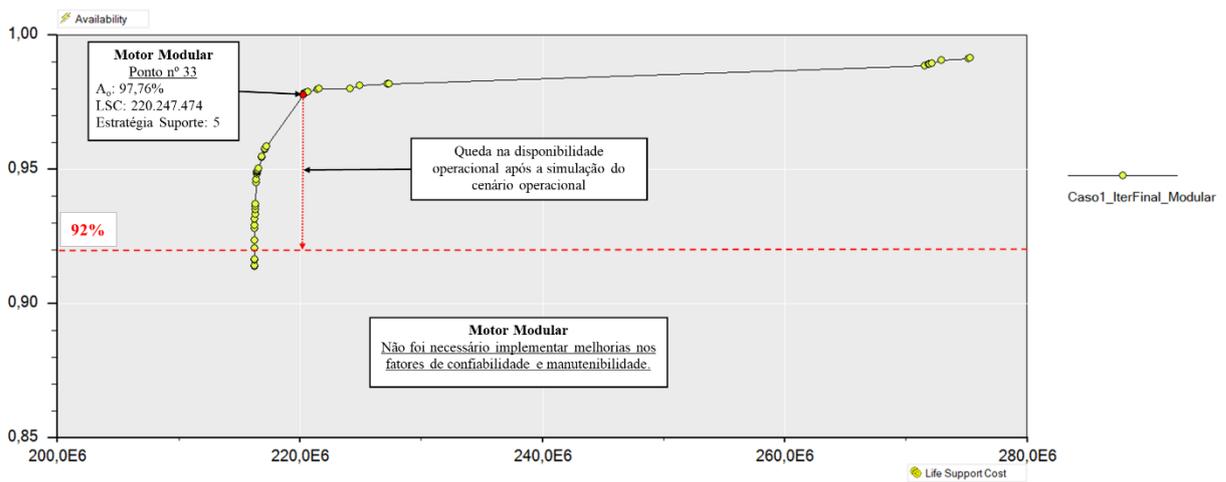


Figura 4.15 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do OPUS10).

Alocando-se os recursos do ponto 33 e simulando o cenário operacional, obteve-se um valor de disponibilidade operacional média na fase C de 92,39%, atendendo ao requisito, conforme indica a Figura 4.16.

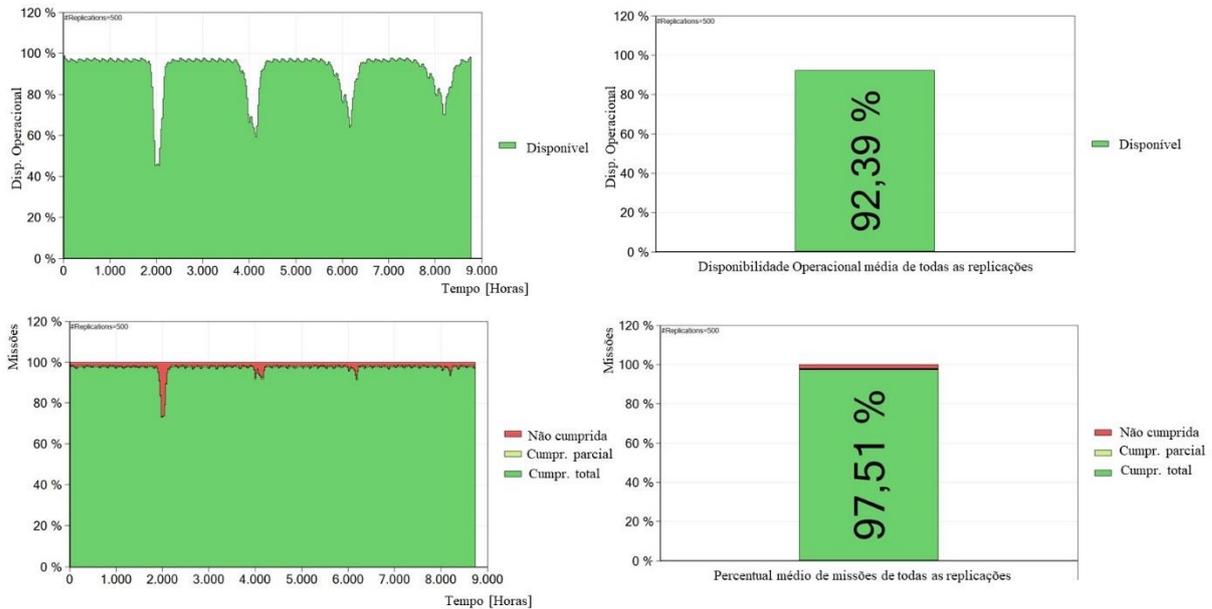


Figura 4.16 – Resultados da fase C para a última iteração realizada para o motor modular para o caso 1 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

Análises comparativas de custo foram prejudicadas para este estudo, visto que o projeto inicial do motor não modular não atingiu o requisito sem a necessidade de mudanças no projeto. As melhorias em confiabilidade e manutenibilidade resultam em melhor desempenho logístico e redução do LSC inicialmente apresentado, configurando uma alternativa de projeto distinta.

Diante da incapacidade do modelo de motor não modular em atender ao requisito, sem a introdução de mudanças no projeto, optou-se por empregar outro indicador como requisito.

A disponibilidade operacional é o indicador mais adequado para aeronaves de defesa e para a aviação executiva, visto que tais atividades não são orientadas por uma programação rígida de voos. Mas existe outro indicador, amplamente empregado na aviação comercial, conhecido como despachabilidade, que representa a porcentagem de voos programados realizados sem ocorrência de interrupções operacionais (FERNANDES, 2011).

Como a despachabilidade possui regras específicas para seu cálculo, será empregado um indicador semelhante fornecido nos resultados do SIMLOX©, que é a taxa de missões cumpridas. Será estabelecido um requisito de 92% para esta taxa.

Como na fase A do método emprega-se o OPUS10©, que não realiza simulações do cenário operacional, seus resultados não consideram a taxa de missões cumpridas. Assim, será usado o valor de disponibilidade operacional máxima como uma aproximação inicial, ou seja, na fase B do método será selecionado um ponto com disponibilidade operacional igual ou imediatamente superior a 92%, levando os recursos deste ponto para a fase C, ajustando o valor por meio do processo iterativo previsto no método.

A aplicação das fases A e B, empregando como indicador a taxa média de missões cumpridas, apresenta os mesmos resultados já indicados na Figura 4.10, para ambas as alternativas em análise. A fase C resulta nos valores apresentados na Figura 4.11, para o motor não modular, e na Figura 4.12 para o motor modular. Ambos os conceitos de manutenção atendem ao requisito de taxa média de missões cumpridas de 92%. No entanto, para o motor modular o resultado supera o requisito em 5% e o motor não modular supera o requisito em 1,78%. Neste caso o processo iterativo irá buscar uma solução com menor LSC. Isso será realizado alocando-se os recursos do ponto imediatamente à esquerda do anteriormente selecionado na fase B.

Ao aplicar-se uma iteração do procedimento acima para o motor não modular, a taxa média de missões cumpridas nas replicações da simulação caiu para 91,61%, conforme indica a Figura 4.17. Desta forma essa iteração não atende ao requisito.

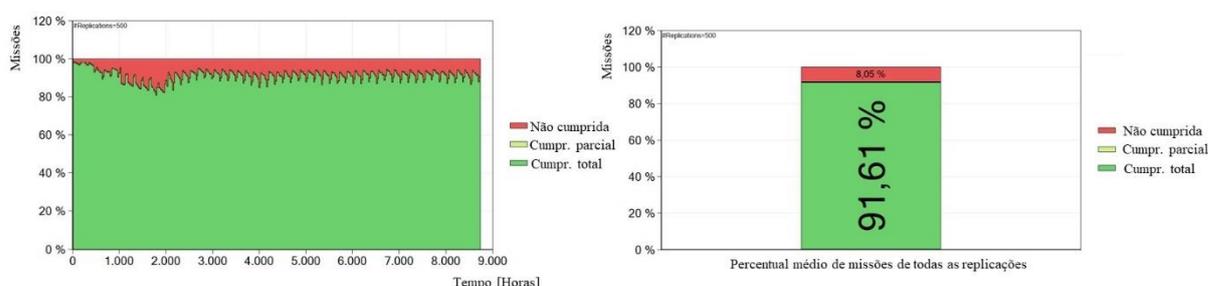


Figura 4.17 – Iteração com taxa média de cumprimento de missões abaixo do requisito para o motor não modular (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

Para o motor modular, as iterações sequenciais levaram à escolha do primeiro ponto da curva de custo-efetividade da fase A, mesmo assim a taxa média de missões cumpridas ficou acima do requisito, agora em 4,93%, conforme indica a Figura 4.18. Portanto o resultado desta iteração será considerado para as comparações que serão a seguir apresentadas.

A Figura 4.19 apresenta os pontos finais selecionados para cada alternativa analisada, com seus respectivos LSC e estratégias de suporte, resultantes da aplicação do método,

aplicando-se como requisito de desempenho logístico a taxa média de missões cumpridas de 92%.

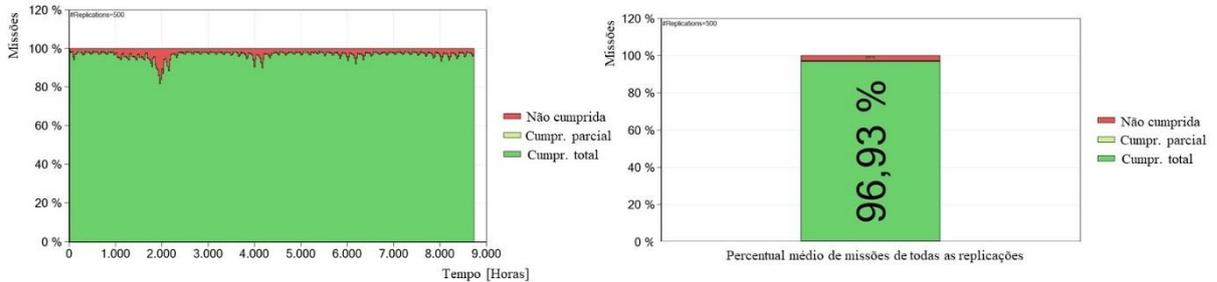


Figura 4.18 – Taxa média de cumprimento de missões para o motor modular (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

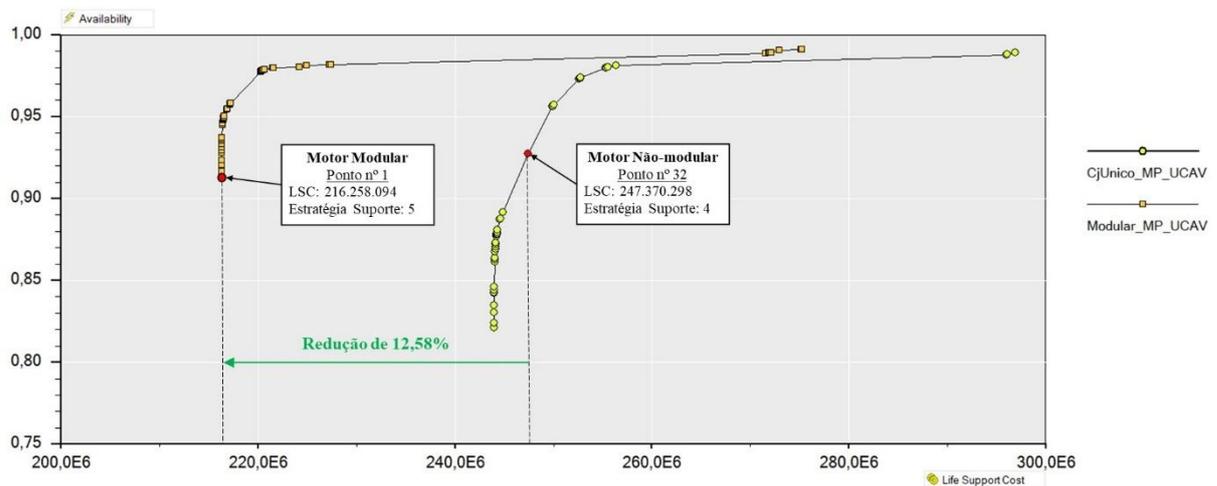


Figura 4.19 – Pontos resultantes da aplicação do método (adaptado dos resultados do OPUS10©).

A Tabela 4-13 apresenta um resumo dos resultados de cada alternativa de projeto, indicando a capacidade do método em apontar o desempenho das parcelas de custo do LSC de cada alternativa de projeto, apontando as vantagens e desvantagens.

Constatou-se maior investimento em recursos de manutenção para a alternativa de projeto que aplica um motor não modular, em relação a alternativa com motor modular, visto que para atingir o nível de desempenho logístico requerido, foi necessário alocar o nível 3 de manutenção na estação central, sendo necessário incluir no LSC os custos dos recursos de manutenção deste nível, que são expressivos, visto tratar-se de um motor aeronáutico. Observa-se também um maior investimento em estoque de giro.

Como sugerido por Edmunds (1978), o conceito de manutenção modular apresentou redução nos custos com manutenção corretiva, equivalente a 47,28% para o caso estudado. Essa vantagem resulta da possibilidade de isolar a falha, identificando o módulo no qual ela ocorreu, substituindo o módulo no nível 2 de manutenção, enquanto para o motor não modular, qualquer falha no motor requer sua remoção e envio para uma estação de nível 3 de manutenção.

Tabela 4-13 – Resultados do método para o caso 1 (adaptado dos resultados do OPUS10© e do SIMLOX©).

Descrição		Modelo	
		Modular	Não modular
Perfil de operação		UCAV	UCAV
Requisito [Taxa média de missões cumpridas]		92,00%	92,00%
Média de missões cumpridas nas replicações		96,93%	93,78%
Ponto da curva de custo-efetividade		1	32
Disponibilidade Operacional máxima		91,37%	92,73%
Disponibilidade Operacional média atingida na fase C		80,87%	70,61%
Alternativa para a estratégia de suporte		5	4
LSC		216.258.094,00	247.370.298,00
Subgrupos do LSC	<b>Investimento total</b>	13.163.008,00	31.436.249,65
	Aquisição de estoque de giro	12.208,00	2.849.249,65
	Aquisição de recursos	13.150.800,00	28.587.000,00
	<b>Custos recorrentes totais</b>	203.095.085,63	215.934.048,16
	Consumo de itens	467.812,80	467.812,80
	Ordens de compra	9.024,17	8.250,67
	Estocagem	1.220,80	599.908,86
	Transporte	32.147.586,71	17.931.348,09
	Manutenção corretiva	45.012.721,40	82.373.470,55
	Manutenção preventiva	84.741.279,75	46.695.457,20
	Manutenção/atualização de recursos	40.715.440,00	67.857.800,00

Os modelos buscaram implementar características observadas na prática do suporte logístico de motores operados pela FAB, como a existência de módulos com manutenção programada com vencimentos distintos entre si, conforme modelado com informações da Tabela 4-5. Esse fato implica num maior número de remoções do motor para troca de módulos. A Figura 4.20 busca ilustrar o aumento da carga de trabalho nos níveis de manutenção imposto por prazos de vencimento distintos para os módulos do motor com conceito de manutenção modular.

Como o ponto selecionado para a alternativa com motor modular recomenda a alocação dos níveis 2 e 3 de manutenção no centro de manutenção contratado, há também um custo maior com transporte.

Mesmo apresentando algumas desvantagens, a redução de investimento em estoque de itens de giro, a redução na aquisição de recursos e a economia com manutenção corretiva, fez com que o conceito de manutenção modular para o motor resultasse numa solução mais econômica, em termo de LSC, em relação ao motor não modular.

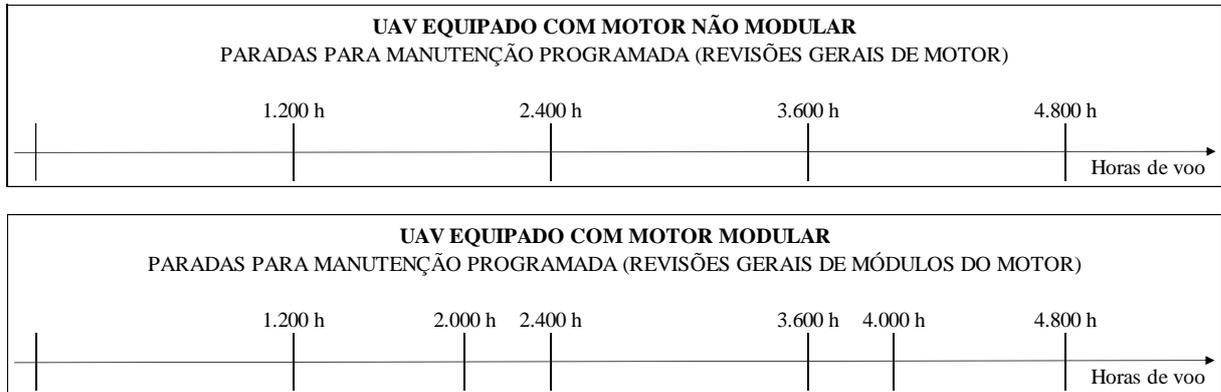


Figura 4.20 – Efeito dos distintos planos de manutenção.

#### 4.4.2 Caso 2

O caso 2 considera uma análise comparativa que avalia o impacto de conceitos de manutenção distintos aplicados a um mesmo cenário operacional. Compara-se o conceito de manutenção modular com o não modular para um motor aeronáutico aplicado a um UAV com o perfil operacional de um ISTAR, de acordo com os modelos gerados para cada conceito de manutenção e de operação, previamente descritos e cuja modelagem encontra-se no Apêndice B. O requisito de disponibilidade operacional média estabelecido para este caso foi de 88%.

A Figura 4.21 apresenta os resultados obtidos da fase A de ambas as alternativas em análise, além dos pontos identificados na fase B como aproximações iniciais para o requisito estabelecido. A alternativa de estratégia de suporte dos pontos selecionados, tanto para o motor não modular quanto para o motor modular, estabelece a alocação dos níveis 2 e 3 de manutenção na estação central, alternativa 4 da Tabela 4-7.

A Figura 4.22 e a Figura 4.23 apresentam os resultados obtidos na fase C para os pontos de cada alternativa em análise encontrados na fase A, respectivamente para o motor não modular e para o motor modular. Observa-se que ao aplicar o dinamismo dos cenários operacionais, por meio de simulação, ambas as alternativas apresentaram um impacto significativo na disponibilidade operacional média, quando comparado ao valor máximo apontado na fase A.

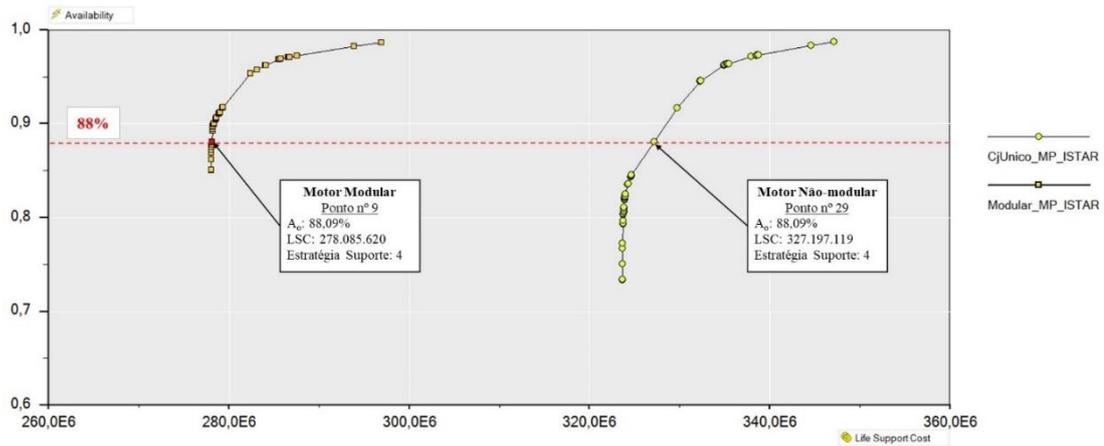


Figura 4.21 – Resultados da fase A e seleção da fase B para o caso 2 (adaptado dos resultados do OPUS10©).

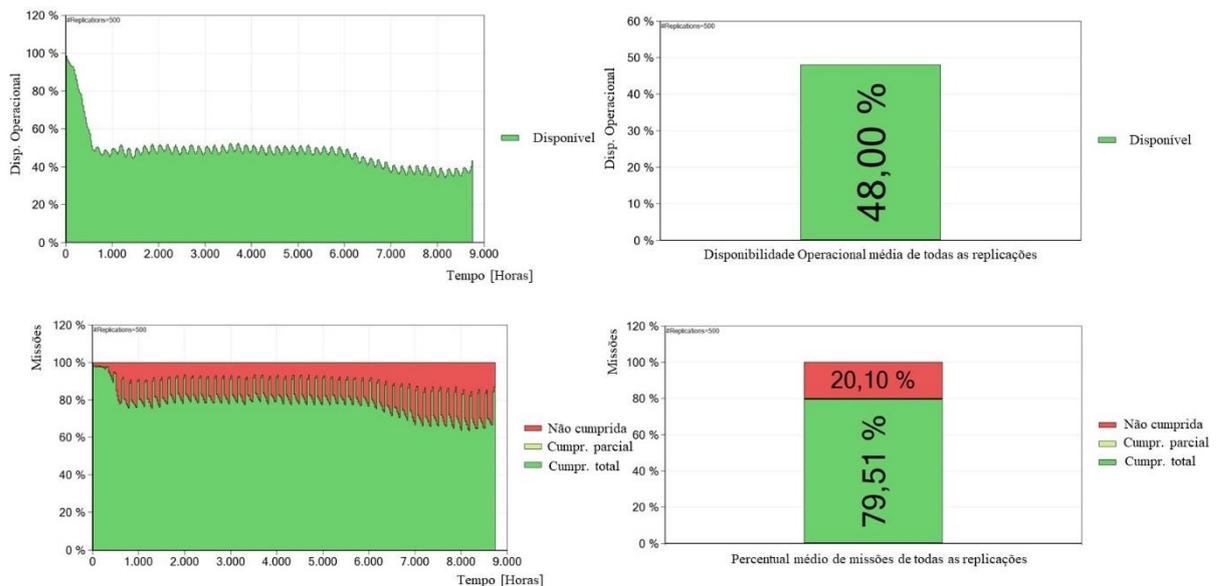


Figura 4.22 – Resultados da primeira iteração para o motor não modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

Iniciou-se o processo iterativo do método, primeiramente para o motor não modular. Para atender ao requisito estabelecido, não foi suficiente apenas aumentar o investimento no LSC. Foi necessário implementar ao modelo uma melhoria de 50%, tanto nos fatores de confiabilidade quanto nos de manutenibilidade, além de alocar os recursos do último ponto da curva de custo-efetividade resultante da fase A, conforme indica a Figura 4.24, alcançando-se, desta forma, uma disponibilidade operacional média das replicações da simulação de 89,31%, conforme indica a Figura 4.25, atendendo ao requisito.

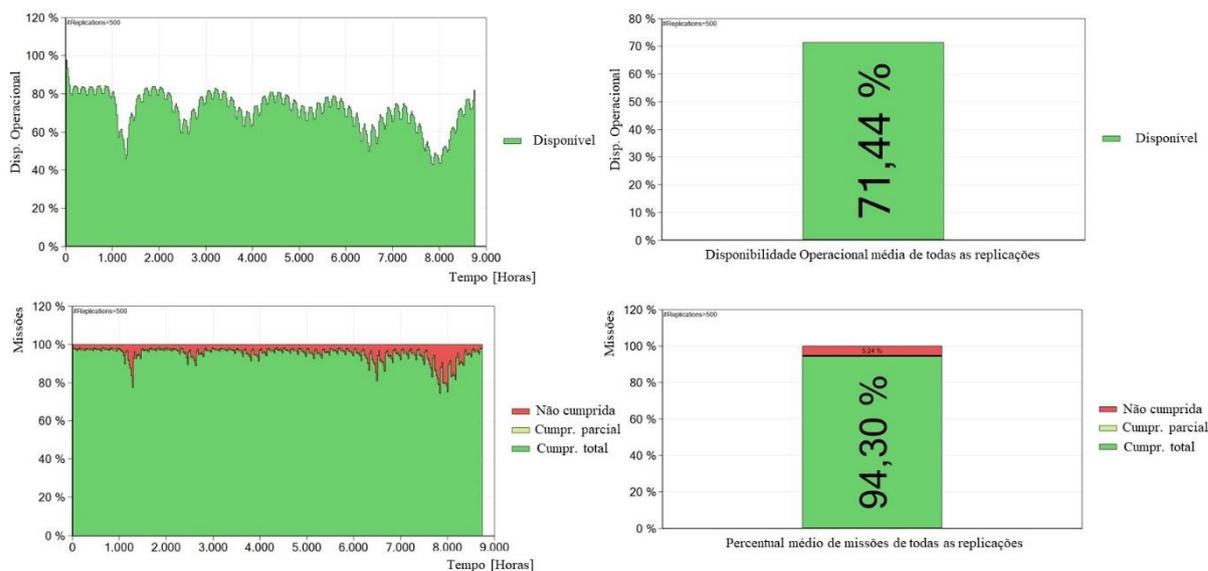


Figura 4.23 – Resultados da primeira iteração para o motor modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

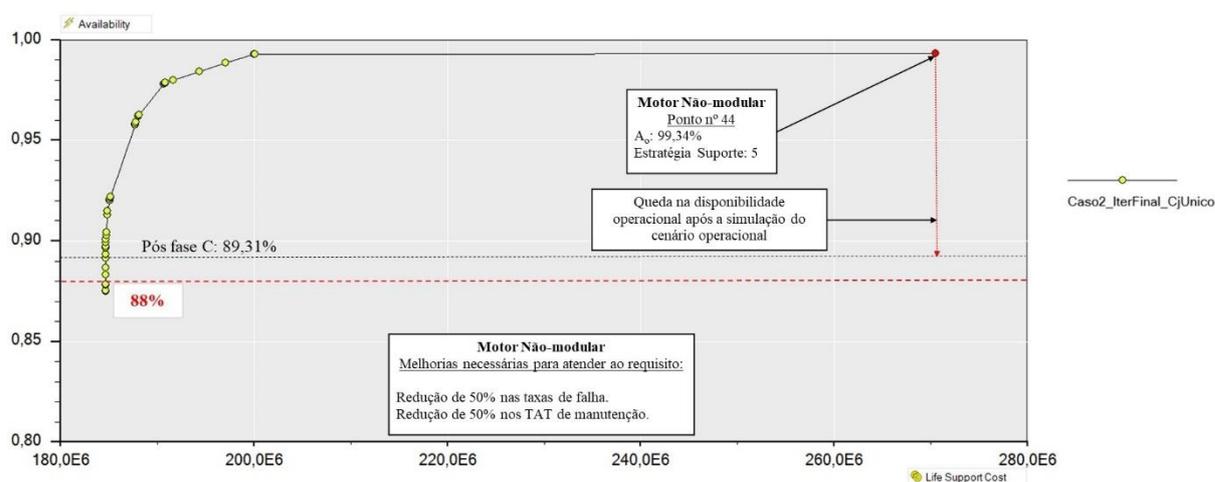


Figura 4.24 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor não modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do OPUS10).

Seria possível aplicar ao caso 2 outro requisito de desempenho logístico, como a taxa de missões cumpridas, no entanto, este procedimento já foi demonstrado no caso 1.

Este caso demonstra a capacidade do método de apontar a incompatibilidade de um conceito de manutenção ao requisito estabelecido, dado um cenário operacional, visto que indicou que por mais que se invista no LSC, com aquisição de estoques e recursos, a alternativa de projeto não é capaz de atingir ao requisito estabelecido.

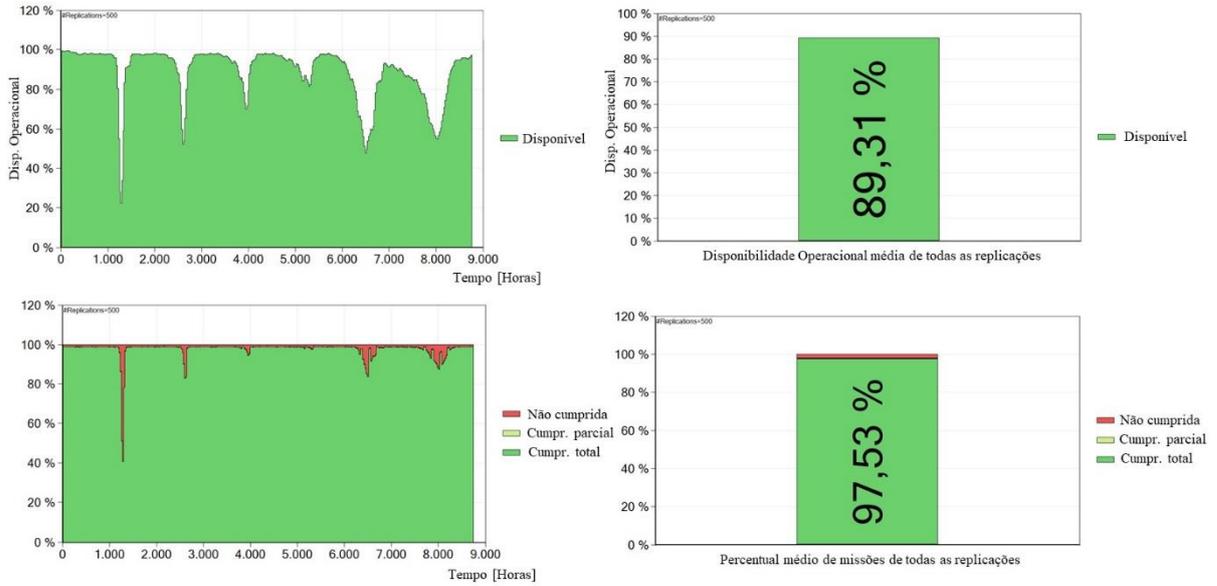


Figura 4.25 – Resultados da fase C para a última iteração realizada para o motor não modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

Para o motor modular, o processo iterativo do método percorreu os pontos da curva de custo-efetividade da fase A, até que na fase B fosse selecionado o ponto 46, capaz de atingir uma disponibilidade operacional máxima de 98,26%, conforme indica a Figura 4.26. Alocando-se os recursos deste ponto na fase B e aplicando-se a simulação de cenários operacionais na fase C, encontrou-se como resultado uma disponibilidade operacional média de 89,23%, conforme indica a Figura 4.27, atendendo ao requisito.

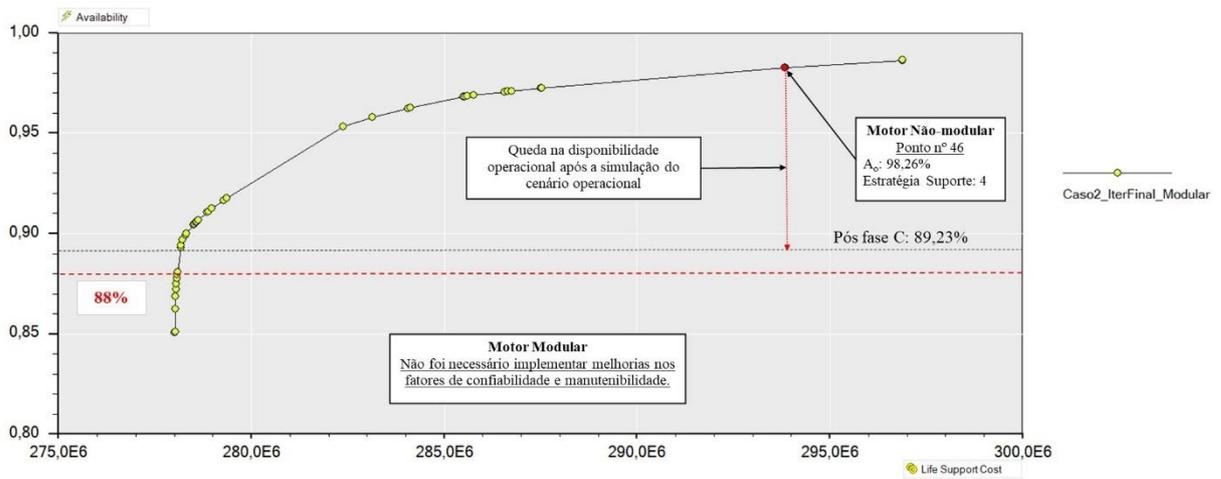


Figura 4.26 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do OPUS10©).

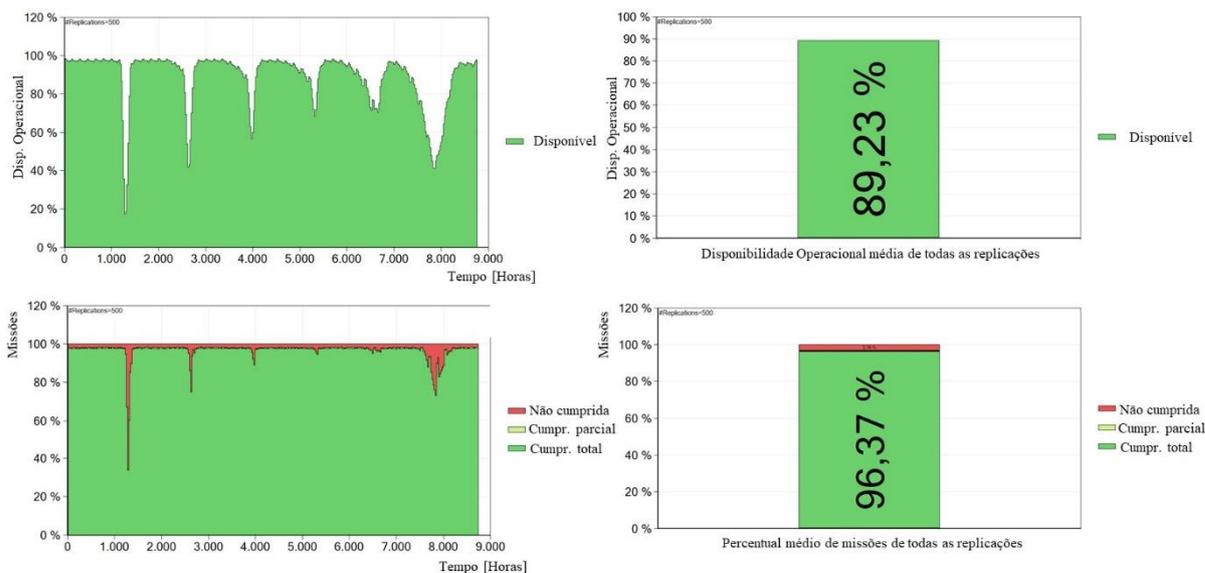


Figura 4.27 – Resultados da fase C para a última iteração realizada para o motor modular para o caso 2 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

A conclusão deste caso é que a integração do motor com conceito de manutenção não modular, conforme modelado neste trabalho, a um UAV com o perfil operacional de ISTAR, conforme o modelo utilizado, não atende ao requisito estabelecido de 88% de disponibilidade operacional média. Para o mesmo caso, a integração do motor modular modelado resulta no atendimento do requisito, com o LSC conforme indicado na Tabela 4-14, que também indica os resultados do motor não modular, sem a introdução de melhorias nos fatores de confiabilidade e manutenibilidade, apenas com a alocação dos recursos do ponto com o máximo investimento em LSC, conforme os resultados da fase A do método para o modelo em questão.

Observa-se que a integração de um motor que não implemente o conceito de manutenção modular, para o caso estudado, possui um LSC 18,18% superior, em relação ao motor com conceito de manutenção modular, e ainda assim não é capaz de atingir o requisito de disponibilidade operacional média de 88%, alcançando apenas uma média de 66,96%.

Cabe ressaltar que a Tabela 4-14 permite observar o comportamento dos subgrupos do LSC para cada alternativa de projeto, que seguem o padrão de comportamento discutido no caso 1.

Tabela 4-14 – Resultados do método para o caso 2 (adaptado dos resultados do OPUS10© e do SIMLOX©).

Descrição		Modelo	
		Modular	Não modular
Perfil de operação		ISTAR	ISTAR
Requisito [Disponibilidade Operacional média]		88,00%	88,00%
Disponibilidade Operacional máxima		98,26%	98,74%
Disponibilidade Operacional média nas replicações*		89,23%	66,96%
Ponto da curva de custo-efetividade		46	64
Alternativa para a estratégia de suporte		4	4
LSC		293.835.796,43	347.138.795,70
Subgrupos do LSC	<b>Investimento total</b>	42.896.239,00	47.352.636,98
	Aquisição de estoque de giro	12.216.739,00	18.765.636,98
	Aquisição de recursos	30.679.500,00	28.587.000,00
	<b>Custos recorrentes totais</b>	250.939.557,43	299.786.158,72
	Consumo de itens	742.996,80	742.996,80
	Ordens de compra	11.056,50	11.056,50
	Estocagem	3.619.757,80	4.762.337,93
	Transporte	28.552.041,08	26.832.141,08
	Manutenção corretiva	52.640.686,25	130.828.453,22
	Manutenção preventiva	96.050.199,00	68.451.373,20
Manutenção/atualização de recursos		69.322.820,00	68.157.800,00

\* Última iteração sem melhoria nos fatores de confiabilidade e manutenibilidade.

#### 4.4.3 Caso 3

O caso 3 considera uma análise comparativa que avalia o impacto de cenários operacionais distintos aplicados a um mesmo conceito de manutenção. Compara-se a aplicação do perfil operacional de um UCAV e de um ISTAR para um UAV equipado com um motor aeronáutico com conceito de manutenção modular, de acordo com os modelos gerados para cada conceito de manutenção e de operação, previamente descritos e cuja modelagem encontra-se no Apêndice B. Ambos os modelos participaram dos casos anteriormente apresentados, porém no presente caso o requisito será de 95% de disponibilidade operacional média.

A Figura 4.28 apresenta os resultados obtidos da fase A de ambas as alternativas em análise, além dos pontos identificados na fase B como aproximações iniciais para o requisito de disponibilidade operacional média estabelecido.

A alternativa de estratégia de suporte do ponto selecionado para o perfil operacional de um UCAV, apontado pela fase A, aloca os níveis 2 e 3 de manutenção no centro de manutenção contratado, já para o perfil operacional de um ISTAR, o método estabelece a alocação dos níveis 2 e 3 de manutenção na estação central, respectivamente alternativas 5 e 4 da Tabela 4-7. Isso mostra que ao impor-se um cenário operacional mais exigente, como o perfil ISTAR, o método

mostra ser necessário trazer os níveis de manutenção e seus recursos mais próximos das bases de operação para alcançar o desempenho logístico requerido.

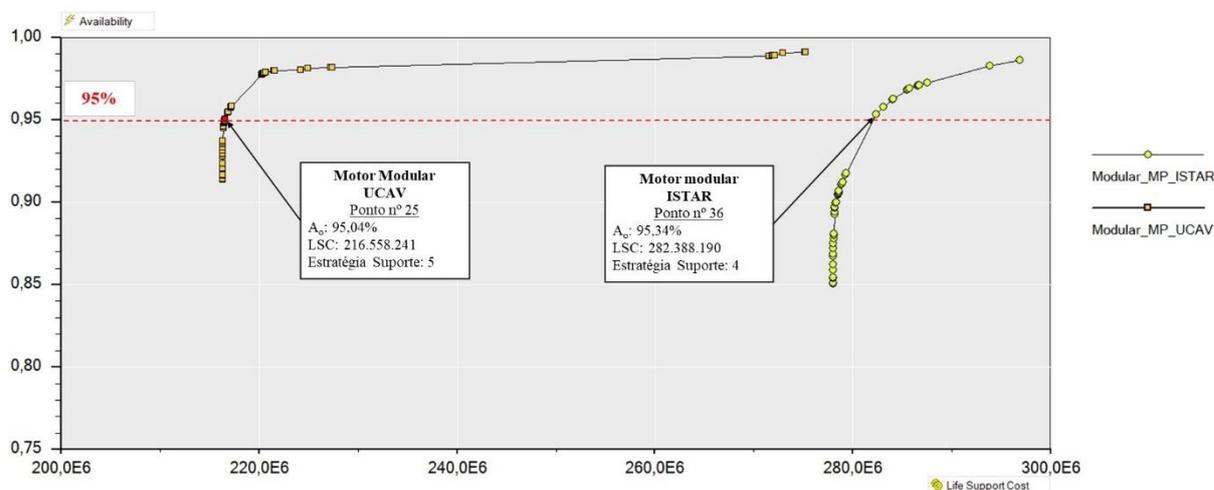


Figura 4.28 – Resultados da fase A e seleção da fase B para o caso 3 (adaptado dos resultados do OPUS10©).

A Figura 4.29 e a Figura 4.30 apresentam os resultados obtidos na fase C para os pontos de cada alternativa em análise selecionados na fase B, para o motor modular operando em um UAV sob o perfil operacional, respectivamente, de um UCAV e de um ISTAR. Observa-se que ao aplicar o dinamismo dos cenários operacionais, por meio de simulação, ambas as alternativas apresentaram um impacto na disponibilidade operacional média, quando comparado ao valor máximo apontado na fase A, sendo mais proeminente para o perfil operacional de um ISTAR, que é mais exigente que o perfil de um UCAV.

Para buscar atingir o requisito estabelecido, iniciou-se o processo iterativo do método. Para a operação UCAV, os pontos da curva da fase A foram testados um a um do 26 até o 45, conforme indicado na Figura 4.31, o qual atingiu o requisito após a fase C, conforme indicado na Figura 4.32.

Mesmo alocando-se os recursos do ponto com a máxima disponibilidade da curva de custo-efetividade resultante da fase A, conforme indicado na Figura 4.33, o modelo de um UAV operado de acordo com o perfil operacional de um ISTAR não conseguiu atingir o requisito de disponibilidade operacional de 95%, conforme mostra a Figura 4.34. Como este caso tem o objetivo de avaliar a aplicação de um conceito de manutenção para o motor em cenários operacionais distintos, não foram demonstrados os resultados de iterações introduzindo

melhorias ao projeto, por fugir do objetivo do caso em estudo. Além disso, tal procedimento já foi demonstrado nos casos 1 e 2.

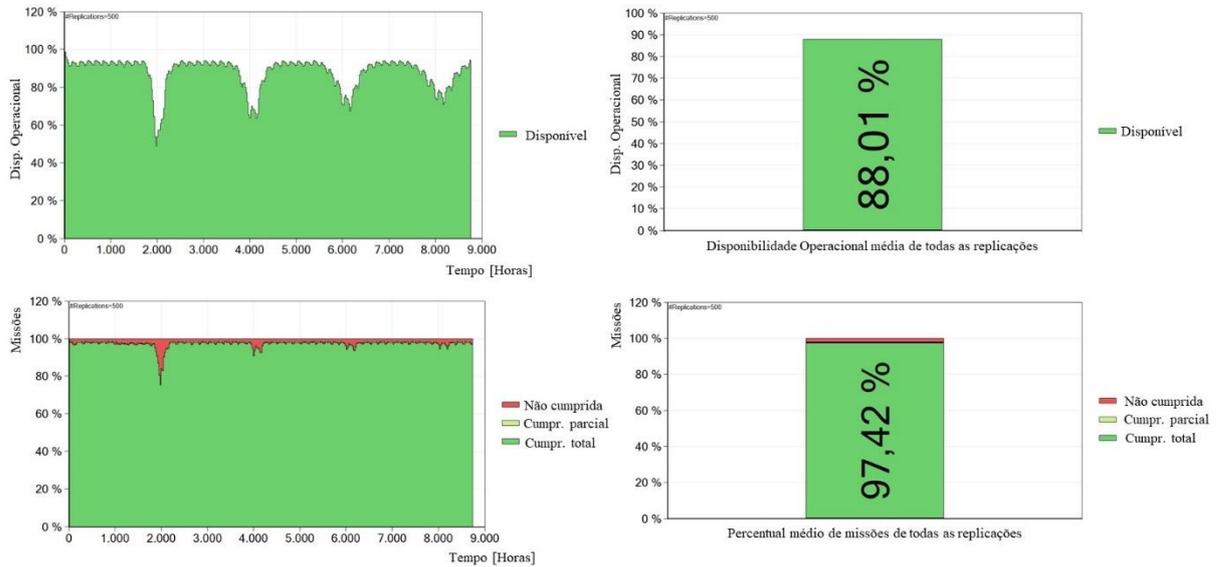


Figura 4.29 – Resultados da primeira iteração para o motor modular com perfil operacional de um UCAV para o caso 3 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

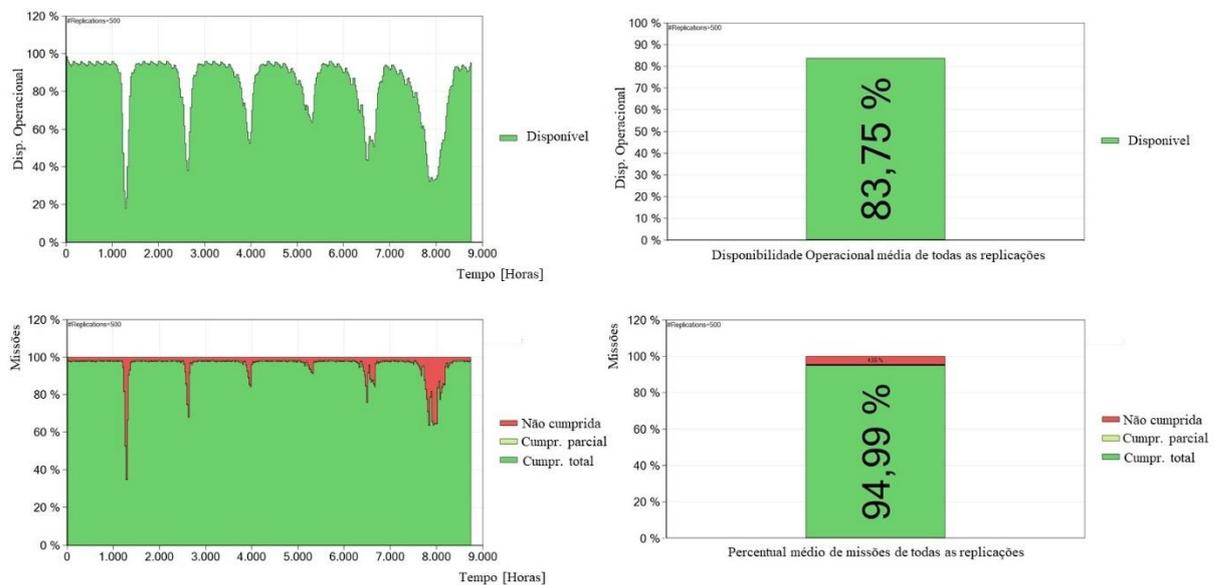


Figura 4.30 – Resultados da primeira iteração para o motor modular com perfil operacional de um ISTAR para o caso 3 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

O método indica que para o perfil operacional modelado para um ISTAR, o modelo do motor com conceito de manutenção modular permite alcançar uma disponibilidade operacional

média de 90,52%. Para atingir-se o requisito é necessário que melhorias no projeto do motor ou do sistema de suporte sejam implementadas. Esta ação não é necessária para a operação de um UCAV conforme modelada neste trabalho. A Tabela 4-15 indica os resultados deste caso de estudo relacionados aos subgrupos de custo do LSC.

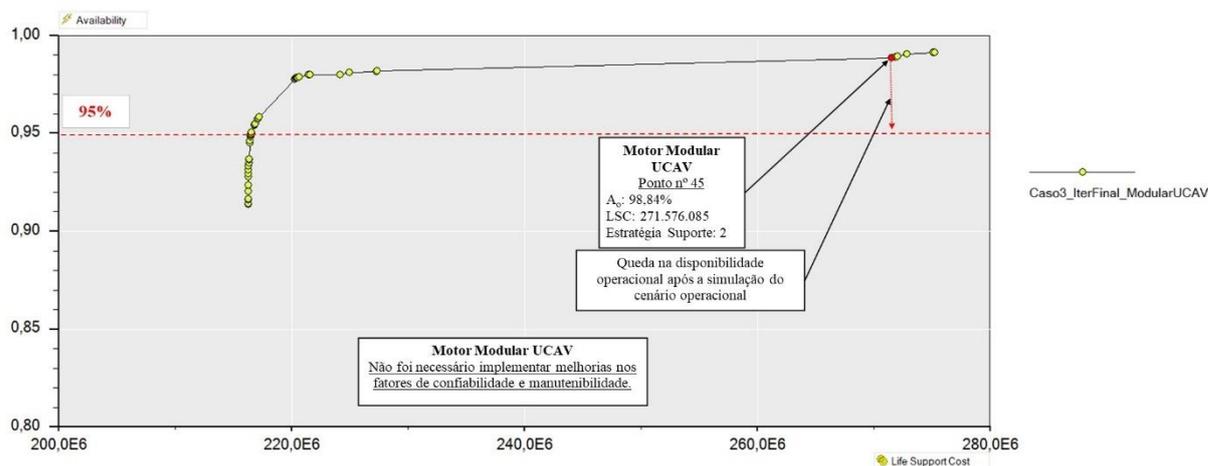


Figura 4.31 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor modular operado com o perfil UCAV modelado (adaptado dos resultados do OPUS10).

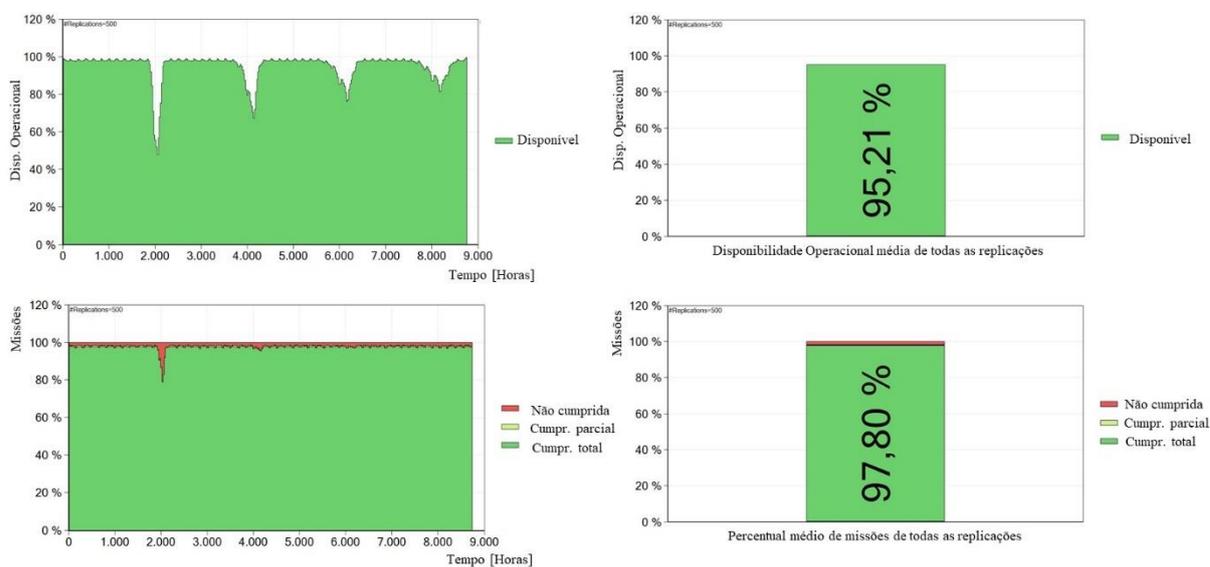


Figura 4.32 – Resultados da última iteração para o motor modular com perfil operacional de um UCAV para o caso 3 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

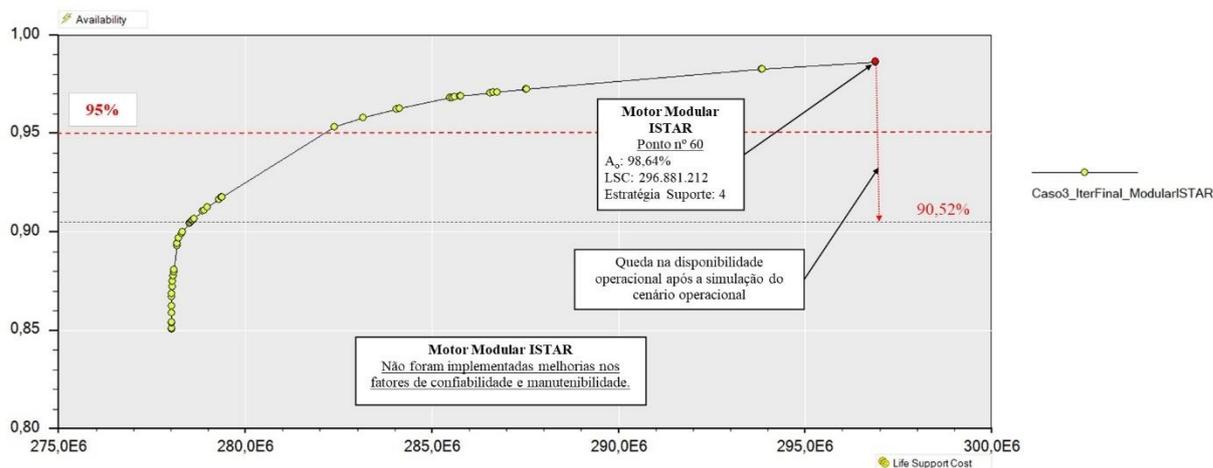


Figura 4.33 – Resultados da fase A e B para a última iteração realizada para o motor modular operado com o perfil ISTAR modelado (adaptado dos resultados do OPUS10©).

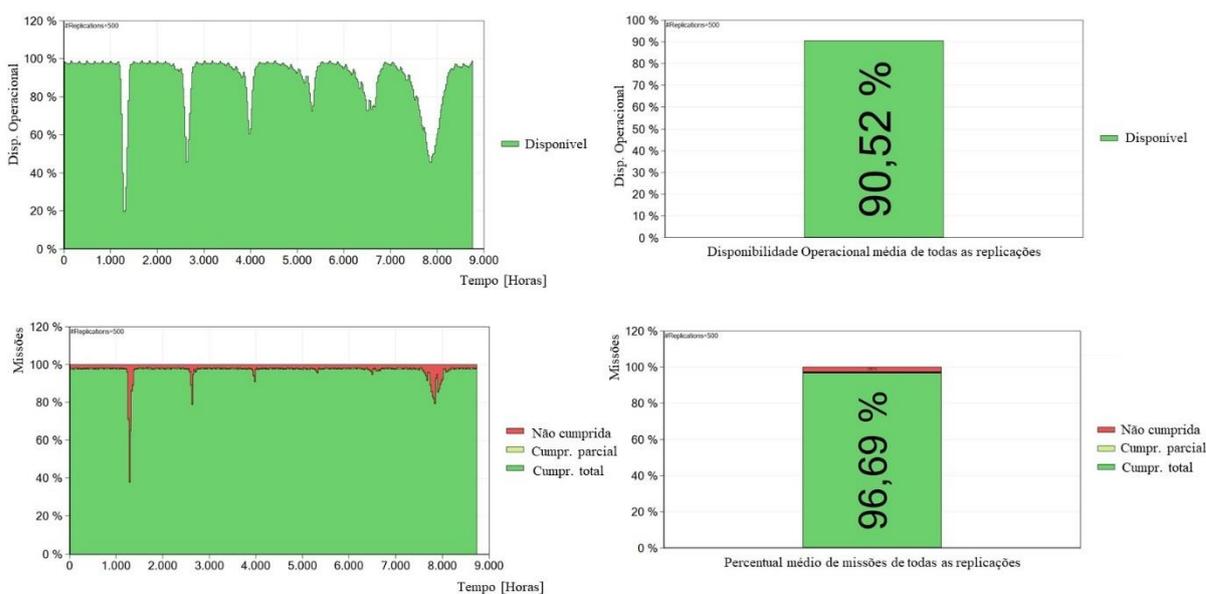


Figura 4.34 – Resultados da última iteração para o motor modular com perfil operacional de um ISTAR para o caso 3 (adaptado dos resultados do SIMLOX©).

Ressalta-se o alto investimento em recursos para a operação UCAV, visto que a estratégia de suporte indicada pelo método aloca o nível 2 de manutenção nas bases, requerendo que todo os recursos do nível 2 sejam adquiridos para as quatro bases. Além disso, o nível 3 de manutenção é alocado na estação central, também agregando o valor dos recursos deste nível ao LSC.

Tabela 4-15 – Resultados do método para o caso 3 (adaptado dos resultados do OPUS10© e do SIMLOX©).

Descrição		Modelo	
		Modular	Modular
Perfil de operação		UCAV	ISTAR
Requisito [Disponibilidade Operacional média]		95,00%	95,00%
Disponibilidade Operacional máxima		98,84%	98,64%
Disponibilidade Operacional média nas replicações*		95,21%	90,52%
Ponto da curva de custo-efetividade		45	60
Alternativa para a estratégia de suporte		2	4
LSC		271.576.084,91	296.881.211,53
Subgrupos do LSC	<b>Investimento total</b>	53.750.632,00	45.432.787,00
	Aquisição de estoque de giro	11.015.982,00	14.753.287,00
	Aquisição de recursos	42.734.650,00	30.679.500,00
	<b>Custos recorrentes totais</b>	217.825.452,91	251.448.424,53
	Consumo de itens	467.812,80	742.996,80
	Ordens de compra	9.024,17	10.374,00
	Estocagem	3.266.326,40	4.129.307,40
	Transporte	15.131.348,09	28.552.041,08
	Manutenção corretiva	33.144.135,79	52.640.686,25
	Manutenção preventiva	64.072.495,67	96.050.199,00
Manutenção/atualização de recursos		101.734.310,00	69.322.820,00

\* Última iteração sem melhoria nos fatores de confiabilidade e manutenibilidade.

#### 4.5 Discussões sobre a aplicação do método

A queda do valor de disponibilidade operacional média resultante da fase C do método, em relação ao ponto selecionado na fase B, é esperada, visto que o OPUS10© indica em cada ponto da curva de custo-efetividade a disponibilidade operacional máxima para um dado investimento em LSC, baseando-se em distribuições estocásticas e numa taxa de utilização média e uniforme. O SIMLOX© apresenta a disponibilidade operacional média obtida das replicações do cenário operacional, sendo capaz de introduzir o dinamismo da operação. Na prática valores médios são amplamente utilizados para apoiar planos e decisões, tanto que os requisitos de projeto, como indicadores de desempenho logístico, são normalmente estabelecidos como valores médios. Portanto, o método apresenta a vantagem de entregar um resultado compatível com os requisitos de projeto.

Apesar da diferença entre a disponibilidade média apontada na simulação e a disponibilidade máxima apontada na otimização ser esperada, o método permite identificar a magnitude desta diferença, agregando precisão, consciência situacional e capacidade de controle sobre os indicadores de desempenho logístico e subgrupos do LSC.

Os casos estudados demonstraram a possibilidade de que alternativas de projeto, que apresentem disponibilidade operacional máxima, para dado LSC, igual ou superior ao requisito, estabelecido com valores médios, sejam incapazes de atender ao requisito ao serem submetidas à simulação do perfil operacional, mesmo aumentando-se o investimento em LSC. Assim, o método permite indicar a compatibilidade do sistema de suporte para determinado cenário operacional, dado o requisito de disponibilidade operacional média.

Os casos 1 e 2 foram apresentados com a intenção de demonstrar a viabilidade de aplicação do método na seleção de subsistemas a serem integrados a um sistema. Nos casos apresentados, o subsistema avaliado foi o de propulsão, tanto para um UAV com uma operação condizente com um UCAV, quanto para uma operação condizente com um ISTAR.

O caso 3 teve a intenção de demonstrar a viabilidade de aplicação do método para a avaliação do desempenho logístico de um subsistema integrado em plataformas com operações distintas, mantendo-se inalterado o sistema de suporte.

O método permite avaliar a necessidade de melhoria em fatores de confiabilidade e manutenibilidade, como apontado no primeiro caso de estudo apresentado, onde a alternativa de projeto não foi capaz de atender ao requisito de disponibilidade operacional média estabelecido, mesmo realizando-se investimento em LSC equivalente ao máximo indicado na curva de custo-efetividade da fase A, que apontava para uma disponibilidade operacional máxima muito acima do requisito, demonstrando uma grande sensibilidade da alternativa de projeto ao cenário operacional.

A aplicação do método aos modelos elaborados para este trabalho aponta para uma maior sensibilidade à dinâmica do cenário operacional apresentada pelo motor que não integra o conceito de manutenção modular. Essa sensibilidade foi avaliada pela maior queda no valor da disponibilidade média após a aplicação da simulação do cenário operacional, em relação ao valor máximo indicado na fase A do método. Este efeito é indicado na Figura 4.35.

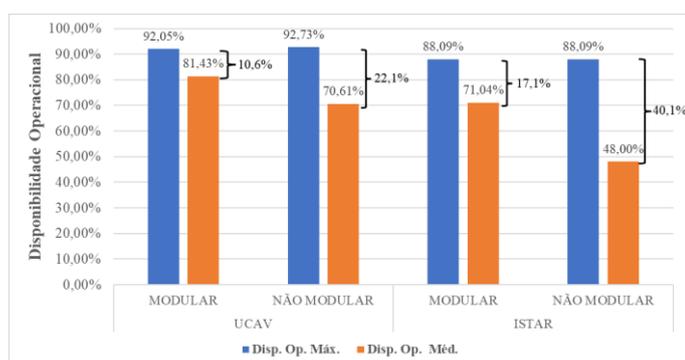


Figura 4.35 – Sensibilidade ao dinamismo do cenário operacional.

Para todos os casos estudados, notou-se uma queda na disponibilidade operacional no gráfico das replicações da simulação ao se alcançar os intervalos de manutenção preventiva, que requerem a execução de tarefas que impõe um elevado TAT. Diversos autores, como Silva (2018), focaram seus estudos na fase de operação e suporte de sistemas de alta complexidade gerencial, avaliando alternativas para a minimização do *downtime* imposto pela manutenção programada. Outros autores, como Figueiredo-Pinto (2022), ainda investigaram e propuseram técnicas aliadas aos sistemas de prognóstico e gerenciamento da saúde, conhecido como PHM (do inglês *Prognostics & Health Management*), para otimizar o aproveitamento das paradas de manutenção e, conseqüentemente, minimizar o *downtime*.

Diante do exposto, este trabalho deixa em aberto a possibilidade de novos estudos que aprimorem o método e avaliem a possibilidade de, mesmo nas fases iniciais do desenvolvimento, introduzir-se técnicas de minimização do *downtime* na simulação, verificando se é possível reduzir a queda na disponibilidade operacional imposta pela simulação de cenários operacionais.

Apesar do trabalho ter focado em sistemas de defesa, dando preferência para o indicador de disponibilidade operacional como requisito, o método é flexível e admite a utilização de outros indicadores de desempenho operacional, como demonstrado no primeiro caso de estudo apresentado.

## **4.6 Considerações finais do capítulo**

Neste capítulo o método proposto no trabalho foi aplicado em casos de estudo, gerando resultados com os quais foi possível discorrer sobre diversas possibilidades de análises com o potencial de auxiliar a tomada de decisões de projeto nas fases de preparação e de desenvolvimento, tomando como base para os estudos um motor aeronáutico. No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões e as oportunidades de trabalhos futuros que possam se beneficiar dos resultados desta pesquisa.

## 5 Conclusão

Este trabalho explorou as lacunas existentes no desenvolvimento de sistemas de alta complexidade responsáveis pelo baixo desempenho dos fatores RAM durante a fase de operação e suporte, tendo como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de auxílio às análises de compensação realizadas nas fases iniciais do desenvolvimento de sistemas de alta complexidade, visto que nestas fases se concentram as oportunidades de economia no Custo do Ciclo de Vida ou LCC. Buscou-se implementar na ferramenta a capacidade de obter previsões do Custo de Suporte em Vida ou LSC, parcela muito representativa do LCC, viabilizando análises comparativas de alternativas de projeto, levando em consideração distintos conceitos de manutenção e os efeitos da dinâmica dos cenários de emprego do sistema.

A hipótese do trabalho considerou para a elaboração da ferramenta a modelagem e a otimização da suportabilidade de distintas alternativas de projeto, permitindo comparações a partir de um desempenho máximo para um dado LSC, como aproximação inicial de um processo iterativo que visa atender a um dado requisito de desempenho, após a introdução da dinâmica do cenário operacional, realizada por meio de simulação dos perfis de emprego.

O resultado foi a elaboração de um método que modela a suportabilidade do sistema, a estrutura de suporte e a taxa de utilização média, por meio do emprego da ferramenta OPUS10©, que realiza a otimização do sistema de suporte modelado, resultando em soluções que apresentam uma disponibilidade operacional máxima para um dado investimento em LSC, formando pontos que compõem uma curva denominada de custo-efetividade. Como a otimização empregada no método incorpora a Análise de Nível de Reparo, conhecida como LORA, cada solução combina a composição do estoque, a quantidade de cada item, a localização dos estoques nas estações da estrutura de suporte, a alocação dos níveis de manutenção dentro dessa estrutura e a quantidade de recursos de manutenção a serem alocados. Dado um requisito, como a disponibilidade operacional média, seleciona-se, como aproximação inicial, um ponto cuja disponibilidade operacional máxima seja igual ou ligeiramente superior ao requisito. Para verificar o atendimento do requisito, o método prevê a alocação dos recursos do ponto selecionado em um modelo de simulação de cenários operacionais. A simulação é realizada com o emprego da ferramenta SIMLOX©, que fornece a disponibilidade operacional média de todas as replicações da simulação. Assim, é possível comparar o resultado da simulação ao requisito, e realizar ajustes, se necessário, por meio de um processo iterativo que seleciona

pontos com maior investimento em LSC, conferindo às análises de compensação maior precisão, consciência situacional e capacidade de apoio à decisão.

Para que o método possa ser empregado de forma efetiva, é necessário que o IPS esteja integrado ao processo de Engenharia de Sistemas no desenvolvimento do produto. Além disso, visto que o método se propõe a avaliar o impacto do cenário de emprego do sistema, o ConOps deve estar bem definido, com informações que permitam a modelagem tanto da estrutura de suporte, quanto do cenário operacional.

Dentro das atividades do IPS, o método consiste numa ferramenta complementar para análise de LCC, do elemento Influência no Projeto, enquadrando-se no ciclo de vida entre as fases de preparação e de desenvolvimento. Seu emprego pode ocorrer em diferentes momentos, sendo idealmente aplicado após o SML 2, auxiliando para que o sistema de suporte alcance o SML 7, a partir do qual as alternativas de projeto já estarão bem definidas, fazendo com que o método, da forma como foi proposto no trabalho, tenha sua aplicabilidade reduzida, visto seu foco na comparação de possíveis alternativas de projeto.

Demonstrou-se no trabalho a relevante influência da LORA na otimização do conceito de suporte, justificando a introdução desta análise ao método. Ao se otimizar o conceito de suporte que, define a alocação ótima dos níveis de manutenção ao longo da estrutura de suporte, o método é capaz de auxiliar na determinação da política de suporte mais adequada no que diz respeito a possibilidade de terceirização de um ou mais níveis de manutenção, ainda nas fases iniciais do desenvolvimento do sistema.

Os casos estudados envolveram modelos para um motor aeronáutico, sistema que requer para sua manutenção recursos com custos significativos, como bancos de prova. Este objeto de estudo permitiu avaliar a influência da otimização da estratégia de suporte, pois ao se alocar o nível 2 e 3 de manutenção em uma estrutura pertencente à organização operadora, observou-se um aumento expressivo no LSC, em virtude do alto investimento em recursos, quando se compara a possibilidade de terceirização destes níveis de manutenção.

Os resultados obtidos nos casos estudados apontaram que o método é eficaz na verificação da sensibilidade da alternativa de projeto ao cenário de emprego. Observou-se que determinadas alternativas de projeto podem não atingir o requisito de disponibilidade operacional média ao serem submetidas à simulação do cenário de emprego, mesmo que a fase de otimização, a qual é baseada em distribuições estocásticas e numa taxa de utilização média, aponte para um desempenho máximo acima do requisito.

O primeiro caso apresentado demonstrou que o método pode ser aplicado empregando-se outros indicadores de desempenho logístico, não ficando limitado à disponibilidade

operacional, apesar de que este indicador é largamente empregado para medir o desempenho logístico de sistemas de defesa.

Os casos estudados ainda apontaram a capacidade do método em destacar as vantagens e desvantagens das alternativas de projeto relacionadas à composição do LSC, permitindo determinar qual parcela tem maior influência sobre os custos de suporte, podendo orientar melhorias no projeto. Por exemplo, os casos estudados utilizando-se o modelo de motor com conceito de manutenção modular, apontaram para uma degradação de desempenho relacionado às atividades de manutenção preventiva, em relação ao conceito não modular, visto que seu plano de manutenção, conforme modelado, requer mais paradas para manutenção preventiva que o modelo de motor não modular, em virtude da introdução de módulos com intervalos distintos de vencimento. No entanto, a redução de custos com manutenção corretiva, oriunda da capacidade de isolamento de falha aos módulos, permitindo a substituição destes em um nível intermediários de manutenção e a redução no investimento em estoque de giro, apontaram um desempenho logístico superior para o motor modular em todos os casos estudados, em relação ao motor que não integra o conceito de manutenção modular.

A utilização do método proposto no desenvolvimento de um motor aeronáutico, mesmo que numa situação hipotética, constatou a importância de se ter bem definido o sistema no qual ele será aplicado e o cenário de emprego, indicando que as informações do ConOps têm importância fundamental para o desenvolvimento de sistemas de alta complexidade custo-efetivos, permitindo que análises de suportabilidade e de custos ocorram desde as fases iniciais do ciclo de vida.

## **5.1 Trabalhos futuros**

Este trabalho deixa algumas lacunas que podem ser utilizadas como oportunidades a serem exploradas em trabalhos futuros. A seguir serão apresentadas algumas possibilidades.

- a) O método proposto neste trabalho focou suas análises sobre o LSC. Assim, fica aberta a possibilidade de ampliar a análise de LCC ao avaliar os custos no desenvolvimento, por exemplo, na implementação de melhorias.
- b) Semelhante ao acima exposto, há a oportunidade de ampliar a análise de LCC ao introduzir-se os custos ligados à operação do sistema, tais como combustível, seguro e custos relacionados com captação, capacitação e emprego de recursos humanos.

- c) Ampliando ainda mais a análise de LCC, pode ser avaliada a inclusão dos custos da fase de desativação na modelagem do método, avaliando o impacto de diferentes estratégias de desativação no LCC.
- d) Mapeamento e avaliação das incertezas associados aos dados disponíveis para a modelagem de alternativas de projeto nas fases iniciais do desenvolvimento.
- e) Aprimoramento do método com a possibilidade de avaliar, mesmo nas fases iniciais do desenvolvimento, técnicas de minimização do *downtime* na simulação, visando a reduzir a queda na disponibilidade operacional média, em relação ao seu valor máximo, imposta pela simulação de cenários operacionais.

## Referências

ABRAHÃO, F. T. M.; MATA FILHO, J. N. da; 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. v

ACQNOTES. **Systems Engineering: Concept of Operations (CONOPS)**. [S. l.]: AcqNotes LCC, 2023. Disponível em: <https://acqnotes.com/acqnote/careerfields/concept-of-operations-conopsse> . Acesso em: 20 fev 2023.

AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE (ASD); AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA (AIA). **S3000L International procedure specification for Logistics Support Analysis (LSA) – Issue 2.0**. 2021a. Disponível em: <<http://www.s3000l.org/docs/S3000L%20Issue%202.0.pdf>>. Acesso em: 12 dez 2021.

AEROSPACE AND DEFENSE INDUSTRIES ASSOCIATION OF EUROPE (ASD); AEROSPACE INDUSTRIES ASSOCIATION OF AMERICA (AIA). **SX000i International procedure specification for Integrated Product Support (IPS) – Issue 3.0**. 2021b. Disponível em: <<http://www.sx000i.org/docs/SX000i%20Issue%203.0.pdf>>. Acesso em: 12 dez 2021.

AGÊNCIA FORÇA AÉREA. **FAB assina contrato para compra de 28 unidades do KC-390**. Brasília, DF: FAB, 2014. Disponível em: [https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/18733/REAPARELHAMENTO----\(V%20C3%ADdeo\)-FAB-assina-contrato-para-compra-de-28-unidades-do-KC-390](https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/18733/REAPARELHAMENTO----(V%20C3%ADdeo)-FAB-assina-contrato-para-compra-de-28-unidades-do-KC-390). Acesso em: 20 jun 2022.

AIRPLANE turbofan engine operation and malfunctions basic familiarization for flight crews. [S. l.: s. n.], 2022. Chapter 1. p. 1-7. Disponível em: <https://www.kimerius.com/app/download/5781574190/Airplane+turbofan+engine+operation+and+malfunctions.+Basic+familiarization+for+flight+crews.pdf>. Acesso em: 30 nov.

ALFREDSSON, P. Optimization of multi-echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities. **European Journal of Operational Research**, v. 99, n. 3, p. 584-595, 1997.

ARJOMANDI, M. *et al.* **Classification of unmanned aerial vehicles**. Adelaide: University of Adelaide, 2006. (Mech. Eng 3016). Disponível em: [https://www.academia.edu/2055673/Classification\\_of\\_Unmanned\\_Aerial\\_Vehicles](https://www.academia.edu/2055673/Classification_of_Unmanned_Aerial_Vehicles). Acesso em: 12 mai 2023.

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

BARROS, L. The optimization of repair decisions using life-cycle cost parameters. **IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry**, v. 9, n. 4, p. 403-413, 1998.

BARROS, L.; RILEY, M. A combinatorial approach to level of repair analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 129, n.2, p. 242-251, 2001.

BASTEN, R. J. I. **Designing logistics support systems: level of repair analysis and spare parts inventory**. 2009. 181 p. Thesis (Ph. D. in Operations Management and Logistics) - University of Twente, Enschede, 2009.

BASTEN, R. J. I.; SCHUTTEN, J. M. J.; VAN DER HEIJDEN, M. C. An efficient model formulation for level of repair analysis. **Annals of Operations Research**, v.172, p. 119-142, Jan 2009.

BASTEN, R. J. I.; VAN DER HEIJDEN, SCHUTTEN, J. M. J. A minimum cost flow model for level of repair analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 133, p. 233-242, 2011a.

BASTEN, R. J. I.; VAN DER HEIJDEN, SCHUTTEN, J. M. J. Practical extensions to a minimum cost flow model for level of repair analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 211, p. 333-342, 2011b.

BEN-DAYA, M.; DUFFUAA, S. O.; RAOULF, A.; KNEZEVIC, J.; AIT-KADI, D. **Handbook of maintenance management and engineering**. London: Springer, 2009. 741 p.

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

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

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **DCA 400-6: Ciclo de vida de sistema e materiais da aeronáutica**. Brasília, DF: Comando da Aeronáutica, 2007. 75 p.

BRICK, E. S.; UCHOA, E. A facility location and installation of resource model for level of repair analysis. **European Journal of Operational Research**, v.192, p. 479-486, 2009.

BRICK, E. S.; PESSOA, A. A.; SACRAMENTO, K. T. Level of repair analysis including failure analysis and optimal location of maintenance facilities resources. **Pesquisa Operacional**, v. 41, p. 1-31, 2021.

BUCH, D.; ABRAHÃO, F.T.M. Método de apoio à decisões de projeto baseadas no custo do ciclo de vida e na estrutura de suporte. *In*: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 24., 2022, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2022.

COUNCIL OF LOGISTICS ENGINEERING PROFESSIONALS. **About Us**. Meza, AZ: CLEP, 2022. Disponível em: <https://logisticsengineers.org/about/>. Acesso em: 20 jun 2022.

CRUYT, A. 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.

CUNHA, M. B.; AMARANTE, J. C. A. O livro branco e a base científica, tecnológica, industrial e logística de defesa. **Revista da Escola de Guerra Naval**, v. 17, n. 1, p. 11-32, jan/jun 2011.

DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY. **Integrated Product Support element guidebook**. Fort Belvoir, VA: DAU, 2011. Disponível em: <https://www.acqnotes.com/Attachments/Integrated%20Product%20Support%20Guidebook%20Dec%202011.pdf>. Acesso em: 24 abr 2022.

DEFENSE ACQUISITION UNIVERSITY. **Integrated Product Support (IPS) elements guidebook**. Fort Belvoir, VA: DAU, 2021. Disponível em: [https://www.dau.edu/pdfviewer?Guidebooks/Integrated-Product-Support-\(IPS\)-Element-Guidebook.pdf](https://www.dau.edu/pdfviewer?Guidebooks/Integrated-Product-Support-(IPS)-Element-Guidebook.pdf). Acesso em: 25 jun 2022.

EDMUNDS, D. B. Modular engine maintenance concept considerations for aircraft turbine engines. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 50, n. 1, p. 14-17, Jan. 1978.

EL-SAYED, A. F. **Fundamentals of aircraft and rocket propulsion**. London: Springer-Verlag, 2016. 1010 p.

FEDELE, L.; DI VITO, L.; RAMUNDO, F. E. Increasing efficiency in an aeronautical engine through maintenance evaluation and upgrades: analysis of the reliability and performance improvements under financial issues. **Energies/MDPI**, v. 13, n. 12, p. 1-17, Jun 2020.

FERREIRA, G. A. **Análise da despachabilidade e confiabilidade do sistema elétrico de uma aeronave executiva do segmento midlight**. 95 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

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.

FIGUEIREDO-PINTO, D.G. **A military aircraft fleet support management model based on the optimal integration of predictive and schedule maintenance**. 2022. 125p. Thesis (Doctor of Technology Management) – Program of Space Sciences and Technologies, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.

GE REPORTS BRASIL. **Banco de provas de Três Rios da GE Celma ganhará novo prêmio**. BR: GE do Brasil, 2020. Disponível em: <https://gereportsbrasil.com.br/banco-de-provas-de-tr%C3%AAs-rios-da-ge-celma-ganhar%C3%A1-novo-pr%C3%A9mio-68a014ff377f>. Acesso em: 21 mar 2023.

GOMES, S. B. V. **A indústria aeronáutica no Brasil**: evolução recente e perspectivas. Rio de Janeiro: BNDES, 2012. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/919>. Acesso em: 10 mai 2021.

GRANT, R. G. **Flight**: 100 years of aviation. London: Dorling Kindersley Limited, 2002. 440 p.

HOBDAY, M. Product complexity, innovation and industrial organisation. **Research Policy**, v. 26, n. 6, p. 689-710, 1998. 87 f.

INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO. **Relatório de Atividades 2018**. São José dos Campos: IAE, DCTA, 2019. Disponível em: [https://www.iae.cta.br/images/relatorios-atividades/Relatorio\\_de\\_Atividades\\_2018\\_Final.pdf](https://www.iae.cta.br/images/relatorios-atividades/Relatorio_de_Atividades_2018_Final.pdf). Acesso em: 10 mai 2021.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Std 1362-1998 (R2007)**: guide for information technology – system definition – Concept of Operations (ConOps) Document. New York: IEEE, 2007.

INSTITUTO DE LOGÍSTICA DA AERONÁUTICA. **Treinamento nos softwares da Opus Suíte no ILA**. Brasília, DF: ILA, Comando da Aeronáutica, 2022. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/ila/index.php/slideshow/539-treinamento-nos-softwares-da-opus-suite-no-ila>. Acesso em: 6 abr 2023.

ITAUARTE-VILLARREAL, C. M. **Optimization models for the economic and non-economic level of repair analysis**. 2010. 103 f. Thesis (M. Sc. in Industrial Engineering) – University of Texas, El Paso, 2010.

LITTLE, J. D. C.; GRAVES, S. C. Little's Law. *In*: CHHAJED, D.; LOWE, T. J. **Building intuition**: insights from basic operations management models and principles. New York: Springer, 2008. Cap. 5, p. 81-100.

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, 19. 2017, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2017.

NASA. **NASA systems engineering handbook**. Washington, DC: NASA, 2016. Disponível em: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa\\_systems\\_engineering\\_handbook\\_0.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook_0.pdf). Acesso em: 18 out. 2022.

NOWLAN, F.S.; HEAP, H. F. **Reliability-centered maintenance**. San Francisco: United Airlines, 1978. 495 p. (AD/A066 579)

OLIVEIRA, T. C. **Design of a tool for the integrated logistics support development of aerospace complex systems**: embryo digital twin. 2022. 87p. Dissertation (Master of Science in Technology Management) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2022.

ROJO, F. J. R.; ROY, R.; SHEHAB, E. Obsolescence management for long-life contracts: state of the art and future trends. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 49, n. 9-12, p. 1235-1250, 2010.

RUSSELL, S. H. Supply chain management: more than integrated logistics. **Air Force Journal of Logistics**, v. 31, n. 2, p. 55-63, 2007.

SAFRAN GROUP. **MAKILA 2A-2A1**: Turboshaft engine. [S. l.]: Turbomeca, Safran Group, 2008. Training notes. (X 298 N7 960 2)

SANDBERG, A.; STRÖMBERG, U. Gripen: with focus on availability performance and life support cost over the product life cycle. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 5, n. 4, p. 325-334, 1999.

SARANGA, H.; KUMAR, U. D. Optimization of aircraft maintenance/support infrastructure using genetic algorithms—level of repair analysis. **Annals of Operations Research**, n. 143, p. 91-106, Mar. 2006.

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

SHERBROOKE, C. C. **Optimal inventory modeling of systems**: multi-echelon techniques. 2<sup>a</sup> ed. Boston: Kluwer, 2004. 332 p.

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

SMITH, D. J. **Reliability, maintainability, and risk**: practical methods for engineers. 8<sup>a</sup> ed. Oxford: Elsevier, 2011. 436 p.

SOUZA, D. S. **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.

SPERINGER, M.; SCHNELZER, J. Differentiation of Industry 4.0 Models. The 4th industrial revolution from different regional perspectives in the Global North and Global South. In: Regional Academy on the United Nations (RAUN) (Eds.) **Innovations for development: towards sustainable, inclusive, and peaceful societies**. Vienna: Vienna International Centre, 2019. Disponível em: [SperingerSchnelzer2019DifferentiationofIndustry4.0Models.pdf](#)  
Acesso em: 17 out. 2022.

STAPELBERG, R. F. **Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design**. London: Springer, 2009. 827 p.

SYSTECON. **OPUS10 user's reference**. Stockholm: Systecon AB, 2022a.

SYSTECON. **SIMLOX user's reference**. Stockholm: Systecon AB, 2022b.

THOMPSON, Loren. Five reasons the Air Force's B-52 bomber will be the first jet ever to stay in service for 100 years. **FORBES**, 02 Jun 2020. Business: Aerospace and Defense. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/lorenthompson/2020/06/02/five-reasons-the-air-forces-b-52-bomber-will-be-the-first-jet-ever-to-stay-in-service-for-100-years/?sh=14097cf05ee6>. Acesso em: 18 out. 2022.

TSAI, S. C.; LIU, C. H. A simulation-based decision support system for a multi-echelon inventory problem with service level constraints. **Computers & Operations Research**, v. 53, p. 118-127, 2015.

TYSSELAND, B. E. Spare parts optimization process and results. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 39, n. 1, p. 8-27, 2009.

UNITED STATES. Air Force. **50th anniversary of B-52 delivery**. Washington, DC: Air Force, U.S., 2005. Disponível em: <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/134063/50th-anniversary-of-b-52-delivery/>. Acesso em: 18 out. 2022.

UNITED STATES. Department of Defense. **Product support manager guidebook**. Washington, DC: DOD, 2022.

VAN BAAREN, R. J.; CURRAN, R. Benchmarking RAMS driven design best-practices in civil and military aerospace. *In*: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTENANCE SYMPOSIUM, 2013, Orlando. **Proceedings** [...]. Piscataway: IEEE, 2013.

WAZLAWICK, R. S. **Metodologia de pesquisa para ciências da computação**. 6ª reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 159p.

WERREL, K. P. **The evolution of the cruise missile**. Montgomery: Air University Press (Maxwell Air Force Base), 1985. 289p.

# Apêndice A – Pesquisas e modelagem matemática da LORA

## A.1 Trabalhos explorando a LORA

A Tabela A-1 apresenta alguns trabalhos publicados em veículos de divulgação científica, que abordaram a LORA.

Tabela A-1 – Conjunto de trabalhos abordando a LORA.

AUTOR(ES)	RESUMO DO TRABALHO	DECISÕES OBTIDAS PELO MODELO PROPOSTO					HEURÍSTICA / META HEURÍSTICA EMPREGADA			
		ACÃO DE MANUTENÇÃO	NÍVEL DA ACÃO DE MANUTENÇÃO	LOCALIZAÇÃO DE ESTOQUE	DIMENSIONAMENTO DE ESTOQUE	ALOCÇÃO DE RECURSOS	DIMENSIONAMENTO DE RECURSOS	ALGORITMO GENÉTICO	BUSCA TABU	BRANCH-AND-BOUND
Alfredsson (1997)	O autor estudou o sistema de suporte para uma frota de sistemas complexos propondo uma modelagem matemática que visa encontrar uma configuração ótima do sistema de suporte que atenda uma restrição de LCC. O modelo abrange decisões de tipo e nível (escalaço) de reparo, nível e localização de estoque, além de abranger a localização e configuração de equipamentos de teste.	X	X	X	X	X				
Barros (1998)	A autora comparou um modelo de otimização de nível de reparo (LOROM: <i>Level-Of-Repair Optimization Model</i> ) com um pacote de <i>software</i> comercial destinado à análise de custo do ciclo de vida (EDCAS - <i>Equipment Designer's Cost Analysis System</i> ). Os cenários analisados consideraram um sistema com monitoramento da condição ( <i>condition-monitoring</i> ) chamado COMOTECH, considerando o monitoramento de vibração.	X								
Barros e Riley (2001)	Os autores partiram do princípio de que problemas práticos de LORA podem ser muito grandes e que a solução por programação inteira pode consumir muito tempo ou exceder a capacidade computacional disponível. Propuseram uma solução combinando o LOROM com o procedimento "branch-and-bound", obtendo um método viável para a solução da LORA, aplicado a um sistema com 2 níveis e 2 escalaços de manutenção, visando minimizar o custo total do ciclo de vida decorrente da manutenção ( <i>total life-cycle maintenance costs</i> ).	X	X						X	
Sarange e Kumar (2006)	Os autores desenvolveram uma formulação matemática para a LORA, tanto para escalaço único, quanto para 3 escalaços, com uma função-objetivo que minimiza o custo da estrutura de manutenção. Um estudo de caso considerando um motor aeronáutico (LRU), com 10 módulos (SRU) e 22 peças foi resolvido por meio da implementação da formulação na ferramenta <i>Evolver</i> do <i>Microsoft Excel</i> , aplicando a meta-heurística Algoritmo Genético. A solução obtida fornece o nível e o tipo de reparo para cada SRU e para cada peça.	X	X					X		
Basten, Schutten e van der Heijden (2009)	Os autores usaram como base as formulações para a modelagem matemática da LORA já disponíveis na literatura, construindo um modelo aprimorado de programação inteira para resolver o problema da LORA para casos generalizados.	X	X							
Brick e Uchoa (2009)	Os autores elaboraram um modelo de programação inteira mista para o LORA, capaz de considerar taxas de falha distintas para os modos de falha de componentes do sistema, associar a ação de manutenção requerida para cada modo de falha, associar custos de transporte e determinar a localização ótima dos recursos. O modelo ainda considera a possibilidade de realização da ação de manutenção em instalação orgânica ou pertencente a terceiros.	X	X			X	X			
Bouachera, Kishk e Power (2010)	Os autores abordaram a LORA, cujos modelos matemáticos propostos na literatura são de programação inteira (IP - <i>Integer Programming</i> ), cujo objetivo é minimizar o custo total de manutenção. Estes modelos, para problemas reais, são muito difíceis de serem resolvidos por meios tradicionais. Portanto, os autores propuseram um método de solução que combina os métodos heurísticos Algoritmo Genético e Busca Tabu na solução da LORA.	X	X					X	X	
Basten, van der Heijden e Schutten (2011a e 2011b)	Os autores publicaram 2 artigos complementares. No primeiro desenvolveram um modelo para solucionar a LORA com uma abordagem de fluxo de custo mínimo ( <i>minimum cost flow</i> ), incluindo probabilidades de reparo, de NFF ( <i>No Fault Found</i> ) e equipamentos com capacidade finita. O modelo permite resolver a LORA considerando a estrutura de manutenção exata, ao invés de considerar a agregação de dados por escalaço. Demonstraram que modelar a estrutura exata pode resultar em reduções de custo na ordem de 7%, para os casos de estruturas desbalanceadas. Para casos analisados com estrutura balanceada essa redução não passou de 1,2%. A desvantagem do modelo é a necessidade de muitos dados para compor os seus parâmetros. No segundo artigo os autores avaliaram as extensões práticas do modelo. Avaliaram probabilidades de insucesso no reparo, probabilidade de NFF e recursos com capacidade finita, por meio da geração de instâncias que foram comparadas a um caso base. Concluíram que a estratégia de reparo muda significativamente quando é incorporada capacidade finita de recursos ou quando a probabilidade de insucesso no reparo decresce na medida em que se aumenta o nível do escalaço de manutenção.	X	X							
Brick, Pessoa e Sacramento (2021)	Os autores propuseram uma modelagem de uma LORA estendida em relação às modelagens até então propostas na literatura. Além de considerar os parâmetros básicos de uma LORA (custos fixos e variáveis e taxa de falha), incluíram na otimização a possibilidade de emprego de recursos de manutenção com distintos níveis de efetividade e custo, possibilidade de incluir custos de construção de instalações, além de considerar custos de transporte entre os escalaços.	X	X				X			

## A.2 Exemplo de modelagem matemática da LORA

O modelo matemático para a otimização decorrente da LORA, proposto por Saranga e Kumar (2006), será apresentada a seguir, com a finalidade de compreender a formulação matemática da função-objetivo e das restrições, com base na PBS do sistema e na estrutura de suporte logístico. O modelo assume as seguintes premissas:

- a) A estrutura de suporte logístico consiste em três escalões de manutenção.
- b) O sistema possui três níveis de indentação.
- c) Cada componente pode ter três ações de manutenção: reparo, descarte ou substituição.
- d) No primeiro escalão de manutenção ocorre apenas o descarte e a substituição de itens. Não ocorre reparo de itens no primeiro escalão.
- e) No segundo escalão de manutenção ocorre as três ações de manutenção para LRU, SRU e peças.
- f) No terceiro escalão ocorre as três ações de manutenção para SRU e peças. As LRU não seguem para o terceiro escalão.

A seguir serão apresentadas as notações empregadas para os parâmetros e para as variáveis do modelo.

E	Escalão ou nível de manutenção. Onde 'e=1' se refere ao 1º escalão (base), 'e=2' se refere ao 2º escalão (intermediário) e 'e=3' se refere ao 3º escalão (parque).
R	Ação de manutenção. Onde 'r=1' se refere à reparo, 'r=2' se refere à descarte e 'r=3' se refere à substituição.
(i,j,k)	Conjunto triplo de índices para identificar um item numa estrutura de produto de 3 níveis. Onde 'i' faz referência à LRU, 'j' faz referência à SRU e 'k' faz referência à peça.
$CV_{r,e}(i,j,k)$	Custo variável associado à ação de manutenção 'r' no escalão 'e' para o item (i,j,k).
$CF_{r,e}(i,j,k)$	Custo fixo associado à ação de manutenção 'r' no escalão 'e' para o item (i,j,k).
$\lambda_{(i,j,k)}$	Taxa de falha do item (i,j,k).

$Z_{r,e}(i,j,k)$  Variável binária que assume o valor ‘1’ se a ação de manutenção ‘r’ for selecionada no escalão ‘e’ para o item (i,j,k).  
E assume o valor ‘0’ caso contrário.

A função-objetivo, dada pela Equação A.1, visa a minimizar o custo do suporte, dado pela soma de custos fixos e variáveis decorrentes das decisões do modelo.

$$\sum_{(i,j,k)} \sum_{r=1}^3 \sum_{e=1}^3 [CV_{r,e}(i,j,k)\lambda_{(i,j,k)} + CF_{r,e}(i,j,k)]Z_{r,e}(i,j,k) \quad (\text{A.1})$$

A Equação A.2 resulta no conjunto de restrições para que exatamente uma opção de reparo seja selecionada para cada item em análise no primeiro escalão (e=1).

$$\sum_{r=1}^3 Z_{r,1}(i,j,k) = 1 \quad \forall (i,j,k) \quad (\text{A.2})$$

A Equação A.3 resulta no conjunto de restrições que garantem que se um item (i,j,k) é substituído em um determinado escalão ‘e’, deve ser escolhida exatamente uma ação de manutenção no escalão ‘e+1’ para este item (i,j,k).

$$Z_{replace,e}(i,j,k) = \sum_{r=1}^3 Z_{r,e+1}(i,j,k) \quad \forall e; \forall (i,j,k) \quad (\text{A.3})$$

As Equações A.4 e A.5 resultam num conjunto de restrições de compatibilidade decorrentes da relação pai-filho.

$$Z_{r,e}(i,0,0) \leq Z_{r,e}(i,j,0) \quad \forall e; \forall (i,j,k) \quad \text{onde } r = \text{substituição ou descarte} \quad (\text{A.4})$$

$$Z_{r,e}(i,j,0) \leq Z_{r,e}(i,j,k) \quad \forall e; \forall (i,j,k) \quad \text{onde } r = \text{substituição ou descarte} \quad (\text{A.5})$$

## Apêndice B – Tabelas com os parâmetros empregados

Este trabalho empregou as ferramentas OPUS10© e SIMLOX© na versão 2022.1, componentes do pacote *Opus Suite RDM*, cujas licenças foram fornecidas pela empresa desenvolvedora, a Systecon, exclusivamente para apoiar este trabalho de pesquisa.

Na modelagem tanto dos parâmetros introduzidos no OPUS10© quanto no SIMLOX©, foi utilizada a língua inglesa para descrever os identificadores de itens, tarefas, modos de falha, entre outros, mantendo a compatibilidade da língua adotada nas tabelas de carregamento de dados das ferramentas. Ressalta-se que algumas das tabelas de entrada de dados empregadas possuem colunas que foram omitidas, por não serem necessárias à modelagem dos casos estudados.

Todos os modelos consideram um UAV monomotor, sendo que o único sistema modelado é o de propulsão. Todos os modelos contemplam um plano de manutenção com ações programadas. Foram elaborados quatro modelos básicos que compuseram os casos estudados no trabalho, denominados da seguinte forma:

- a) *CjUnico\_MP\_ISTAR*: refere-se a um modelo do sistema de suporte para um UAV operando com o perfil operacional definido para uma frota de ISTAR e equipado com um motor não modular;
- b) *Modular\_MP\_ISTAR*: refere-se a um modelo do sistema de suporte para um UAV operando com o perfil operacional definido para uma frota de ISTAR e equipado com um motor modular;
- c) *CJUnico\_MP\_UCAV*: refere-se a um modelo do sistema de suporte para um UAV operando com o perfil operacional definido para uma frota de UCAV e equipado com um motor não modular; e
- d) *Modular\_MP\_UCAV*: refere-se a um modelo do sistema de suporte para um UAV operando com o perfil operacional definido para uma frota de UCAV e equipado com um motor modular.

A seguir serão apresentados os dados que foram empregados nos modelos dos casos de estudo da pesquisa. Parâmetros de controle envolvidos no processo de otimização, simulação e apresentação de resultados não serão apresentados, por não fazerem parte da construção dos modelos.

## B.1 Descrição do produto

A Tabela B-1, denominada *Product*, define a designação do produto e é comum a todos os modelos, assim como a Tabela B-2, denominada *ProductVariant*, que define a designação da variante única do produto empregada nos casos de estudo.

Tabela B-1 – Designação do produto (OPUS10©).

PID	DESCR	NOTE
Product identifier	Description	User note
1 UAV	Unmanned Aerial Vehicle	

Tabela B-2 – Designação da variante do produto (OPUS10©).

PVID	DESCR	BPID	NOTE
Product variant identifier	Description	Product or product variant identifier	User note
1 M_UAV	Military Unmanned Aerial Vehicle	UAV	

A Tabela B-3, denominada *BreakdownElement*, define os elementos da estrutura do produto para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. A Tabela B-4 define os elementos da estrutura do produto para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV*.

Tabela B-3 – Elementos da estrutura de produto para os modelos do motor não modular (OPUS10©).

BDEID	DESCR	ATYPE	REPL	NOTE
Breakdown element identifier	Description	Aggregation type	Replaceability strategy	User note
		<HARDWARE>	<REPLACEABLE>	
1 P-10	Engine system	POSITION		
2 P-10-01	CORE ENGINE position			
3 P-10-02	ECU position			
4 P-10-03	FUEL CONTROL position			
5 P-10-04	BLEED VALVE position			
6 P-10-05	DRAIN VALVE position			
7 P-10-06	HEAT EXCHANGER position			
8 P-10-07	OIL TANK AND FILTER position			
9 P-10-08	FUEL FILTER position			
10 P-10-09	IGNITER BOX position			
11 P-10-10	IGNITER position			
12 P-10-11	ACCESSORY GEARBOX position			
13 P-10-12	FUEL PUMP position			
14 P-10-13	LUBE PUMP position			
15 P-10-14	STARTER-GENERATOR position			
16 P-10-15	HYDRAULIC PUMP position			

Tabela B-4 – Elementos da estrutura do produto para os modelos do motor modular (OPUS10©).

BDEID	DESCR	ATYPE	REPL	NOTE
Breakdown element identifier	Description	Aggregation type	Replaceability strategy	User note
		<HARDWARE>	<REPLACEABLE>	
1 P-10	Engine system	POSITION		
2 P-10-01	ENGINE position			
3 P-10-02	ECU position			
4 P-10-03	FUEL CONTROL position			
5 P-10-04	BLEED VALVE position			
6 P-10-05	DRAIN VALVE position			
7 P-10-06	HEAT EXCHANGER position			
8 P-10-07	OIL TANK AND FILTER position			
9 P-10-08	FUEL FILTER position			
10 P-10-09	IGNITER BOX position			
11 P-10-10	IGNITER position			
12 P-10-11	ACCESSORY GEARBOX position			
13 P-10-12	FUEL PUMP position			
14 P-10-13	LUBE PUMP position			
15 P-10-14	STARTER-GENERATOR position			
16 P-10-15	HYDRAULIC PUMP position			

A Tabela B-5, denominada *ProductBreakdown*, define a estrutura do produto e é comum a todos os modelos.

Tabela B-5 – Estrutura de produto (OPUS10©).

PVID	BDSID	BDMID	QTYPM	TID	NOTE
Product or product variant identifier	Breakdown sub identifier	Breakdown mother identifier	Quantity per mother element <1>	Replacement task identifier	User note
1 M_UAV	P-10				
2 M_UAV	P-10-01	P-10		REMOVE_REPLACE_ENGINE	
3 M_UAV	P-10-02	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
4 M_UAV	P-10-03	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
5 M_UAV	P-10-04	P-10	2	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
6 M_UAV	P-10-05	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
7 M_UAV	P-10-06	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
8 M_UAV	P-10-07	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
9 M_UAV	P-10-08	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
10 M_UAV	P-10-09	P-10	2	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
11 M_UAV	P-10-10	P-10	2	REMOVE_REPLACE_IGNITER	
12 M_UAV	P-10-11	P-10		REMOVE_REPLACE_AGB	
13 M_UAV	P-10-12	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
14 M_UAV	P-10-13	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
15 M_UAV	P-10-14	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	
16 M_UAV	P-10-15	P-10		REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	

A Tabela B-6, denominada *ProductRealization*, define como a estrutura do produto é preenchida, alocando itens em cada posição, para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. A Tabela B-7 define a alocação de itens à estrutura do produto para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV*.

Tabela B-6 – Alocação de itens aos elementos da estrutura de produto para os modelos do motor não modular (OPUS10©).

	PVID	BDEID	IID	NOTE
	Product or product variant identifier	Breakdown element identifier	Item identifier	User note
1	M_UAV	P-10-01	N-MOD-TURBOJET	
2	M_UAV	P-10-02	ECU	
3	M_UAV	P-10-03	EFCU	
4	M_UAV	P-10-04	BDV	
5	M_UAV	P-10-05	DNV	
6	M_UAV	P-10-06	HTEXGR	
7	M_UAV	P-10-07	OILTK-FLTR	
8	M_UAV	P-10-08	FFLTR	
9	M_UAV	P-10-09	IGBX	
10	M_UAV	P-10-10	IGTR	
11	M_UAV	P-10-11	AGB	
12	M_UAV	P-10-12	FPMP	
13	M_UAV	P-10-13	LBPMP	
14	M_UAV	P-10-14	STR-GEN	
15	M_UAV	P-10-15	HYD-PMP	

Tabela B-7 – Alocação de itens aos elementos da estrutura de produto para os modelos do motor modular (OPUS10©).

	PVID	BDEID	IID	NOTE
	Product or product variant identifier	Breakdown element identifier	Item identifier	User note
1	M_UAV	P-10-01	MOD-TURBOJET	
2	M_UAV	P-10-02	ECU	
3	M_UAV	P-10-03	EFCU	
4	M_UAV	P-10-04	BDV	
5	M_UAV	P-10-05	DNV	
6	M_UAV	P-10-06	HTEXGR	
7	M_UAV	P-10-07	OILTK-FLTR	
8	M_UAV	P-10-08	FFLTR	
9	M_UAV	P-10-09	IGBX	
10	M_UAV	P-10-10	IGTR	
11	M_UAV	P-10-11	AGB	
12	M_UAV	P-10-12	FPMP	
13	M_UAV	P-10-13	LBPMP	
14	M_UAV	P-10-14	STR-GEN	
15	M_UAV	P-10-15	HYD-PMP	

## B.2 Componentes e grupos

A Tabela B-8, denominada *Item*, apresenta os itens dos modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. A Tabela B-9 apresenta os itens para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV*.

Tabela B-8 – Componentes do modelo de motor não modular (OPUS10©).

	IID	DESCR	PRICE
	Item identifier	Description	Price
1	N-MOD-TURBOJET	Non-modular Turbojet Engine	2100000,000
2			
3	ECU	Eletronic Control Unit	37920,000
4	EFCU	Eletronic Fuel Control Unit	27072,000
5	BDV	Bleed Valve	4004,000
6	DNV	Drain Valve	2669,330
7	HTEXGR	Heat Exchanger	3248,000
8	OILTK-FLTR	Oil Tank and Filter	9100,000
9	FFLTR	Fuel Filter	1736,000
10	IGBX	Igniter Box	11144,000
11	IGTR	Igniter	1400,000
12	AGB	Accessory Gearbox	198440,000
13	FPMP	Fuel Pump	22941,000
14	LBPMP	Lube Pump	18200,000
15	STR-GEN	Starter-Generator	65576,000
16	HYD-PMP	Hydraulic Pump	19058,000

Tabela B-9 – Componentes do modelo de motor modular (OPUS10©).

	IID	DESCR	PRICE
	Item identifier	Description	Price
1	MOD-TURBOJET	Modular Turbojet Engine	2520000,000
2	ENG_MOD1	Compressor module	882000,000
3	ENG_MOD2	Combustion module	630000,000
4	ENG_MOD3	Turbine module	756000,000
5	ENG_MOD4	Exhaust module	252000,000
6			
7	ECU	Eletronic Control Unit	37920,000
8	EFCU	Eletronic Fuel Control Unit	27072,000
9	BDV	Bleed Valve	4004,000
10	DNV	Drain Valve	2670,000
11	HTEXGR	Heat Exchanger	3248,000
12	OILTK-FLTR	Oil Tank and Filter	9100,000
13	FFLTR	Fuel Filter	1736,000
14	IGBX	Igniter Box	11144,000
15	IGTR	Igniter	1400,000
16	AGB	Accessory Gearbox	198440,000
17	FPMP	Fuel Pump	22941,000
18	LBPMP	Lube Pump	18200,000
19	STR-GEN	Starter-Generator	65576,000
20	HYD-PMP	Hydraulic Pump	19058,000

A Tabela B-10, denominada *ItemStructure*, apresenta a estrutura dos componentes com subcomponentes. Esta tabela é empregada nos modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV*. Os modelos relacionados ao motor não modular não apresentam a necessidade de utilização desta tabela.

Tabela B-10 – Estrutura de componentes que possuem subcomponentes (OPUS10©).

	IID	MID	QTYPM	REPL	TID	NOTE
	Subitem identifier	Mother item identifier	Quantity per mother item <1>	Replaceability strategy <REPLACEABLE>	Replacement task identifier	User note
1	ENG_MOD1	MOD-TURBOJET			REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	
2	ENG_MOD2	MOD-TURBOJET			REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	
3	ENG_MOD3	MOD-TURBOJET			REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	
4	ENG_MOD4	MOD-TURBOJET			REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	

A Tabela B-11, denominada *ComponentGroup*, cria grupos de componentes para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. A Tabela B-12 cria grupos de componentes para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV*.

Tabela B-11 – Grupos de componentes para o motor não modular (OPUS10©).

	COGID	DESCR	NOTE
	Component group identifier	Description	User note
1	ALL_ITEMS	All itens, including turbojet, gearbox and accessories	
2	ACCESSORIES	Only accessories (not include gearbox)	

Tabela B-12 – Grupos de componentes para o motor modular (OPUS10©).

	COGID	DESCR	NOTE
	Component group identifier	Description	User note
1	ALL_ITEMS	All itens	Except Engine modules
2	ACCESSORIES	Only accessories	Except Igniters
3	ENG_MODULES	Engine modules	Engine modules

A Tabela B-13, denominada *ComponentGroupContent*, aloca os componentes aos grupos criados para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. A Tabela B-14 aloca os componentes aos grupos criados para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV*.

Tabela B-13 – Composição dos grupos criados para os modelos de motor não modular (OPUS10©).

	COGID	COID	NOTE	COGID	COID	NOTE
	Component group identifier	Component or sub group identifier	User note	Component group identifier	Component or sub group identifier	User note
1	ALL_ITEMS	N-MOD-TURBOJET		17	ACCESSORIES	ECU
2	ALL_ITEMS	ECU		18	ACCESSORIES	EFCU
3	ALL_ITEMS	EFCU		19	ACCESSORIES	BDV
4	ALL_ITEMS	BDV		20	ACCESSORIES	DNV
5	ALL_ITEMS	DNV		21	ACCESSORIES	HTEXGR
6	ALL_ITEMS	HTEXGR		22	ACCESSORIES	OILTK-FLTR
7	ALL_ITEMS	OILTK-FLTR		23	ACCESSORIES	FFLTR
8	ALL_ITEMS	FFLTR		24	ACCESSORIES	IGBX
9	ALL_ITEMS	IGBX		25	ACCESSORIES	IGTR
10	ALL_ITEMS	IGTR		26	ACCESSORIES	FPMP
11	ALL_ITEMS	AGB		27	ACCESSORIES	LBPMP
12	ALL_ITEMS	FPMP		28	ACCESSORIES	STR-GEN
13	ALL_ITEMS	LBPMP		29	ACCESSORIES	HYD-PMP
14	ALL_ITEMS	STR-GEN				
15	ALL_ITEMS	HYD-PMP				
16						

Tabela B-14 – Composição dos grupos criados para os modelos de motor modular (OPUS10©).

	COGID	COID	NOTE		COGID	COID	NOTE
	Component group identifier	Component or sub group identifier	User note		Component group identifier	Component or sub group identifier	User note
1	ALL_ITEMS	MOD-TURBOJET		18	ACCESSORIES	ECU	
2	ALL_ITEMS	ECU		19	ACCESSORIES	EFCU	
3	ALL_ITEMS	EFCU		20	ACCESSORIES	BDV	
4	ALL_ITEMS	BDV		21	ACCESSORIES	DNV	
5	ALL_ITEMS	DNV		22	ACCESSORIES	HTEXGR	
6	ALL_ITEMS	HTEXGR		23	ACCESSORIES	OILTK-FLTR	
7	ALL_ITEMS	OILTK-FLTR		24	ACCESSORIES	FFLTR	
8	ALL_ITEMS	FFLTR		25	ACCESSORIES	IGBX	
9	ALL_ITEMS	IGBX		26	ACCESSORIES	FPMP	
10	ALL_ITEMS	IGTR		27	ACCESSORIES	LBPMP	
11	ALL_ITEMS	AGB		28	ACCESSORIES	STR-GEN	
12	ALL_ITEMS	FPMP		29	ACCESSORIES	HYD-PMP	
13	ALL_ITEMS	LBPMP		30			
14	ALL_ITEMS	STR-GEN		31	ENG_MODULES	ENG_MOD1	
15	ALL_ITEMS	HYD-PMP		32	ENG_MODULES	ENG_MOD2	
16	ALL_ITEMS	ENG_MODULES		33	ENG_MODULES	ENG_MOD3	
17				34	ENG_MODULES	ENG_MOD4	

### B.3 Falhas e reparo

Na Tabela B-15, denominada *Failure*, são definidos os modos de falha dos componentes para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. Os modos de falha dos componentes dos modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram definidos conforme a Tabela B-16.

Tabela B-15 – Modos de falha atribuídos aos componentes dos modelos do motor não modular (OPUS10©).

	FRID	DESCR	BDEID	IID	REPAB	PFLF
	Failure identifier	Description	Breakdown element identifier	Item identifier	Repairable	Probability of functional loss given failure
1	FAILURE_TURBOJET	Turbojet engine fail		N-MOD-TURBOJET		
2	FAILURE_ECU	Electronic Control Unit fail		ECU		
3	FAILURE_EFCU	Electronic Fuel Control Unit fail		EFCU		
4	FAILURE_BDV	Bleed Valve fail		BDV		
5	FAILURE_DNV	Drain Valve fail		DNV		
6	FAILURE_HTEXGR	Heat Exchanger fail		HTEXGR		
7	FAILURE_OILTK-FLTR	Oil Tank and Filter fail		OILTK-FLTR		
8	FAILURE_FFLTR	Fuel Filter fail		FFLTR		
9	FAILURE_IGBOX	Igniter Box fail		IGBX		
10	FAILURE_IGTR	Igniter fail		IGTR		
11	FAILURE_AGB	Accessory Gearbox fail		AGB		
12	FAILURE_FPMP	Fuel Pump fail		FPMP		
13	FAILURE_LBMP	Lube Pump fail		LBPMP		
14	FAILURE_STR-GEN	Starter-Generator fail		STR-GEN		
15	FAILURE_HYD-PMP	Hydraulic Pump fail		HYD-PMP		

Tabela B-16 – Modos de falha atribuídos aos componentes dos modelos do motor modular (OPUS10©).

	FRID	DESCR	BDEID	IID	REPAB	PFLF
	Failure identifier	Description	Breakdown element identifier	Item identifier	Repairable	Probability of functional loss given failure
					<Y>	<1,00>
1	FAILURE_TURBOJET	Turbojet engine fail		MOD-TURBOJET		
2	FAILURE_MOD1	Engine module 1 fail		ENG_MOD1		
3	FAILURE_MOD2	Engine module 2 fail		ENG_MOD2		
4	FAILURE_MOD3	Engine module 3 fail		ENG_MOD3		
5	FAILURE_MOD4	Engine module 4 fail		ENG_MOD4		
6						
7	FAILURE_ECU	Electronic Control Unit fail		ECU		
8	FAILURE_EFCU	Electronic Fuel Control Unit fail		EFCU		
9	FAILURE_BDV	Bleed Valve fail		BDV		
10	FAILURE_DNV	Drain Valve fail		DNV		
11	FAILURE_HTEXGR	Heat Exchanger fail		HTEXGR		
12	FAILURE_OILTK-FLTR	Oil Tank and Filter fail		OILTK-FLTR		
13	FAILURE_FFLTR	Fuel Filter fail		FFLTR		
14	FAILURE_IGBOX	Igniter Box fail		IGBX		
15	FAILURE_IGTR	Igniter fail		IGTR		
16	FAILURE_AGB	Accessory Gearbox fail		AGB		
17	FAILURE_FPMP	Fuel Pump fail		FPMP		
18	FAILURE_LBMP	Lube Pump fail		LBPMP		
19	FAILURE_STR-GEN	Starter-Generator fail		STR-GEN		
20	FAILURE_HYD-PMP	Hydraulic Pump fail		HYD-PMP		

A Tabela B-17, denominada *FailureRate*, atribui uma taxa de falha para cada modo de falha dos modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. A taxa de falha de cada modo de falha para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foi atribuída conforme a Tabela B-18.

Tabela B-17 – Taxas de falha para os modelos de motor não modular (OPUS10©).

	FRID	OPID	FRT	FRTT	NOTE
	Failure identifier	Operation parameter identifier	Failure rate	FRT Time dependent value identifier	User note
			[1/MOPID <sub>s</sub> ]		
1	FAILURE_TURBOJET	<OPHOURS>	2730.06		
2	FAILURE_ECU	<OPHOURS>	337.50		
3	FAILURE_EFCU	<OPHOURS>	171.72		
4	FAILURE_BDV	<OPHOURS>	751.34		
5	FAILURE_DNV	<OPHOURS>	813.94		
6	FAILURE_HTEXGR	<OPHOURS>	864.00		
7	FAILURE_OILTK-FLTR	<OPHOURS>	96.43		
8	FAILURE_FFLTR	<OPHOURS>	122.69		
9	FAILURE_IGBOX	<OPHOURS>	75.60		
10	FAILURE_IGTR	<OPHOURS>	146.88		
11	FAILURE_AGB	<OPHOURS>	326.86		
12	FAILURE_FPMP	<OPHOURS>	1066.10		
13	FAILURE_LBMP	<OPHOURS>	177.39		
14	FAILURE_STR-GEN	<OPHOURS>	4026.24		
15	FAILURE_HYD-PMP	<OPHOURS>	272.16		

Tabela B-18 – Taxas de falha para os modelos de motor modular (OPUS10©).

	FRID	OPID	FRT	FRTT	NOTE
	Failure identifier	Operation parameter identifier	Failure rate [1/MOPIDs]	FRT Time dependent value identifier	User note
1	FAILURE_TURBOJET	<OPHOURS>	136.50		
2	FAILURE_MOD1	<OPHOURS>	409.51		
3	FAILURE_MOD2	<OPHOURS>	682.51		
4	FAILURE_MOD3	<OPHOURS>	546.01		
5	FAILURE_MOD4	<OPHOURS>	955.52		
6	FAILURE_ECU	<OPHOURS>	337.50		
7	FAILURE_EFCU	<OPHOURS>	171.72		
8	FAILURE_BDV	<OPHOURS>	751.34		
9	FAILURE_DNV	<OPHOURS>	813.94		
10	FAILURE_HTEXGR	<OPHOURS>	864.00		
11	FAILURE_OILTK-FLTR	<OPHOURS>	96.43		
12	FAILURE_FFLTR	<OPHOURS>	122.69		
13	FAILURE_IGBOX	<OPHOURS>	75.60		
14	FAILURE_IGTR	<OPHOURS>	146.88		
15	FAILURE_AGB	<OPHOURS>	326.86		
16	FAILURE_FPMP	<OPHOURS>	1066.10		
17	FAILURE_LBMP	<OPHOURS>	177.39		
18	FAILURE_STR-GEN	<OPHOURS>	4026.24		
19	FAILURE_HYD-PMP	<OPHOURS>	272.16		

A Tabela B-19, denominada *Repair*, associa uma tarefa de reparo para cada modo de falha para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. A tarefa de reparo para cada modo de falha dos modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* é associada por meio da Tabela B-20.

Tabela B-19 – Tarefas de reparo para os modelos do motor não modular (OPUS10©).

	FRID	MAID	NOTE
	Failure identifier	Task, task package or maintenance activity identifier	User note
1	FAILURE_TURBOJET	RECTIFY_TURBOJET	
2	FAILURE_ECU	RECTIFY_ECU	
3	FAILURE_EFCU	RECTIFY_EFCU	
4	FAILURE_BDV	RECTIFY_BDV	
5	FAILURE_DNV	RECTIFY_DNV	
6	FAILURE_HTEXGR	RECTIFY_HTEXGR	
7	FAILURE_OILTK-FLTR	RECTIFY_OILTK-FLTR	
8	FAILURE_FFLTR	RECTIFY_FFLTR	
9	FAILURE_IGBOX	RECTIFY_IGBX	
10	FAILURE_IGTR	RECTIFY_IGTR	
11	FAILURE_AGB	RECTIFY_AGB	
12	FAILURE_FPMP	RECTIFY_FPMP	
13	FAILURE_LBMP	RECTIFY_LBPMP	
14	FAILURE_STR-GEN	RECTIFY_STR-GEN	
15	FAILURE_HYD-PMP	RECTIFY_HYD-PMP	

Tabela B-20 – Tarefas de reparo para os modelos do motor modular (OPUS10©).

	FRID	MAID	NOTE
	Failure identifier	Task, task package or maintenance activity identifier	User note
1	FAILURE_TURBOJET	RECTIFY_TURBOJET	
2	FAILURE_MOD1	RECTIFY_MOD1	
3	FAILURE_MOD2	RECTIFY_MOD2	
4	FAILURE_MOD3	RECTIFY_MOD3	
5	FAILURE_MOD4	RECTIFY_MOD4	
6			
7	FAILURE_ECU	RECTIFY_ECU	
8	FAILURE_EFCU	RECTIFY_EFCU	
9	FAILURE_BDV	RECTIFY_BDV	
10	FAILURE_DNV	RECTIFY_DNV	
11	FAILURE_HTEXGR	RECTIFY_HTEXGR	
12	FAILURE_OILTK-FLTR	RECTIFY_OILTK-FLTR	
13	FAILURE_FFLTR	RECTIFY_FFLTR	
14	FAILURE_IGBOX	RECTIFY_IGBX	
15	FAILURE_IGTR	RECTIFY_IGTR	
16	FAILURE_AGB	RECTIFY_AGB	
17	FAILURE_FPMP	RECTIFY_FPMP	
18	FAILURE_LBMP	RECTIFY_LBPMP	
19	FAILURE_STR-GEN	RECTIFY_STR-GEN	
20	FAILURE_HYD-PMP	RECTIFY_HYD-PMP	

## B.4 Manutenção preventiva

A Tabela B-21, denominada *PMPlan*, foi empregada para estabelecer o plano de manutenção para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. O plano de manutenção para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foi estabelecido por meio da Tabela B-22.

Tabela B-21 – Plano de manutenção para os modelos do motor não modular (OPUS10©).

	PMID	BDEID	IID	PSEI	MNOCC	ENREG	NOTE
	Preventive maintenance plan identifier	Breakdown element identifier	Item identifier	Probability for system effectiveness impact	Maximum number of occurrences	Enforce regularity	User note
				<1,00>		<N>	
1	ANNUAL_CORROSION	P-10					
2							
3	ENGINE_MAINTENANCE	P-10					
4							
5	GBOX_MAINTENANCE	P-10-11					

Tabela B-22 – Plano de manutenção para os modelos do motor modular (OPUS10©).

	PMID	BDEID	IID	PSEI	MNOCC	ENREG	NOTE
	Preventive maintenance plan identifier	Breakdown element identifier	Item identifier	Probability for system effectiveness impact	Maximum number of occurrences	Enforce regularity	User note
				<1,00>		<N>	
1	ANNUAL_CORROSION	P-10					
2							
3	ENGINE_MAINTENANCE	P-10					
4							
5	MOD1_MAINTENANCE	P-10					
6							
7	MOD3_MAINTENANCE	P-10					
8							
9	GBOX_MAINTENANCE	P-10-11					

A Tabela B-23, denominada *PMSchedule*, estabelece o sequenciamento das atividades do plano de manutenção para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. O sequenciamento das atividades do plano de manutenção para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foi estabelecido por meio da Tabela B-24.

Tabela B-23 – Sequenciamento das atividades do plano de manutenção dos modelos de motor não modular (OPUS10©).

	PMID	SEQ	MAID	ATIM	DTIM	NOTE
	Preventive maintenance plan identifier	Sequence number	Maintenance activity identifier	Anticipation of PM interval	Deferment of PM interval	User note
1	ANNUAL_CORROSION	1	CORROSION_INSPECTION			
2						
3	ENGINE_MAINTENANCE	1	ENGINE_INSPECTION			
4	ENGINE_MAINTENANCE	2	ENGINE_INSPECTION			
5	ENGINE_MAINTENANCE	3	ENGINE_INSPECTION			
6	ENGINE_MAINTENANCE	4	ENGINE_INSPECTION			
7	ENGINE_MAINTENANCE	5	ENGINE_INSPECTION			
8	ENGINE_MAINTENANCE	6	ENGINE_OVERHAUL			
9						
10	GBOX_MAINTENANCE	1	GBOX_OVERHAUL			

Tabela B-24 – Sequenciamento das atividades do plano de manutenção dos modelos de motor modular (OPUS10©).

	PMID	SEQ	MAID	ATIM	DTIM	NOTE
	Preventive maintenance plan identifier	Sequence number	Maintenance activity identifier	Anticipation of PM interval	Deferment of PM interval	User note
1	ANNUAL_CORROSION	1	CORROSION_INSPECTION			
2						
3	ENGINE_MAINTENANCE	1	ENGINE_INSPECTION			
4						
5	MOD1_MAINTENANCE	1	MOD1_OVERHAUL			
6						
7	MOD3_MAINTENANCE	1	MOD3_OVERHAUL			
8						
9	GBOX_MAINTENANCE	1	GBOX_OVERHAUL			

A Tabela B-25, denominada *PMInterval*, estabelece os intervalos entre manutenções para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. Os intervalos entre manutenções para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foi estabelecido por meio da Tabela B-26.

Tabela B-25 – Intervalos de manutenção dos modelos de motor não modular (OPUS10©).

	PMID	SEQ	OPID	PMINT	NOTE
	Preventive maintenance plan identifier	Sequence number	Operation parameter identifier	Preventive maintenance interval	User note
1	ANNUAL_CORROSION	1	<CALHOURS>	8760.000	
2					
3	ENGINE_MAINTENANCE	1	<OPHOURS>	200.000	
4	ENGINE_MAINTENANCE	2	<OPHOURS>	200.000	
5	ENGINE_MAINTENANCE	3	<OPHOURS>	200.000	
6	ENGINE_MAINTENANCE	4	<OPHOURS>	200.000	
7	ENGINE_MAINTENANCE	5	<OPHOURS>	200.000	
8	ENGINE_MAINTENANCE	6	<OPHOURS>	200.000	
9					
10	GBOX_MAINTENANCE	1	<OPHOURS>	1000.000	

Tabela B-26 – Intervalos de manutenção dos modelos de motor modular (OPUS10©).

	PMID	SEQ	OPID	PMINT	NOTE
	Preventive maintenance plan identifier	Sequence number	Operation parameter identifier	Preventive maintenance interval	User note
1	ANNUAL_CORROSION	1	<CALHOURS>	8760.000	
2					
3	ENGINE_MAINTENANCE	1	<OPHOURS>	200.000	
4					
5	MOD1_MAINTENANCE	1	<OPHOURS>	2000.000	
6	MOD3_MAINTENANCE	1	<OPHOURS>	1200.000	
7					
8	GBOX_MAINTENANCE	1	<OPHOURS>	1000.000	

## B.5 Modelagem das tarefas de manutenção e atividades de manutenção

A Tabela B-27, denominada *MaintenanceLevel*, é comum a todos os modelos e por meio dela são definidos os níveis de manutenção.

Tabela B-27 – Níveis de manutenção definidos para os modelos (OPUS10©).

	LEVLID	DESCR	LEVLNO	NOTE
	Maintenance level identifier	Description	Level number	User note
1	L1	First line maintenance	1	
2	L2	Second line maintenance	2	
3	L3	Third line maintenance	3	

A Tabela B-28, denominada *Task*, modela as tarefas de manutenção para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. As tarefas para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram modeladas de acordo com a Tabela B-29.

Tabela B-28 – Tarefas de manutenção para os modelos de motor não modular (OPUS10©).

TID	DESCR	TYPE	COST	LEVLID	DURN	(DURN)	DURNT	NOTE	TID	DESCR	TYPE	COST	LEVLID	DURN	(DURN)	DURNT	NOTE
Task identifier	Description	Task type	Direct cost per task	Maintenance level identifier	Duration [Hours]	Duration time dist	DURN Time dependent value identifier	User note	Task identifier	Description	Task type	Direct cost per task	Maintenance level identifier	Duration [Hours]	Duration time dist	DURN Time dependent value identifier	User note
		<RECTIFY>	<0.00>								<RECTIFY>	<0.00>					
1	REMOVE_REPLACE_ENGINE	Remove and replace engine	REPLACE	L1	15.0			Corrective Maintenance	25	OVERHAUL	Engine overhaul		L3	240.0			Preventive Maintenance
2	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	Remove and replace accessories	REPLACE	L1	5.0			Corrective Maintenance	26	INSPECTION_OUT	Engine inspection		L2	48.0			Preventive Maintenance
3	REMOVE_REPLACE_IGNITER	Remove and replace igniters	REPLACE	L1	1.0			Corrective Maintenance	27	CORROSION_OUT	Engine corrosion inspection		L2	16.0			Preventive Maintenance
4	REMOVE_REPLACE_AGB	Remove and replace AGB	REPLACE	L1	12.0			Corrective Maintenance	28	RECTIFY_TURBOJET_OUT	Rectify turbojet engine		L3	240.0			Corrective Maintenance
5									29	RECTIFY_ECU_OUT	Rectify ECU		L3	32.0			Corrective Maintenance
6	INSPECTION	Engine inspection		L2	48.0			Preventive Maintenance	30	RECTIFY_EFCU_OUT	Rectify EFCU		L3	40.0			Corrective Maintenance
7	CORROSION	Engine corrosion inspection		L2	16.0			Preventive Maintenance	31	RECTIFY_BDV_OUT	Rectify BDV		L3	20.0			Corrective Maintenance
8									32	RECTIFY_DNV_OUT	Rectify DNV		L3	24.0			Corrective Maintenance
9	RECTIFY_TURBOJET	Rectify turbojet engine		L3	240.0			Corrective Maintenance	33	RECTIFY_HTEXGR_OUT	Rectify HTEXGR		L3	23.0			Corrective Maintenance
10	RECTIFY_ECU	Rectify ECU		L3	32.0			Corrective Maintenance	34	RECTIFY_OILTKFLTR_OUT	Rectify OILTKFLTR		L3	24.0			Corrective Maintenance
11	RECTIFY_EFCU	Rectify EFCU		L3	40.0			Corrective Maintenance	35	RECTIFY_FLTR_OUT	Rectify FLTR		L3	16.0			Corrective Maintenance
12	RECTIFY_BDV	Rectify BDV		L3	20.0			Corrective Maintenance	36	RECTIFY_GIBX_OUT	Rectify GIBX		L3	16.0			Corrective Maintenance
13	RECTIFY_DNV	Rectify DNV		L3	24.0			Corrective Maintenance	37	RECTIFY_GSTR_OUT	Rectify GSTR		L3	16.0			Corrective Maintenance
14	RECTIFY_HTEXGR	Rectify HTEXGR		L3	23.0			Corrective Maintenance	38	RECTIFY_IPMP_OUT	Rectify IPMP		L3	32.0			Corrective Maintenance
15	RECTIFY_OILTKFLTR	Rectify OILTKFLTR		L3	24.0			Corrective Maintenance	39	RECTIFY_AGB_OUT	Rectify AGB		L3	12.0			Corrective Maintenance
16	RECTIFY_FLTR	Rectify FLTR		L3	16.0			Corrective Maintenance	40	RECTIFY_STR_GEN_OUT	Rectify STR-GEN		L3	48.0			Corrective Maintenance
17	RECTIFY_GIBX	Rectify GIBX		L3	16.0			Corrective Maintenance	41	RECTIFY_HYD-PMP_OUT	Rectify HYD-PMP		L3	24.0			Corrective Maintenance
18	RECTIFY_GSTR	Rectify GSTR		L3	16.0			Corrective Maintenance	42	RECTIFY_STR_GEN_OUT	Rectify STR-GEN		L3	48.0			Corrective Maintenance
19	RECTIFY_AGB	Rectify AGB		L3	12.0			Corrective Maintenance	43	RECTIFY_STR_GEN_OUT	Rectify STR-GEN		L3	48.0			Corrective Maintenance
20	RECTIFY_IPMP	Rectify IPMP		L3	32.0			Corrective Maintenance	44	RECTIFY_HYD-PMP_OUT	Rectify HYD-PMP		L3	24.0			Corrective Maintenance
21	RECTIFY_AGB	Rectify AGB		L3	12.0			Corrective Maintenance	45								
22	RECTIFY_STR_GEN	Rectify STR-GEN		L3	48.0			Corrective Maintenance	46	OVERHAUL_OUT	Engine overhaul		L3	240.0			Preventive Maintenance
23	RECTIFY_HYD-PMP	Rectify HYD-PMP		L3	24.0			Corrective Maintenance									

Tabela B-29 – Tarefas de manutenção para os modelos de motor modular (OPUS10©).

TID	DESCR	TYPE	COST	LEVLID	DURN	(DURN)	DURNT	NOTE	TID	DESCR	TYPE	COST	LEVLID	DURN	(DURN)	DURNT	NOTE
Task identifier	Description	Task type	Direct cost per task	Maintenance level identifier	Duration [Hours]	Duration time dist	DURN Time dependent value identifier	User note	Task identifier	Description	Task type	Direct cost per task	Maintenance level identifier	Duration [Hours]	Duration time dist	DURN Time dependent value identifier	User note
		<RECTIFY>	<0.00>								<RECTIFY>	<0.00>					
1	REMOVE_REPLACE_ENGINE	Remove and replace engine	REPLACE	L1	15.0			Remove and replace	32	RECTIFY_STR_GEN	Rectify STR-GEN		L3	48.0			Corrective Maintenance
2	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	Remove and replace accessories	REPLACE	L1	5.0			Remove and replace	33	RECTIFY_HYD-PMP	Rectify HYD-PMP		L3	24.0			Corrective Maintenance
3	REMOVE_REPLACE_IGNITER	Remove and replace igniters	REPLACE	L1	1.0			Remove and replace	34	REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE_OUT	Remove and replace engine module	REPLACE	939.17	L2	0.0		Remove and replace
4	REMOVE_REPLACE_AGB	Remove and replace AGB	REPLACE	L1	12.0			Remove and replace	35	INSPECTION_OUT	Engine inspection		L2	48.0			Preventive Maintenance
5									36	CORROSION_OUT	Engine corrosion inspection		L2	16.0			Preventive Maintenance
6	REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	Remove and replace engine module	REPLACE	L2	21.0			Remove and replace	37	RECTIFY_TURBOJET_OUT	Rectify turbojet engine		L3	240.0			Corrective Maintenance
7									38	RECTIFY_ECU_OUT	Rectify ECU		L3	32.0			Corrective Maintenance
8	INSPECTION	Engine inspection		L2	48.0			Preventive Maintenance	39	RECTIFY_EFCU_OUT	Rectify EFCU		L3	40.0			Corrective Maintenance
9	CORROSION	Engine corrosion inspection		L2	16.0			Preventive Maintenance	40	RECTIFY_BDV_OUT	Rectify BDV		L3	20.0			Corrective Maintenance
10									41	RECTIFY_DNV_OUT	Rectify DNV		L3	24.0			Corrective Maintenance
11	RECTIFY_TURBOJET	Rectify turbojet engine		L3	240.0			Corrective Maintenance	42	RECTIFY_HTEXGR_OUT	Rectify HTEXGR		L3	23.0			Corrective Maintenance
12	RECTIFY_MOD1	Rectify engine module 1		L3	96.0			Corrective Maintenance	43	RECTIFY_OILTKFLTR_OUT	Rectify OILTKFLTR		L3	24.0			Corrective Maintenance
13	RECTIFY_MOD2	Rectify engine module 2		L3	70.0			Corrective Maintenance	44	RECTIFY_FLTR_OUT	Rectify FLTR		L3	16.0			Corrective Maintenance
14	RECTIFY_MOD3	Rectify engine module 3		L3	82.0			Corrective Maintenance	45	RECTIFY_GIBX_OUT	Rectify GIBX		L3	16.0			Corrective Maintenance
15	RECTIFY_MOD4	Rectify engine module 4		L3	34.0			Corrective Maintenance	46	OVERHAUL_MOD1_OUT	Overhaul engine module 1		L3	135.0			Preventive Maintenance
16									47	OVERHAUL_MOD3_OUT	Overhaul engine module 2		L3	100.0			Preventive Maintenance
17	OVERHAUL_MOD1	Overhaul engine module 1		L3	135.0			Preventive Maintenance	48	RECTIFY_IPMP_OUT	Rectify IPMP		L3	32.0			Corrective Maintenance
18	OVERHAUL_MOD3	Overhaul engine module 2		L3	100.0			Preventive Maintenance	49	RECTIFY_AGB_OUT	Rectify AGB		L3	12.0			Corrective Maintenance
19									50	RECTIFY_STR_GEN_OUT	Rectify STR-GEN		L3	48.0			Corrective Maintenance
20	RECTIFY_ECU	Rectify ECU		L3	32.0			Corrective Maintenance	51	RECTIFY_HYD-PMP_OUT	Rectify HYD-PMP		L3	24.0			Corrective Maintenance
21	RECTIFY_EFCU	Rectify EFCU		L3	40.0			Corrective Maintenance	52	RECTIFY_DNV_OUT	Rectify DNV		L3	24.0			Corrective Maintenance
22	RECTIFY_BDV	Rectify BDV		L3	20.0			Corrective Maintenance	53	RECTIFY_HTEXGR_OUT	Rectify HTEXGR		L3	23.0			Corrective Maintenance
23	RECTIFY_DNV	Rectify DNV		L3	24.0			Corrective Maintenance	54	RECTIFY_OILTKFLTR_OUT	Rectify OILTKFLTR		L3	24.0			Corrective Maintenance
24	RECTIFY_HTEXGR	Rectify HTEXGR		L3	23.0			Corrective Maintenance	55	RECTIFY_FLTR_OUT	Rectify FLTR		L3	16.0			Corrective Maintenance
25	RECTIFY_OILTKFLTR	Rectify OILTKFLTR		L3	24.0			Corrective Maintenance	56	RECTIFY_GIBX_OUT	Rectify GIBX		L3	16.0			Corrective Maintenance
26	RECTIFY_FLTR	Rectify FLTR		L3	16.0			Corrective Maintenance	57	RECTIFY_GSTR_OUT	Rectify GSTR		L3	16.0			Corrective Maintenance
27	RECTIFY_GIBX	Rectify GIBX		L3	16.0			Corrective Maintenance	58	RECTIFY_IPMP_OUT	Rectify IPMP		L3	32.0			Corrective Maintenance
28	RECTIFY_GSTR	Rectify GSTR		L3	16.0			Corrective Maintenance	59	RECTIFY_AGB_OUT	Rectify AGB		L3	12.0			Corrective Maintenance
29	RECTIFY_AGB	Rectify AGB		L3	12.0			Corrective Maintenance	60	RECTIFY_STR_GEN_OUT	Rectify STR-GEN		L3	48.0			Corrective Maintenance
30	RECTIFY_IPMP	Rectify IPMP		L3	32.0			Corrective Maintenance	61	RECTIFY_HYD-PMP_OUT	Rectify HYD-PMP		L3	24.0			Corrective Maintenance
31	RECTIFY_AGB	Rectify AGB		L3	12.0			Corrective Maintenance									

A Tabela B-30 e B-31, denominadas *TaskResource*, estabelecem os recursos requeridos e suas quantidades para as tarefas de manutenção dos modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. Os recursos requeridos e suas quantidades para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram modeladas de acordo com a Tabela B-32 e B-33.

Tabela B-30 – Recursos para as tarefas de manutenção dos modelos de motor não modular –  
continua (OPUS10©).

TID	RID	QTY	TID	RID	QTY	TID	RID	QTY
Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required	Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required	Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required
		<1.00>			<1.00>			<1.00>
1 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_TECHNICIAN	2.00	34 INSPECTION	L2_ENGINEERING_SUPPORT	67	RECTIFY_TURBOJET	VIDEOSCOPE	
2 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_ENGINEERING_SUPPORT		35 INSPECTION	L2_SPECIAL_TOOLS	68	RECTIFY_TURBOJET	L3_TRAINING	
3 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_SPECIAL_TOOLS		36 INSPECTION	VIDEOSCOPE	69	RECTIFY_TURBOJET	L3_MANUALS	
4 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_TRAINING		37 INSPECTION	L2_TRAINING	70	RECTIFY_TURBOJET	L3_WS_INFRA	
5 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_MANUALS		38 INSPECTION	L2_MANUALS	71	RECTIFY_TURBOJET	L3_CERTIFICATION	
6 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_BASE_INFRA		39 INSPECTION	L2_WS_INFRA	72			
7 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_CERTIFICATION		40 INSPECTION	L2_CERTIFICATION	73	RECTIFY_ECU	L3_TECHNICIAN	
8			41		74	RECTIFY_ECU	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
9 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_TECHNICIAN		42 CORROSION	L2_TECHNICIAN	2.00	RECTIFY_ECU	L3_SPECIAL_TOOLS	
10 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_ENGINEERING_SUPPORT		43 CORROSION	L2_ENGINEERING_SUPPORT	75	RECTIFY_ECU	ELECTRONIC_BENCH	
11 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_SPECIAL_TOOLS		44 CORROSION	L2_SPECIAL_TOOLS	76	RECTIFY_ECU	L3_TRAINING	
12 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_TRAINING		45 CORROSION	VIDEOSCOPE	77	RECTIFY_ECU	L3_MANUALS	
13 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_MANUALS		46 CORROSION	L2_TRAINING	78	RECTIFY_ECU	L3_WS_INFRA	
14 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_BASE_INFRA		47 CORROSION	L2_MANUALS	79	RECTIFY_ECU	L3_CERTIFICATION	
15 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_CERTIFICATION		48 CORROSION	L2_WS_INFRA	80	RECTIFY_ECU		
16			49 CORROSION	L2_CERTIFICATION	81			
17 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_TECHNICIAN		50		82	RECTIFY_EFCU	L3_TECHNICIAN	
18 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_ENGINEERING_SUPPORT		51 OVERHAUL	L3_TECHNICIAN	4.00	RECTIFY_EFCU	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
19 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_SPECIAL_TOOLS		52 OVERHAUL	L3_ENGINEERING_SUPPORT	84	RECTIFY_EFCU	L3_SPECIAL_TOOLS	
20 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_TRAINING		53 OVERHAUL	L3_SPECIAL_TOOLS	85	RECTIFY_EFCU	AIR_FUEL_BENCH	
21 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_MANUALS		54 OVERHAUL	ENGINE_TEST_BENCH	86	RECTIFY_EFCU	L3_TRAINING	
22 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_BASE_INFRA		55 OVERHAUL	BALANCING_MACHINE	87	RECTIFY_EFCU	L3_MANUALS	
23 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_CERTIFICATION		56 OVERHAUL	VIDEOSCOPE	88	RECTIFY_EFCU	L3_WS_INFRA	
24			57 OVERHAUL	L3_TRAINING	89	RECTIFY_EFCU	L3_CERTIFICATION	
25 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_TECHNICIAN	2.00	58 OVERHAUL	L3_MANUALS	90	RECTIFY_BDV	L3_TECHNICIAN	
26 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_ENGINEERING_SUPPORT		59 OVERHAUL	L3_WS_INFRA	91	RECTIFY_BDV	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
27 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_SPECIAL_TOOLS		60 OVERHAUL	L3_CERTIFICATION	92	RECTIFY_BDV	L3_SPECIAL_TOOLS	
28 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_TRAINING				93	RECTIFY_BDV	AIR_FUEL_BENCH	
29 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_MANUALS		62 RECTIFY_TURBOJET	L3_TECHNICIAN	4.00	RECTIFY_BDV	L3_TRAINING	
30 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_BASE_INFRA		63 RECTIFY_TURBOJET	L3_ENGINEERING_SUPPORT	95	RECTIFY_BDV	L3_MANUALS	
31 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_CERTIFICATION		64 RECTIFY_TURBOJET	L3_SPECIAL_TOOLS	96	RECTIFY_BDV	L3_WS_INFRA	
32			65 RECTIFY_TURBOJET	ENGINE_TEST_BENCH	97	RECTIFY_BDV	L3_CERTIFICATION	
33 INSPECTION	L2_TECHNICIAN	2.00	66 RECTIFY_TURBOJET	BALANCING_MACHINE	98	RECTIFY_BDV		
					99			

Tabela B-31 – Recursos para as tarefas de manutenção dos modelos de motor não modular –  
continuação (OPUS10©).

TID	RID	QTY	TID	RID	QTY	TID	RID	QTY
Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required	Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required	Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required
		<1.00>			<1.00>			<1.00>
100 RECTIFY_DNV	L3_TECHNICIAN		133 RECTIFY_FFLTR	L3_WS_INFRA	166	RECTIFY_FPMP	AIR_FUEL_BENCH	
101 RECTIFY_DNV	L3_ENGINEERING_SUPPORT		134 RECTIFY_FFLTR	L3_CERTIFICATION	167	RECTIFY_FPMP	L3_TRAINING	
102 RECTIFY_DNV	L3_SPECIAL_TOOLS		135		168	RECTIFY_FPMP	L3_MANUALS	
103 RECTIFY_DNV	AIR_FUEL_BENCH		136 RECTIFY_IGBX	L3_TECHNICIAN	169	RECTIFY_FPMP	L3_WS_INFRA	
104 RECTIFY_DNV	L3_TRAINING		137 RECTIFY_IGBX	L3_ENGINEERING_SUPPORT	170	RECTIFY_FPMP	L3_CERTIFICATION	
105 RECTIFY_DNV	L3_MANUALS		138 RECTIFY_IGBX	L3_SPECIAL_TOOLS	171			
106 RECTIFY_DNV	L3_WS_INFRA		139 RECTIFY_IGBX	ELECTRICAL_BENCH	172	RECTIFY_LBPMP	L3_TECHNICIAN	
107 RECTIFY_DNV	L3_CERTIFICATION		140 RECTIFY_IGBX	L3_TRAINING	173	RECTIFY_LBPMP	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
108			141 RECTIFY_IGBX	L3_MANUALS	174	RECTIFY_LBPMP	L3_SPECIAL_TOOLS	
109 RECTIFY_HTEXGR	L3_TECHNICIAN		142 RECTIFY_IGBX	L3_WS_INFRA	175	RECTIFY_LBPMP	LUB_HYD_BENCH	
110 RECTIFY_HTEXGR	L3_ENGINEERING_SUPPORT		143 RECTIFY_IGBX	L3_CERTIFICATION	176	RECTIFY_LBPMP	L3_TRAINING	
111 RECTIFY_HTEXGR	L3_SPECIAL_TOOLS		144		177	RECTIFY_LBPMP	L3_MANUALS	
112 RECTIFY_HTEXGR	AIR_FUEL_BENCH		145 RECTIFY_IGTR	L3_TECHNICIAN	178	RECTIFY_LBPMP	L3_WS_INFRA	
113 RECTIFY_HTEXGR	L3_TRAINING		146 RECTIFY_IGTR	L3_ENGINEERING_SUPPORT	179	RECTIFY_LBPMP	L3_CERTIFICATION	
114 RECTIFY_HTEXGR	L3_MANUALS		147 RECTIFY_IGTR	L3_SPECIAL_TOOLS	180			
115 RECTIFY_HTEXGR	L3_WS_INFRA		148 RECTIFY_IGTR	ELECTRICAL_BENCH	181	RECTIFY_STR-GEN	L3_TECHNICIAN	
116 RECTIFY_HTEXGR	L3_CERTIFICATION		149 RECTIFY_IGTR	L3_TRAINING	182	RECTIFY_STR-GEN	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
117			150 RECTIFY_IGTR	L3_MANUALS	183	RECTIFY_STR-GEN	L3_SPECIAL_TOOLS	
118 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_TECHNICIAN		151 RECTIFY_IGTR	L3_WS_INFRA	184	RECTIFY_STR-GEN	ELECTRICAL_BENCH	
119 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_ENGINEERING_SUPPORT		152 RECTIFY_IGTR	L3_CERTIFICATION	185	RECTIFY_STR-GEN	L3_TRAINING	
120 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_SPECIAL_TOOLS		153		186	RECTIFY_STR-GEN	L3_MANUALS	
121 RECTIFY_OILTK-FLTR	LUB_HYD_BENCH		154 RECTIFY_AGB	L3_TECHNICIAN	2.00	RECTIFY_STR-GEN	L3_WS_INFRA	
122 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_TRAINING		155 RECTIFY_AGB	L3_ENGINEERING_SUPPORT	187	RECTIFY_STR-GEN	L3_CERTIFICATION	
123 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_MANUALS		156 RECTIFY_AGB	L3_SPECIAL_TOOLS	188			
124 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_WS_INFRA		157 RECTIFY_AGB	GBOX_BENCH	189			
125 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_CERTIFICATION		158 RECTIFY_AGB	L3_TRAINING	190	RECTIFY_HYD-PMP	L3_TECHNICIAN	
126			159 RECTIFY_AGB	L3_MANUALS	191	RECTIFY_HYD-PMP	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
127 RECTIFY_FFLTR	L3_TECHNICIAN		160 RECTIFY_AGB	L3_WS_INFRA	192	RECTIFY_HYD-PMP	L3_SPECIAL_TOOLS	
128 RECTIFY_FFLTR	L3_ENGINEERING_SUPPORT		161 RECTIFY_AGB	L3_CERTIFICATION	193	RECTIFY_HYD-PMP	LUB_HYD_BENCH	
129 RECTIFY_FFLTR	L3_SPECIAL_TOOLS				194	RECTIFY_HYD-PMP	L3_TRAINING	
130 RECTIFY_FFLTR	LUB_HYD_BENCH		163 RECTIFY_FPMP	L3_TECHNICIAN	195	RECTIFY_HYD-PMP	L3_MANUALS	
131 RECTIFY_FFLTR	L3_TRAINING		164 RECTIFY_FPMP	L3_ENGINEERING_SUPPORT	196	RECTIFY_HYD-PMP	L3_WS_INFRA	
132 RECTIFY_FFLTR	L3_MANUALS		165 RECTIFY_FPMP	L3_SPECIAL_TOOLS	197	RECTIFY_HYD-PMP	L3_CERTIFICATION	

Tabela B-32 – Recursos para as tarefas de manutenção dos modelos de motor modular –  
continua (OPUS10©).

TID	RID	QTY	TID	RID	QTY	TID	RID	QTY
Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required	Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required	Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required
		<1,00>			<1,00>			<1,00>
1 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_TECHNICIAN	2,00	46 INSPECTION	VIDEOSCOPE		91 RECTIFY_TURBOJET	L3_TRAINING	
2 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_ENGINEERING_SUPPORT		47 INSPECTION	L2_TRAINING		92 RECTIFY_TURBOJET	L3_MANUALS	
3 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_ENGINE_TEST_CASE		48 INSPECTION	L2_MANUALS		93 RECTIFY_TURBOJET	L3_WS_INFRA	
4 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_SPECIAL_TOOLS		49 INSPECTION	L2_WS_INFRA		94 RECTIFY_TURBOJET	L3_CERTIFICATION	
5 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_TRAINING		50 INSPECTION	L2_CERTIFICATION		95		
6 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_MANUALS		51			96 RECTIFY_MOD1	L3_TECHNICIAN	4,00
7 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_BASE_INFRA		52 CORROSION	L2_TECHNICIAN	2,00	97 RECTIFY_MOD1	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
8 REMOVE_REPLACE_ENGINE	L1_CERTIFICATION		53 CORROSION	L2_ENGINEERING_SUPPORT		98 RECTIFY_MOD1	L3_SPECIAL_TOOLS	
9			54 CORROSION	L2_SPECIAL_TOOLS		99 RECTIFY_MOD1	MODULE_TEST_KIT	
10 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_TECHNICIAN		55 CORROSION	VIDEOSCOPE		100 RECTIFY_MOD1	ENGINE_TEST_BENCH	
11 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_ENGINEERING_SUPPORT		56 CORROSION	L2_TRAINING		101 RECTIFY_MOD1	BALANCING_MACHINE	
12 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_SPECIAL_TOOLS		57 CORROSION	L2_MANUALS		102 RECTIFY_MOD1	VIDEOSCOPE	
13 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_TRAINING		58 CORROSION	L2_WS_INFRA		103 RECTIFY_MOD1	L3_TRAINING	
14 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_MANUALS		59 CORROSION	L2_CERTIFICATION		104 RECTIFY_MOD1	L3_MANUALS	
15 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_BASE_INFRA		60			105 RECTIFY_MOD1	L3_WS_INFRA	
16 REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	L1_CERTIFICATION		61 OVERHAUL_MOD1	L3_TECHNICIAN	4,00	106 RECTIFY_MOD1	L3_CERTIFICATION	
17			62 OVERHAUL_MOD1	L3_ENGINEERING_SUPPORT		107		
18 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_TECHNICIAN		63 OVERHAUL_MOD1	L3_SPECIAL_TOOLS		108 RECTIFY_MOD2	L3_TECHNICIAN	4,00
19 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_ENGINEERING_SUPPORT		64 OVERHAUL_MOD1	MODULE_TEST_KIT		109 RECTIFY_MOD2	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
20 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_SPECIAL_TOOLS		65 OVERHAUL_MOD1	ENGINE_TEST_BENCH		110 RECTIFY_MOD2	L3_SPECIAL_TOOLS	
21 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_TRAINING		66 OVERHAUL_MOD1	BALANCING_MACHINE		111 RECTIFY_MOD2	MODULE_TEST_KIT	
22 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_MANUALS		67 OVERHAUL_MOD1	VIDEOSCOPE		112 RECTIFY_MOD2	ENGINE_TEST_BENCH	
23 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_BASE_INFRA		68 OVERHAUL_MOD1	L2_TRAINING		113 RECTIFY_MOD2	VIDEOSCOPE	
24 REMOVE_REPLACE_IGNITER	L1_CERTIFICATION		69 OVERHAUL_MOD1	L3_MANUALS		114 RECTIFY_MOD2	L3_TRAINING	
25			70 OVERHAUL_MOD1	L3_WS_INFRA		115 RECTIFY_MOD2	L3_MANUALS	
26 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_TECHNICIAN	2,00	71 OVERHAUL_MOD1	L3_CERTIFICATION		116 RECTIFY_MOD2	L3_WS_INFRA	
27 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_ENGINEERING_SUPPORT		72			117 RECTIFY_MOD2	L3_CERTIFICATION	
28 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_SPECIAL_TOOLS		73 OVERHAUL_MOD3	L3_TECHNICIAN	4,00	118		
29 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_TRAINING		74 OVERHAUL_MOD3	L3_ENGINEERING_SUPPORT		119 RECTIFY_MOD3	L3_TECHNICIAN	4,00
30 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_MANUALS		75 OVERHAUL_MOD3	L3_SPECIAL_TOOLS		120 RECTIFY_MOD3	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
31 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_BASE_INFRA		76 OVERHAUL_MOD3	MODULE_TEST_KIT		121 RECTIFY_MOD3	L3_SPECIAL_TOOLS	
32 REMOVE_REPLACE_AGB	L1_CERTIFICATION		77 OVERHAUL_MOD3	ENGINE_TEST_BENCH		122 RECTIFY_MOD3	MODULE_TEST_KIT	
33			78 OVERHAUL_MOD3	BALANCING_MACHINE		123 RECTIFY_MOD3	ENGINE_TEST_BENCH	
34 REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	L2_TECHNICIAN	2,00	79 OVERHAUL_MOD3	VIDEOSCOPE		124 RECTIFY_MOD3	BALANCING_MACHINE	
35 REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	L2_ENGINEERING_SUPPORT		80 OVERHAUL_MOD3	L3_TRAINING		125 RECTIFY_MOD3	VIDEOSCOPE	
36 REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	L2_SPECIAL_TOOLS		81 OVERHAUL_MOD3	L3_MANUALS		126 RECTIFY_MOD3	L3_TRAINING	
37 REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	MODULE_TOOLS_STANDS		82 OVERHAUL_MOD3	L3_WS_INFRA		127 RECTIFY_MOD3	L3_MANUALS	
38 REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	L2_TRAINING		83 OVERHAUL_MOD3	L3_CERTIFICATION		128 RECTIFY_MOD3	L3_WS_INFRA	
39 REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	L2_MANUALS		84			129 RECTIFY_MOD3	L3_CERTIFICATION	
40 REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	L2_WS_INFRA		85 RECTIFY_TURBOJET	L3_TECHNICIAN	4,00	130		
41 REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	L2_CERTIFICATION		86 RECTIFY_TURBOJET	L3_ENGINEERING_SUPPORT		131 RECTIFY_MOD4	L3_TECHNICIAN	4,00
42			87 RECTIFY_TURBOJET	L3_SPECIAL_TOOLS		132 RECTIFY_MOD4	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
43 INSPECTION	L2_TECHNICIAN	2,00	88 RECTIFY_TURBOJET	ENGINE_TEST_BENCH		133 RECTIFY_MOD4	L3_SPECIAL_TOOLS	
44 INSPECTION	L2_ENGINEERING_SUPPORT		89 RECTIFY_TURBOJET	BALANCING_MACHINE		134 RECTIFY_MOD4	MODULE_TEST_KIT	
45 INSPECTION	L2_SPECIAL_TOOLS		90 RECTIFY_TURBOJET	VIDEOSCOPE		135 RECTIFY_MOD4	ENGINE_TEST_BENCH	

Tabela B-33 – Recursos para as tarefas de manutenção dos modelos de motor modular –  
continuação (OPUS10©).

TID	RID	QTY	TID	RID	QTY	TID	RID	QTY
Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required	Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required	Task identifier	Resource identifier	Resource quantity required
		<1,00>			<1,00>			<1,00>
136 RECTIFY_MOD4	VIDEOSCOPE		181 RECTIFY_HTEXGR	AIR_FUEL_BENCH		226 RECTIFY_AGB	GBOX_BENCH	
137 RECTIFY_MOD4	L3_TRAINING		182 RECTIFY_HTEXGR	L3_TRAINING		227 RECTIFY_AGB	L3_TRAINING	
138 RECTIFY_MOD4	L3_MANUALS		183 RECTIFY_HTEXGR	L3_WS_INFRA		228 RECTIFY_AGB	L3_MANUALS	
139 RECTIFY_MOD4	L3_WS_INFRA		184 RECTIFY_HTEXGR	L3_WS_INFRA		229 RECTIFY_AGB	L3_WS_INFRA	
140 RECTIFY_MOD4	L3_CERTIFICATION		185 RECTIFY_HTEXGR	L3_CERTIFICATION		230 RECTIFY_AGB	L3_CERTIFICATION	
141			186			231		
142 RECTIFY_ECU	L3_TECHNICIAN		187 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_TECHNICIAN		232 RECTIFY_FPMP	L3_TECHNICIAN	
143 RECTIFY_ECU	L3_ENGINEERING_SUPPORT		188 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_ENGINEERING_SUPPORT		233 RECTIFY_FPMP	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
144 RECTIFY_ECU	L3_SPECIAL_TOOLS		189 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_SPECIAL_TOOLS		234 RECTIFY_FPMP	L3_SPECIAL_TOOLS	
145 RECTIFY_ECU	ELECTRONIC_BENCH		190 RECTIFY_OILTK-FLTR	LUB_HYD_BENCH		235 RECTIFY_FPMP	AIR_FUEL_BENCH	
146 RECTIFY_ECU	L3_TRAINING		191 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_TRAINING		236 RECTIFY_FPMP	L3_TRAINING	
147 RECTIFY_ECU	L3_MANUALS		192 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_MANUALS		237 RECTIFY_FPMP	L3_MANUALS	
148 RECTIFY_ECU	L3_WS_INFRA		193 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_WS_INFRA		238 RECTIFY_FPMP	L3_WS_INFRA	
149 RECTIFY_ECU	L3_CERTIFICATION		194 RECTIFY_OILTK-FLTR	L3_CERTIFICATION		239 RECTIFY_FPMP	L3_CERTIFICATION	
150			195			240		
151 RECTIFY_EFCU	L3_TECHNICIAN		196 RECTIFY_FFLTR	L3_TECHNICIAN		241 RECTIFY_LBPMP	L3_TECHNICIAN	
152 RECTIFY_EFCU	L3_ENGINEERING_SUPPORT		197 RECTIFY_FFLTR	L3_ENGINEERING_SUPPORT		242 RECTIFY_LBPMP	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
153 RECTIFY_EFCU	L3_SPECIAL_TOOLS		198 RECTIFY_FFLTR	L3_SPECIAL_TOOLS		243 RECTIFY_LBPMP	L3_SPECIAL_TOOLS	
154 RECTIFY_EFCU	AIR_FUEL_BENCH		199 RECTIFY_FFLTR	LUB_HYD_BENCH		244 RECTIFY_LBPMP	LUB_HYD_BENCH	
155 RECTIFY_EFCU	L3_TRAINING		200 RECTIFY_FFLTR	L3_TRAINING		245 RECTIFY_LBPMP	L3_TRAINING	
156 RECTIFY_EFCU	L3_MANUALS		201 RECTIFY_FFLTR	L3_MANUALS		246 RECTIFY_LBPMP	L3_MANUALS	
157 RECTIFY_EFCU	L3_WS_INFRA		202 RECTIFY_FFLTR	L3_WS_INFRA		247 RECTIFY_LBPMP	L3_WS_INFRA	
158 RECTIFY_EFCU	L3_CERTIFICATION		203 RECTIFY_FFLTR	L3_CERTIFICATION		248 RECTIFY_LBPMP	L3_CERTIFICATION	
159			204			249		
160 RECTIFY_BDV	L3_TECHNICIAN		205 RECTIFY_IBGX	L3_TECHNICIAN		250 RECTIFY_STR-GEN	L3_TECHNICIAN	
161 RECTIFY_BDV	L3_ENGINEERING_SUPPORT		206 RECTIFY_IBGX	L3_ENGINEERING_SUPPORT		251 RECTIFY_STR-GEN	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
162 RECTIFY_BDV	L3_SPECIAL_TOOLS		207 RECTIFY_IBGX	L3_SPECIAL_TOOLS		252 RECTIFY_STR-GEN	L3_SPECIAL_TOOLS	
163 RECTIFY_BDV	AIR_FUEL_BENCH		208 RECTIFY_IBGX	ELECTRICAL_BENCH		253 RECTIFY_STR-GEN	ELECTRICAL_BENCH	
164 RECTIFY_BDV	L3_TRAINING		209 RECTIFY_IBGX	L3_TRAINING		254 RECTIFY_STR-GEN	L3_TRAINING	
165 RECTIFY_BDV	L3_MANUALS		210 RECTIFY_IBGX	L3_MANUALS		255 RECTIFY_STR-GEN	L3_MANUALS	
166 RECTIFY_BDV	L3_WS_INFRA		211 RECTIFY_IBGX	L3_WS_INFRA		256 RECTIFY_STR-GEN	L3_WS_INFRA	
167 RECTIFY_BDV	L3_CERTIFICATION		212 RECTIFY_IBGX	L3_CERTIFICATION		257 RECTIFY_STR-GEN	L3_CERTIFICATION	
168			213			258		
169 RECTIFY_DNV	L3_TECHNICIAN		214 RECTIFY_IJTR	L3_TECHNICIAN		259 RECTIFY_HYD-PMP	L3_TECHNICIAN	
170 RECTIFY_DNV	L3_ENGINEERING_SUPPORT		215 RECTIFY_IJTR	L3_ENGINEERING_SUPPORT		260 RECTIFY_HYD-PMP	L3_ENGINEERING_SUPPORT	
171 RECTIFY_DNV	L3_SPECIAL_TOOLS		216 RECTIFY_IJTR	L3_SPECIAL_TOOLS		261 RECTIFY_HYD-PMP	L3_SPECIAL_TOOLS	
172 RECTIFY_DNV	AIR_FUEL_BENCH		217 RECTIFY_IJTR	ELECTRICAL_BENCH		262 RECTIFY_HYD-PMP	LUB_HYD_BENCH	
173 RECTIFY_DNV	L3_TRAINING		218 RECTIFY_IJTR	L3_TRAINING		263 RECTIFY_HYD-PMP	L3_TRAINING	
174 RECTIFY_DNV	L3_MANUALS		219 RECTIFY_IJTR	L3_MANUALS		264 RECTIFY_HYD-PMP	L3_MANUALS	
175 RECTIFY_DNV	L3_WS_INFRA		220 RECTIFY_IJTR	L3_WS_INFRA		265 RECTIFY_HYD-PMP	L3_WS_INFRA	
176 RECTIFY_DNV	L3_CERTIFICATION		221 RECTIFY_IJTR	L3_CERTIFICATION		266 RECTIFY_HYD-PMP	L3_CERTIFICATION	
177			222					
178 RECTIFY_HTEXGR	L3_TECHNICIAN		223 RECTIFY_AGB	L3_TECHNICIAN	2,00			
179 RECTIFY_HTEXGR	L3_ENGINEERING_SUPPORT		224 RECTIFY_AGB	L3_ENGINEERING_SUPPORT				
180 RECTIFY_HTEXGR	L3_SPECIAL_TOOLS		225 RECTIFY_AGB	L3_SPECIAL_TOOLS				

A Tabela B-34, denominada *MaintenanceActivity*, estabelece as atividades de manutenção dos modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. As atividades de manutenção para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram modeladas de acordo com a Tabela B-35.

Tabela B-34 – Atividades de manutenção dos modelos de motor não modular (OPUS10©).

	MAID	DESCR	NOTE
	Maintenance activity identifier	Description	User note
1	ENGINE_OVERHAUL	Engine overhaul	
2	ENGINE_INSPECTION	Engine inspection	
3	CORROSION_INSPECTION	Engine corrosion inspection	
4	GBOX_OVERHAUL	Accessory Gearbox overhaul	

Tabela B-35 – Atividades de manutenção dos modelos de motor modular (OPUS10©).

	MAID	DESCR	NOTE
	Maintenance activity identifier	Description	User note
1	ENGINE_INSPECTION	Engine inspection	
2	CORROSION_INSPECTION	Engine corrosion inspection	
3	GBOX_OVERHAUL	Accessory Gearbox overhaul	
4	MOD1_OVERHAUL	Engine module 1 overhaul	
5	MOD3_OVERHAUL	Engine module 3 overhaul	

A Tabela B-36, denominada *MaintenanceActivityContent*, estabelece o conjunto de tarefas de cada atividade de manutenção dos modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. O conjunto de tarefas de cada atividade de manutenção para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram modelados de acordo com a Tabela B-37.

Tabela B-36 – Tarefas das atividades de manutenção dos modelos de motor não modular (OPUS10©).

	MAID	COID	SMAID	PROB	NOTE
	Maintenance activity identifier	Component identifier	Task, task package or maintenance activity identifier	Probability	User note
				<1.000>	
1	ENGINE_INSPECTION	N-MOD-TURBOJET	INSPECTION		
2	ENGINE_INSPECTION	HTEXGR	RECTIFY_HTEXGR	0.200	
3	ENGINE_INSPECTION	IGTR	RECTIFY_IGTR	0.100	
4	ENGINE_INSPECTION	DNV	RECTIFY_DNV	0.100	
5					
6	CORROSION_INSPECTION	N-MOD-TURBOJET	INSPECTION		
7					
8	ENGINE_OVERHAUL	N-MOD-TURBOJET	OVERHAUL		
9	ENGINE_OVERHAUL	FFLTR	<REORDER>		
10	ENGINE_OVERHAUL	IGTR	<REORDER>		
11	ENGINE_OVERHAUL	BDV	RECTIFY_BDV	0.500	
12	ENGINE_OVERHAUL	DNV	RECTIFY_DNV	0.300	
13	ENGINE_OVERHAUL	HTEXGR	RECTIFY_HTEXGR	0.300	
14	ENGINE_OVERHAUL	OILTK-FLTR	RECTIFY_OILTK-FLTR	0.500	
15	ENGINE_OVERHAUL	STR-GEN	RECTIFY_STR-GEN	0.500	
16					
17	GBOX_OVERHAUL	AGB	RECTIFY_AGB		

Tabela B-37 – Tarefas das atividades de manutenção dos modelos de motor modular (OPUS10©).

	MAID	COID	SMAID	PROB	NOTE
	Maintenance activity identifier	Component identifier	Task, task package or maintenance activity identifier	Probability	User note
				<1.000>	
1	ENGINE_INSPECTION	MOD-TURBOJET	INSPECTION		
2	ENGINE_INSPECTION	HTEXGR	RECTIFY_HTEXGR	0,200	
3	ENGINE_INSPECTION	IGTR	RECTIFY_IGTR	0,100	
4	ENGINE_INSPECTION	DNV	RECTIFY_DNV	0,100	
5	ENGINE_INSPECTION	ENG_MOD2	RECTIFY_MOD2	0,200	
6	ENGINE_INSPECTION	ENG_MOD4	RECTIFY_MOD4	0,400	
7					
8	CORROSION_INSPECTION	MOD-TURBOJET	INSPECTION		
9					
10	MOD1_OVERHAUL	ENG_MOD1	OVERHAUL_MOD1		
11					
12	MOD3_OVERHAUL	ENG_MOD3	OVERHAUL_MOD3		
13	MOD3_OVERHAUL	FFLTR	<REORDER>		
14	MOD3_OVERHAUL	IGTR	<REORDER>		
15	MOD3_OVERHAUL	BDV	RECTIFY_BDV	0,500	
16	MOD3_OVERHAUL	DNV	RECTIFY_DNV	0,300	
17	MOD3_OVERHAUL	HTEXGR	RECTIFY_HTEXGR	0,300	
18	MOD3_OVERHAUL	OILTK-FLTR	RECTIFY_OILTK-FLTR	0,500	
19	MOD3_OVERHAUL	STR-GEN	RECTIFY_STR-GEN	0,500	
20	MOD3_OVERHAUL	ENG_MOD4	RECTIFY_MOD4	0,300	
21					
22	GBOX_OVERHAUL	AGB	RECTIFY_AGB		

## B.6 Modelagem dos recursos de manutenção

A Tabela B-38, denominada *Resource*, estabelece os recursos de manutenção dos modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. Os recursos de manutenção para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram modelados de acordo com a Tabela B-39.

Tabela B-38 – Recursos de manutenção dos modelos de motor não modular (OPUS10©).

RID	DESCR	PRICE	SUSTC	RESHC	TLEN	TYPE	MUTILF	NOTE
Resource identifier	Description	Price	Annual unit sustainment cost	Resource usage hourly cost	Technical life length	Resource type	Maximum utilization factor	User note
		<0.000>	<0.0>	<0.00>	[Years]	<SPECIAL>	<1.000>	
1	L1_TECHNICIAN		13000.0	130.00				The annual sustainment is 10 times the hourly cost The annual sustainment is 10 times the hourly cost The annual sustainment is 10 times the hourly cost
2	L2_TECHNICIAN		14000.0	140.00				
3	L3_TECHNICIAN		15000.0	150.00				
4								
5	L1_ENGINEERING_SUPPORT		375000.0			ENABLER		Every year support
6	L2_ENGINEERING_SUPPORT		380000.0			ENABLER		Every year support
7	L3_ENGINEERING_SUPPORT		395000.0			ENABLER		Every year support
8								
9	L1_SPECIAL_TOOLS	30000.000	900.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
10	L2_SPECIAL_TOOLS	45000.000	1350.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
11	L3_SPECIAL_TOOLS	85000.000	2550.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
12								
13	VIDEOSCOPE	25000.000	750.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
14	ENGINE_TEST_BENCH	8000000.000	240000.0	300.00		ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
15	BALANCING_MACHINE	190000.000	5700.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
16	GBOX_BENCH	48000.000	1140.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
17	ELECTRICAL_BENCH	52000.000	1560.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
18	ELECTRONIC_BENCH	20000.000	600.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
19	AIR_FUEL_BENCH	30000.000	900.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
20	LUB_HYD_BENCH	32000.000	960.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
21								
22	L1_TRAINING	8000.000	8000.0			ENABLER		Every year training
23	L2_TRAINING	10000.000	10000.0			ENABLER		Every year training
24	L3_TRAINING	12000.000	12000.0			ENABLER		Every year training
25								
26	L1_MANUALS	15000.000	450.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
27	L2_MANUALS	17000.000	510.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
28	L3_MANUALS	19000.000	570.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
29								
30	L1_BASE_INFRA	3000000.000	90000.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
31	L2_WS_INFRA	3500000.000	105000.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
32	L3_WS_INFRA	4000000.000	120000.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
33								
34	L1_CERTIFICATION	45000.000	1350.0			ENABLER		Annual costs to maintain the certification (3% of certification cost)
35	L2_CERTIFICATION	50000.000	1500.0			ENABLER		Annual costs to maintain the certification (3% of certification cost)
36	L3_CERTIFICATION	60000.000	18000.0			ENABLER		Annual costs to maintain the certification (3% of certification cost)

Tabela B-39 – Recursos de manutenção dos modelos de motor modular (OPUS10©).

RID	DESCR	PRICE	SUSTC	RESHC	TLEN	TYPE	MUTILF	NOTE
Resource identifier	Description	Price	Annual unit sustainment cost	Resource usage hourly cost	Technical life length	Resource type	Maximum utilization factor	User note
		<0.000>	<0.0>	<0.00>	[Years]	<SPECIAL>	<1.000>	
1	L1_TECHNICIAN		13000.0	130.00				The annual sustainment is 10 times the hourly cost The annual sustainment is 10 times the hourly cost The annual sustainment is 10 times the hourly cost
2	L2_TECHNICIAN		14000.0	140.00				
3	L3_TECHNICIAN		15000.0	150.00				
4								
5	L1_ENGINEERING_SUPPORT		375000.0			ENABLER		Every year support
6	L2_ENGINEERING_SUPPORT		380000.0			ENABLER		Every year support
7	L3_ENGINEERING_SUPPORT		395000.0			ENABLER		Every year support
8								
9	L1_SPECIAL_TOOLS	35100.000	1053.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
10	L2_SPECIAL_TOOLS	52650.000	1579.5			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
11	L3_SPECIAL_TOOLS	99450.000	2983.5			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
12								
13	L1_ENGINE_TEST_CASE	180000.000	5400.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
14	MODULE_TOOLS_STANDS	350000.000	10500.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
15	MODULE_TEST_KIT	950000.000	28500.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
16	VIDEOSCOPE	25000.000	750.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
17	ENGINE_TEST_BENCH	8000000.000	240000.0	300.00		ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
18	BALANCING_MACHINE	190000.000	5700.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
19	GBOX_BENCH	48000.000	1140.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
20	ELECTRICAL_BENCH	52000.000	1560.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
21	ELECTRONIC_BENCH	20000.000	600.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
22	AIR_FUEL_BENCH	30000.000	900.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
23	LUB_HYD_BENCH	32000.000	960.0					Annual sustainment cost is 3% of resource price
24								
25	L1_TRAINING	9600.000	9600.0			ENABLER		Every year training
26	L2_TRAINING	12000.000	12000.0			ENABLER		Every year training
27	L3_TRAINING	14400.000	14400.0			ENABLER		Every year training
28								
29	L1_MANUALS	18000.000	540.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
30	L2_MANUALS	20400.000	612.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
31	L3_MANUALS	22800.000	684.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
32								
33	L1_BASE_INFRA	3000000.000	90000.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
34	L2_WS_INFRA	3500000.000	105000.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
35	L3_WS_INFRA	4000000.000	120000.0			ENABLER		Annual sustainment cost is 3% of resource price
36								
37	L1_CERTIFICATION	45000.000	1350.0			ENABLER		Annual costs to maintain the certification (3% of certification cost)
38	L2_CERTIFICATION	50000.000	1500.0			ENABLER		Annual costs to maintain the certification (3% of certification cost)
39	L3_CERTIFICATION	60000.000	18000.0			ENABLER		Annual costs to maintain the certification (3% of certification cost)

## B.7 Modelagem da estrutura de suporte

A Tabela B-40, denominada *Station*, define as estações da estrutura de suporte e é comum a todos os modelos.

Tabela B-40 – Estações da estrutura de suporte (OPUS10©).

	STID	DESCR	QTY	TYPE	LEVL	LINDX	LGID	CUNIT	CVAL
	Station identifier	Description	Total quantity	Type	Level in support org.	Level index in support org.	Lateral group identifier	Storage cost per unit	Storage cost per value
			<1>	<DEPOT>				<0,00>	<0,000>
1	WORKSHOP			WS	C				
2	CENTRAL			DEPOT	B				0,010
3	BASE ALFA			STORE	A	1			0,015
4	BASE BETA			STORE	A	2			0,015
5	BASE CHARLIE			STORE	A	3			0,015
6	BASE DELTA			STORE	A	4			0,015

A Tabela B-41, denominada *StationStructure*, define o relacionamento das estações e as características de tempo e custo de transporte entre elas. Esta tabela é comum a todos os modelos.

Tabela B-41 – Relacionamento das estações da estrutura de suporte (OPUS10©).

	STID	MSTID	TFRMS	TTOMS	CFRMS	CTOMS
	Station identifier	Mother station identifier	Time from mother station	Time to mother station	Cost from mother station	Cost to mother station
			[Hours]	[Hours]	<0,00>	<0,00>
1	BASE ALFA	CENTRAL	36,0	36,0	2800,00	2800,00
2	BASE BETA	CENTRAL	24,0	24,0	2200,00	2200,00
3	BASE CHARLIE	CENTRAL	24,0	24,0	2200,00	2200,00
4	BASE DELTA	CENTRAL	36,0	36,0	2800,00	2800,00
5	CENTRAL	WORKSHOP	16,0	16,0	1800,00	1800,00

A Tabela B-42, denominada *MaintenanceCapability*, define a alocação dos níveis de manutenção dentro da estrutura de suporte. Esta tabela é comum a todos os modelos.

Tabela B-42 – Alocação dos níveis de manutenção na estrutura de suporte (OPUS10©).

	COGID	SGID	LEVLID	ENDBL	NOTE
	Component group identifier	Station group identifier	Maintenance level identifier (inclusive)	Endurance blocked (inclusive)	User note
				<Y>	
1	M_UAV	BASES	L1		

A Tabela B-43, denominada *ReorderCapability*, aloca a capacidade de compra e os custos e prazos associados. Esta tabela é comum a todos os modelos.

Tabela B-43 – Alocação de capacidade de compra (OPUS10©).

	IID	STID	LEADT	LEADTD	LEADTT	ORDSC
	Item identifier	Station identifier	Lead time [Hours]	Lead time time distr	LEADT Time dependent value identifier	Ordering setup cost <0.00>
1	IGTR	CENTRAL	300.0			150.00
2	FFLTR	CENTRAL	300.0			150.00

A Tabela B-44, denominada *TaskStationData*, define os atrasos administrativos das tarefas de manutenção em cada estação da estrutura de suporte para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. Os atrasos administrativos das tarefas de manutenção para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram modelados de acordo com a Tabela B-45.

Tabela B-44 – Atrasos administrativos das tarefas de manutenção nas estações da estrutura de suporte para os modelos de motor não modular (OPUS10©).

CUID	STID	TIID	ADLTU		CUID	STID	TIID	ADLTU			
			Administrative delay time unscheduled [Hours] <0.0>	Administrative delay time scheduled [Hours] <0.0>				Administrative delay time unscheduled [Hours] <0.0>	Administrative delay time scheduled [Hours] <0.0>		
1	N-MOD-TURBOJET	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ENGINE	3.5	2.0	33	AGB	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_AGB	3.0	1.5
2	N-MOD-TURBOJET	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ENGINE	3.5	2.0	34	IGTR	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_IGNITER	0.5	
3	N-MOD-TURBOJET	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ENGINE	3.5	2.0	35					
4	N-MOD-TURBOJET	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ENGINE	3.5	2.0	36	ECU	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
5						37	EFCU	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
6	ECU	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	38	BDV	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
7	EFCU	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	39	DNV	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
8	BDV	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	40	HTEXGR	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
9	DNV	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	41	OILTK-FLTR	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
10	HTEXGR	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	42	FFLTR	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
11	OILTK-FLTR	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	43	IGBX	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
12	FFLTR	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	44	FPMP	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
13	IGBX	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	45	LBPMP	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
14	FPMP	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	46	STR-GEN	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
15	LBPMP	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	47	HYD-PMP	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
16	STR-GEN	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	48	AGB	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_AGB	3.0	1.5
17	HYD-PMP	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	49	IGTR	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_IGNITER	0.5	
18	AGB	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_AGB	3.0	1.5	50					
19	IGTR	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_IGNITER	0.5		51	ECU	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
20						52	EFCU	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
21	ECU	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	53	BDV	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
22	EFCU	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	54	DNV	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
23	BDV	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	55	HTEXGR	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
24	DNV	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	56	OILTK-FLTR	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
25	HTEXGR	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	57	FFLTR	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
26	OILTK-FLTR	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	58	IGBX	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
27	FFLTR	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	59	FPMP	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
28	IGBX	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	60	LBPMP	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
29	FPMP	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	61	STR-GEN	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
30	LBPMP	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	62	HYD-PMP	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
31	STR-GEN	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	63	AGB	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_AGB	3.0	1.5
32	HYD-PMP	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	64	IGTR	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_IGNITER	0.5	

Tabela B-45 – Atrasos administrativos das tarefas de manutenção nas estações da estrutura de suporte para os modelos de motor modular (OPUS10©).

COID	STID	TIID	ADLTU	ADLTS	COID	STID	TIID	ADLTU	ADLTS		
Component identifier	Station identifier	Task implementation identifier	Administrative delay time unscheduled [Hours]	Administrative delay time scheduled [Hours]	Component identifier	Station identifier	Task implementation identifier	Administrative delay time unscheduled [Hours]	Administrative delay time scheduled [Hours]		
1	MOD-TURBOJET	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ENGINE	3.5	2.0	35	STR-GEN	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
2	MOD-TURBOJET	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	3.5	2.0	36	HYD-PMP	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
3	MOD-TURBOJET	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ENGINE	3.5	2.0	37	AGB	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_AGB	3.0	1.5
4	MOD-TURBOJET	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	3.5	2.0	38	IGTR	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_IGNITER	0.5	
5	MOD-TURBOJET	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ENGINE	3.5	2.0	39					
6	MOD-TURBOJET	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	3.5	2.0	40	ECU	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
7	MOD-TURBOJET	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ENGINE	3.5	2.0	41	EFCU	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
8	MOD-TURBOJET	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	3.5	2.0	42	BDV	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
9						43	DNV	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
10	ECU	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	44	HTEXGR	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
11	EFCU	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	45	OILTK-FLTR	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
12	BDV	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	46	FFLTR	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
13	DNV	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	47	IGBX	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
14	HTEXGR	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	48	FPMP	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
15	OILTK-FLTR	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	49	LBPMP	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
16	FFLTR	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	50	STR-GEN	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
17	IGBX	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	51	HYD-PMP	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
18	FPMP	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	52	AGB	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_AGB	3.0	1.5
19	LBPMP	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	53	IGTR	BASE CHARLIE	REMOVE_REPLACE_IGNITER	0.5	
20	STR-GEN	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	54					
21	HYD-PMP	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	55	ECU	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
22	AGB	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_AGB	3.0	1.5	56	EFCU	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
23	IGTR	BASE ALFA	REMOVE_REPLACE_IGNITER	0.5		57	BDV	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
24						58	DNV	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
25	ECU	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	59	HTEXGR	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
26	EFCU	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	60	OILTK-FLTR	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
27	BDV	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	61	FFLTR	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
28	DNV	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	62	IGBX	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
29	HTEXGR	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	63	FPMP	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
30	OILTK-FLTR	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	64	LBPMP	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
31	FFLTR	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	65	STR-GEN	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
32	IGBX	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	66	HYD-PMP	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5
33	FPMP	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	67	AGB	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_AGB	3.0	1.5
34	LBPMP	BASE BETA	REMOVE_REPLACE_ACCESSORIES	3.0	1.5	68	IGTR	BASE DELTA	REMOVE_REPLACE_IGNITER	0.5	

A Tabela B-46, denominada *MaintenanceLevelStationData*, define os atrasos administrativos atrelados a alocação dos níveis de manutenção às estações da estrutura de suporte para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. Os atrasos administrativos atrelados a alocação dos níveis de manutenção às estações da estrutura de suporte para modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram modelados de acordo com a Tabela B-47.

Tabela B-46 – Atrasos administrativos atrelados a alocação dos níveis de manutenção às estações da estrutura de suporte para motor não modular (OPUS10©).

	COGID	SGID	LEVLID	ADLTU	ADLTS
	Component group identifier	Station group identifier	Maintenance level identifier	Administrative delay time unscheduled [Days]	Administrative delay time scheduled [Days]
1	N-MOD-TURBOJET	BASES	L1	5.0	3.0
2	ACCESSORIES	BASES	L1	2.5	1.5
3	AGB	BASES	L2	3.0	1.5
4					
5	N-MOD-TURBOJET	CENTRAL	L2	6.0	5.0
6	N-MOD-TURBOJET	CENTRAL	L3	10.0	8.0
7	ACCESSORIES	CENTRAL	L3	4.0	3.0
8	AGB	CENTRAL	L2	4.0	3.0
9	AGB	CENTRAL	L3	7.0	5.0
10					
11	N-MOD-TURBOJET	WORKSHOP	L3	24.0	16.0
12	ACCESSORIES	WORKSHOP	L3	20.0	14.0
13	AGB	WORKSHOP	L3	18.0	15.0

Tabela B-47 – Atrasos administrativos atrelados a alocação dos níveis de manutenção às estações da estrutura de suporte para motor modular (OPUS10©).

	COGID	SGID	LEVLID	ADLTU	ADLTS
	Component group identifier	Station group identifier	Maintenance level identifier	Administrative delay time unscheduled [Hours]	Administrative delay time scheduled [Hours]
1	MOD-TURBOJET	BASES	L1	5,0	3,0
2	ACCESSORIES	BASES	L1	2,5	1,5
3	AGB	BASES	L2	3,0	1,5
4					
5	MOD-TURBOJET	CENTRAL	L2	6,0	5,0
6	MOD-TURBOJET	CENTRAL	L3	10,0	8,0
7	ACCESSORIES	CENTRAL	L3	4,0	3,0
8	AGB	CENTRAL	L2	4,0	3,0
9	AGB	CENTRAL	L3	7,0	5,0
10					
11	MOD-TURBOJET	WORKSHOP	L3	24,0	16,0
12	ACCESSORIES	WORKSHOP	L3	20,0	14,0
13	AGB	WORKSHOP	L3	18,0	15,0

A Tabela B-48, denominada *TaskImplementation*, modela as tarefas de manutenção alternativas para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *CjUnico\_MP\_UCAV*. As tarefas de manutenção alternativas para os modelos *Modular\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_UCAV* foram modeladas de acordo com a Tabela B-49.

Tabela B-48 – Tarefas alternativas para os modelos de motor não modular (OPUS10©).

	COID	STID	TRID	TIID	ENDBL	NOTE
	Component identifier	Station identifier	Task requirement identifier	Task implementation identifier	Endurance blocked	User note
1	N-MOD-TURBOJET	WORKSHOP	INSPECTION	INSPECTION_OUT	<Y>	
2	N-MOD-TURBOJET	WORKSHOP	CORROSION	CORROSION_OUT		
3						
4	N-MOD-TURBOJET	WORKSHOP	RECTIFY_TURBOJET	RECTIFY_TURBOJET_OUT		
5	ECU	WORKSHOP	RECTIFY_ECU	RECTIFY_ECU_OUT		
6	EFCU	WORKSHOP	RECTIFY_EFCU	RECTIFY_EFCU_OUT		
7	BDV	WORKSHOP	RECTIFY_BDV	RECTIFY_BDV_OUT		
8	DNV	WORKSHOP	RECTIFY_DNV	RECTIFY_DNV_OUT		
9	HTEXGR	WORKSHOP	RECTIFY_HTEXGR	RECTIFY_HTEXGR_OUT		
10	OILTK-FLTR	WORKSHOP	RECTIFY_OILTK-FLTR	RECTIFY_OILTK-FLTR_OUT		
11	FFLTR	WORKSHOP	RECTIFY_FFLTR	RECTIFY_FFLTR_OUT		
12	IGBX	WORKSHOP	RECTIFY_IGBX	RECTIFY_IGBX_OUT		
13	IGTR	WORKSHOP	RECTIFY_IGTR	RECTIFY_IGTR_OUT		
14	AGB	WORKSHOP	RECTIFY_AGB	RECTIFY_AGB_OUT		
15	FPMP	WORKSHOP	RECTIFY_FPMP	RECTIFY_FPMP_OUT		
16	LBPMP	WORKSHOP	RECTIFY_LBPMP	RECTIFY_LBPMP_OUT		
17	STR-GEN	WORKSHOP	RECTIFY_STR-GEN	RECTIFY_STR-GEN_OUT		
18	HYD-PMP	WORKSHOP	RECTIFY_HYD-PMP	RECTIFY_HYD-PMP_OUT		
19	N-MOD-TURBOJET	WORKSHOP	OVERHAUL	OVERHAUL_OUT		

Tabela B-49 – Tarefas alternativas para os modelos de motor modular (OPUS10©).

	COID	STID	TRID	TIID	ENDBL	NOTE
	Component identifier	Station identifier	Task requirement identifier	Task implementation identifier	Endurance blocked	User note
					<Y>	
1	MOD-TURBOJET	WORKSHOP	REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE	REMOVE_REPLACE_ENG_MODULE_OUT		
2						
3	MOD-TURBOJET	WORKSHOP	INSPECTION	INSPECTION_OUT		
4	MOD-TURBOJET	WORKSHOP	CORROSION	CORROSION_OUT		
5						
6	MOD-TURBOJET	WORKSHOP	RECTIFY_TURBOJET	RECTIFY_TURBOJET_OUT		
7	ENG_MOD1	WORKSHOP	RECTIFY_MOD1	RECTIFY_MOD1_OUT		
8	ENG_MOD2	WORKSHOP	RECTIFY_MOD2	RECTIFY_MOD2_OUT		
9	ENG_MOD3	WORKSHOP	RECTIFY_MOD3	RECTIFY_MOD3_OUT		
10	ENG_MOD4	WORKSHOP	RECTIFY_MOD4	RECTIFY_MOD4_OUT		
11						
12	ENG_MOD1	WORKSHOP	OVERHAUL_MOD1	OVERHAUL_MOD1_OUT		
13	ENG_MOD3	WORKSHOP	OVERHAUL_MOD3	OVERHAUL_MOD3_OUT		
14						
15	ECU	WORKSHOP	RECTIFY_ECU	RECTIFY_ECU_OUT		
16	EFCU	WORKSHOP	RECTIFY_EFCU	RECTIFY_EFCU_OUT		
17	BDV	WORKSHOP	RECTIFY_BDV	RECTIFY_BDV_OUT		
18	DNV	WORKSHOP	RECTIFY_DNV	RECTIFY_DNV_OUT		
19	HTEXGR	WORKSHOP	RECTIFY_HTEXGR	RECTIFY_HTEXGR_OUT		
20	OILTK-FLTR	WORKSHOP	RECTIFY_OILTK-FLTR	RECTIFY_OILTK-FLTR_OUT		
21	FFLTR	WORKSHOP	RECTIFY_FFLTR	RECTIFY_FFLTR_OUT		
22	IGBX	WORKSHOP	RECTIFY_IGBX	RECTIFY_IGBX_OUT		
23	IGTR	WORKSHOP	RECTIFY_IGTR	RECTIFY_IGTR_OUT		
24	AGB	WORKSHOP	RECTIFY_AGB	RECTIFY_AGB_OUT		
25	FPMP	WORKSHOP	RECTIFY_FPMP	RECTIFY_FPMP_OUT		
26	LBPMP	WORKSHOP	RECTIFY_LBPMP	RECTIFY_LBPMP_OUT		
27	STR-GEN	WORKSHOP	RECTIFY_STR-GEN	RECTIFY_STR-GEN_OUT		
28	HYD-PMP	WORKSHOP	RECTIFY_HYD-PMP	RECTIFY_HYD-PMP_OUT		

## B.8 Modelagem das alternativas para estratégias de suporte

A Tabela B-50, denominada *MaintenanceCapabilityAlternative*, modela as alternativas para as estratégias de suporte a serem avaliadas pela LORA. Esta tabela é comum a todos os modelos.

Tabela B-50 – Alternativas para as estratégias de suporte (OPUS10©).

	AID	COGID	SGID	LEVLID	NOTE
	Alternative number	Component group identifier	Station or group identifier	Maintenance level identifier (inclusive)	User note
1	1	ALL_ITEMS	CENTRAL	L2	
2	1	ALL_ITEMS	WORKSHOP	L3	
3					
4	2	ALL_ITEMS	BASES	L2	
5	2	ALL_ITEMS	CENTRAL	L3	
6					
7	3	ALL_ITEMS	BASES	L2	
8	3	ALL_ITEMS	WORKSHOP	L3	
9					
10	4	ALL_ITEMS	CENTRAL	L3	
11					
12	5	ALL_ITEMS	WORKSHOP	L3	

## B.9 Modelagem da operação do sistema

A Tabela B-51, denominada *SystemDeployment*, modela a distribuição dos sistemas nas bases e é comum a todos os modelos.

Tabela B-51 – Distribuição dos sistemas nas bases de operação (OPUS10©).

	SID	USTID	QTYPS	UTLID	OBSTID	PRIOF	NOTE
	System identifier	Unit or station identifier	Quantity per unit or station <1>	Utilization profile identifier	Onboard station identifier	Priority factor <1.000>	User note
1	UCAV	BASE ALFA	7	UCAV_PROFILE			
2	UCAV	BASE BETA	7	UCAV_PROFILE			
3	UCAV	BASE CHARLIE	7	UCAV_PROFILE			
4	UCAV	BASE DELTA	7	UCAV_PROFILE			

A Tabela B-52, denominada *UtilizationProfile*, estabelece a taxa de utilização média dos sistemas para os modelos *CjUnico\_MP\_UCAV* e *Modular\_MP\_UCAV*. A taxa de utilização média dos sistemas para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_ISTAR* é estabelecida pela Tabela B-53.

Tabela B-52 – Taxa de utilização média para a operação de UCAV (OPUS10©).

	UTLID	UTIL	MRT	IDISP	NOTE
	Utilization profile identifier	Utilization per calendar time [1/Year] <8760,00>	Missions per calendar time [1/Year]	Initiation distribution pattern <EQUIDIST>	User note
1	UCAV_PROFILE	221,00			

Tabela B-53 – Taxa de utilização média para a operação de ISTAR (OPUS10©).

	UTLID	UTIL	MRT	IDISP	NOTE
	Utilization profile identifier	Utilization per calendar time [1/Year] <8760,00>	Missions per calendar time [1/Year]	Initiation distribution pattern <EQUIDIST>	User note
1	ISTAR_PROFILE	351,00			

A Tabela B-54, denominada *MissionType*, estabelece o tipo de missão ou voo para os modelos *CjUnico\_MP\_UCAV* e *Modular\_MP\_UCAV*. O tipo de missão ou voo para os modelos *CjUnico\_MP\_ISTAR* e *Modular\_MP\_ISTAR* é estabelecida pela Tabela B-55.

Tabela B-54 – Tipo de missão para UCAV (SIMLOX©).

MTID	DESCR	NOS	MNOS	MNOSA	DURN	DURND	MSUCPT	TFOUT	TFRET
Mission type identifier	Description	Nominal number of systems	Minimum number of systems	Minimum number of systems abort	Mission duration [Hours]	Mission duration distribution	Mission success point	Mission out time fraction	Mission return time fraction
							<1,0>	<0,000>	<0,000>
1	1 A/C - 1 FH - UCAV	1	1		1,0		0,8	0,300	0,300
2	1 A/C - 2 FH - UCAV	1	1		2,0		0,8	0,200	0,200
3	2 A/C - 1 FH - UCAV	2	2		1,0		0,8	0,300	0,300
4	2 A/C - 2 FH - UCAV	2	2		2,0		0,8	0,200	0,200
5	3 A/C - 1 FH - UCAV	3	3		1,0		0,8	0,300	0,300
6	3 A/C - 2 FH - UCAV	3	3		2,0		0,8	0,200	0,200

Tabela B-55 – Tipo de missão para ISTAR (SIMLOX©).

MTID	DESCR	NOS	MNOS	MNOSA	DURN	DURND	MSUCPT	TFOUT	TFRET
Mission type identifier	Description	Nominal number of systems	Minimum number of systems	Minimum number of systems abort	Mission duration [Hours]	Mission duration distribution	Mission success point	Mission out time fraction	Mission return time fraction
							<1,0>	<0,000>	<0,000>
1	1 A/C - 2 FH - ISTAR	1	1		2,0		0,8	0,200	0,200
2	1 A/C - 3 FH - ISTAR	1	1		3,0		0,8	0,200	0,200
3	1 A/C - 4 FH - ISTAR	1	1		4,0		0,8	0,100	0,100
4	1 A/C - 5 FH - ISTAR	1	1		5,0		0,8	0,100	0,100
5	2 A/C - 2 FH - ISTAR	2	2		2,0		0,8	0,200	0,200

A Tabela B-56, denominada *OperationProfile*, estabelece o perfil de operação para os modelos CjUnico\_MP\_UCAV e Modular\_MP\_UCAV. O perfil de operação para os modelos CjUnico\_MP\_ISTAR e Modular\_MP\_ISTAR é estabelecido pela Tabela B-57.

Tabela B-56 – Perfil de operação UCAV (SIMLOX©).

PRID	SPRID	STIM	ITYPE	IQTY	IQTYD	IPER
Profile identifier	Subprofile identifier	Start time [Hours]	Initiation type <SCHEDULED>	Initiation quantity <1>	Initiation quantity distr	Initiation period [Hours] <0,0>
1	SEG-SEX UCAV	2 A/C - 1 FH - UCAV	7,0		1	
2	SEG-SEX UCAV	3 A/C - 2 FH - UCAV	9,0		1	
3	SEG-SEX UCAV	3 A/C - 1 FH - UCAV	11,0		1	
4	SEG-SEX UCAV	2 A/C - 2 FH - UCAV	15,0		1	
5	SEG-SEX UCAV	1 A/C - 1 FH - UCAV	18,0		2	
6	SEG-SEX UCAV	1 A/C - 2 FH - UCAV	21,0		2	
7						
8	SAB-DOM UCAV	1 A/C - 1 FH - UCAV	8,0		1	
9	SAB-DOM UCAV	3 A/C - 2 FH - UCAV	15,0		1	
10						
11	SEMANA UCAV	SEG-SEX UCAV	0,0		5	120,0
12	SEMANA UCAV	SAB-DOM UCAV	120,0		2	48,0
13						
14	ANO UCAV	SEMANA UCAV	0,0		52	8736,0

Tabela B-57 – Perfil de operação ISTAR (SIMLOX®).

	PRID	SPRID	STIM	ITYPE	IQTY	IQTYD	IPER
	Profile identifier	Subprofile identifier	Start time	Initiation type	Initiation quantity	Initiation quantity distr	Initiation period
			[Hours]	<SCHEDULED>	<1>		[Hours]
1	SEG-SEX ISTAR	1 A/C - 2 FH - ISTAR	6,0		3		
2	SEG-SEX ISTAR	1 A/C - 3 FH - ISTAR	9,0		2		
3	SEG-SEX ISTAR	1 A/C - 4 FH - ISTAR	13,0		3		
4	SEG-SEX ISTAR	1 A/C - 5 FH - ISTAR	15,0		1		
5	SEG-SEX ISTAR	2 A/C - 2 FH - ISTAR	21,0		1		
6							
7	SAB-DOM ISTAR	1 A/C - 4 FH - ISTAR	9,0		2		
8	SAB-DOM ISTAR	1 A/C - 2 FH - ISTAR	19,0		2		
9							
10	SEMANA ISTAR	SEG-SEX ISTAR	0,0		5		120,0
11	SEMANA ISTAR	SAB-DOM ISTAR	120,0		2		48,0
12							
13	ANO ISTAR	SEMANA ISTAR	0,0		52		8736,0

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">DM</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">11 de julho de 2023</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/DM-035/2023</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">149</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO:  Modelagem da suportabilidade e simulação de cenários operacionais como ferramentas para o desenvolvimento de sistemas complexos.			
6. AUTOR(ES): <b>Daniel Buch</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):  Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:  1. Suportabilidade. 2. Conceito de suporte. 3. Apoio a decisão.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:  Logística (administração); Suporte logístico integrado; Métodos; Sistemas complexos; Ciclo de vida; Redução de custos; Consciência situacional; Pesquisa operacional.			
10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;"><input checked="" type="checkbox"/> Nacional    <input type="checkbox"/> Internacional</span>  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 27/06/2023. Publicada em 2023.			
11. RESUMO:  A evolução tecnológica impulsionou o surgimento de sistemas de alta complexidade, que são formados pela integração de diversos componentes e que requerem o envolvimento de várias disciplinas da engenharia ao longo do seu ciclo de vida, normalmente marcado por uma longa fase de operação e suporte. Tal fase pode ser considerada a mais importante do ciclo de vida, visto ser a razão da existência do produto. Os custos decorrentes do suporte de sistemas de alta complexidade gerencial representam uma parcela significativa do custo do ciclo de vida. Devido ao relevante impacto do suporte, é desejável que esta parcela de custo seja minimizada. As principais referências das áreas de Engenharia Logística e de Engenharia de Sistemas defendem que as oportunidades de economia no custo do ciclo de vida concentram-se nas fases iniciais do desenvolvimento. Dessa forma, esse trabalho propõe um método, a ser aplicado na concepção do produto, que modela o conceito de suporte de distintas alternativas de projeto, obtendo resultados otimizados que permitem comparar o desempenho logístico de cada alternativa, considerando, por meio de simulação, o dinamismo do cenário operacional. A métrica de desempenho logístico adotada nas análises comparativas é a relação entre o custo de suporte e a disponibilidade operacional. O método emprega a otimização simultânea da composição, localização e níveis de estoques de itens sobressalentes, da alocação de níveis de manutenção e seus recursos, bem como suas quantidades, dentro da estrutura de suporte. Para tanto, foram utilizados modelos matemáticos implementados em ferramentas comerciais, sendo empregado o OPUS10© para a fase de modelagem e otimização do suporte e o SIMLOX© para a fase de simulação de cenários operacionais. O método requer a integração da abordagem do IPS ( <i>Integrated Product Support</i> ) ao processo de Engenharia de Sistemas no desenvolvimento do produto, de modo que os dados para a modelagem possam ser gerados e amadurecidos pelas atividades do IPS. A aplicação do método em casos de estudos de integração de motores com distintos conceitos de manutenção, em aeronaves não tripuladas, com distintos perfis operacionais, apontou sua capacidade de fornecer previsões de desempenho logístico, considerando o impacto ocasionado pelo dinamismo do cenário operacional simulado. O método é capaz de apontar as vantagens e desvantagens na formação do custo de suporte das alternativas de projeto avaliadas, concretizando-se como uma ferramenta com potencial para aumentar a consciência situacional nas análises de compensação que apoiam a tomada de decisões de integração de alternativas de projeto, na fase de concepção do produto.			
12. GRAU DE SIGILO:  <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			