

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Guilherme Sousa de Moraes**

**CONCEITOS DE ENGENHARIA LOGÍSTICA  
APLICADOS À OPERAÇÃO DE LANÇAMENTO DE  
VEÍCULOS SUBORBITAIS**

Trabalho de Graduação  
2022

**Curso de Engenharia Aeronáutica**

**Guilherme Sousa de Moraes**

**CONCEITOS DE ENGENHARIA LOGÍSTICA  
APLICADOS À OPERAÇÃO DE LANÇAMENTO DE  
VEÍCULOS SUBORBITAIS**

Orientador

Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão (ITA)

**ENGENHARIA AERONÁUTICA**

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

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

Morais, Guilherme Sousa de  
Conceitos de Engenharia Logística aplicados à Operação de Lançamento de Veículos Suborbitais  
/ Guilherme Sousa de Moraes.  
São José dos Campos, 2022.  
61f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2022. Orientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão.

1. Alcântara. 2. Logística. 3. Suportabilidade. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.  
II. Título.

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

MORAIS, Guilherme Sousa de. **Conceitos de Engenharia Logística aplicados à Operação de Lançamento de Veículos Suborbitais**. 2022. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

**CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Guilherme Sousa de Moraes

TÍTULO DO TRABALHO: Conceitos de Engenharia Logística aplicados à Operação de Lançamento de Veículos Suborbitais.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2022

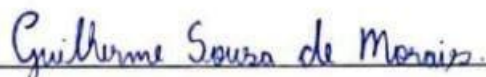
É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida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

---

Guilherme Sousa de Moraes  
Rua H8A, Ap. 129  
12.228-460 – São José dos Campos–SP

# CONCEITOS DE ENGENHARIA LOGÍSTICA APLICADOS À OPERAÇÃO DE LANÇAMENTO DE VEÍCULOS SUBORBITAIS

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Guilherme Sousa de Moraes

Autor



Fernando Teixeira Mendes Abrahão (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Vinicius Malatesta  
Coordenador do Curso de Engenharia Aeronáutica

São José dos Campos, 16 de novembro de 2022.

Dedico este trabalho a minha família e minha namorada, que sempre estiveram me apoiando nos momentos mais difíceis e que mesmo de longe me motivaram a seguir em frente.

# Agradecimentos

Primeiramente, a Deus por todas as bênçãos que me tem dado durante toda a minha vida.

Aos meus pais, Rafaela e Orisvaldo, por todo o suporte, estrutura e dedicação com a qual me criaram e educaram, por sempre me direcionarem para o caminho dos estudos e do aperfeiçoamento profissional, e por sempre acreditarem nos meus sonhos e me apoiarem durante todas as fases da minha vida, em especial durante os difíceis anos de cursinhos pré-vestibulares e durante minhas aventuras no IME e, por fim, no ITA.

A minha namorada Raíssa, pela paciência e companheirismo que tem me acompanhado durante todo o ITA. Você tornou esses 5 anos muito mais alegres e com sabor.

Ao meu irmão Raul, pelas longas conversas sobre jogos, filmes e histórias da época de cursinho. Espero que você possa também experimentar desses 5 maravilhosos anos dentro do H8.

Aos meus grandes amigos do ITA, em especial ao Antônio Walef, pelas maravilhosas histórias compartilhadas, pelos momentos de alegria e humor e por servir como janela de volta para nossa terra.

Àqueles do efetivo do IAE e do CLA, em especial ao Cap. Mendes e Cap. Kazuya, por terem acreditado no meu trabalho e estendido a mão no momento que eu mais precisava. Eu não teria conseguido sem vocês!

Ao meu orientador Prof. Abrahão pelos conselhos e conhecimento contribuindo para minha formação acadêmica e na confecção desse relatório. À SYSTECON, por gentilmente ceder uma licença acadêmica do seu *software*, que foi imprescindível para conclusão desse trabalho de graduação.

E a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para que este sonho se tornasse realidade.

Muito obrigado a todos!

*"If I have seen farther than others,  
it is because I stood on the shoulders of giants."*

— SIR ISAAC NEWTON

# Resumo

Este estudo apresenta uma aplicação de conceitos logísticos na operação de lançamento de veículos suborbitais. Tomou-se para estudo o caso do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) por ser o principal centro de lançamento do Brasil, possuindo importância estratégica para o programa espacial brasileiro, e pela introdução do Centro Espacial Alcântara (CEA), iniciativa que permitirá o lançamento de veículos estrangeiros na área do CLA, atraindo novos projetos, novos investimentos e, principalmente para o escopo desse trabalho, uma frequência de operações nunca realizada anteriormente. Ao longo da aplicação desses conceitos, foram identificadas as principais restrições de suporte responsáveis pela indisponibilidade dos equipamentos do Centro, além de algumas ações gerenciais que poderão otimizar a gestão da qualidade na previsão dos eventos de falha. O trabalho também tem como objetivo a realização de uma simulação para diagnosticar quantitativamente a atual situação logística do Centro e os impactos que as soluções propostas implicariam no cenário de suporte.



# Abstract

This paper presents a application of logistic concepts on suborbital vehicle launch operations. It was taken to study the case of Alcântara Launch Center (CLA) due to it's the main launch center of Brazil, having strategic importance to the Brazilian Spacial Program, and due to implementation of Alcântara Space Center (CEA), a effort that allow launching of foreign vehicles at the area of CLA, bringing new projects, new investments and, specially for the scope of this paper, a operation frequency never did before. Over the application of concepts, It was identify the main support restrictions responsible for the unavailability of the Center' equipment, besides of some managerial actions that could optimize the quality manager of fail events forecast. This paper also had as objective a implementation of simulation to diagnose quantitatively the current logistic situation of the Center and the impacts of proposed solutions had on the support scenario.

# Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Vista aérea do Centro de Lançamento de Alcântara. (FARIA, 2018) .	15
FIGURA 2.1 – Estados de um item. (ABNT, 1994) . . . . .	18
FIGURA 2.2 – Diagrama com a sequência lógica das fases do Ciclo de Vida. Fonte: autor . . . . .	19
FIGURA 2.3 – Visibilidade do custo de ciclo de vida total de um produto. (BLAN- CHARD, 2003) . . . . .	20
FIGURA 2.4 – Processo de análise de alternativas. (ECSS, 2010) . . . . .	23
FIGURA 2.5 – Processo de definição do plano de manutenção. (ECSS, 2010) . . . .	26
FIGURA 2.6 – Processo de atualização do plano de manutenção durante operação. (ECSS, 2010) . . . . .	27
FIGURA 2.7 – Visão geral dos elementos do IPS. Fonte: autor . . . . .	28
FIGURA 2.8 – Aplicações de uma Árvore de Falhas. (HELMAN; ANDERY, 1995) . .	32
FIGURA 2.9 – Estrutura de uma Árvore de Falhas. (BEVICTORI, 2010) . . . . .	33
FIGURA 2.10 – Exemplos de símbolos para eventos. (BEVICTORI, 2010) . . . . .	34
FIGURA 2.11 – Exemplos de símbolos de portas lógicas. (BEVICTORI, 2010) . . . .	34
FIGURA 3.1 – Resumo da metodologia aplicada. Fonte: autor . . . . .	37
FIGURA 4.1 – Lançador Móvel. (FAB, 2022) . . . . .	39
FIGURA 4.2 – Lançador de Porte Médio. (FAB, 2022) . . . . .	40
FIGURA 4.3 – Radar ADOUR. (FAB, 2022) . . . . .	41
FIGURA 4.4 – Radar ATLAS. (FAB, 2022) . . . . .	41
FIGURA 4.5 – Antena STELLA 43. (FAB, 2022) . . . . .	42
FIGURA 4.6 – Antena Redundante. (FAB, 2022) . . . . .	42

---

FIGURA 4.7 – Antena Zodiac. (FAB, 2022) . . . . .	43
FIGURA 4.8 – Ilustração da posição das instalações do CLA e suas respectivas distâncias. (FAB, 2022) . . . . .	43
FIGURA 4.9 – Árvore de falhas do CLA. Fonte: autor . . . . .	45
FIGURA 4.10 – Cenário de Suporte modelado no <i>software</i> . Fonte: autor . . . . .	48
FIGURA 4.11 – Curva de custo-benefício para o caso padrão do CLA. Fonte: autor .	49
FIGURA 4.12 – Impacto da redução do <i>lead time</i> de aquisição nas curvas de custo-benefício de suporte do CLA. Fonte: autor . . . . .	51
FIGURA 4.13 – Impacto da redução do <i>turnaround time</i> das manutenções preventivas nas curvas de custo-benefício de suporte do CLA. Fonte: autor .	53

# Lista de Abreviaturas e Siglas

CEA	Centro Espacial Alcântara
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CLBI	Centro de Lançamento da Barreira do Inferno
hOp	Horas Operacionais
IPS	<i>Integrated Product Support</i>
LCC	<i>Life Cycle Cost</i>
LOC	Sistema de Localização
MBIC	Míssil Balístico Intercontinental
METRIC	<i>Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control</i>
PHST	<i>Packaging, Handling, Storage and Transportation</i>
SPL	Setor de Preparação e Lançamento
TELE	Sistema de Telemedidas
VLS	Veículo Lançador de Satélites

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	14
1.1	Motivação . . . . .	14
1.2	Objetivo . . . . .	16
1.3	Organização do trabalho . . . . .	16
2	LOGÍSTICA DE SISTEMAS COMPLEXOS . . . . .	17
2.1	Ciclo de Vida de Produtos . . . . .	18
2.2	Apoio Integrado ao Produto (IPS) . . . . .	19
2.2.1	IPS no ciclo de vida dos sistemas . . . . .	21
2.2.2	Elementos do IPS . . . . .	27
2.3	Árvore de Falhas . . . . .	32
2.4	OPUS10 . . . . .	35
3	METODOLOGIA . . . . .	36
4	MODELAGEM E SIMULAÇÃO NO OPUS10 . . . . .	38
4.1	Escolha dos equipamentos . . . . .	38
4.2	Descrição dos equipamentos . . . . .	38
4.2.1	Setor de Preparação e Lançamentos . . . . .	39
4.2.2	Sistema de Localização . . . . .	40
4.2.3	Sistema de Telemedidas . . . . .	41
4.3	Árvore de Falhas . . . . .	43
4.4	Modelagem no <i>Software</i> . . . . .	45
4.5	Resultados . . . . .	49

---

4.5.1	Peças sobressalentes . . . . .	49
4.5.2	Aquisição de peças . . . . .	50
4.5.3	Manutenção Preventiva . . . . .	52
5	DIAGNÓSTICO DO CENÁRIO DE SUPORTE . . . . .	54
6	CONCLUSÃO . . . . .	58
	REFERÊNCIAS . . . . .	60

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Desde o seu ápice de notoriedade ocorrida durante a Guerra Fria, as atividades espaciais tem sofrido grandes transformações. Na época mencionada, o interesse das grandes nações nessas atividades eram essencialmente científicas e exploratórias. Também eram desenvolvidos em paralelo projetos com possíveis aplicações militares, já que as tecnologias que permitiram o lançamento de foguetes de sondagem e veículos portadores de experimentos e instrumentos científicos até o espaço cósmico podiam ser facilmente convertidos em mísseis balísticos intercontinentais (MBIC), usados para transportar ogivas nucleares de alto poder destrutivo. (FILHO, 1999)

Para alcançar a liderança e prestígio internacional, os governos dessas grandes nações despenderam gigantescos volumes de recursos públicos para financiar pesquisas e desenvolvimento de tecnologias espaciais. Entretanto, com o fim da Guerra Fria, esse cenário mudou drasticamente. Com a perda da sua principal força impulsora e financeira, as instituições envolvidas com essas atividades tiveram que buscar alternativas, com as aplicações comerciais começando a se sobrepôr aos interesses científicos e exploratórios desse setor. Aplicações em telecomunicações, meteorologia, observação e posicionamento passaram a dominar essa atividade no âmbito comercial, com aplicações de defesa ainda sendo financiados majoritariamente com recursos públicos devido a sua importância estratégica.(FILHO, 1999) Com isso, diversos equipamentos comuns ao cotidiano das pessoas hoje em dia tem seu funcionamento dependente de satélites particulares operando em órbita do Planeta Terra.

Este aumento no consumo de produtos e serviços derivados da tecnologia espacial provocou uma grande demanda por serviços de lançamentos de foguetes e, conseqüentemente, por melhores requisitos de confiabilidade, prazos e custos dessas operações. Visando isso, um dos pontos importantes para se obter uma vantagem comercial nessa área é a adequação do centro de lançamento à estes requisitos, principalmente nos requisitos logísticos.

Tendo em vista que o mercado de lançamento de foguetes movimentava bilhões de dólares por ano, mostra-se interessante o ingresso do Brasil nesse setor. Principalmente ao consi-

derar o grande potencial que possui o Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Com sua inauguração ocorrida durante a década de 1980, o CLA foi criado como alternativa ao Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) para os requisitos de operação de um Veículo Lançador de Satélites (VLS), já que o CLBI enfrentava restrições devido a proximidade com a Região Metropolitana de Natal e sua iminente expansão. (ANDRADE *et al.*, 2018)



FIGURA 1.1 – Vista aérea do Centro de Lançamento de Alcântara. (FARIA, 2018)

Com sua operação comprovada devido aos vários lançamentos bem sucedidos já realizados, tanto nacionais quanto estrangeiros, o CLA destaca-se devido a sua localização geográfica e estratégica, já que devido a sua proximidade com a Linha do Equador ( $2^{\circ}18'$  ao sul), sua operação permite uma significativa economia de combustível, reduzindo os custos de operação e permitindo o transporte de mais carga (ANDRADE *et al.*, 2018). Além disso, o Centro está localizado numa região com baixa densidade populacional, com uma vasta área disponível para implantação de novas infraestruturas, e de regime climático bem definido e estável, permitindo operações durante praticamente todo o ano. Somadas todas essas vantagens, atesta-se a viabilidade comercial do CLA para esse nicho de mercado, além de que a sua inserção promove uma maior visibilidade e aquisição de recursos para projetos nacionais.

Apesar dessas vantagens naturais, o CLA apresenta um incomodo histórico de ineficiências e problemas logísticos que, por muitas vezes, interferem diretamente na sua operação. Falhas de equipamentos, indisponibilidade devido a falta de peças sobressalentes e demora nas suas aquisições e reparos são alguns dos vários incidentes que acabaram por inviabilizar e postergar algumas operações do Centro.



## 1.2 Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo revisar alguns dos principais conceitos e ferramentas de suporte já consolidadas em operações de sistemas complexos e aplicá-las a operação e cenário de suporte do Centro de Lançamento de Alcântara, realizando assim um diagnóstico de sua situação atual e identificando seus pontos positivos e negativos, analisando os impactos de possíveis soluções para que, futuramente, seja possível a obtenção de uma estrutura economicamente viável e que atenda às necessidades da operação levando em consideração suas características de confiabilidade, segurança e disponibilidade de meios.

## 1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividindo em seis seções:

A primeira seção é reservada para a introdução do assunto a ser tratado nesse estudo, com uma apresentação sobre o ambiente mercadológico do setor espacial e dos motivos pelo qual o CLA é considerado um forte potencial nesse nicho e seus problemas de sustentabilidade. Além disso, é apresentado o objetivo específico desse trabalho.

A segunda seção traz uma revisão bibliográfica sobre os conceitos utilizados neste trabalho, iniciando por uma introdução à tópicos de logística para sistemas complexos, passando por uma abordagem sobre IPS e seus elementos, realizando uma breve estudo sobre Árvore de Falhas e sua análise e finalizando com uma descrição sobre o *software* OPUS10 e seus principais usos.

A terceira seção traz um resumo da metodologia empregada no trabalho, explicando a pesquisa de campo realizada e como os dados levantados serão utilizados posteriormente.

A quarta seção contém as considerações necessárias para a realização da simulação do cenário de suporte do CLA, como critério para escolha dos equipamentos estudados, descrição de cada um deles, apresentação da Árvore de Falhas do Centro e os resultados quantitativos das soluções propostas, bem como uma análise sobre cada uma delas.

A quinta seção apresenta um diagnóstico da situação do suporte do CLA focado em cada elemento do IPS, destacando seus pontos positivos e negativos e propondo possíveis soluções.

Por fim, na sexta seção têm-se as conclusões obtidas ao final das atividades programadas para esse trabalho, bem como sugestões de temas relacionados para estudos futuros.

## 2 Logística de Sistemas Complexos

Segundo Blanchard, logística é uma abordagem sob a perspectiva completa de um sistema que inclui: todas as atividades associadas ao design inicial e suportabilidade; aquisição dos elementos de suporte; transporte, armazenamento, manipulação e distribuição de suprimentos e componentes necessários para operação; e a efetiva manutenção e suporte do produto durante todo o seu período de utilização (BLANCHARD, 2003).

Dentro desse perspectiva, alguns conceitos devem ser definidos de forma a nortear esse trabalho:

- **Disponibilidade:** capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. O termo "disponibilidade" é usado como uma medida do desempenho de disponibilidade; (ABNT, 1994)
- **Confiabilidade:** capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo. O termo "confiabilidade" é usado como uma medida de desempenho de confiabilidade; (ABNT, 1994)
- **Manutenibilidade:** capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos. O termo "mantenibilidade" é usado como uma medida do desempenho de manutenibilidade; (ABNT, 1994)
- **Desempenho do suporte de manutenção:** Capacidade de uma organização de manutenção prover, sob demanda, os recursos necessários para manter um item sob condições especificadas e de acordo com uma dada política de manutenção. As condições especificadas estão relacionadas com o próprio item e com as condições sob as quais é usado e mantido. (ABNT, 1994)

Dessa forma, é possível dividir o tempo de operação de um item em dois estados:

disponível e indisponível. Quando o item está disponível, isso indica que ele está em condições de exercer suas funções (esteja ele de fato executando ou não) ou que esteja impedido de executá-la devido a algum fator externo ao seu domínio. Já quando o item está indisponível, isso indica que ele está sem condições de exercer suas funções devido a alguma falha interna de seus sistemas, sendo essa falha reparada ou não.

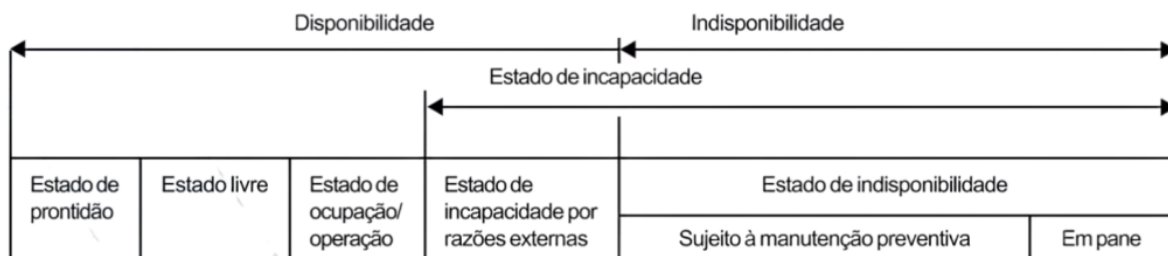


FIGURA 2.1 – Estados de um item. (ABNT, 1994)

## 2.1 Ciclo de Vida de Produtos

Todo sistema possui um ciclo de vida. O ciclo de vida de um produto descreve as ações de um produto desde sua concepção até seu descarte divididos em fases que seguem uma lógica sequencial. Essas fases sequenciais são importantes para organização temporal de tomadas de decisão e para garantir uma visão objetiva por todo o ciclo de vida desse sistema, facilitando o controle e acompanhamento dos processos técnicos e de projeto (SX000I, 2021). Segundo o manual SX000i, o ciclo de vida de todo produto pode ser dividido em 5 fases, descritas a seguir:

1. **Fase de preparação:** fase no qual é identificada a necessidade de um cliente ou a oportunidade para inserção de um novo produto no mercado. A partir dessas informações, são desenvolvidos os requisitos do produto, analisados os benefícios e riscos das tecnologias atuais disponíveis e a definição de tipo de negócio no qual esse produto será integrado, incluindo análises de alternativas e custo estimado de Ciclo de Vida.
2. **Fase de desenvolvimento:** fase no qual o produto é desenvolvido com base nos requisitos de operação elaborados na fase anterior. É também elaborado um processo de manufatura que seja executável e que apresente custo razoável. Por fim, é realizada uma avaliação da suportabilidade operacional desse sistema com foco na diminuição de sua cauda logística, com o objetivo de reduzir os custos na fase de serviço.
3. **Fase de produção:** fase no qual o produto é efetivamente produzido e testado para assegurar a satisfação junto aos seus requisitos operacionais determinados anteriormente.

4. **Fase de serviço:** fase na qual o produto é efetivamente operado e suportado, sendo regularmente avaliado com relação a sua eficiência e custo-benefício exigidos pelos requisitos iniciais. É nessa fase também que são avaliadas possíveis modificações e atualizações de suas configurações visando melhorias de desempenho ou atender a perfis de missões distintos.
5. **Fase de descarte:** fase na qual o produto entra em obsolescência, sendo retirado de serviço de acordo com todas as normas reguladoras com relação a segurança e ao impacto com meio ambiente.

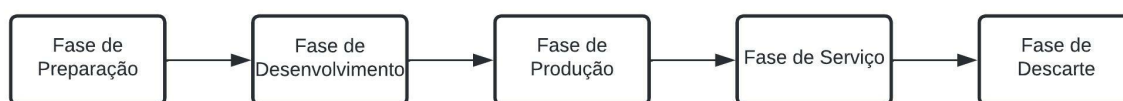


FIGURA 2.2 – Diagrama com a sequência lógica das fases do Ciclo de Vida. Fonte: autor

Um parâmetro econômico muito importante que surge desse conceito é o Custo de Ciclo de Vida de um produto (Life Cycle Cost, ou LCC, em inglês). Esse conceito engloba todos os custos envolvidos durante toda a existência do produto, desde sua conceituação até sua retirada de serviço, considerando tanto suas despesas de projeto, operação, suporte e descarte. O custo de ciclo de vida é um dos parâmetros mais utilizados para análise de riscos, avaliação de alternativas de projeto e montagem dos planos de suporte de um produto. (BLANCHARD, 2003)

## 2.2 Apoio Integrado ao Produto (IPS)

Num ambiente mercadológico de forte competição internacional, como é o caso das atividades espaciais, é mandatário que os produtos desenvolvidos atendam não apenas aos requisitos operacionais mas também aos requisitos logísticos e financeiros. Porém, historicamente as atividades de logística de um sistema complexo tendem a serem negligenciadas durante as fases de projeto e desenvolvimento, sendo implementadas como consequências das tomadas de decisão realizadas nestas fases e não recebendo uma devida atenção. Com a experiência adquirida desses projetos, esse tipo de prática mostrou-se altamente custosa e negativa para o produto final. Isso porque os custos de projeto e desenvolvimento, construção, instalação e produção são geralmente bem conhecidos e, por esse motivo, são os valores mais visados e comparados entre projetos distintos, já que são custos de curto prazo associados a aquisição desses sistemas. Entretanto, os custos associados a utilização, manutenção e suporte durante todo o seu ciclo de vida, que para alguns

sistemas pode significar até 75% do seu custo total, são algumas vezes negligenciados ou de difícil medição. (BLANCHARD, 2003)

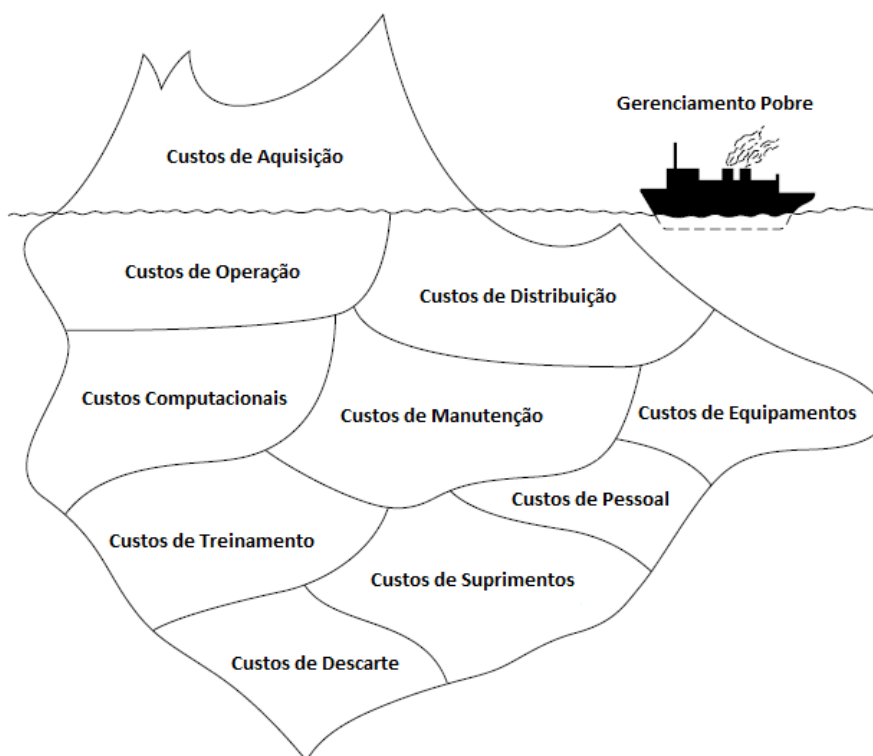


FIGURA 2.3 – Visibilidade do custo de ciclo de vida total de um produto. (BLANCHARD, 2003)

Quando investigado esse fenômeno, observa-se que uma parte significativa desses altos custos de utilização se devem a decisões tomadas durante a fase de projeto e desenvolvimento do produto. Decisões a respeito de seleções de tecnologias utilizadas, material, processos de manufatura, integração de subsistemas e, principalmente, os planos de manutenção e suporte desse produto possuem um alto impacto no custo de ciclo de vida. Ou seja, a inclusão dos requisitos de suportabilidade durante todo o ciclo de vida de um produto se mostra uma tarefa crucial para seu sucesso comercial.

Devido a isso, no setor de defesa, a logística evoluiu através do conceito de Suporte Logístico Integrado (*Integrated Logistic Support*, ou ILS, em inglês), que posteriormente foi renomeada de Suporte Integrado ao Produto (*Integrated Product Support*, ou IPS, em inglês). O IPS consiste numa abordagem que busca planejar, desenvolver, adquirir e operar sistemas e equipamentos com a melhor disponibilidade e otimização de custos. O foco desse conceito é enxergar a logística com base no sistema completo, e não apenas no suprimento e distribuição de componentes menores desse sistema, e suportá-lo de forma eficaz e eficiente durante todo o seu ciclo de vida. Para isso, o IPS tem como principais implementações:

- integração dos requisitos de suporte ao projeto do sistema e seus equipamentos;

- desenvolvimento dos requisitos de sistema com base na suportabilidade (capacidade de um produto de ser suportado de maneira eficiente e com restrição de custos obedecendo seus requisitos operacionais) e disponibilidade do sistema;
- projeto de um plano logístico capaz de satisfazer tais requisitos de suporte.

A implementação dessa abordagem como uma parte integrada de todas as fases de um projeto de produto complexo provê uma ferramenta capaz de desenvolver um sistema de suporte logístico operacional e econômico baseado na garantia dos requisitos de performance, de disponibilidade e de metas de manutenção realísticas, além da constante avaliação de alternativas para os elementos do produto e de seu suporte.

## **2.2.1 IPS no ciclo de vida dos sistemas**

Para atingir seu objetivo, o IPS deve ser aplicado nos processos de engenharia de sistemas durante todas as fases do ciclo de vida do produto.

### **2.2.1.1 Fase de preparação**

Durante a fase de preparação, o IPS é responsável pela definição dos cenários de suporte. Essa tarefa consiste na identificação, avaliação e acordo com o usuário final a respeito dos parâmetros de cenário de suporte operacional do produto a fim de determinar as suas condições de contorno. Esses parâmetros serão vistos como limitadores durante a fase de desenvolvimento e projeto de suporte do produto, mas são importantes para definir o tipo e condições na qual as tarefas de logística irão ocorrer durante a fase de serviço.

### **2.2.1.2 Fase de desenvolvimento**

Apesar de ser uma tarefa importante, a definição dos cenários de suporte demonstra apenas as condições nas quais o suporte deve ser considerado, não avaliando qual ações ou atividades são as mais convenientes para sua realização. Isso porque mesmo considerando um mesmo cenário de suporte, diversas estratégias de manutenção podem ser consideradas factíveis. Um mesmo equipamento pode ser desenvolvido para atuar sob manutenção corretiva, por exemplo, sendo utilizado em serviço até sua falha e sendo reparado posteriormente, consumindo assim poucas peças de reposição e altas taxas de trabalho manual, ou esse mesmo equipamento pode ser desenvolvido para atuar sob manutenção preventiva, organizando as taxas de trabalho manual e diminuindo os impactos dos eventos de falha sob um custo de alto consumo de peças de reposição. Ou seja, ambas as estratégias satisfazem o cenário de suporte, mas apresentam abordagens e custos diferentes.

Dessa forma, na fase de desenvolvimento, o IPS é responsável pelo desenvolvimento do conceito de suporte. Essa tarefa consiste numa série de considerações a respeito das complexidades de tarefas, da criticalidade dos itens a serem mantidos, suas taxas de falhas e seus custos associados. Essas considerações levam a identificação dos tipos de tarefas associados ao suporte desse produto e seus requisitos técnicos e de suprimentos para serem realizadas.

Outra tarefa importante do IPS dentro dessa fase é a avaliação e seleção de alternativas de projeto. Desde o fim da contextualização do produto na sua fase de preparação até a definição de seu design preliminar, vários desenhos alternativos são considerados de forma a definir as soluções mais apropriadas com os requisitos dos usuários. Dessa forma, o IPS contribui para a avaliação dessas alternativas considerando o impacto que elas possuem no suporte, tanto positivos quanto negativos, podendo ainda solicitar algumas modificações que visem a redução da cauda logística desse produto, como detecção automática de falhas, melhor acessibilidade para itens com altas taxas de manutenção e padronização de interfaces e componentes.

Paralelamente, diversos designs de suporte também são considerados nessa fase para cada alternativa de desenho proposto ao produto. O objetivo da participação do IPS nessa tarefa é introduzir e ressaltar as necessidades logísticas do produto desde seu princípio, já que praticamente todas os seus elementos são impactados pelas configurações escolhidas. A figura mostra o processo lógico de avaliação e decisão de alternativas para o produto e seu sistema de suporte.

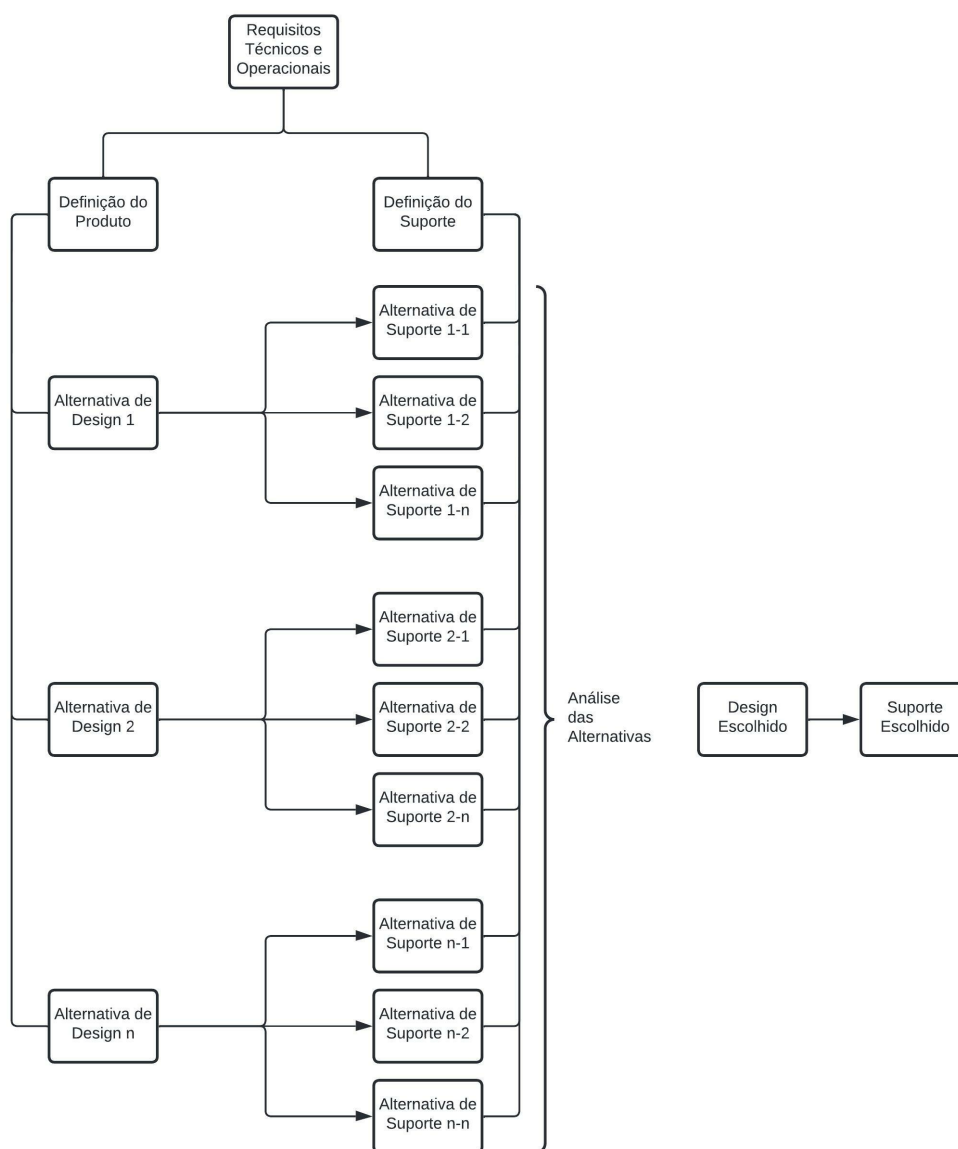


FIGURA 2.4 – Processo de análise de alternativas. (ECSS, 2010)

### 2.2.1.3 Fase de produção

As atividades de suporte, que são realizadas durante a fase de serviço do produto, têm como finalidade a garantia de sua operação com o mínimo de custos e o máximo de disponibilidade. Essas manutenções são, de fato, as atividades operacionais do IPS que mais diretamente se relacionam com o produto em serviço, com todos os seus outros elementos sendo consequências de necessidades das atividades de manutenção.

Essas atividades derivam da perda natural de desempenho de elementos do produto com sua utilização. Quando certo elemento se degrada ao ponto de que sua performance já não está mais dentro dos requisitos aceitáveis para operação, ocorre a falha desse elemento. Dessa forma, as ações de manutenção podem ser classificadas de duas formas: realizadas



antes ou depois da ocorrência da falha. O primeiro tipo é chamado de manutenções preventivas e se baseia no estudo dessa perda de desempenho de forma a se antecipar a falha, buscando aproveitar o máximo de tempo útil dos componentes antes da falha e evitando os impactos negativos causados por esse evento. O segundo tipo é chamado de manutenções corretivas, já que visam a correção de um elemento após este já ter sofrido a falha, analisando o custo-benefício entre esses reparos e os impactos que a falha desse elemento apresenta no desempenho geral do produto.

Para auxiliar nesses estudos sobre falhas, faz parte das atividades do IPS durante a fase de produção a realização de uma Análise de Modos de Falha, seus Efeitos e Criticidades (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*, ou FMECA, em inglês). Essa análise permite identificar os potenciais modos de falha de um determinado elemento ou subsistema, a probabilidade associada a cada modo e suas consequências na operação do produto como um todo. Dessa forma, é possível avaliar quais elementos são críticos o suficiente para receberem manutenção preventiva ou corretiva, quais as atividades necessárias para mantê-lo ou recuperá-lo e a frequência com que devem ser realizadas.

Outra atividade que complementa o FMECA para o desenvolvimento do plano de manutenção desse produto é a Análise de Níveis de Reparo (*Level of Repair Analysis*, ou LORA, em inglês). A LORA é uma metodologia analítica usada para determinar em qual nível de reparo um item será reparado ou descartado, baseado em considerações de custo e requisitos de disponibilidade. Para sistemas complexos contendo milhares de subsistemas organizados em diversos níveis e com várias possibilidades de reparo, LORA busca determinar a configuração ótima de reparos e manutenção de forma a minimizar o Custo de Ciclo de Vida desse sistema. Engenheiros logísticos responsáveis por essa tarefa examinam não apenas o custo de reparo ou substituição de uma peça, mas de todos os elementos necessários para realizar tal atividade de forma correta. Isso inclui a consideração do nível técnico do pessoal, as ferramentas, os equipamentos de teste e a infraestrutura necessária para acomodar toda essa operação. (DAU, 2022)

Com o LORA e FMECA estabelecidos, é necessário ainda o levantamento dos equipamentos de suporte e peças sobressalentes necessários. Esses objetos, à parte do próprio produto a ser mantido, são os elementos primários a serem considerados numa atividade de manutenção. Apesar da busca pela padronização e portabilidade desses equipamentos serem hábitos bem-vistos pelo IPS, sua implementação deve ser realizada sob monitoramento. Isso porque a implementação dessa visão de forma rígida pode acarretar pouca flexibilidade dentro da linha de manutenção, gerando possíveis problemas de abastecimento de peças e equipamentos e diminuição da disponibilidade do produto. Dessa forma, todo desvio de padronização deve ser estudado sobre seus benefícios e avaliado sobre os possíveis problemas de integração que poderão surgir com outros equipamentos ou com outras configurações do produto.

Outra atividade importante para o IPS é a definição dos planos de Empacotamento, Manuseio, Estocagem e Transporte do produto e de seus equipamentos e peças de apoio (*Packaging, Handling, Storage and Transportation*, ou PHST, em inglês). Esse plano é responsável por identificar e definir as necessidades, cenários e requisitos técnicos para o transporte desse produto de maneira econômica, segura e prática. Para isso, procedimentos são desenvolvidos para o transporte de todos os itens possíveis de movimentação, elencando todos os materiais e equipamentos necessários para tal fim, planejando e contratando serviços, se necessário, e documentando todo o processo burocrático para tal atividade, como permissões, certificações, e requisitos técnicos para realização dessas tarefas.

Por fim, é necessário ainda preparar e treinar o pessoal de suporte para realização de suas tarefas. Dessa forma, um plano de treinamento é preparado considerando os requisitos técnicos e riscos de cada atividade e equipamento. Esse plano deve ser documentado e atualizado tanto na fase de produção quanto na fase de serviço, garantindo a qualidade e nível técnico da equipe para realização das tarefas de manutenção de forma eficiente e segura.

Com isso, conclui-se o plano de manutenção detalhado do produto. Esse plano apresenta a distribuição de cada recurso necessário para cada tarefa de manutenção, sua frequência e sua melhor localização dentro da linha de operação. Dependendo do nível de complexidade ou de requisito de previsibilidade desse plano de manutenção, modelagens matemáticas e simulações podem ser empregadas para se obter um resultado estatístico que demonstre os cenários mais críticos e os mais prováveis de ocorrerem dentro dessa linha, além de ser possível analisar os impactos de possíveis modificações no plano original. A figura 2.5 resume o processo de análise e definição desse plano.

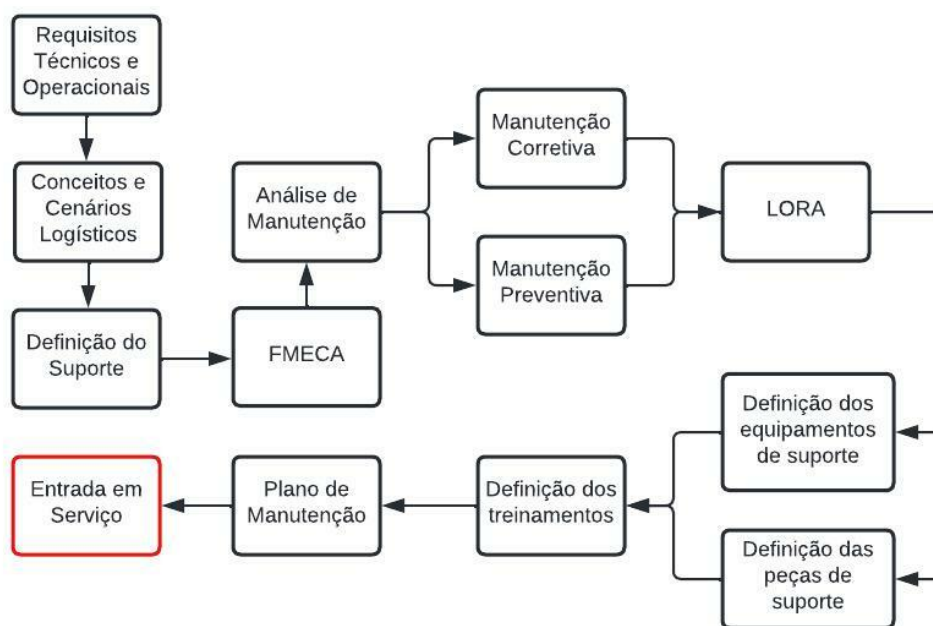


FIGURA 2.5 – Processo de definição do plano de manutenção. (ECSS, 2010)

#### 2.2.1.4 Fase de serviço

Mesmo após a entrada do produto em serviço, faz parte das atividades do IPS monitorar e avaliar as atividades operacionais e de suporte. Para isso, medidores de desempenho são elencados para realizar essa avaliação, como disponibilidade, acessibilidade, tempo para reparos, custos de reparo e nível de trabalho manual necessário. Esses medidores fornecem dados de feedback para posterior análise de possíveis alterações no plano de manutenção, tornando o processo da figura 2.5 um ciclo retroalimentado, como mostrado na figura 2.6.

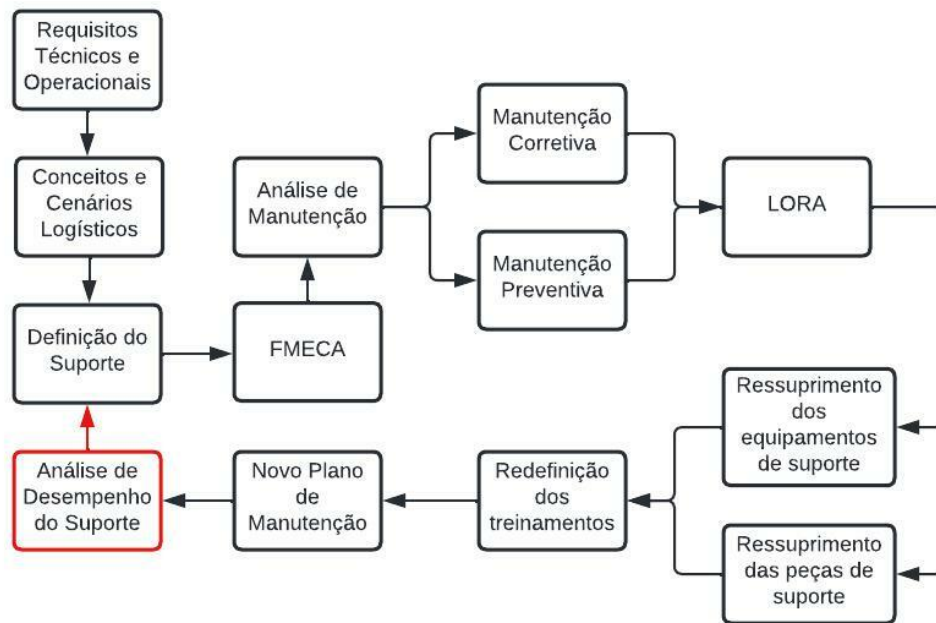


FIGURA 2.6 – Processo de atualização do plano de manutenção durante operação. (ECSS, 2010)

### 2.2.1.5 Fase de descarte

Por fim, na fase de descarte, as seguintes tarefas são consideradas para o IPS: eliminação gradativa do estoque de peças sobressalentes e equipamentos de apoio, mantendo um balanço entre a manutenção de níveis razoáveis de suportabilidade mesmo no final do ciclo do produto e os custos de operação dessas peças e equipamentos; descarte e reciclagem dos componentes desse sistema, seguindo todas as normas reguladoras de segurança e proteção ao meio ambiente; e desativação progressiva dos serviços de suporte e instalações necessárias.

## 2.2.2 Elementos do IPS

De forma a melhorar o entendimento sobre o IPS, as tarefas descritas anteriormente são divididas em doze categorias chamadas de elementos do IPS. Vale lembrar que essa divisão é apenas de caráter didático e que na aplicação desses conceitos, todas as atividades relativas aos doze elementos ocorrem de forma interdependentes e, muitas vezes, simultâneas. (SX000I, 2021)



FIGURA 2.7 – Visão geral dos elementos do IPS. Fonte: autor

### 2.2.2.1 Gerenciamento de Suporte

Esse elemento é responsável pelo desenvolvimento, implementação e avaliação das estratégias de suporte do produto durante todo o seu ciclo de vida, focando na otimização dos parâmetros de desempenho de suporte, como disponibilidade, confiabilidade, manutenibilidade e redução dos custos de suporte. Geralmente esse elemento está centrado na figura do gerente de suporte de um produto que possui a responsabilidade de garantir a integração e coordenação entre todos os elementos do IPS. Suas principais atividades são:

- Análise de alternativas;
- Desenvolvimento do plano de IPS;
- Supervisão das atividades do IPS;
- Documentação das atividades realizadas e seus resultados;
- Gerenciamento de contratos de suporte.

### 2.2.2.2 Manutenção

O objetivo da manutenção é planejar, implementar e executar as manutenções de um sistema. Ela estabelece os conceitos de manutenção e, por isso, possui uma grande influência nas tarefas de planejamento, desenvolvimento e aquisição dos outros elementos do IPS. Suas principais atividades são:

- Desenvolvimento do plano de manutenção;
- Execução e otimização das tarefas de manutenção;

- Análise de riscos das tarefas de manutenção;
- Realização de análises de vida útil de peças e subsistemas.

### **2.2.2.3 Suprimentos**

O objetivo desse elemento é a aquisição, catalogação, armazenagem e descarte de peças sobressalentes e itens consumíveis necessários para o suporte do produto, realizando estudos de equilíbrio entre as necessidades por esses itens e seus custos de estocagem. Esse elemento também engloba a aquisição dos itens para provisão inicial, análise de mercado, relacionamento com distribuidores e solução de possíveis obstáculos aduaneiros.

### **2.2.2.4 Operações Logísticas**

Operações Logísticas é uma combinação de recursos, processos e considerações de projeto e ambiente para garantir que o sistema, seus equipamentos de apoio e itens de suporte sejam preservados, embalados, manuseados e transportados de forma segura e eficiente. O objetivo desse elemento é identificar e planejar os requisitos de manuseio, embalagem, armazenamento e transporte desses sistemas, já que alguns itens possuem necessidades especiais para que seja transportado, como controle de ambiente, isolamento de choques e impossibilidades para alguns modais de transporte. Suas atividades são:

- Levantamento de requisitos para manuseio e embalagem;
- Análise de riscos para transporte do sistema;
- Planejamento e documentação do plano de transporte;
- Execução desse plano.

### **2.2.2.5 Recursos Computacionais**

O objetivo desse elemento é identificar, planejar, documentar e suprir hardwares, softwares, instalações e pessoal necessário para suporte computacional do produto. Sua principal atividade é o gerenciamento dos recursos computacionais para suporte do produto, desde a identificação da necessidade de algum equipamento ou programa computacional até a avaliação e implementação de atualizações e melhorias nesses recursos.

### **2.2.2.6 Influência de Desenho**

Esse elemento representa a integração entre as necessidades operacionais trazidas pela engenharia de sistemas com as necessidades de suporte trazidas pelo IPS no desenho das

configurações de um produto. Ou seja, é a participação efetiva da equipe de suporte no projeto, realizando avaliações e mudanças de desenho com base na otimização da manutenibilidade desse produto. Suas principais atividades são:

- Análise de custo de ciclo de vida de cada configuração proposta;
- Análise de suporte de cada configuração proposta;
- Proposta de alternativas de projeto visando melhor suportabilidade.

#### **2.2.2.7 Engenharia de suporte continuada**

Esse elemento suporta o produto no seu ambiente operacional. Suas atribuições incluem a realização de tarefas técnicas (investigação e análises de engenharia) que garantem a operação continuada e sua manutenibilidade até o fim do ciclo de vida. Suas principais atividades são:

- Avaliação do desempenho operacional do sistema;
- Identificação e resolução de deficiências de suporte;
- Identificação de oportunidades de melhorias de desempenho;
- Gerenciamento de descarte.

#### **2.2.2.8 Dados Técnicos**

Dados Técnicos representa o armazenamento de informações de natureza científica e tecnológica relativas ao projeto e operação do produto, não incluindo aqui os dados sobre programas computacionais utilizados ou dados administrativos e financeiros. Esse elemento abrange dados gerados por modelagem e simulação, avaliação de alternativas, testes e os conceitos de operação, suporte, manutenção e transporte. Suas principais atividades são:

- Obtenção e armazenamento de dados técnicos;
- Produção de publicações técnicas.

#### **2.2.2.9 Infraestrutura**

Infraestrutura representa o conjunto de instalações físicas, permanentes ou temporárias, necessárias para operar e suportar o produto. Esse elemento inclui os estudos para

melhorias das instalações, localização, necessidades de espaço, requisitos de segurança e ambiente e equipamentos para suporte dessas instalações. Devido ao longo tempo necessário para planejamento e construção, as atividades desse elemento devem ser consideradas e planejadas nos primeiros estágios do ciclo de vida do produto. Suas principais atividades são:

- Levantamento de necessidades de instalações;
- Planejamento para aquisição ou construção dessas instalações;
- Análise de integridade e suporte das instalações existentes.

#### **2.2.2.10 Pessoal**

O recrutamento e contratação de pessoal com as habilidades e conhecimentos necessários para planejar, operar e suportar o produto são essenciais para o seu sucesso. Dessa forma, esse elemento lida com a busca, contratação e gerenciamento de recursos humanos necessários para todo o ciclo de vida do produto.

#### **2.2.2.11 Equipamentos de Suporte**

Equipamentos de suporte consiste em todos os equipamentos (fixos ou moveis) necessários para suportar a operação e a manutenção do produto. Isto inclui, mas não é limitado, a equipamentos de solo, de manutenção, de calibração, de metrologia, ferramentas, bancadas de testes, geradores e veículos de apoio. É importante que durante a fase de projeto de um produto, um dos requisitos a serem levantados é a minimização de desenvolvimento de novos equipamentos de suporte, focando nos equipamentos já amplamente existentes no mercado, facilitando sua aquisição e de peças de reposição, caso seja necessário.

#### **2.2.2.12 Treinamento**

Treinamento é o processo de aprendizado pelo qual o pessoal contratado obtém ou melhoram um conjunto de conhecimento e habilidades pré-determinados que são relevantes para a operação e manutenção do produto. Dessa forma, as principais atividades desse elemento envolvem a identificação das necessidades e planejamento de treinamentos, com a aquisição de materiais técnicos e instrutores capacitados para tal tarefa.



## 2.3 Árvore de Falhas

A Árvore de Falhas é um método sistemático e padronizado com a capacidade de fornecer bases objetivas para diversas funções, como a análise de modos comuns de falha em sistemas, justificação de alterações em sistemas e demonstração de atendimento a requisitos regulamentares ou contratuais. (HELMAN; ANDERY, 1995)

Seu conceito teve origem em 1961, sendo desenvolvido por H. A. Watson para avaliar o grau de segurança do sistema de controle de lançamentos de mísseis. Com uma utilização abrangente, seus aspectos vão desde projetos de máquinas e equipamentos até a análise de processos industriais ou administrativos. (BEVICTORI, 2010)

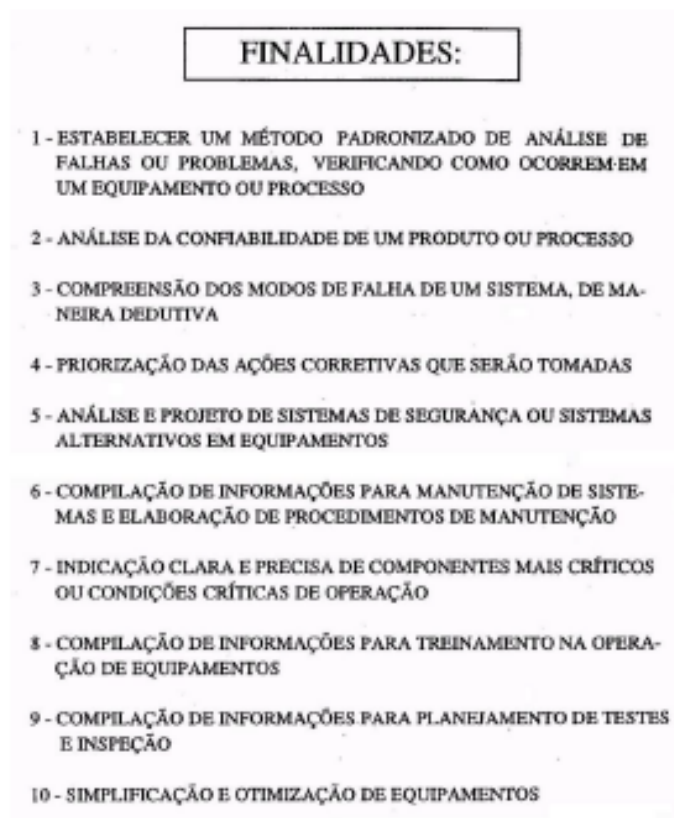


FIGURA 2.8 – Aplicações de uma Árvore de Falhas. (HELMAN; ANDERY, 1995)

A análise de uma árvore de falhas tem início a partir de um problema ou falha particular do sistema, que é denominada como “evento de topo”, e continua com a sequência ou combinação de fatos que possam conduzir a tal evento. Com isso, é possível construir um modelo gráfico que permite mostrar o encadeamento de diferentes eventos que podem resultar no evento topo. Sua análise é conduzida até se obter eventos básicos, que não se considera necessário aprofundar. Tais eventos básicos são denominados como “limite de resolução da árvore”. (HELMAN; ANDERY, 1995)

Com isso, pode-se dizer que a análise parte de uma situação anormal do sistema e desce até atingir suas causas mais básicas, caracterizando uma sequência top-down. A estrutura da árvore de falhas, apresentada na figura 2.9, pode ser observado que o evento indesejável aparece no topo, ligado a eventos mais básicos por intermédio de símbolos de eventos e portas lógicas (apresentados como exemplos nas figuras 2.10 e 2.11), e se finaliza em eventos considerados fundamentais.

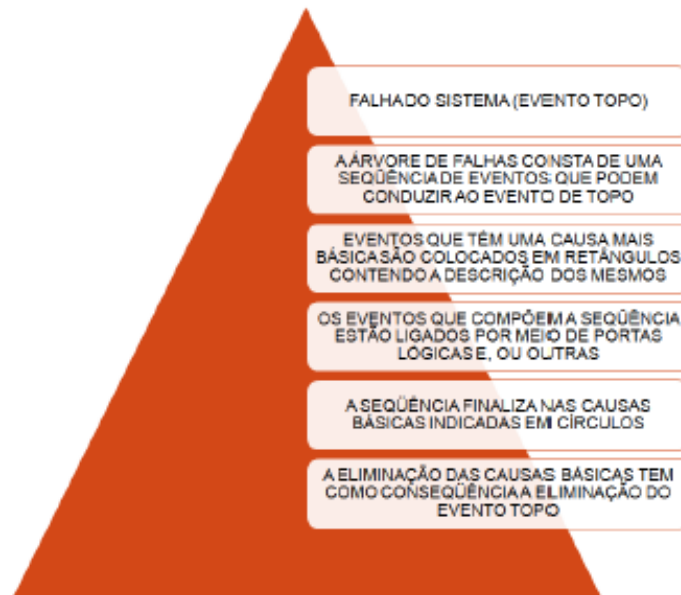


FIGURA 2.9 – Estrutura de uma Árvore de Falhas. (BEVICTORI, 2010)

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
	EVENTOS QUE SÃO SAÍDAS DE PORTAS LÓGICAS
	EVENTOS ASSOCIADOS A FALHAS BÁSICAS
	EVENTOS NÃO REALIZADOS (OMITIDOS)
	PARÂMETRO ASSOCIADO A UM EVENTO QUE DEVE SER MONITORADO
	EVENTO CONDICIONAL: USADO EM JANELAS DE INIBIÇÃO
	INDICA A CONEXÃO COM OUTRO SÍMBOLO OU EVENTO

FIGURA 2.10 – Exemplos de símbolos para eventos. (BEVICTORI, 2010)






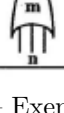
SÍMBOLO	NOME	RELAÇÃO CAUSAL
	E	EVENTO DE SAÍDA SÓ OCORRE SE TODOS OS DE ENTRADA OCORREREM
	OU	EVENTO DE SAÍDA OCORRE SE PELO MENOS UM DOS DE ENTRADA OCORRER
	INIBIÇÃO (CONDICIONAL)	EVENTO DE ENTRADA SÓ CONDUZ AO DE SAÍDA SE O CONDICIONAL OCORRER
	E DE PRIORIDADE	EVENTO DE SAÍDA OCORRE SE OS DE ENTRADA OCORREREM NA ORDEM DA ESQUERDA PARA A DIREITA
	OU EXCLUSIVA	EVENTO DE SAÍDA OCORRE SE UM, MAS NÃO AMBOS, DOS DE ENTRADA OCORRER
	M EM N	EVENTO DE SAÍDA OCORRE SE M EM N DOS DE ENTRADA OCORREREM

FIGURA 2.11 – Exemplos de símbolos de portas lógicas. (BEVICTORI, 2010)

## 2.4 OPUS10

O OPUS10 é um *software* de otimização de manutenção e suporte de sistemas desenvolvido pela empresa sueca Systecon. Seu principal objetivo é a maximizar a efetividade geral de um produto ou organização com o menor custo de ciclo de vida possível. Dessa forma, sua utilização está intimamente ligada aos conceitos de IPS apresentados anteriormente. (SYSTECON, a)

A principal utilidade do *software* é a otimização de estoques de peças sobressalentes a partir de sua alocação. Além disso, outras aplicações são análise de lista de aprovisionamento inicial, estudo de estoque (rearranjo, reabastecimento - ou ambos), avaliação de estrutura de suporte logística e análise de sensibilidade (FIGUEIREDO *et al.*, 2020). Outra grande vantagem da utilização desse programa é o fato dele ser escalável e flexível, sendo possível modelar diversos cenários diferentes e comparar seus resultados, sendo uma importante ferramenta para avaliação de alternativas e tomada de decisão. (SYSTECON, b)

Vale ressaltar que o *software* utiliza um algoritmo baseado na técnica METRIC (*Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*) (PINTO; ABRAHÃO, 2018). Portanto, todas as premissas assumidas nessa técnica são válidas também nesse trabalho, como a inexistência de condenação ou canibalização nos equipamentos simulados.

## 3 Metodologia

Com base na revisão teórica apresentada no capítulo anterior e considerando os tipos de problemas logísticos que o CLA apresenta, levanta-se a hipótese de que os conceitos de IPS e seus elementos não são considerados ou devidamente aplicados para o cenário de suporte do Centro, seja por desconhecimento ou por falha em sua aplicação.

Para se testar essa hipótese, foi realizada uma pesquisa de campo para conhecer o dia a dia de operação do CLA e entender suas principais dificuldades logísticas. Para isso, o autor foi convidado pela direção do CLA para acompanhar algumas das operações que ocorreram no Centro durante o mês de setembro/22.

Nesse tempo, foram realizadas pesquisas em documentos de procedimento, histórico de operações realizadas para levantamento de horas de operação de cada equipamento, análise de contratos de manutenção antigos e atuais para os principais equipamentos e entrevistas com os funcionários do Centro e das empresas de manutenção contratadas para obter um panorama de suas atividades.

De posse dessas informações, foi realizado uma simulação do cenário de suporte do Centro utilizando o *software* OPUS10, de modo a entender quantitativamente a situação atual de suporte. A partir dessa simulação, foram avaliadas os impactos de algumas modificações de parâmetros de manutenção no desempenho logístico do Centro, comparando os resultados com aqueles do cenário atual. Essas avaliações são importantes para verificar o impacto que essas modificações apresentariam na operação e gerar dados de eficiência para avaliação de custo-benefício das opções de cenário de suporte a serem adotadas futuramente.

Para complementar essa análise, foi realizado um diagnóstico do cenário de operação do Centro utilizando como base os conceitos de elementos de IPS. Para cada elemento, foi avaliado qualitativamente o desempenho atual de suas atividades, apontando os aspectos positivos e negativos e avaliando de que forma as modificações simuladas anteriormente poderiam ser implementadas.

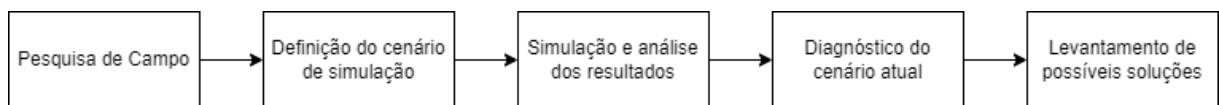


FIGURA 3.1 – Resumo da metodologia aplicada. Fonte: autor

# 4 Modelagem e Simulação no OPUS10

## 4.1 Escolha dos equipamentos

Segundo o Manual de Usuário do CEA (FAB, 2022), as principais atividades do CLA são:

1. **Preparação e Lançamento:** serviços de carregamento do propelente, integração da carga útil e posicionamento do veículo para o lançamento, além do próprio lançamento em si, com serviços de controle e segurança;
2. **Rastreo e Coleta de Dados:** instalações e equipamentos responsáveis pela obtenção das coordenadas de localização do veículo em tempo real para garantia da segurança de vôo e coleta de dados emitidos pelo próprio veículo e pela carga útil, ambos em tempo real.

Para executar essas atividades, o Centro possui uma rede de equipamentos tanto de operação quanto de apoio, cada um com suas especificidades e complexidades associadas. Dessa forma, por simplificação na análise do trabalho e facilidade na obtenção e organização dos dados logísticos, foram filtrados os equipamentos, seguindo os seguintes critérios:

1. **Índice de significância:** importância daquele equipamento para a atividade fim do Centro;
2. **Taxa de falhas:** histórico de indisponibilidades que aquele equipamento teve;
3. **Valor de aquisição:** comparação numérica do valor associado a aquisição daquele equipamento.

## 4.2 Descrição dos equipamentos

Os equipamentos considerados nesse estudo foram divididos de acordo com seus setores dentro do próprio organograma do Centro, facilitando o entendimento de suas funções,

similaridades e diferenças.

### 4.2.1 Setor de Preparação e Lançamentos

Esse Sistema é responsável por fornecer apoio técnico e coordenar e controlar meios, sistemas e pessoal durante as atividades de preparação, montagem, integração e lançamento de veículos espaciais e suas cargas úteis. Dentro seus vários equipamentos, aqueles englobados nesse estudo são:

- **Lançador Móvel:** O Lançador Móvel MAN-1 tem uma capacidade de carga de 470 kN.m e variação de azimute de 360° e variação de inclinação de 90°, podendo manter-se estacionado em qualquer posição desejada pelo operador. Sua estrutura consiste numa base de concreto fixa, seu corpo móvel superior rotativo, a lança para acomodação do veículo e um sistema de comando e controle. Os movimentos de rotação e elevação são executados por motores elétricos, que atuam através de reduzidores de engrenagens de forma a produzir movimentos suaves, estáveis, sem trancos e facilmente controláveis, sem aquecimento excessivo quando solicitado com carga nominal. Os pontos de movimento possuem rolamentos especialmente dimensionadas para assegurar partida fácil, movimento suave e parada na posição previamente estabelecida. Por fim, esse Lançador recebe a designação de Móvel porque pode ser desmontado e remontado em outra localidade.



FIGURA 4.1 – Lançador Móvel. (FAB, 2022)

- **Lançador de Porte Médio:** O Lançador de Porte Médio é o menor deles, tem capacidade de carga de 7 t e variação de azimute de 360° e variação de inclinação de 90°,



também podendo manter-se estacionado em qualquer posição desejada pelo operador. Sua estrutura é semelhante com a do Lançador Móvel, apresentando base de concreto fixa, corpo móvel rotativo, lança para acomodação do veículo e sistema de comando e controle. Porém, o seu movimento ocorre através de um fuso mecânico transversal que é acionado por um motor elétrico. Além disso, diferentemente do Lançador Móvel, esse equipamento não pode ser movimentado para outra localidade.



FIGURA 4.2 – Lançador de Porte Médio. (FAB, 2022)

#### 4.2.2 Sistema de Localização

Esse sistema é responsável pela aquisição e rastreamento do objeto lançado, conhecendo a cada instante e com grande precisão sua posição no espaço a fim de acompanhar a sua trajetória realizada. Dentre os seus equipamentos, aqueles englobados nesse estudo são:

- **Radar ADOUR:** é um radar de trajetografia localizado dentro do próprio CLA, a aproximadamente 6 km dos lançadores. Efetua o rastreamento do objeto lançado durante sua fase inicial de trajetória, sendo assim denominado de Radar de Proximidade. A sua antena é formada por um refletor principal paraboloide de revolução cujo centro está localizado a sua fonte primária e um refletor auxiliar hiperbólico de revolução, que gira numa taxa de 40 Hz. Na sua operação, permite a aquisição e rastreamento automático da posição de um engenho de até 10 m<sup>2</sup> de seção transversal a uma distância de 350 km, disponibilizando esses dados de localização em tempo real para seus clientes.

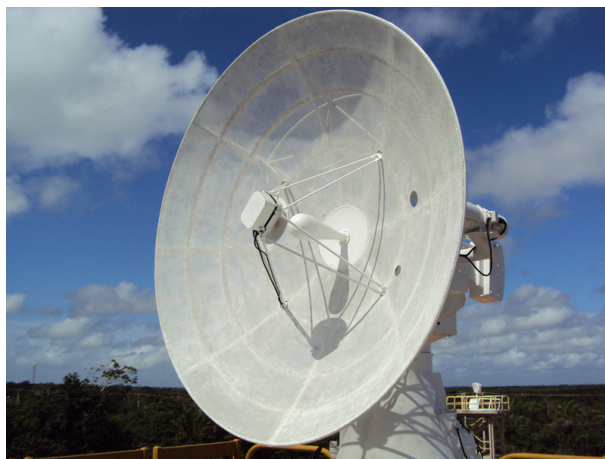


FIGURA 4.3 – Radar ADOUR. (FAB, 2022)

- **Radar ATLAS:** localizada na Estação de Rastreamento do Sítio da Raposa, a aproximadamente 30 km dos lançadores, efetua o rastreo do objeto lançado com uma precisão angular de 0,1 mrad, sendo assim denominado de Radar de Precisão. Possui seu funcionamento muito semelhante ao seu par ADOUR, com limitação de rastreo para um engenho de 10 m<sup>2</sup> de seção transversal a uma distância de 500 km.



FIGURA 4.4 – Radar ATLAS. (FAB, 2022)

### 4.2.3 Sistema de Telemidas

Esse sistema é responsável pelo recebimento e tratamento dos dados emitidos pelo veículo e carga útil, transmitindo-os em tempo real ou os armazenando para posterior análise, além de auxiliar a equipe de Localização no rastreo do engenho. Dentre os seus equipamentos, aqueles englobados nesse estudo serão as Antenas de Banda S, mais especificamente:

- **Antena STELLA 43:** Equipamento instalado na Estação de Telemidas de Alcântara, a aproximadamente 6 km de distância dos lançadores, possui diâmetro maior

do seu paraboloide de revolução de 10 m e ganho de recepção de até 43 dBi. É a principal antena da estação de Alcântara.



FIGURA 4.5 – Antena STELLA 43. (FAB, 2022)

- **Antena Redundante:** Equipamento instalado na Estação de Telemidas de Alcântara, a aproximadamente 6 km de distância dos lançadores, possui diâmetro maior do seu paraboloide de revolução de 4,5 m e ganho de recepção de até 37 dBi. Serve de apoio para a Antena principal STELLA 43.



FIGURA 4.6 – Antena Redundante. (FAB, 2022)

- **Antena ZODIAC:** Equipamento instalado na Estação de Telemidas do Sítio da Raposa, a aproximadamente 30 km de distância dos lançadores, possui diâmetro maior do seu paraboloide de revolução de 7,3 m e ganho de recepção de até 40 dBi.



FIGURA 4.7 – Antena Zodiac. (FAB, 2022)

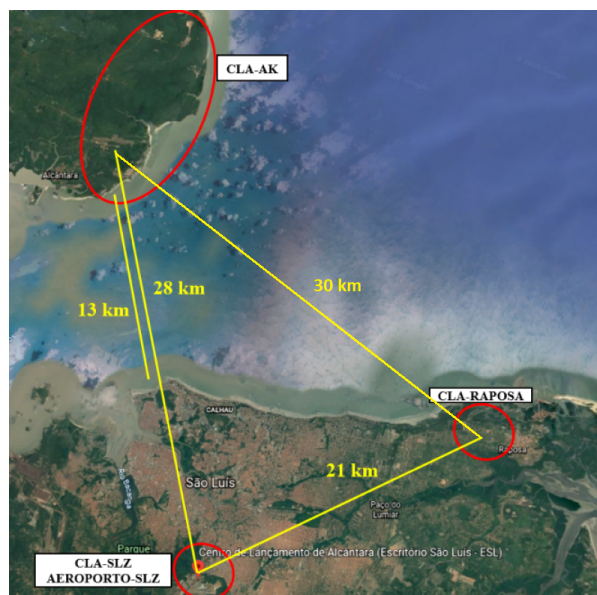


FIGURA 4.8 – Ilustração da posição das instalações do CLA e suas respectivas distâncias. (FAB, 2022)

### 4.3 Árvore de Falhas

Para se entender melhor o ambiente de operações do Centro e a interdependência dos seus equipamentos, foi construída uma árvore de falhas dos equipamentos listados anteriormente. Para que o Centro esteja operacional num dado momento, é necessário que todos os seus subsistemas estejam disponíveis, no caso, SPL, Localização e Telemedidas. Caso alguma dela apresente falha, isso implica uma falha do próprio Centro, já que uma das atividades fins será prejudicada ou, até mesmo, impraticada. Já dentro de cada subsistema, existem relações diferentes entre seus equipamentos que são expostas a seguir:

- **Setor de Preparação e Lançamento:** Para que esse subsistema esteja operacional, é necessário que pelo menos um dos lançadores esteja operacional. Isso porque

ambos exercem basicamente a mesma atividade, com apenas algumas mudanças de integração do veículo com um ou outro lançador que, de modo geral, afeta muito pouco a cronologia de operação. Dessa forma, caso um lançador esteja inoperante, o restante é capaz de suprir o seu papel.

- **Sistema de Localização:** Para esse subsistema, é necessário que ambos os radares estejam operacionais. Isso porque os seus funcionamentos são complementares: o radar ADOUR (Alcântara) é mais eficaz no início do lançamento, sendo capaz de obter a localização do veículo com maior rapidez. Já o radar ATLAS (Sítio da Raposa) é mais voltado para obtenção da localização com precisão, sendo mais lento na captura da posição do veículo. Esses dois equipamentos são integrados através de uma rede de designação que permite a troca de informações entre os dois equipamentos, funcionando assim de forma integrada. Dessa forma, caso um dos radares falhe, todo o Sistema de Localização fica comprometido.
- **Sistema de Telemédidas:** Esse sistema necessita de pelo menos duas antenas operacionais para coleta de dados do veículo e da carga útil, sendo uma antena operando em modo primária e outra em modo secundária. Dessa forma, quaisquer duas antenas operacionais das três disponíveis podem realizar tal operação.

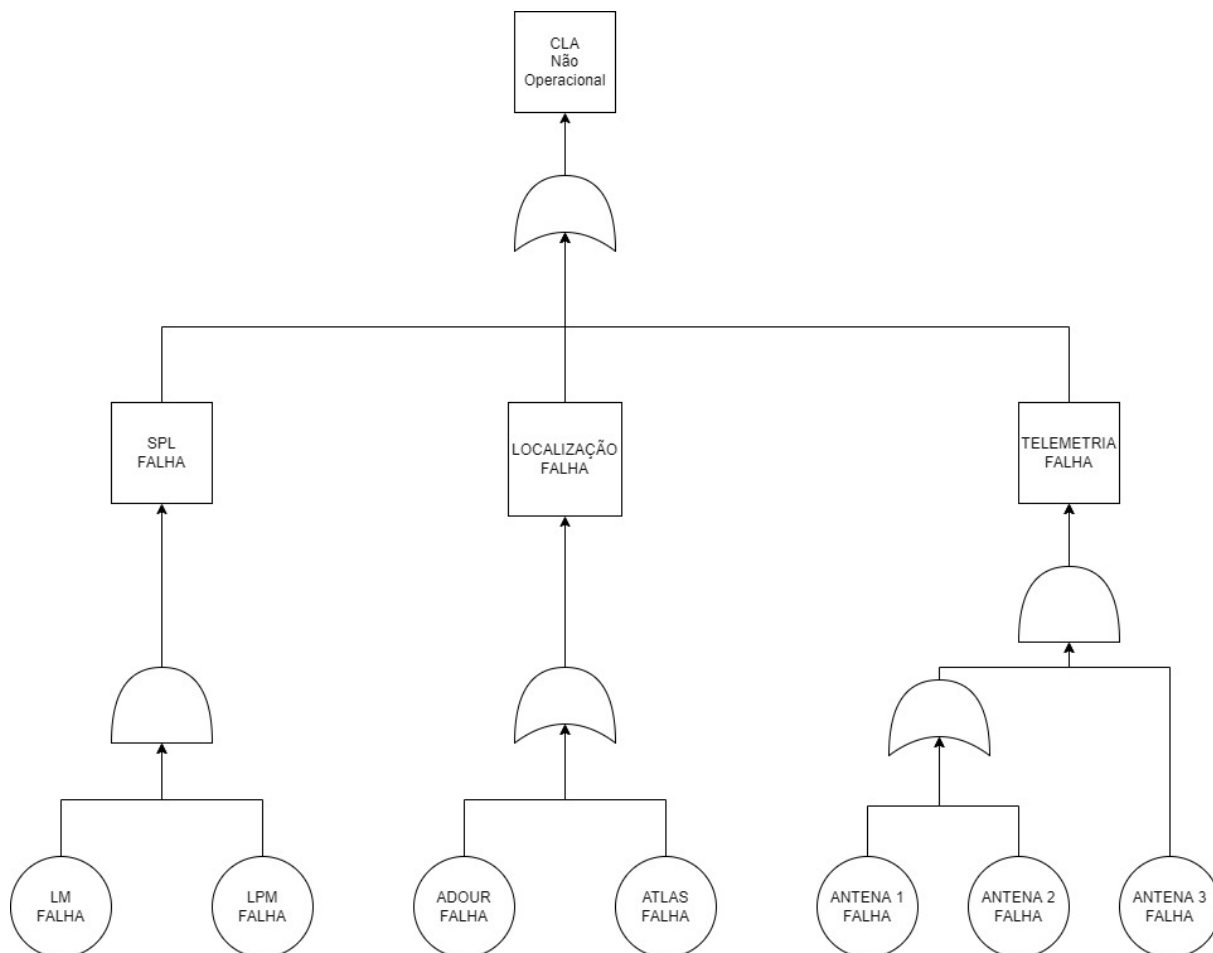


FIGURA 4.9 – Árvore de falhas do CLA. Fonte: autor

#### 4.4 Modelagem no *Software*

A modelagem do cenário de suporte do CLA foi realizada no OPUS10 sob licença acadêmica obtida pelo AeroLogLab (ITA, 2022), este último vinculado ao ITA. Por se tratar de uma licença de caráter estudantil, ela possui algumas restrições quando comparada a licença comercial, sendo a principal delas a limitação de até 3 sistemas principais e 20 componentes diferentes ao todo.

Dessa forma, foi considerado como sistemas principais os setores aos quais os equipamentos pertencem. Essa adaptação é razoável ao cenário real pois como os equipamentos de um mesmo setor possuem atividades fins semelhantes, as horas operacionais podem ser atribuídas ao setor em si, enquanto as relações de redundâncias apresentadas podem ser aplicadas aos componentes de cada equipamento. Porém, uma situação que ocorre no cenário real do Centro mas que não foi possível modelar é a de que apesar dos equipamentos possuírem componentes semelhantes, eles não são intercambiáveis. Para modelar essa situação, seria necessário criar componentes diferentes para cada equipamento. Mas,

devido a limitação de 20 componentes total, foi escolhido abranger mais componentes diferentes do que os repetir.

Por fim, ressalta-se que devido a essa limitação no número de componentes, escolheu-se priorizar aqueles classificados como *Disposal Units* (unidades de descarte) pois são aqueles não cobertos pelos contratos de manutenção com as empresas responsáveis. Isso faz com que em caso de falha, o próprio Centro seja responsável pela sua aquisição, ficando a empresa responsável apenas por sua remoção e instalação no equipamento.

Como os reparos de peças são cobertos por contratos com empresas externas, elas são responsáveis pela determinação de processos para realização de tal tarefa, que geralmente varia com o equipamento ou componente que é alvo do reparo. Dessa forma, decidiu-se por focar apenas na aquisição das peças em si, que não são cobertas pelos contratos e que, portanto, são atividades concernentes ao próprio CLA.

Entretanto, essa escolha possui alguns impactos nos resultados das simulações realizadas. Por considerar que todos os componentes simulados são consumíveis, não foi simulado o impacto que os reparos em si possuem no desempenho logístico do Centro. Com isso, toda a estrutura de reparo que estão sob responsabilidade dessas empresas externas foi desconsiderado, sendo as únicas atividades modeladas a substituição da peça em pane por uma do estoque e a realização das manutenções preventivas. Essa consideração, obviamente, aumenta o desempenho logístico geral do Centro, já que todas as indisponibilidades geradas por essas atividades foram retiradas do escopo dessa modelagem. Além disso, o custo de ciclo de vida é maior do que o esperado, dado que ao modelar esses componentes como consumíveis, toda pane desses componentes requer a aquisição de um novo, enquanto no cenário real ocorre o reparo é possível, com a mesma peça retornando a sua operação e evitando a aquisição de uma nova.

Entretanto, apesar de tornar o cenário modelado consideravelmente distante do cenário real, essas considerações permitem a realização de uma análise que, qualitativamente, se mantém verdadeira para o caso real, dado que o impacto nas curvas de desempenho seria bastante semelhante. Dessa forma, uma simulação mais profunda e aderente ao caso real indubitavelmente resultaria em curvas diferentes das apresentadas nesse trabalho, mas a mudança de comportamento com a implementação das modificações propostas seriam semelhantes.

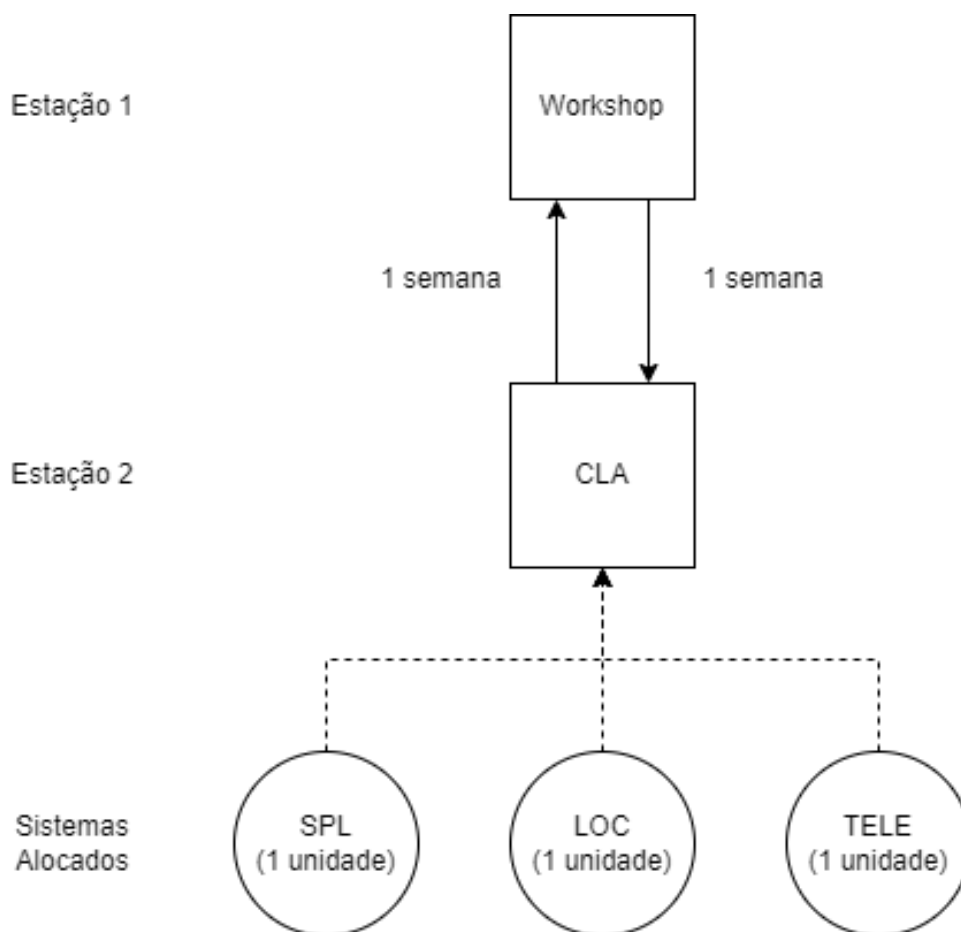


Sistema	Componente	Vida útil	Preço (R\$)	Tempo de aquisição	Quantidade
LOC	Magnetron	1000 hOp	360.000,00	12 meses	2
	TR Dupla	2000 hOp	150.000,00	12 meses	2
	TR Simples	2000 hOp	130.000,00	12 meses	1
TELE	Encoder	300 hOp	65.000,00	6 meses	3
	Servo Driver	750 hOp	180.000,00	18 meses	3
	Motor	1500 hOp	600.000,00	18 meses	3
	Servomecanismos	600 hOp	500.000,00	12 meses	3
	Módulo Monopulso	600 hOp	300.000,00	12 meses	3
	Amplificador	600 hOp	180.000,00	12 meses	3
SPL	Controlador	1500 hOp	18.000,00	12 meses	2
	Comunicador	1500 hOp	2.500,00	12 meses	2
	<i>Switch</i>	1500 hOp	3.500,00	12 meses	2
	<i>Conection Box</i>	1500 hOp	6.000,00	12 meses	2
	<i>Shelter</i>	600 hOp	7.500,00	12 meses	2
	Fonte	750 hOp	800,00	4 meses	2
	Chave fim 1	750 hOp	1.400,00	6 meses	4
	Chave fim 2	750 hOp	1.500,00	6 meses	6
	Contator	750 hOp	1.250,00	6 meses	10
	Disjuntor 1	750 hOp	1.500,00	8 meses	6
	Disjuntor 2	750 hOp	350,00	6 meses	4

TABELA 4.1 – Tabela de componentes modelados. Fonte: autor

Para as estações de suporte, foram consideradas o próprio CLA e um *Workshop* genérico, que é a estação ao qual as peças adquiridas são geradas. Isso foi feito porque muitos componentes comprados pelo CLA ou são importados ou são adquiridos de empresas localizadas na região Sudeste. Dessa forma, para simular o tempo de frete necessário para as novas peças chegarem até Alcântara, decidiu-se por adicionar esse *Workshop* e definir o tempo de transporte de 1 semana, que é o caso de peças que sejam muito grandes para serem transportadas por vias aéreas, sendo esse o pior caso.



FIGURA 4.10 – Cenário de Suporte modelado no *software*. Fonte: autor

Por fim, também foi modelado as manutenções preventivas previstas nos contratos de suporte dos equipamentos do Centro, pois apesar de serem manutenções programadas e previstas, o *Turnaround Time* desses processos impactam tanto no orçamento quanto na disponibilidade dos sistemas. Como foram considerados os setores como sistemas modelados, esse cenário considera que as manutenções preventivas dos equipamentos de cada setor ocorrem simultaneamente e possuem o mesmo *Turnaround Time*.

Sistema	Frequência	TAT	Custo (R\$)
SPL	Mensal	4 dias	9.000,00
	Semestral	4 dias	12.000,00
	Anual	10 dias	22.000,00
LOC	Bimestral	8 dias	252.790,60
TELE	Bimestral	10 dias	379.185,90

TABELA 4.2 – Descrição das manutenções preventivas dos equipamentos do CLA. Fonte: autor

## 4.5 Resultados

### 4.5.1 Peças sobressalentes

Com a metodologia descrita na seção anterior, o resultado da simulação para o caso do CLA é apresentado no gráfico da figura 4.11. O Centro considera como meta de desempenho logístico uma disponibilidade de 80%, dado que no seu histórico de operações, em média 20% do tempo operacional é voltado para operações de baixa prioridade, como operações de treinamento promovidas pelo próprio Centro.

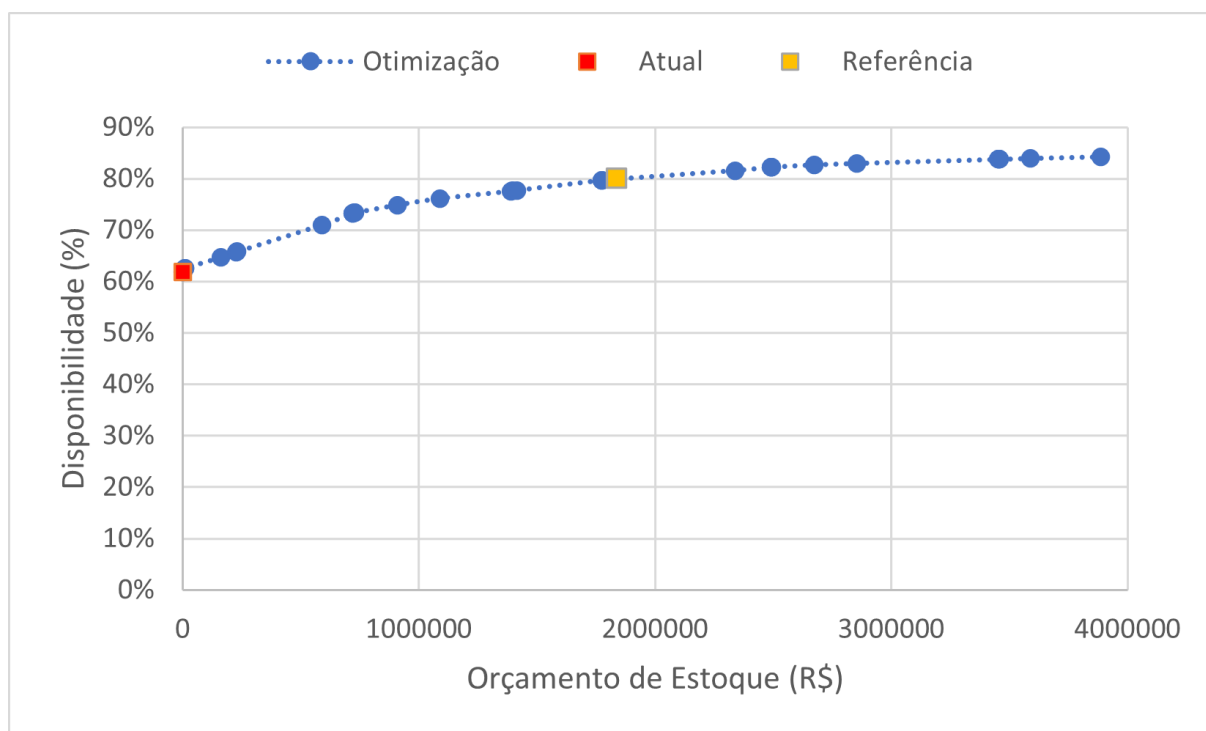


FIGURA 4.11 – Curva de custo-benefício para o caso padrão do CLA. Fonte: autor

O gráfico da figura 4.11 é uma curva de disponibilidade do Centro por orçamento de estoque. Cada ponto desse gráfico representa uma configuração diferente de estoque a ser mantida durante toda a sua operação. Nesse cenário, caso uma peça venha a falhar, ocorre a substituição por uma sobressalente e uma nova peça é adquirida para repor a faltante no estoque. Dito isso, o orçamento de estoque exposto no eixo das abscissas é o valor total de aquisição desse estoque, não considerando o valor das peças a serem compradas durante a operação.

Já no eixo das ordenadas é apresentado a disponibilidade máxima de cada configuração. Como o OPUS10 é um software de otimização de estoque, os pontos na curva representam o cenário ideal de operação dado uma configuração de estoque. Isso significa que numa operação real, considerando cada ponto, o sistema pode apresentar qualquer disponibilidade abaixo dessa curva, mas nunca acima. Isso ocorre devido ao fato de os

eventos de falha não serem determinísticos, ou seja, é impossível prever com exatidão quando esses eventos ocorrem. Dessa forma, o *software* considera o melhor dos casos justamente para fornecer o resultado otimizado desse sistema, apresentando um limite superior para seu desempenho logístico.

Atualmente, o Centro não trabalha com estoque de suas peças, fazendo aquisições apenas quando alguma peça instalada falha. Devido a alta especificidade das peças e, conseqüentemente, a demora em sua aquisição, essa estratégia afeta muito a disponibilidade dos sistemas. Dentro da simulação, representado na figura 4.11 pela ponto vermelho, essa estratégia apresenta um desempenho máximo de 62% de disponibilidade.

Utilizando uma estratégia que envolva aquisição e otimização de estoque, a simulação mostra que seria possível alcançar uma disponibilidade máxima de 80% alocando-se o equivalente a R\$ 1.839.400,00 em peças sobressalentes, como mostrado pelo ponto amarelo na figura 4.11.

Vale ressaltar que considerar uma estratégia de suporte que utilize estoque de peças não envolve apenas a aquisição inicial das peças. Seria necessário a alocação de espaço adequado (ou construção, caso seja necessário), controle e fiscalização da quantidade e estado das peças sobressalentes estocadas e o estabelecimento de um processo bem definido de embalagem e armazenamento para cada tipo de peça, de acordo com suas especificações, o que gera custos adicionais recorrentes no orçamento de suporte do Centro que não foram considerados nesse trabalho. Entretanto, é inegável que esse tipo de solução, quando bem implementada, possui grande impacto positivo no desempenho logístico de um sistema, principalmente daqueles que apresentem alto nível de especificidade, como é o caso do CLA. Isso é demonstrado pelo fato de que, atualmente, é impossível que o Centro alcance a meta de 80% de disponibilidade sem a utilização de estoque.

### 4.5.2 Aquisição de peças

A idéia de se estabelecer um estoque de peças sobressalentes, apesar de efetiva, é quase trivial para suporte de equipamentos complexos. Essa solução surge para equilibrar a relação entre frequência de demanda por peças e o *lead time* para fabricação ou aquisição delas. Para o caso de sistemas complexos, esse *lead time* geralmente é longo devido a especificidade das peças e componentes, que possuem fabricação demorada e praticamente sob demanda. Porém, para o caso do CLA, também contribuem para esse alto *lead time* algumas ineficiências burocráticas, dado que o Centro é de propriedade governamental. Devido a essa característica, o processo de aquisição precisa passar por várias etapas administrativas e aduaneiras, o que o torna bastante moroso e, em alguns casos, até mais caros.

Dito isso, uma outra solução proposta é a de redução do *lead time* para aquisição de peças através da redução dessas ineficiências burocráticas, seja pela melhora de seus processos internos, seja através da inclusão dessa tarefa e de metas de desempenho no contrato com a empresa responsável pela manutenção.

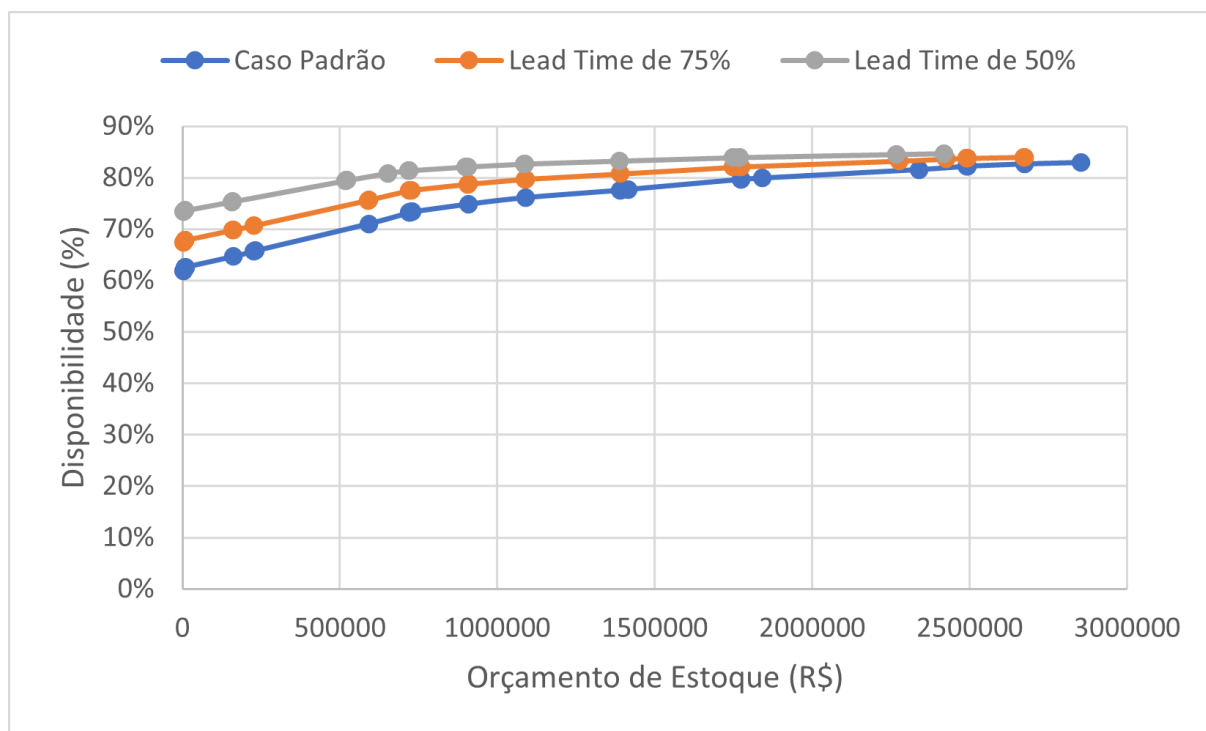


FIGURA 4.12 – Impacto da redução do *lead time* de aquisição nas curvas de custo-benefício de suporte do CLA. Fonte: autor

A figura 4.12 mostra o impacto da redução de *lead time* no cenário de suporte do CLA. Nela, foram consideradas o caso padrão, como descrito nas seções anteriores, representada pela curva azul, e os casos de redução para 75% e 50% no *lead time* de aquisição de todas as peças, representadas pelas curvas laranja e cinza, respectivamente. Nota-se que para o caso sem estoque (orçamento de estoque nulo), a disponibilidade máxima aumenta de 62% para 67% para o caso de redução para 75% e aumenta de 62% para 73% para o caso de redução para 50%. Além disso, considerando a referência de 80% de disponibilidade máxima, o orçamento de estoque cai de R\$ 1.839.400,00 para R\$ 1.388.550,00 e para R\$ 521.150,00, respectivamente. Pelo formato das curvas, é possível concluir também que para um mesmo orçamento de estoque, o ganho de disponibilidade é relativamente baixo, com aumento máximo de 5% e 10% para cada caso, respectivamente. Além disso, esse aumento vai diminuindo com o aumento do estoque, já que as curvas tendem a se aproximarem. Entretanto, quando se olha sob perspectiva de meta de disponibilidade máxima, a redução no orçamento de estoque é bastante considerável, com reduções iniciais da ordem de R\$ 300.000,00 e R\$ 700.000,00, respectivamente, notando-se reduções de orçamento ainda maiores com o aumento do nível de referência de disponibilidade máxima.

Olhando para o lado operacional, reduzir em 50% o *lead time* de aquisição de todas as peças através de melhorias de processos internos possa ser um objetivo irreal a curto prazo. Dito isso, uma forma de aplicar essa solução seria delegar a tarefa de aquisição e estoque de peças para a empresa contratada, aplicando incentivos positivos baseados em desempenho nesse contrato logístico, já que a empresa privada possui um potencial muito maior de redução desse tempo do que o Centro em si. Esse acréscimo de contrato acarretaria também num acréscimo do seu custo total, sendo necessário um estudo aprofundado para se avaliar até que ponto seria vantajoso para o CLA realizar tal acréscimo ou fazer as aquisições por si próprio, focando nas melhorias de seus processos internos.

Entretanto, é possível concluir desse estudo que a estratégia de redução do *lead time* é efetiva apenas para determinados objetivos. Caso o objetivo seja o aumento da disponibilidade de um sistema para um mesmo nível de estoque, essa estratégia é pouco eficaz, dado que mesmo considerando a redução de 50% de *lead time* de todos os itens, o que operacionalmente pode ser uma meta difícil de se atingir, o ganho de disponibilidade é de no máximo 11%. Esse ganho se torna ainda menor com o aumento do estoque empregado. Isso reforça também a importância da aplicação de estoque no cenário do suporte do CLA, dado que mesmo com a redução de 50% do *lead time*, ainda seria impossível alcançar a meta de disponibilidade sem o uso de estoque.

Por outro lado, caso o objetivo seja reduzir o estoque mantendo um mesmo desempenho logístico, essa estratégia se mostra eficiente, dado que é capaz de reduzir em 70% o orçamento de estoque, considerando a meta de disponibilidade.

### 4.5.3 Manutenção Preventiva

Focando em melhorar o desempenho logístico através da otimização de seus processos internos, também foi sugerido a redução do *turnaround time* das manutenções preventivas. Como essas manutenções possuem bastante frequência durante o ano, considerou-se válido o estudo do seu impacto na disponibilidade geral do Centro. Para isso, considerou-se o impacto da redução do *turnaround time* para 75% e 50% para todas as manutenções previstas.

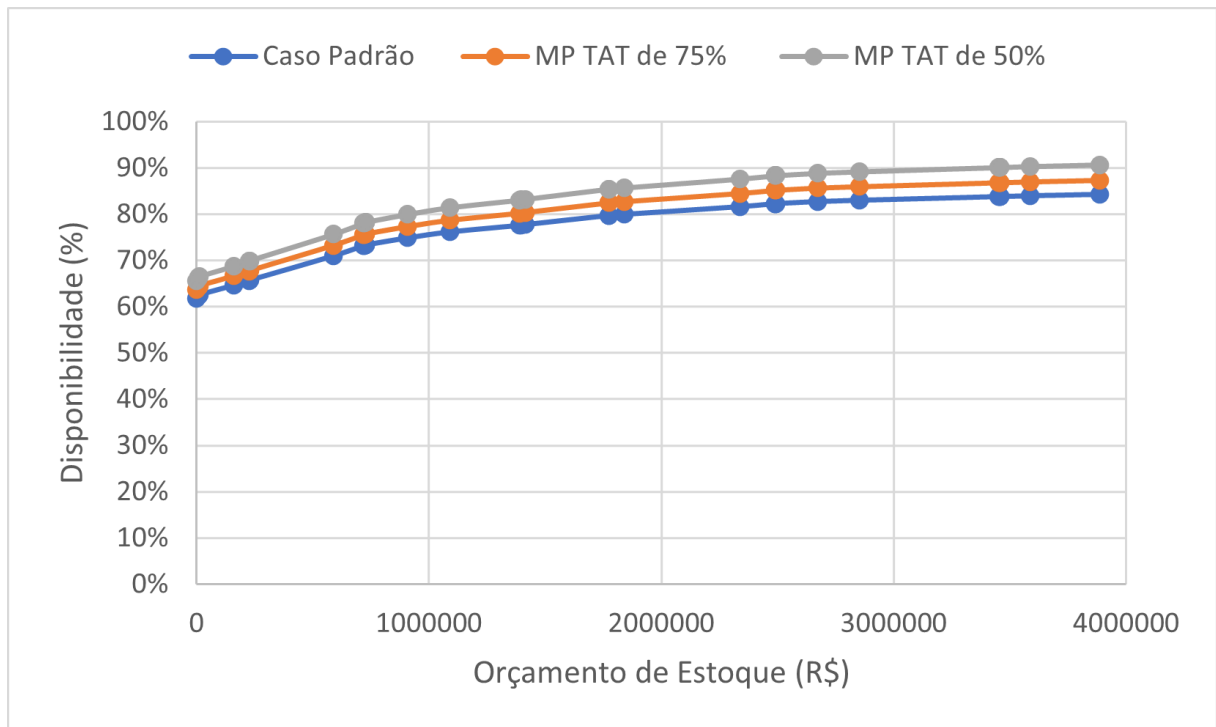


FIGURA 4.13 – Impacto da redução do *turnaround time* das manutenções preventivas nas curvas de custo-benefício de suporte do CLA. Fonte: autor

Pela figura 4.13, observa-se que o comportamento das três curvas é bem semelhante, com um leve deslocamento na direção positiva do eixo das ordenadas. Isso faz com que a diferença de disponibilidade para um mesmo orçamento seja de 2% e 4% para as reduções para 75% e 50%, respectivamente. Isso mostra que essa estratégia é ainda menos efetiva para aumento da disponibilidade do que a redução do *lead time* de aquisição de peças. Entretanto, considerando a disponibilidade de referência, é possível observar uma redução no orçamento de estoque de R\$ 1.839.400,00 para R\$ 1.388.550,00 e para R\$ 908.550,00, respectivamente. Ou seja, seguindo a estratégia anterior, a redução do *turnaround time* das manutenções preventivas é efetiva para redução no orçamento de estoque necessário, mas não para aumento significativo da disponibilidade do sistema.

## 5 Diagnóstico do cenário de suporte

A partir dos conceitos do IPS apresentados anteriormente, é possível fazer um diagnóstico do sistema de apoio logístico do CLA focado em cada um dos elementos daquele conceito, já que dessa forma, é possível detalhar melhor a análise e entender como o desempenho do Centro num dos elementos afeta o desempenho em outros, dado a integração existente entre eles.

- **Gerenciamento de suporte:** toda a estratégia de suporte do Centro é pautada na reação ao evento da falha. Dessa forma, praticamente não ocorre nenhum planejamento ou gerenciamento dos recursos baseados na antevisão desse tipo de evento, sendo tudo organizado após a falha ser detectada. Uma consequência disso é a não utilização de estoque de peças sobressalentes, fazendo com que sempre que uma componente falha, aquele equipamento fique indisponível até que seu reparo seja executado ou, em caso de condenação da peça ou caso a peça seja descartável, até que uma nova seja adquirida. Além disso, sistemas de controles simples como o levantamento de horas de uso dos equipamentos e seus componentes estão presentes para somente alguns equipamentos, sendo esses bem rudimentares. Assim, seja pela falta de pessoal dedicado a essa atividade, seja pela falta de recursos financeiros para se alocar, o gerenciamento de suporte dos equipamentos é delegado ao próprio responsável de cada equipamento, que geralmente está mais focado em operá-lo do que suportá-lo;
- **Manutenção:** com relação a esse elemento, praticamente todo o plano de manutenção dos equipamentos avaliados nesse estudo são montados pela empresa de manutenção contratada pelo Centro. Apesar desses planos estarem de acordo com os manuais do fabricante, não existe um esforço de melhora ou estudos de modificação desses planos, seja por impossibilidades técnicas, seja por falta de investimento para realização dessas modificações. Dessa forma, não existe um incentivo para a empresa em melhorar o seu desempenho logístico, como o tempo ou o custo dessas manutenções;
- **Suprimentos:** o contrato de manutenção atual do Centro não cobre a aquisição de peças de maior valor agregado, ficando essa compra a cargo do próprio CLA.

Devido a alta especificidade de seus componentes aliado as dificuldades burocráticas de aquisição e importação de produtos para órgãos públicos, o processo de aquisição de novas peças dura vários meses, aumentando ainda mais a indisponibilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, a indisponibilidade do próprio Centro;

- **Operações Logísticas:** considerando o fato de que todos os equipamentos analisados nesse trabalho são fixos, o trabalho de Operações Logísticas se limita a armazenagem e transporte de seus componentes. Nesse sentido, o Centro possui protocolos muito bem definidos seguindo todas as recomendações dos fabricantes, principalmente devido a uma cláusula no contrato com a empresa de manutenção que exige que o Centro siga essas recomendações, do contrário a empresa pode negar a realização do serviço de reparo ou troca. Além disso, vale ressaltar que o Centro também segue os protocolos de armazenagem e transporte das fabricantes dos foguetes que ele mesmo opera, atividade essa considerada da mais críticas durante uma operação de lançamento;
- **Recursos computacionais:** com relação ao suporte logístico do Centro, esse elemento é um dos principais pontos fracos do seu sistema. Isso porque pouquíssimos recursos computacionais são utilizados no suporte logístico, além daqueles estritamente essenciais para execução das manutenções preventivas nos módulos eletrônicos. Dessa forma, não há qualquer auxílio computacional na verificação da integridade funcional dos componentes mecânicos bem como na sua instalação ou remoção. Além disso, também não existe um sistema informatizado de controle da quantidade horas operacionais que determinado equipamentos possui nem de gerenciamento de estoque, sendo isso consequência da estratégia reativa ao evento da falha que é aplicada;
- **Engenharia de Suporte Continuada:** outro ponto negativo bastante proeminente dentro do sistema de suporte do Centro. Isso porque não há esforços significativos no sentido de melhorar o desempenho logístico dos equipamentos, tanto por parte do Centro quanto por parte da empresa contrata. Para o primeiro, isso ocorre muito devido à falta de pessoal para se dedicar a essa tarefa, principalmente pessoal qualificado na área de logística, e devido às limitações orçamentárias necessárias para aplicação das futuras modificações sugeridas. Já para a empresa contratada, esse esforço é mínimo dado que as bases de desempenho para o contrato consideram apenas os prazos para realização das manutenções, e não indicadores logísticos mais representativos, como a taxa de disponibilidade dos equipamentos e o custo de suporte geral. Outros elementos que são diretamente afetados por esses problemas são Manutenção, Suprimentos e Recursos Logísticos, já que as falhas apontadas nesses elementos anteriormente passam diretamente pelo elemento atual;
- **Influência de Desenho:** apesar de alguns equipamentos do Centro passarem por



modernizações de seus componentes e interfaces, essas mudanças visam melhorias a parte operacional do equipamento, ou seja, não ocorre um estudo prévio de custo de ciclo de vida dessas modernizações. Dessa forma, o impacto que essas modificações implicarão no cenário de suporte do produto é completamente incerto, de modo que muitos dos componentes adicionados são mais caros e menos numerosos no mercado, dificultando a sua aquisição, ou mais complexos de se reparar ou apresentam uma taxa de falha maior, dificultando a sua manutenção;

- **Dados Técnicos:** atualmente, o CLA possui uma parceria com a Universidade Federal do Maranhão (UFMA) em que seus alunos de Engenharia Aeroespacial realizam alguns trabalhos acadêmicos de interesse do Centro, com algumas publicações já ocorridas. Além disso, existe um esforço do Centro de atrair alunos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) para também realizações de trabalhos acadêmicos, como iniciações científicas e trabalhos de graduação. Sobre documentação, o Centro possui um bom acervo sobre o seu histórico de operações, possuindo relatórios de missões, cronologias realizadas e problemas identificados. Porém, documentação sobre as ações logísticas dos seus equipamentos são um pouco desconsideradas, sendo quase todo os dados deixados na responsabilidade da empresa contratada;
- **Infraestrutura:** o CLA conta hoje com toda a infraestrutura necessária para operações de lançamento de foguetes, como Prédio de Preparação de Propulsores, de Carga útil, de Propelentes líquidos, Centro de Controle, Casamata, Centro Médico, Hotéis e Casas para acomodação etc. Porém, grande parte dessas infraestruturas necessitam de manutenções mais recorrentes das que já ocorrem hoje principalmente dada as condições ambientais aos quais estão localizadas, com a proximidade do mar aumentando significativamente a degradação de suas estruturas. Porém, um ponto positivo importante é que o Centro possui hoje uma grande área reservada ainda não efetivada. Isso garante um amplo espaço para construção de novas infraestruturas caso algum cliente ou o próprio governo brasileiro tenha necessidade para tal;
- **Equipamentos de Suporte:** outro ponto negativo do cenário logístico do CLA são seus equipamentos de suporte. Isso porque devido à complexidade da natureza de suas atividades, o Centro demanda de equipamentos de suporte tão complexos a ponto de possuírem planos de manutenção próprios. Porém, esses equipamentos de suporte sofrem dos mesmos problemas logísticos apontados anteriormente, como falta de estoque de sobressalentes, dificuldade na aquisição de peças e falta de previsibilidade dos eventos de falha. Além disso, por se tratar de equipamentos secundários, eles não possuem planos de manutenção preventivos, sendo completamente dependentes de manutenções corretivas. Já sobre os equipamentos de apoio logístico para as realizações das manutenções, esses são geralmente concentrados na sede da empresa contratada, em São José dos Campos, com o Centro possuindo

apenas equipamentos mais básicos para correção de falhas menores e simples. Isso faz com que os equipamentos que necessitem de reparos mais profundos demorem cerca de 1 semana apenas no trajeto entre as duas localidades;

- **Pessoal:** por ser tratar de uma organização sob administração estatal, o CLA possui algumas dificuldades administrativas para realização de contratação de pessoal. Isso porque os servidores civis são contratados via concursos públicos, que geralmente levam bastante tempo e custos e, por isso, são realizadas com uma frequência baixíssima. Já os servidores militares possuem alta rotatividade, visto que são transferidos para outra localidade a cada 4 ou 5 anos, em média. Isso faz com que o Centro possua baixa mão de obra própria, apesar de bastante qualificada para realização de suas tarefas.
- **Treinamentos:** devido principalmente ao caráter sigiloso de suas atividades, é relativamente difícil para o CLA realizar treinamentos específicos em outros centros de lançamento de maiores portes. Além disso, devido a sua localização e a condição de sua mão de obra pouco numerosa, a liberação de servidores para realizarem especialização por conta própria em outras localidades é pouco frequente.

## 6 Conclusão

A proposta desse trabalho foi realizar a aplicação de alguns conceitos de engenharia logística na operação de lançamento de foguetes suborbitais. Para isso, foi realizado um estudo de caso do Centro de Lançamento de Alcântara, devido a sua importância estratégica no Programa Espacial Brasileiro e devido ao incômodo histórico de indisponibilidade de seus principais equipamentos.

Dessa forma, foi realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos a serem aplicados nesse trabalho, em especial, ao Apoio Integrado ao Produto e seus elementos. Após isso, foi realizado um estudo de campo para compreender melhor a operação do Centro e os principais problemas logísticos enfrentados.

De posse dessas informações, foi realizada uma simulação do cenário de suporte do Centro utilizando o *software* OPUS10. Para isso, foram elecandos os principais equipamentos a serem analisados nessa simulação de acordo com seu índice de significância para a missão do Centro, sua taxa de falhas e o valor de aquisição de cada equipamento. O mesmo foi realizado com seu componentes. Também foi montada a árvore de falhas desses equipamentos, demonstrando como a falha de um equipamento impacta no funcionamento do CLA como um todo.

Na simulação, foram avaliados os impactos de três soluções propostas: a implementação de um estoque de itens, a redução do *lead time* de aquisição de peças e a redução do *turnaround time* das manutenções preventivas. A partir dessas simulações, foi possível concluir que a estratégia principal que o Centro deve seguir é a implementação de um estoque de peças, visto que é a única estratégia que, aplicada sozinha, consegue atingir a meta de desempenho logístico requerida. Apesar de se demonstrarem pouco efetivas em aumentar o nível de disponibilidade do sistema, as duas outras estratégias foram eficazes em reduzir o tamanho do orçamento destinado ao tamanho do estoque em si, podendo serem vistas como ações secundárias e aplicadas juntas com a implementação de estoque.

Por fim, foi realizada um diagnóstico do cenário de suporte do Centro focada em cada um dos doze elementos do IPS, mostrando os pontos positivos e negativos e sugerindo formas de implementação das modificações estudadas anteriormente.

Como sugestão para continuidade desse trabalho, há algumas frentes que podem ser

seguidas a fim de aprimorá-lo:

- **Melhora da imersão da simulação no caso real de operação do CLA:** além das limitações impostas pela licença estudantil utilizada nesse trabalho, o OPUS10 é um *software* focado na otimização do cenário logístico. Dessa forma, sugere-se um estudo de simulação de operação do Centro considerando eventos cronológicos, dado que as operações são concentradas. Dessa forma, seria possível determinar, por exemplo, as melhores janelas de aquisição de peças e realização de manutenções preventivas.
- **Estudo de custo-benefício da implementação de requisitos logísticos nos contratos de manutenção do CLA:** atualmente, as métricas dos contratos de manutenção do CLA envolvem exclusivamente *turnaround time* de manutenções corretivas. Dessa forma, a empresa contratada possui pouco incentivo em melhorar o desempenho logístico dos equipamentos do CLA, como sugestão de melhorias nos equipamentos e treinamentos para seus funcionários. Porém, a introdução desses requisitos acarreta num aumento do custo desses contratos. Dito isso, uma análise do custo-benefício dessas implementações pode ser um importante auxílio para o desempenho logístico do CLA.
- **Estudo do impacto das condições ambientes na operação dos equipamentos do CLA:** devido a sua proximidade com o mar, os principais equipamentos do CLA estão sujeitos a exposição a alta umidade do ar, que acelera o processo de corrosão de metais, além de prejudicar circuitos eletrônicos. Dessa forma, uma análise do impacto dessa exposição nos equipamentos e sugestões de como evitá-los ou minimizá-los também seriam de grande auxílio para o desempenho logístico do Centro.

Com esses tópicos citados, é possível dar continuidade na análise e melhoria do cenário logístico do CLA, auxiliando também na implementação do CEA e no desenvolvimento do Programa Espacial Brasileiro.

# Referências

- ABNT. **NBR5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade**. [S.l.], nov 1994. 37 p.
- ANDRADE, I. de O.; CRUZ, R. L. V.; HILLEBRAND, G. R. L.; SOARES, M. A. O centro de lançamento de alcântara: Abertura para o mercado internacional de satélites e salvaguardas para a soberania nacional. IPEA, out 2018. Available at: [https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_contentview=articleid=34473Itemid=433](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_contentview=articleid=34473Itemid=433). Accessed on: 18 Mar. 2022.
- BEVICTORI, L. F. N. **Aplicação da Análise de Árvores de Falhas (FTA) e proposta de Análise dos Modos de Falhas e Efeitos (FMEA) na cadeia logística da aviação de transporte da Força Aérea Brasileira**. [S.l.], 2010. 84 p.
- BLANCHARD, B. S. **Logistics Engineering and Management**. 6rd. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- DAU. **Level of Repair Analysis (LORA)**. 2022. Available at: <https://www.dau.edu/acquipedia/pages/ArticleContent.aspx?itemid=300>. Accessed on: 17 nov. 2022.
- ECSS. **Space engineering**: Logistics engineering. [S.l.], 2010. 29 p.
- FAB. **Centro Espacial de Alcântara - Manual de Usuário**. [S.l.], 2022. 68 p.
- FARIA, M. F. de S. B. **Estudo do vento no Centro de Lançamento de Alcântara usando Árvore de Decisão**. [S.l.], 2018. 41 p.
- FIGUEIREDO, M. C.; SCANFONE, L.; MOTA, D. C. Análise do impacto do *Turnaround Time* de reparáveis na disponibilidade da frota do projeto c-95m. **Revista Defesa e Segurança (RDS)**, v. 4, n. 3, p. 42–60, abr 2020. Available at: <https://revistaeletronica.fab.mil.br/index.php/afa/issue/view/12>. Accessed on: 08 abr. 2022.
- FILHO, D. H. da S. Considerações sobre a comercialização do centro de lançamento de alcântara. **Parcerias Estratégicas**, v. 4, n. 7, p. 75–85, out 1999. Available at: [http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias\\_estrategicas/article/view/81](http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/81). Accessed on: 21 abr. 2022.
- HELMAN, H.; ANDERY, P. R. P. **Análise de Falhas**: aplicação dos métodos de fmea - fta. [S.l.], 1995. 156 p.

ITA. **AeroLogLab**: Laboratório de engenharia logística do ita. 2022. Available at: <https://www.aerologlab.ita.br/>. Accessed on: 08 set. 2022.

PINTO, D. G. F.; 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. **Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE)**, p. 55–60, 2018. Available at: [https://www.sige.ita.br/edicoes-anteriores/2018/st/ST\\_04\\_2.pdf](https://www.sige.ita.br/edicoes-anteriores/2018/st/ST_04_2.pdf). Accessed on: 08 ago. 2022.

SX000I. **International Specification for Integrated Product Support (IPS)**. [S.l.], 2021. 632 p.

SYSTECON. **OPUS10**: More than spare parts optimization. Available at: <https://www.systecongroup.com/us/software/opus10-more-spare-parts-optimization>. Accessed on: 08 abr. 2022.

SYSTECON. **OPUS10**: Application areas. Available at: <https://www.systecongroup.com/us/knowledge-center/opus10-application-areas>. Accessed on: 08 abr. 2022.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

<sup>1</sup> CLASSIFICAÇÃO/TIPO  <p style="text-align: center;"><b>TC</b></p>	<sup>2</sup> DATA  <p style="text-align: center;">27 de outubro de 2022</p>	<sup>3</sup> REGISTRO N°  <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-021/2022</p>	<sup>4</sup> N° DE PÁGINAS  <p style="text-align: center;">61</p>
<sup>5</sup> TÍTULO E SUBTÍTULO:  Conceitos de engenharia logística aplicados à operação de lançamento de veículos suborbitais.			
<sup>6</sup> AUTOR(ES):  <b>Guilherme Sousa de Moraes</b>			
<sup>7</sup> INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):  Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
<sup>8</sup> PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:  1. Alcântara. 2. Logística. 3. Suportabilidade.			
<sup>9</sup> PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:  Logística (administração); Veículos de lançamento; Centro de lançamento de Alcântara; Análise de falhas; Estudo de caso; Administração.			
<sup>10</sup> APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;"><b>( X ) Nacional ( ) Internacional</b></span>  ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica. Orientador: Prof. Dr. Fernando Teixeira Mendes Abrahão. Publicado em 2022.			
<sup>11</sup> RESUMO:  Este estudo apresenta uma aplicação de conceitos logísticos na operação de lançamento de veículos suborbitais. Tomou-se para estudo o caso do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) por ser o principal centro de lançamento do Brasil, possuindo importância estratégica para o programa espacial brasileiro, e pela introdução do Centro Espacial Alcântara (CEA), iniciativa que permitirá o lançamento de veículos estrangeiros na área do CLA, atraindo novos projetos, novos investimentos e, principalmente para o escopo desse trabalho, uma frequência de operações nunca realizada anteriormente. Ao longo da aplicação desses conceitos, foram identificadas as principais restrições de suporte responsáveis pela indisponibilidade dos equipamentos do Centro, além de algumas ações gerenciais que poderão otimizar a gestão da qualidade na previsão dos eventos de falha. O trabalho também tem como objetivo a realização de uma simulação para diagnosticar quantitativamente a atual situação logística do Centro e os impactos que as soluções propostas implicariam no cenário de suporte.			
<sup>12</sup> GRAU DE SIGILO:  <p style="text-align: center;"><b>( X ) OSTENSIVO ( ) RESERVADO ( ) SECRETO</b></p>			