

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

PIETER VAN TILBURG BERNARDES

GESTÃO DA QUALIDADE EM NANOSSATÉLITES: ANÁLISE HISTÓRICA DE
MISSÕES DE NANOSSATÉLITES E ANÁLISE FTA PRELIMINAR DO CUBESAT
CATARINA-A1

Joinville
2023

PIETER VAN TILBURG BERNARDES

GESTÃO DA QUALIDADE EM NANOSSATÉLITES: ANÁLISE HISTÓRICA DE
MISSÕES DE NANOSSATÉLITES E ANÁLISE FTA PRELIMINAR DO CUBESAT
CATARINA-A1

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Talita Sauter Possamai

Coorientadora: Damylle Xavier Donati

Joinville
2023

PIETER VAN TILBURG BERNARDES

GESTÃO DA QUALIDADE EM NANOSSATÉLITES: ANÁLISE HISTÓRICA DE
MISSÕES DE NANOSSATÉLITES E ANÁLISE FTA PRELIMINAR DO CUBESAT
CATARINA-A1

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 23 de junho de 2023.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Talita Sauter Possamai

Data: 05/07/2023 17:35:36-0300

CPF: ***.039.319-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Orientadora: Dra. Talita Sauter Possamai
Orientadora
Presidente



Documento assinado digitalmente

Gian Ricardo Berkenbrock

Data: 06/07/2023 10:24:53-0300

CPF: ***.641.149-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Gian Ricardo Berkenbrock
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Luis Fernando Peres Calil

Data: 06/07/2023 17:26:00-0300

CPF: ***.477.678-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Luis Fernando Peres Calil
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho de conclusão de curso a todos que acreditaram em meu potencial, apoiando-me de forma incondicional ao longo desta jornada acadêmica. Agradeço a minha família por seu amor e suporte constantes, aos meus amigos pelo incentivo e companheirismo, e aos meus professores pela orientação e conhecimento transmitidos. Agradeço a Deus por sua graça e sabedoria, guiando me em cada passo deste caminho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a conclusão bem-sucedida deste trabalho de conclusão de curso do curso de Engenharia Aeroespacial do Universidade Federal de Santa Catarina.

Primeiramente, sou grato a minha orientadora e professora, Talita Sauter Possamai, pela sua orientação dedicada e valiosos insights ao longo de todo o processo. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, e sou imensamente grato por sua paciência e expertise na área. Também agradeço a aluna de mestrado, Danylle Xavier, por toda ajuda e suporte. Suas sugestões e críticas construtivas ajudaram-me a aprimorar minhas ideias e a encontrar soluções para os desafios enfrentados ao longo do caminho. Agradeço especialmente pela disponibilidade em compartilharem seus conhecimentos e experiências, que foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e profissional. Suas orientações e feedbacks contribuíram para minha compreensão mais aprofundada do tema estudado, ampliando meu horizonte de conhecimento.

Agradeço também ao meu pai, George, minha mãe, Yara, e meus irmãos, Erik e Nicolas, pelo apoio e amor incondicional durante toda a jornada. Agradeço aos amigos que esta jornada acadêmica me proporcionou, em especial a Larissa Coutinho, Lucas Gregório, Yuri Achermann, Hans Herbert, Gabriel Ienaga e Lucas Martins. Suas palavras de encorajamento e apoio foram fundamentais para me manter motivado e focado nos momentos desafiadores.

Não posso deixar de mencionar os professores e colegas de curso que contribuíram com discussões estimulantes e sugestões construtivas ao longo do meu percurso acadêmico. Agradeço a todos que compartilharam seu conhecimento e experiência, enriquecendo meu aprendizado e ajudando-me a crescer como estudante e profissional. Dedico minha gratidão a todos da equipe Kosmos Rocketry por todas convivências compartilhadas, por sempre acreditarem e confiarem em mim e meus trabalhos. Na mesma medida, agradeço aos integrantes e da Atlética Camaleão que me proporcionaram experiências inesquecíveis e pela deposição de confiança em mim. Dedico meu enorme agradecimento aos integrantes da KUASE Rep que desde o começo me acolheram e me receberam como se fosse parte da família.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a todos que estiveram ao meu lado e que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, mesmo que não mencionados aqui. Seu apoio e incentivo foram essenciais para alcançar esse marco importante em minha jornada acadêmica, estou verdadeiramente grato por fazerem parte dessa conquista.

RESUMO

A falta de dados de qualidade é um desafio significativo na área de CubeSats. Embora esses nanossatélites tenham se tornado cada vez mais populares, ainda existe uma escassez de informações consistentes e confiáveis sobre seu desempenho em missões espaciais. Essa falta de dados pode limitar o desenvolvimento e o progresso desses dispositivos. Para compreender melhor o cenário dos CubeSats, foi realizada uma análise histórica dos lançamentos de nanossatélites com dimensão até 3U. Essa análise fornece uma visão abrangente da evolução desses dispositivos ao longo do tempo, destacando o número de lançamentos ao redor do mundo e a diversificação de suas aplicações. Adicionalmente, a contextualização histórica é fundamental para compreender o contexto atual dos CubeSats e identificar tendências e desafios futuros. Além disso, um estudo das falhas ocorridas nos CubeSats foi conduzido. Essa análise qualitativa identificou os principais tipos de falhas que ocorrem nesses nanossatélites, como problemas de comunicação, falhas no sistema de energia e problemas no sistema de controle. Compreender essas falhas é essencial para melhorar o projeto e a confiabilidade dos CubeSats, aprimorando sua eficácia e garantindo uma maior taxa de sucesso nas missões espaciais. Com a realização do mapeamento dos tipos e frequência de falhas que ocorrem, é aplicado a Análise de Árvore de Falhas (FTA) no CubeSat Catarina-A1, o primeiro satélite da frota A da Constelação Catarina. A aplicação da Análise de Árvore de Falhas oferece uma abordagem preliminar e sistemática para identificar e mitigar os riscos no Catarina-A1, melhorando seu desempenho e aumentando a eficiência de sua missão.

Palavras-chave: Gestão. CubeSat. Nanossatélite. Falhas. Confiabilidade

ABSTRACT

The lack of reliability data is a significant challenge in the area of CubeSats. Although these nanosatellites have become increasingly popular, there is still a shortage of consistent and reliable information about their performance on space missions. This lack of data may limit the development and progress of these devices. To better understand the CubeSat scenario, a historical analysis of nanosatellite launches up to 3U in size was performed. This analysis provides a comprehensive overview of the evolution of these devices over time, highlighting the number of launches around the world and the diversification of their applications. Additionally, historical contextualization is key to understanding the current context of CubeSats and identifying future trends and challenges. In addition, a study of the failures that have occurred in CubeSats has been conducted. This qualitative analysis identified the main types of failures that occur in these nanosatellites, such as communication problems, power system failures, and control system problems. Understanding these failures is essential to improving the design and reliability of CubeSats, improving their effectiveness, and ensuring a higher success rate on space missions. By mapping the types and frequency of failures that occur, Fault Tree Analysis (FTA) is applied to the Catarina-A1 CubeSat, the first satellite of the Catarina Constellation's A fleet. The application of Fault Tree Analysis provides a preliminary and systematic approach to identify and mitigate risks on Catarina-A1, improving its performance and increasing the efficiency of its mission.

Keywords: Assurance. CubeSat. NanoSatellite. Failures. Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre possíveis tamanhos de CubeSats.	14
Figura 2 – Vista Explodida de um Cubesat genérico.	15
Figura 3 – Ciclo de vida do projeto de CubeSat.	16
Figura 4 – Status de missão de CubeSats lançados entre 2005 e 2018.	20
Figura 5 – Norma ECSS-Q-ST-20 e demais normas vinculadas.	21
Figura 6 – Arquitetura da documentação ECSS.	23
Figura 7 – Simbologia FTA.	27
Figura 8 – Passos da FTA.	28
Figura 9 – Status de nanosatélites.	31
Figura 10 – Sucesso de missões de cubesats.	32
Figura 11 – Fluxograma do trabalho.	35
Figura 12 – Conceito geral da missão.	40
Figura 13 – Cenários de operação.	41
Figura 14 – Critérios de avaliação de aceitação de risco.	43
Figura 15 – Identificação e classificação de riscos.	43
Figura 16 – Lançamentos de CubeSats por ano.	46
Figura 17 – Distribuição de lançamentos ao redor do mundo.	47
Figura 18 – Produção relativa por país.	47
Figura 19 – Distribuição de produção por tipo de organização.	48
Figura 20 – Distribuição de produção por dimensão.	49
Figura 21 – Distribuição por tipo de missão.	50
Figura 22 – Percentual de falhas reportadas em lançamentos de CubeSats.	51
Figura 23 – Falhas por dimensão de CubeSat.	51
Figura 24 – Categorias de falhas.	52
Figura 25 – Comportamento das falhas ao longo dos anos.	53
Figura 26 – Comportamento das falhas ao longo dos anos por tipo de organização.	53
Figura 27 – Falhas relativas por tipo de organização.	54
Figura 28 – FTA - Comunicação.	55
Figura 29 – FTA - Antena.	59
Figura 30 – FTA - Sistema de Energia Elétrica.	60
Figura 31 – FTA - Sistema de Determinação e Controle de Atitude.	61
Figura 32 – FTA - Computador de Bordo.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fases de produção de um satélite e suas descrições.	16
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVO	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	DESENVOLVIMENTO E MANUFATURA DE NANOSSATÉLITES	13
2.2	GERENCIAMENTO DE PROJETOS E ENGENHARIA DE SISTEMAS ESPACIAIS	17
2.3	GESTÃO DA QUALIDADE	19
2.4	ECSS	21
2.4.1	ECSS-P-00: Política de Padronização	22
2.4.1.1	Diferentes níveis de padrões	22
2.4.1.2	Apresentação geral de M-xx/Q-xx/E-xx	24
2.5	ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS	24
2.5.1	Finalidade e Objetivos da Análise de Árvore de Falhas	25
2.5.2	Construção da FTA	25
2.6	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3	METODOLOGIA	35
3.1	DATABASE	35
3.2	CONSTELAÇÃO CATARINA: CATARINA-A1	38
3.2.1	Análise e Definição da Missão	39
3.2.2	Arquitetura e Requisitos de Missão	39
3.3	MAPEAMENTO DE FALHAS DO PROJETO CUBESAT CATARINA-A1	42
3.4	ANÁLISE FTA DO CUBESAT CATARINA-A1	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	ANÁLISE HISTÓRICA	46
4.2	ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS	54
4.2.1	Análise da Antena	55
4.2.2	Análise EPS	56
4.2.3	Análise ADCS	57
4.2.4	Análise OBC	58
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5	CONCLUSÕES	65

REFERÊNCIAS 67

1 INTRODUÇÃO

Inicialmente desenvolvidos em 1999 e apresentados publicamente em 2000, por Bob Twiggs e Jordi Puig-Suari, CubeSats são uma classe de plataformas de pesquisa conhecidos como nanossatélites, ou seja, são miniaturas de satélites que vêm sendo utilizadas majoritariamente em Órbitas Terrestres Baixas (Low Earth Orbit – LEO) há mais de 15 anos (SWARTWOUT, 2013). Os CubeSats são tipicamente construídos a partir de uma unidade padrão (Units - U) de 10 cm x 10 cm x 10 cm, de tal modo que sua dimensão depende da combinação dessas unidades, podendo ser 1U, 2U, 3U, 6U ou 12U em tamanho e apresentando massas tipicamente menores que 1,33 kg por U (COELHO, 2016; NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2018).

Devido ao seu desenvolvimento ter sido com o intuito acadêmico no âmbito de estimular a concepção e o desenvolvimento de plataformas orbitais, apesar da pouca aceitação inicialmente pela sociedade, os CubeSats rapidamente se tornaram amplamente aceitos na indústria aeroespacial, assim como na academia, principalmente devido a características-chave como a normalização, o baixo custo e a facilidade de implementação (SWARTWOUT, 2013).

Como consequência das características citadas, os CubeSats estão sendo cada vez mais utilizados em órbitas ativas para demonstração tecnológica, estudos científicos e até mesmo para fins comerciais, proporcionando acessibilidade a pequenas empresas, institutos de pesquisa e universidades. Da mesma maneira que os satélites típicos, CubeSats são construídos sob medida para atender exigências específicas de uma missão e, por se tratar de um projeto modular, os subsistemas estão disponíveis a partir de diferentes fornecedores e podem ser integrados de acordo com as necessidades da missão (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2022).

Como descrito por Nervold et al. (2016), os CubeSats servem como excelentes ferramentas para apoiar a educação e o desenvolvimento de conhecimentos no campo espacial. Facilitam o rápido desenvolvimento e implantação de missões para fins educacionais, de demonstração tecnológica e científica. Estudantes, profissionais e entusiastas podem não apenas obter conhecimento em primeira mão sobre projeto e construção de plataformas orbitais, mas também podem participar do projeto e das operações de missões espaciais (DUNWOODY et al., 2022).

Tendo isso em vista, a Agência Espacial Brasileira (AEB/MCTI, 2021), por meio da Portaria nº 590 (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2021), criou o programa Constelação Catarina em parceria com instituições do Estado de Santa Catarina (SC), como o Instituto Serviço Nacional de Atividade Industrial (SENAI) de Inovação em Sistemas Embarcados, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a participação

do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), além de outras instituições. O programa Constelação Catarina prevê o desenvolvimento, a fabricação e o lançamento de uma constelação de satélites, que tem como objetivos principais atuar no setor de defesa civil e levar melhorias à agricultura de precisão, desenvolvendo o setor industrial, o agronegócio, projetos de cidades inteligentes, saúde e segurança (FIESC, 2021; OCP NEWS, 2021).

Dentro do programa, a Frota A, primeira frota de nanossatélites da constelação, tem por objetivo principal servir de demonstração tecnológica, coletando os dados das plataformas de medição, agregar ao Sistema Brasileiro de Coleta de Dados (SBCD) e ao Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA) e atender diretamente os serviços nacionais, como a Defesa Civil e o Setor Agropecuário, que utilizam dados hidrometeorológicos, proporcionando articulação entre indústria, academia e governo, de forma a demonstrar a capacidade tecnológica do estado de Santa Catarina (UFSC, 2023c).

Sendo assim, para assegurar que os satélites cumpram com êxito todos os requerimentos, é importante que seja realizada uma gestão da qualidade aplicada e acompanhada ao longo de todo programa, certificando que as exigências de projetos sejam cumpridas de forma confiável. No entanto, devido aos baixos recursos disponíveis e pela complexidade das ferramentas e filosofias normalmente utilizadas, o gerenciamento de qualidade não é um tópico no qual a maior preocupação e recursos são alocados em projetos de CubeSats (COELHO, 2016). Como confirmado por Dunwoody et al. (2022), os cubesats estão sujeitos a uma alta taxa de falhas, sendo a principal causa a falta de verificação no nível do sistema.

Portanto, em vista da insuficiência de documentação de gestão de qualidade em projetos de CubeSats e com o crescimento contínuo da complexidade e das aplicações para a sociedade, pretende-se realizar um estudo da gestão da qualidade e confiabilidade, assim como uma análise de falhas aplicada na produção de um CubeSat analisando o histórico deste tipo de sistema espacial e elaborar uma análise de árvore de falhas preliminar, tendo em vista a norma ECSS-Q-ST-20C, norma já utilizada no desenvolvimento do Catarina-A1, (ECSS., 2018) da Agência Espacial Europeia (European Space Agency - ESA), e demais normas e ferramentas necessárias para assegurar que o projeto alcance todos os requisitos de qualidade, auxiliando no aumento da taxa de sucesso de projetos de CubeSats.

Para isso, como estudo de caso, foi levado em consideração o desenvolvimento do nanossatélite Catarina-A1 da Frota A da Constelação Catarina, um CubeSat de 2U, que será lançado em meados de 2024, com menção das normas ECSS da ESA, principais normas de garantia de qualidade e confiabilidade na indústria espacial europeia, e da ferramenta Análise de Árvores de Falhas (Fault Tree Analysis - FTA).

1.1 OBJETIVO

Com o intuito de suprir a falta de informações referentes à gestão da qualidade em projetos de nanossatélites, propõe-se neste trabalho os objetivos destacados abaixo.

1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar metodologia de gestão da qualidade, confiabilidade e de riscos preliminar no projeto do nanossatélite Catarina-A1, tendo como comparação a realização de um mapeamento histórico de lançamentos de CubeSats.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Enunciar uma análise histórica de lançamentos de CubeSats;
- Evidenciar o rastreamento de falhas comumente reportadas;
- Analisar e apontar as falhas do Catarina-A1;
- Aplicar a ferramenta FTA no desenvolvimento do Catarina-A1.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta uma visão geral do desenvolvimento e manufatura de um nanossatélite, a visão e explicação da engenharia de sistemas por trás de um projeto espacial, a importância da aplicação de uma gestão da qualidade para redução de falhas, o rastreamento de normas de qualidade a serem aplicadas no ramo e, por fim, a apresentação de projetos de CubeSats que tiveram a implementação de gestão da qualidade em determinando degrau do processo produtivo.

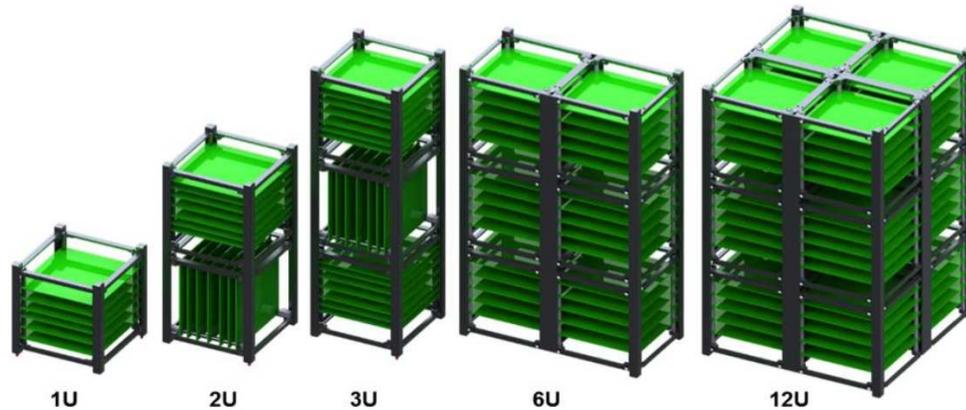
2.1 DESENVOLVIMENTO E MANUFATURA DE NANOSSATÉLITES

O ambiente espacial se apresenta muito desafiador, se tornando cada vez mais atraente e fazendo com que CubeSats se tornassem uma inovação interessante no setor espacial. Desde 2000 o número de missões de satélites vem aumentando ano após ano. Mais de 100 universidades e várias nações emergentes lançaram e ainda planejam lançar nanossatélites com diversas aplicações, como monitoramento do clima, prevenção de desastres ambientais e observação espacial, astronomia, ciências atmosféricas, biologia, observação da Terra e telecomunicações. Até 31 de maio de 2018, 855 CubeSats foram lançados (VILLELA et al., 2019; DAVOLI et al., 2019).

Todos podem criar seu próprio satélite personalizável, contanto que os CubeSats sigam os padrões definidos com base no formato e peso, mantendo-se em conformidade com as diretrizes de segurança de voo e com o documento de Especificações de Design de CubeSat (CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY, 2009), para simplificar as operações de lançamento e implantação. Um CubeSat deve ser composto por uma (1U) ou mais (nU), como visto na Figura 1, unidades de cubo de dimensão unitária $10 \times 10 \times 10$ cm e com uma massa de até 1,33

kg por unidade (VILLELA et al., 2019; DAVOLI et al., 2019; OBERHOLZER et al., 2019).

Figura 1 – Comparação entre possíveis tamanhos de CubeSats.



Fonte: Lahrichi (2017).

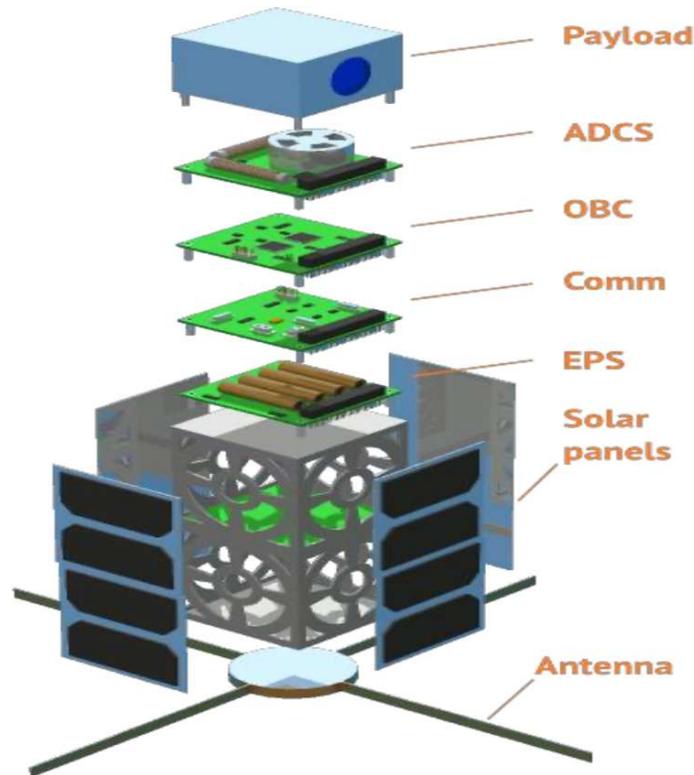
Devido a esta possibilidade de personalização de projetos, é importante ter uma estrutura que facilite a montagem e a desmontagem. Para isso, um CubeSat integra todos os subsistemas necessários em uma estrutura tipo esqueleto, onde diferentes placas eletrônicas são empilhadas e cada um tem uma função específica para atender ao propósito geral do projeto, como visto na vista explodida presente na Figura 2 (OBERHOLZER et al., 2019; LAHRICHI, 2017).

Como apontado por Lahrichi (2017), averiguando a Figura 2, os subsistemas destacados são:

- Payload: A carga útil consiste nos instrumentos necessários para realizar a missão principal do satélite. Pode conter sensores, câmeras etc;
- ADCS (Attitude Determination And Control System): O “Sistema de Determinação e Controle de Atitudes” é o módulo responsável por orientar o CubeSat em relação ao eixo coordenado relativo entre as órbitas terrestre e do satélite;
- OBC: O Computador de Bordo é a unidade lógica digital do satélite, estando conectado a todas as entradas e saídas do satélite e coordena entre elas;
- TTC&M (Comm): Sistema de comunicação usado para dar feedback e receber comandos do controle de solo, bem como coordenar com outros CubeSats, se necessário;
- EPS: Sistema Elétrico de Potência responsável por armazenar energia elétrica para uso do CubeSat, composto por um conjunto de baterias;
- Solar Panels: Os painéis solares utilizam células fotovoltaicas para converter a energia solar em energia elétrica, estando conectados à bateria para carregá-la;
- Antena: A antena transmite informações para a base de controle por meio de radiação eletromagnética.

Portanto, para ajudar e suavizar a integração dos componentes, os fabricantes

Figura 2 – Vista Explodida de um Cubesat genérico.



Fonte: Lahrichi (2017).

desenvolvem cadeias de processos eficientes em recursos para obter uma vantagem no mercado. Sendo assim, desde 1990, o uso de produtos comerciais prontos para uso (Commercial Off-The-Shelf - COTS) vem se tornando cada vez mais uma tendência, possibilitando algumas modificações em torno dos processos tradicionais de desenvolvimento para produzir novos nanossatélites (OBERHOLZER et al., 2019; CORONEL et al., 2015).

O termo COTS é atribuído a subsistemas que são comercialmente feitos e disponíveis para o público em geral, ou seja, não há a necessidade de inventá-los, e que requerem pouca ou nenhuma modificação exclusiva, sendo necessária apenas a integração das partes pré-construídas no sistema satelital para fornecer funcionalidade desejada ao sistema e, assim, atender às necessidades do cliente. É possível a obtenção de propulsores, rodas de reação, rádios e até kits completos de satélites (CORONEL et al., 2015; TOORIAN et al., 2008).

Para garantir um ótimo desempenho e funcionalidade do projeto, o ciclo de vida de um satélite é frequentemente modelado de acordo com os padrões definidos pela Agência Espacial Europeia (ESA), Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (National Aeronautics and Space Administration - NASA) ou Departamento de Defesa (Department of Defense - DoD). Esta metodologia categoriza tudo o que

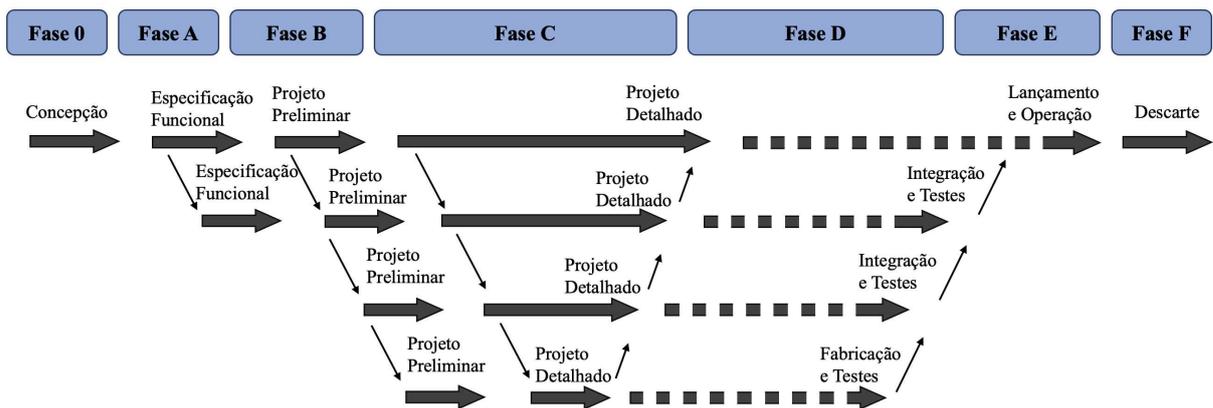
deve ser feito em um projeto em fases distintas que são separadas por pontos chave de decisão. De forma geral, essas divisões de fase são tais como descritas na Tabela 1 e esquematizado na Figura 3 (CORONEL et al., 2015; KAPURCH, 2010; ELSTAK et al., 2009).

Tabela 1 – Fases de produção de um satélite e suas descrições.

FASE	Descrição
0	Estudos de concepção
A	Desenvolvimento de conceitos e tecnologia
B	Design preliminar e conclusão de tecnologia
C	Design final e fabricação
D	Montagem, integração e teste do sistema
E	Lançamento e operação
F	Descarte

Fonte: Autor (2023).

Figura 3 – Ciclo de vida do projeto de CubeSat.



Fonte: Autor (2023).

Na Fase 0, devem ser geradas ideias de missão e alternativas para escolher novos programas e projetos. A equipe de pesquisa analisa uma ampla gama de conceitos de missão, assim como a viabilidade do sistema desejado, os requisitos de nível de sistema, a eficiência, custo e viabilidade do cronograma, e, por fim, identifica as necessidades potenciais e o escopo da tecnologia. Além disso, na Fase 0 é importante definir um grupo preciso de partes interessadas (stakeholders) e usuários para ajudar a garantir que os objetivos da missão e os conceitos de operações atendam às necessidades e expectativas dos usuários finais (KAPURCH, 2010).

Por sua vez, na Fase A elabora-se uma proposta de arquitetura de missão que seja confiável e atenda às expectativas, requisitos e restrições do programa, incluindo recursos. Ou seja, deve-se desenvolver o conceito de missão final, requisitos de nível de sistema, desenvolvimentos de tecnologia de sistema necessários e planos de gerenciamento técnico de programa e de projeto (KAPURCH, 2010).

Com isso, defini-se, na Fase B, o projeto com detalhes suficientes para estabelecer uma linha de base inicial capaz de atender às necessidades da missão, desenvolvendo os requisitos do produto final da estrutura do sistema e estabelecendo um design preliminar para cada sistema da estrutura. Após a análise inicial, na Fase C, é realizado o detalhamento do projeto, incluindo seus subsistemas associados, sistemas operacionais, subsistemas de hardware e software. Nesta fase, deve ser gerado projetos finais para cada produto final que constitui a estrutura (KAPURCH, 2010).

Com a concepção final do projeto, na Fase D, realiza-se a montagem, integração, verificação e validação do sistema, incluindo o teste do sistema de voo para ambientes esperados. Outras atividades incluem atualização de procedimentos operacionais, ensaios e treinamento da equipe operacional e tripulantes. Ao passo que isto é realizado, é concretizado que o sistema será capaz de atender aos requisitos do projeto (KAPURCH, 2010).

Por fim, na Fase E a missão é conduzida de forma e atender à necessidade inicialmente identificada e manter o suporte a essa necessidade, para isso implementando o plano de operações da missão. Logo, com o cumprimento da missão, é colocado em prática o plano de descomissionamento (descarte) dos sistemas desenvolvidos e, por fim, realizado as análises dos dados devolvidos e de quaisquer amostras que tenham sido coletadas pelo projeto (KAPURCH, 2010).

2.2 GERENCIAMENTO DE PROJETOS E ENGENHARIA DE SISTEMAS ESPACIAIS

Tendo em vista a complexidade, os custos, qualificação e prazos dos projetos espaciais, é estritamente necessário o controle e o acompanhamento das atividades realizadas pelas pessoas e empresas ao longo de toda cadeia do processo de produção de um nanossatélite. Para isso, o uso de métodos e estratégias de gestão de projetos reduz riscos, corta custos e incrementa a taxa de sucesso do projeto em todas as etapas, com o auxílio de técnicas empregadas como garantia de produto (Product Assurance - PA) ou gestão da qualidade (Quality Assurance - QA) e engenharia de sistemas (System Engineering) que são englobados pelo gerenciamento de projetos (Project Management - PM).

Para a otimização dos processos de produção de CubeSats, a ênfase na qualidade, confiabilidade e produção, é um fator vital para o sucesso do projeto. De forma geral, o gerenciamento de projetos é responsável por aspectos técnicos como os requisitos, concepção, a implementação e fabricação, montagem e testes do produto a ser entregue (OBERHOLZER et al., 2019). Ademais, como dito por Decker (2016) a engenharia de sistemas tem como enfoque a obtenção de um sistema robusto que satisfaça os objetivos técnicos, melhorando o desenvolvimento e a entrega de produtos,

aprimorando o desenvolvimento e as interações de alto nível e de subsistema de um programa, incluindo:

1. Compatibilidade entre subsistemas e funcionalidade adequada de sistemas integrados;
2. Desenvolvimento e gerenciamento do cronograma, mão de obra e custo necessários para entregar subsistemas completos, bem como para integrar e entregar o sistema espacial;
3. Garantir que o teste do subsistema valide os requisitos e planejar e conduzir testes integrados após a entrega do subsistema;
4. Analisar os riscos do programa para identificar e implementar estratégias de mitigação para garantir a entrega no prazo.

Vê-se que o pensamento baseado em engenharia de sistemas permite que um programa planeje adequadamente e complete todos os testes necessários antes da entrega da plataforma orbital. Portanto, aplicando estas metodologias, os resultados alcançados incluem qualidades no nível do sistema, propriedades, características, funções, comportamento e desempenho do sistema como um todo.

Sendo assim, para que estes objetivos sejam alcançados e melhorias de processos de produção individuais não sejam perdidas no quadro geral do processo, a metodologia deve apresentar uma sequência ordenada de tarefas. Como propriamente descrito por Kapurch (2010), a engenharia de sistemas é uma abordagem metódica e multidisciplinar para o projeto, realização, gerenciamento técnico, operações e aposentadoria de um sistema. Sendo assim, essas múltiplas responsabilidades abordam documentações ao longo de todas as etapas do projeto, sendo algumas delas (OBERHOLZER et al., 2019):

- Organização e Planejamento;
 - WBS - Work Breakdown Structure;
 - Árvore do Produto;
 - Árvore de especificações;
 - Recursos Humanos;
 - Recursos financeiros;
 - Eventos/prazos;
- Gerenciamento da Qualidade;
- Gerenciamento de Verificação e Validação;
- Gerenciamento de Cronograma/Prazos;
- Gerenciamento de Configuração;
- Gerenciamento da Documentação de Projeto;
- Papel de um Escritório de Projetos;
 - Gerenciamento de Contratos;
 - Registro de Conhecimento.

2.3 GESTÃO DA QUALIDADE

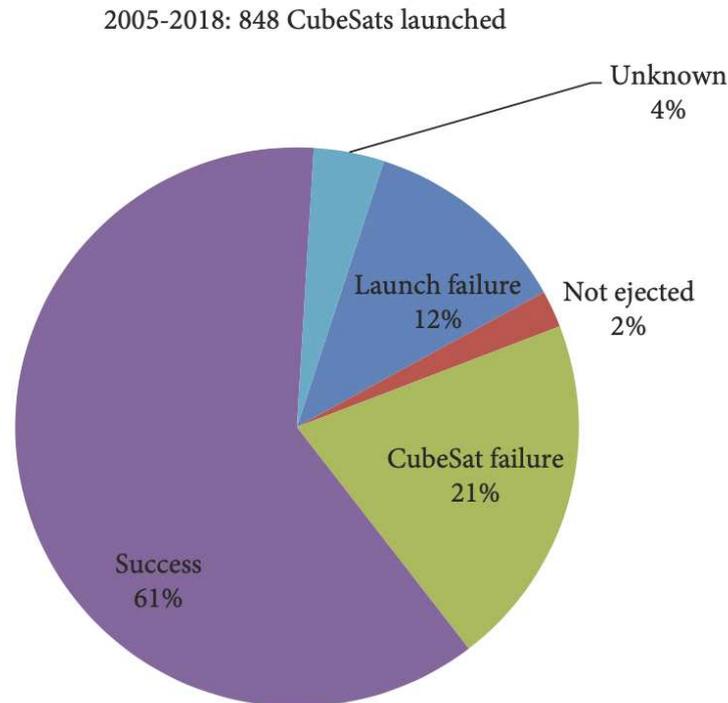
Particularmente no setor espacial, a garantia da qualidade é de fundamental importância para assegurar a qualidade na execução de todas as atividades realizadas no e com o satélite, a fim de aumentar a probabilidade de sucesso da missão. Assim como descrito pela própria ECSS. (2018), o principal objetivo da gestão da Garantia da Qualidade é garantir que projetos que abrangem definição de missão, design, desenvolvimento e produção de sistemas espaciais sejam estabelecidos, mantidos e implementados. Para isso, todos os requisitos de gestão da qualidade devem ser especificados através da definição e implementação de métodos e procedimentos adequados (SILVA; LOUREIRO, 2009).

A garantia de qualidade é vista como uma parte da garantia do produto. Devido às consequências às vezes catastróficas que uma única falha pode ter para a vida humana, o meio ambiente, um dispositivo ou uma missão, a gestão da qualidade desempenha um papel muito importante, pois tem seu início na Fase 0 do desenvolvimento do projeto espacial, com a análise de requisitos, indo até o lançamento e operação do satélite. Tem independência organizacional, orçamentária e de desenvolvimento de produtos, o que significa que se reporta apenas à alta administração e tem seu próprio orçamento para ajudar a construir um produto. A garantia do produto está em pé de igualdade com o gerenciamento de projetos, mas abrange o ponto de vista do cliente (SILVA; LOUREIRO, 2009; PRAUSE et al., 2016).

Apesar de a tecnologia CubeSat estar evoluindo e novas empresas estarem se especializando na fabricação de peças dedicadas para CubeSats, falhas de satélite não são incomuns, sendo uma falha definida como o não cumprimento de nenhum dos objetivos ou o descumprimento de um único objetivo que comprometa a missão. Entretanto, como consequência, os CubeSats estão se tornando mais confiáveis, pois a herança de voo vem sendo construída e aplicada em projetos novos (DECKER, 2016). Como destacado por Villela et al. (2019) os próprios CubeSats não podem ser culpados por todas as falhas de missão. Cerca de 20% de todas as falhas ocorreram durante o lançamento ou durante a fase de implantação, enquanto boa parte das falhas ocorrem

durante os estágios iniciais de operação, como visto na Figura 4.

Figura 4 – Status de missão de CubeSats lançados entre 2005 e 2018.



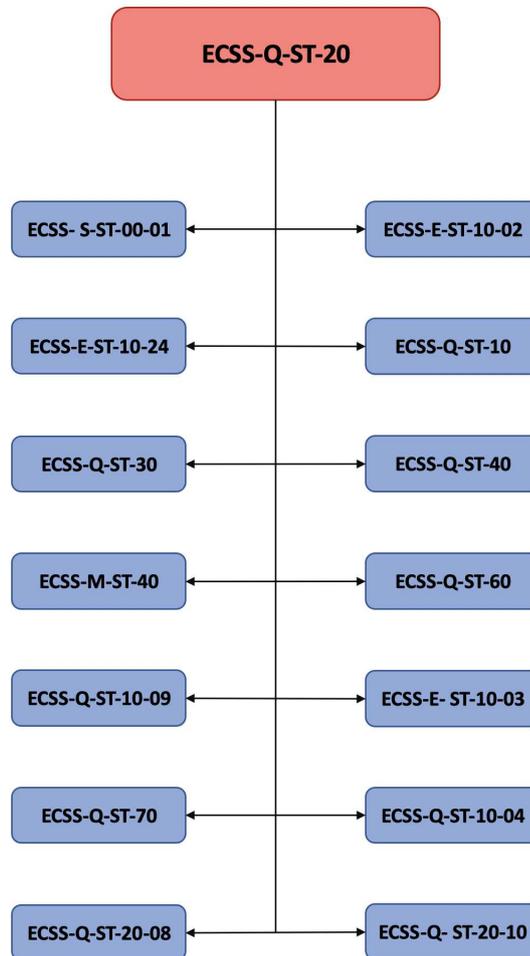
Fonte: Villela et al. (2019).

Um dos grandes problemas para CubeSats é a *infant mortality* (mortalidade infantil), onde o nanossatélite falha durante o comissionamento ou durante os estágios iniciais, sendo alguns casos assim que entraram no ambiente espacial. Muitos desses erros ocorrem por resultado direto da não realização de testes adequados e acompanhamento ao longo do projeto (DECKER, 2016). Sendo assim, com o intuito de aumentar a taxa de sucesso e, conseqüentemente reduzir as chances de falhas, as organizações procuram promover um alto nível de qualidade a custos cada vez mais baixos, por meio da redução do desperdício e da otimização dos processos produtivos, de modo a atingir e manter a competitividade no mercado (VILLELA et al., 2019; SOUZA et al., 2011).

Para o alcance de tais melhorias, sistemas de gestão são comumente utilizados, como a ISO 9001 (International Organization for Standardization), sendo esta uma norma mais genérica de qualidade que é aplicável a organizações de qualquer tamanho, tipo ou setor. Por outro lado, a norma AS9100, do Grupo Internacional de Qualidade Aeroespacial (International Aerospace Quality Group - IAQG), é um sistema de gestão da qualidade focado no setor aeronáutico, espacial e de defesa. Por fim, a ECSS-Q-ST-20, disponibilizada pela ESA, define os requisitos de gestão da qualidade para o estabelecimento e implementação de um programa de garantia de qualidade para produtos de projetos espaciais. Sendo assim, a Figura 5 mostra uma quebra da ECSS-

Q-ST-20 e as demais normas vinculadas para a aplicação e acompanhamento de um sistema de gestão de qualidade, com enfoque em melhor desempenho e redução de custos.

Figura 5 – Norma ECSS-Q-ST-20 e demais normas vinculadas.



Fonte: Autor (2023).

2.4 ECSS

A Cooperação Europeia para Padronização Espacial (European Cooperation for Space Standardization - ECSS), oficialmente iniciada no outono de 1993, é uma iniciativa estabelecida para desenvolver um conjunto único e coerente de padrões de fácil utilização para uso em todas as atividades espaciais europeias e, em particular, em projetos. A ECSS apresenta uma arquitetura de documentação com três ramos: Gerenciamento de Projetos, Garantia do Produto e Engenharia. Ressalta-se que esta norma é aplicável a todos os elementos de um sistema espacial, incluindo o segmento espacial, o segmento de serviço de lançamento e o segmento solo (ECSS, 1996; KRIEDTE, 1996).

2.4.1 ECSS-P-00: Política de Padronização

Este documento aborda os diferentes aspectos do sistema, incluindo escopo, objetivos, implementação, autoridade, organização e documentação. A política da ECSS determina que seus padrões devem promover a melhoria contínua de métodos e técnicas e evitar trabalho desnecessário. Para isso faz uso da experiência de projetos anteriores e outras fontes apropriadas que devem ser sistematicamente incorporadas ao sistema ECSS. Suas normas devem satisfazer todos os clientes europeus e internacionais e devem encorajar a eficiência industrial e a competitividade limitando a variedade de produtos e processos.

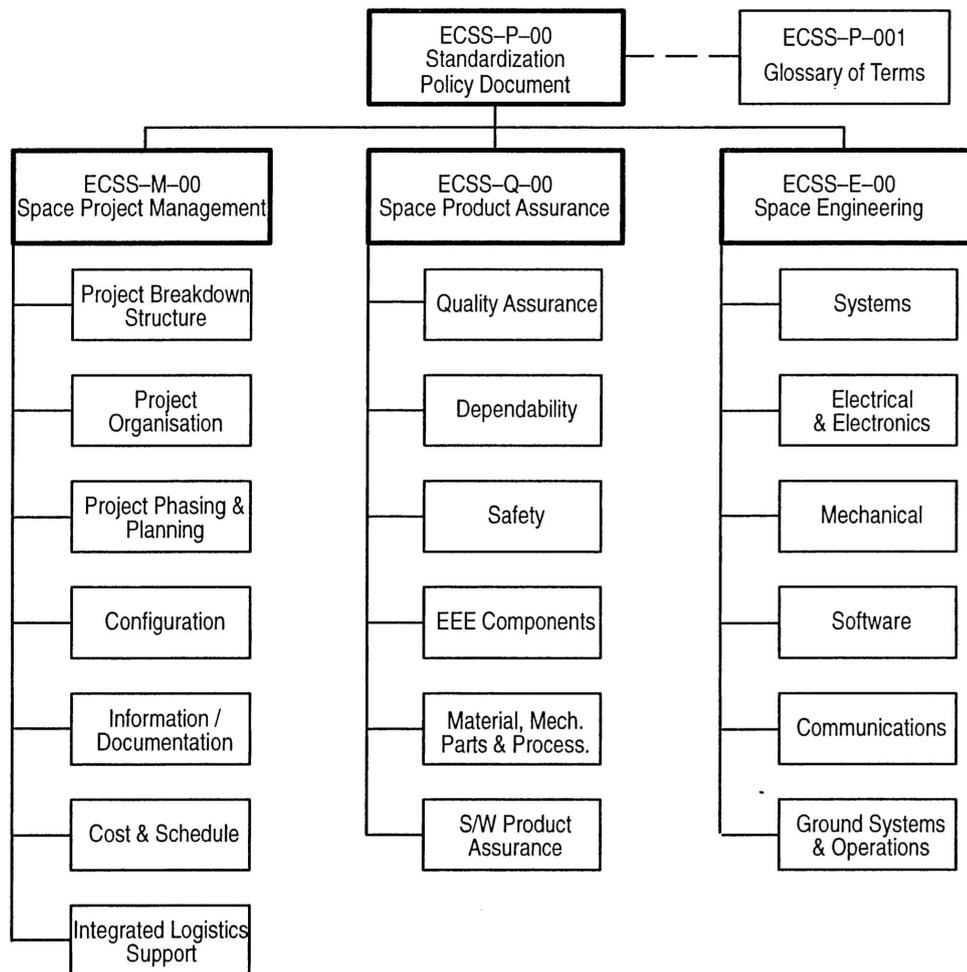
A ECSS declara em seu Documento de Política que cada requisito individual deve se referir à necessidade a ser atendida e não aos meios a serem usados para cumpri-la. Nas Diretivas ISO, uma orientação semelhante é proposta indicando que, sempre que possível, os requisitos devem ser expressos em termos de desempenho, em vez de design ou características descritivas, deixando mais liberdade para desenvolvimentos técnicos (ECSS, 1996).

2.4.1.1 Diferentes níveis de padrões

Um dos principais aspectos da norma ECSS é a arquitetura de documentação, que é projetada para facilitar a organização e recuperação de informações dentro do sistema de padrões ECSS. A documentação está basicamente organizada em três ramos principais: Gestão, Garantia do Produto e Engenharia, e quatro níveis hierárquicos. Conforme mostrado na Figura 6, essa arquitetura é definida com o nível de detalhe necessário para diferenciar as principais funções, disciplinas e atividades. O escopo, propósito e localização de cada padrão ECSS deve estar de acordo com esta

arquitetura (ECSS., 1996; KRIEDTE, 1996).

Figura 6 – Arquitetura da documentação ECSS.



Fonte: Kriedte (1996).

- Nível 0 (ECSS-P-00):
 - O documento no Nível 0 descreve a política e os objetivos do sistema ECSS e sua arquitetura juntamente com a regra principal para a criação, validação e manutenção de documentos.
- Nível 1 (ECSS-M-00, ECSS-Q-00, ECSS-E-00):
 - Descrevem a estratégia no domínio específico. Eles fornecem uma visão global dos requisitos e descrevem as interfaces entre os elementos (e os documentos) no Nível 2.
- Nível 2 (ECSS-M-10, ECSS-Q-10, etc):
 - Os documentos descrevem os objetivos e funções necessários para todos os aspectos no domínio individual (organização do projeto, garantia de qualidade, engenharia do sistema etc.).
- Nível 3:
 - Descrevem métodos, procedimentos e ferramentas recomendadas para

atingir os requisitos dos documentos do Nível 2. Além disso, eles definem as restrições e requisitos para interfaces e desempenho do produto ou atividade especificada. Os documentos do Nível 3 são orientativos e podem ser adaptados às necessidades dos projetos.

2.4.1.2 *Apresentação geral de M-xx/Q-xx/E-xx*

O objetivo de um projeto espacial (ECSS, 1996; KRIEDTE, 1996) é entregar a um cliente (e posteriormente apoiar ou operar, se necessário) um sistema que inclua um ou mais elementos destinados à operação no espaço. Para que sejam alcançados os objetivos, o fornecedor realiza atividades que podem ser convencionalmente divididas em 5 categorias:

1. Gerenciamento de projetos: responsável pela realização da totalidade dos objetivos do projeto e, especificamente, pela organização do projeto e sua execução oportuna e econômica;
2. Engenharia: responsável pela definição do sistema, verificação do cumprimento dos requisitos técnicos do cliente e cumprimento das restrições de projeto aplicáveis;
3. Produção: responsável pela fabricação, montagem e integração do sistema, de acordo com o projeto definido pela engenharia;
4. Operações: responsável por exercer e apoiar o sistema para atingir os objetivos do cliente durante as fases operacionais (nota; as operações podem ser realizadas pelo cliente, pelo fornecedor ou por um terceiro em nome do cliente, ou por uma combinação desses);
5. Garantia de produto: responsável pela implementação do elemento de garantia de qualidade do projeto e por algumas outras atividades especializadas;

Os limites entre essas atividades nem sempre são claramente definidos; por exemplo, os domínios de engenharia, produção, operações e garantia de produto incluem, cada um, um elemento de gerenciamento que se sobrepõe ao domínio de gerenciamento de projetos propriamente dito. Outro ponto é que a produção e operações incluem atividades de engenharia preparatórias e de suporte, que também podem ser consideradas como parte do domínio de engenharia. Por outro lado, a garantia do produto inclui atividades de confiabilidade, disponibilidade, facilidade de manutenção e segurança, que formam uma parte essencial do processo de projeto no domínio da engenharia (ECSS., 1996).

2.5 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS

A análise de árvore de falhas (Fault Tree Analysis – FTA) é uma técnica analítica esquemática usada para análise de confiabilidade, manutenibilidade e segurança. Uma

árvore de falhas mostra graficamente, por meio de uma notação especificada, a relação lógica entre uma falha particular do sistema e todas as suas causas contribuintes. O termo 'árvore' é usado porque a representação esquemática da análise tem uma estrutura ramificada que aumenta de tamanho à medida que vários níveis de detalhes são considerados (KRITZINGER, 2016).

É uma análise de cima para baixo (*top-down*), uma rede de causa e efeito. Começa por se assumir um modo de falha do sistema (o evento de topo) e trabalha-se de trás para frente, procedendo sucessivamente por níveis mais detalhados do projeto para identificar as possíveis causas de ocorrência do evento descrito no topo, que pode ser previsto no contexto do seu ambiente de funcionamento e modo de operação (STAMATELATOS et al., 2002).

2.5.1 Finalidade e Objetivos da Análise de Árvore de Falhas

Qualquer sistema suficientemente complexo está sujeito a falhas como resultado da falha de um ou mais subsistemas ou componentes. O objetivo da FTA é usar a lógica dedutiva para entender todas as causas subjacentes de uma falha específica em um sistema suficientemente complexo para que a probabilidade de falha possa ser reduzida por meio de um projeto de sistema aprimorado.

Como destacado por Kritzinger (2016), um FTA é conduzido para satisfazer qualquer um dos seguintes objetivos:

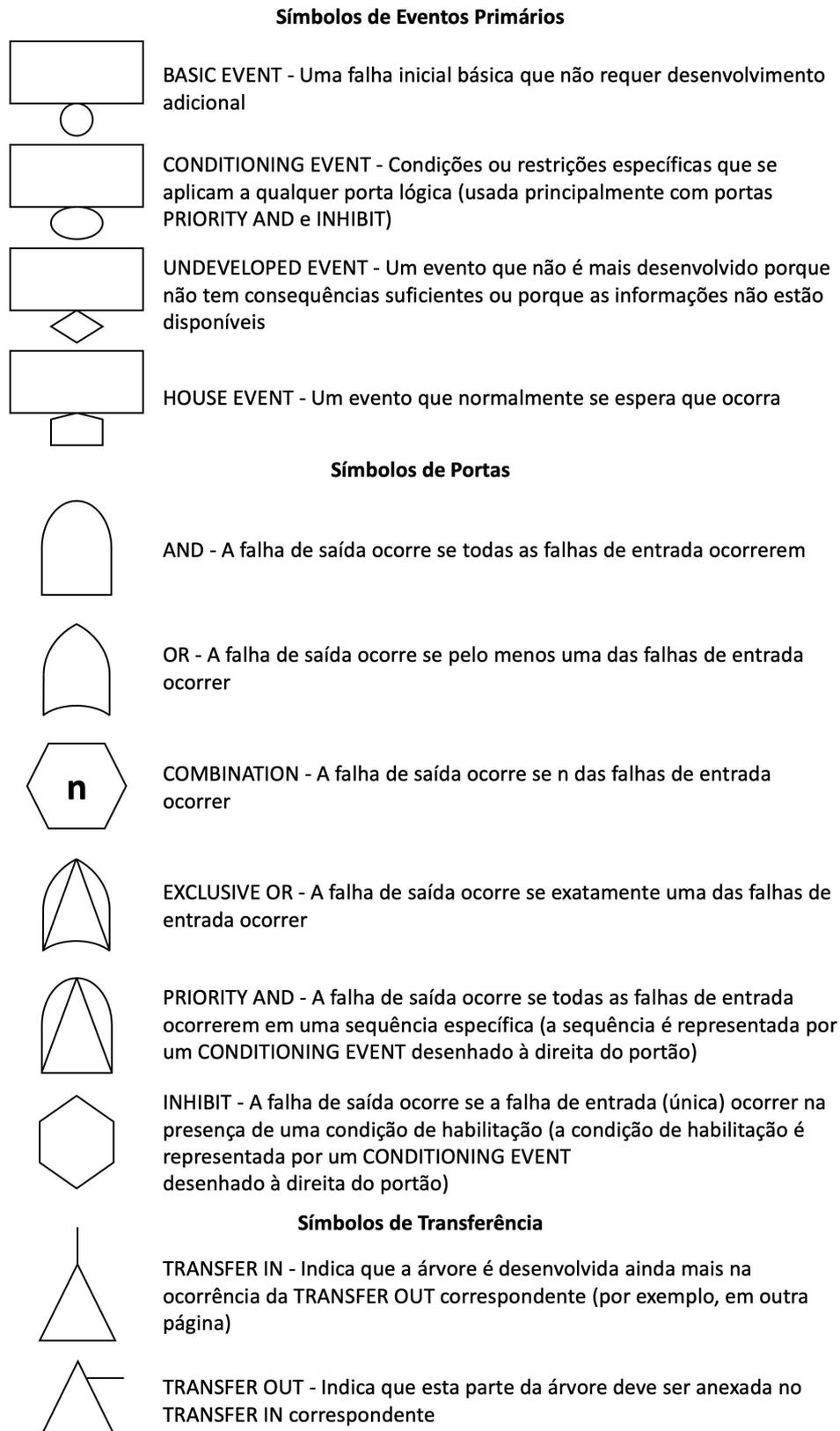
- Melhorar a compreensão das características do sistema representando esquematicamente a arquitetura do sistema. Isso então:
 - Auxilia o avaliador de segurança a identificar a combinação lógica de eventos que devem acontecer primeiro para que ocorra um resultado indesejável;
 - Facilita a otimização do esforço de manutenção;
- Comprovar o cumprimento das metas de segurança da Análise Funcional de Riscos (FHA):
 - Permite a avaliação quantitativa de uma probabilidade para o resultado indesejável, avaliando assim a capacidade de uma arquitetura escolhida para atender seus requisitos de segurança/confiabilidade.

2.5.2 Construção da FTA

A FTA, como destacado anteriormente, é iniciado a partir de um evento de alto nível, o topo da cadeia, e desce por uma sucessão de portas lógicas, descritas na Figura 7, até eventos básicos, onde pode ser conduzido tanto para eventos positivos quanto para eventos negativos, sendo um processo iterativo que se repete sempre que ocorrem mudanças na arquitetura do sistema e/ou quando uma nova causa de falha é identificada:

- Os segmentos da árvore lógica que levam a um evento negativo, como um acidente, definem todas as coisas que podem dar errado para causar o evento negativo. Segmentos de árvore lógica para eventos negativos geralmente usam mais portas OR do que portas AND, exceto para proteções redundantes;
- O segmento da árvore lógica que leva a um evento positivo define todas as coisas que devem funcionar juntas para que a máquina opere ou conclua uma missão bem-sucedida. Árvores lógicas para eventos positivos geralmente usam mais portas AND do que portas OR, exceto para redundância;

Figura 7 – Simbologia FTA.

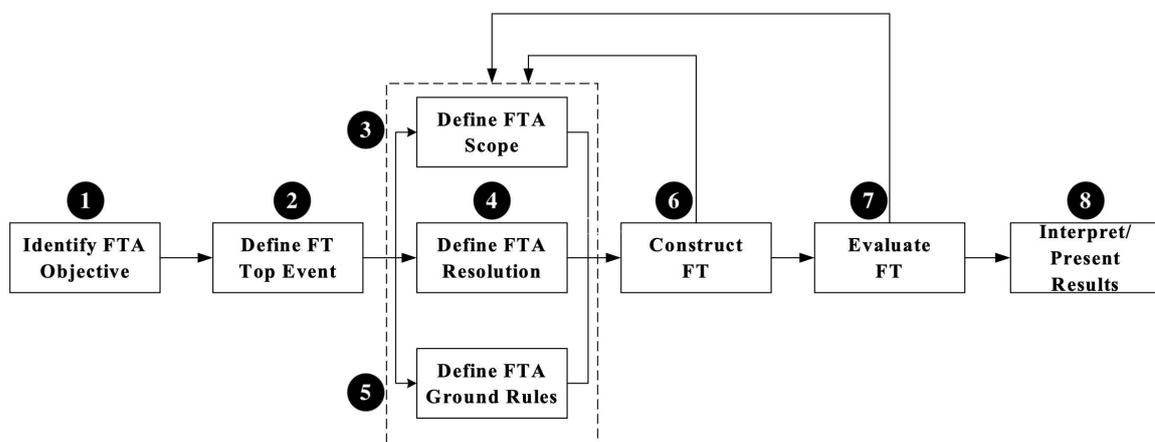


Fonte: Adaptado de (STAMATELATOS et al., 2002).

Para sua construção, segundo Stamatelatos et al. (2002) e Kritzinger (2016) as seguintes etapas devem ser seguidas:

1. Identificar o objetivo da FTA;
2. Definição do evento topo da árvore de falhas;
3. Definição do escopo da FTA;
4. Definição da resolução da FTA;
5. Definição das regras básicas para a FTA;
6. Construção da FTA;
7. Avaliação da FTA;
8. Interpretação e apresentação dos resultados.

Figura 8 – Passos da FTA.



Fonte: Stamatelatos et al. (2002).

Sendo assim, avaliando a Figura 8, deve ser identificado inicialmente o objetivo da FTA, a fim de garantir que a análise satisfará o objetivo escolhido com base na formulação de termos de uma falha do sistema a ser analisado. Em seguida, define-se o evento topo da árvore de falhas, ou seja, o evento principal da árvore, de tal modo que este acontecimento é o evento para o qual as causas de falha serão resolvidas e a probabilidade de falha determinada. Desse modo, a definição do evento de topo deve ser feita cuidadosamente, pois, se for muito genérica a análise torna-se incontrolável. Por outro lado, se for muito específica, a análise não fornece uma visão suficientemente ampla do sistema. Se o evento principal for mal definido, toda a avaliação ficará sem foco.

Em sequência, define-se o escopo da FTA, realizando a indicação de quais falhas e contribuintes serão incluídos e quais não serão incluídos. O escopo da FTA também inclui a versão específica do projeto e o período histórico relevante para o sistema que será analisado, assim como devem ser adicionadas condições de contorno para a análise, incluindo os estados iniciais dos componentes e as entradas assumidas

para o sistema.

Então, avalia-se a resolução que a FTA apresentará, ou seja, o nível de detalhamento a que serão submetidas as causas de falha para o evento topo. Se o evento principal for uma falha funcional do sistema, como falha na operação ou desligamento inadvertido, o evento principal geralmente é resolvido para os principais componentes dos sistemas. Com isso, devem ser definidas as regras básicas que irão incluir o procedimento e a nomenclatura pelos quais os eventos e portões serão nomeados (Figura 7), pois a nomenclatura selecionada é de extrema importância na criação de uma árvore de falhas compreensível. As regras básicas de modelagem podem incluir falhas de componentes específicos, erros humanos e de causa comum.

Tendo realizado os demais passos descritos anteriormente, a construção do árvore de falha deve ser realizada a partir dos esquemas e descrições do sistema. Uma vez concluída, deve ser realizada a avaliação qualitativa e quantitativa, de forma que, conforme apontado por Stamatelatos et al. (2002):

- A avaliação qualitativa fornece informações sobre os conjuntos mínimos de corte para o evento principal. Também podem ser identificados conjuntos de sucesso que garantem a prevenção do evento principal;
- A avaliação quantitativa produz não apenas a probabilidade do evento principal, mas também os conjuntos de cortes dominantes que contribuem para a probabilidade do evento principal, bem como a importância quantitativa de cada evento básico. Os conjuntos de corte neste caso são classificados por probabilidade e os conjuntos de corte de baixa probabilidade são truncados da análise.

Por fim, com as análises montadas, enfatiza-se a interpretação de toda árvore e não apenas sua apresentação. Os resultados devem ser interpretados para fornecer implicações tangíveis, especialmente no que diz respeito ao impacto potencial sobre o objetivo, a fim de se tomar as medidas cabíveis para contornar e evitar que as falhas avaliadas ocorram (STAMATELATOS et al., 2002).

2.6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No trabalho feito por Kulu (2022), o autor primeiramente apresenta as últimas estatísticas de lançamento de nanossatélites e CubeSats. Em sequência se concentra no detalhamento nos nanossatélites voando além do LEO. O terceiro ponto do estudo se trata da coleta e previsões de várias organizações e as compara com resultados históricos, apresentando e discutindo as razões para a divergência entre os dados. Por último, a pesquisa inclui a criação de uma nova previsão para os próximos 6 anos da área.

Para elaboração da pesquisa, o autor utilizou como critérios de pesquisa:

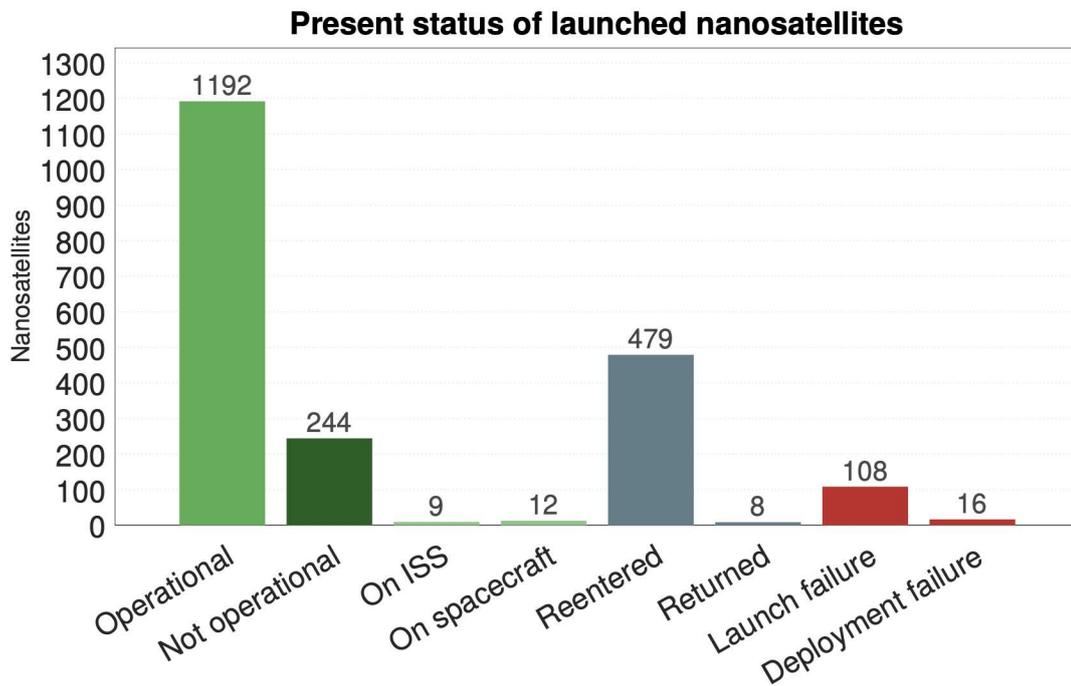
- Incluído no banco de dados Nanosats:
 - Nanosatélites de 1kg a 10kg;
 - Todos os CubeSats de 0,25U a 27U;
 - Picosatélites de 100 g a 1 kg;
 - PocketQubes, TubeSats e ThinSats.
- Não incluso:
 - Femtosatélites (10 g a 100 g), chipsats e lançamentos suborbitais;
 - CubeSats aparafusados em estágios superiores e não devem ser objetos voadores separados;
 - Câmeras de inspeção do espaço profundo, como voadas em IKAROS e Tianwen-1;
 - Os dados existem desde 1998, enquanto pelo menos 21 nanossats foram lançados na década de 1960;
 - Microsatélites personalizados na faixa de 10 a 50 kg.

Concluiu-se pela primeira parte do documento, as últimas estatísticas e tendências de lançamento de CubeSat e nanosatélites. Mais de 3.400 nanosatélites (2.068 nanosats e 1.893 CubeSats) foram lançados até 1º de agosto de 2022. O autor também destaca o status atual de todos os nanosatélites lançados, incluindo foguetes e falhas de implantação, como visto na Figura 9, ressaltando a dificuldade de coletar as informações e comentando que a verdadeira contagem operacional é provavelmente menor do que os 1192 destacadas no artigo por conta de informações de constelações não serem anunciados.

Em sua análise o status operacional também inclui semi-operacional, ou seja, operacional não significa que a missão foi concluída, mas pelo menos um dado com telemetria funcionando deve ser enviado regularmente. CubeSats nunca ouvido com

status “sem sinal” é de cerca de 6% (132 de 2068).

Figura 9 – Status de nanosatélites.



Fonte: Kulu (2022).

Além disso, o autor na segunda parte do trabalho enfocou o subconjunto de nanosatélites voando além da órbita baixa da Terra e 79 dessas missões com órbitas terrestre médias a heliocêntrica foram listadas como 15 delas lançadas. Na terceira parte do estudo coletou previsões de lançamento de pequenos satélites e as comparou com resultados históricos. A maioria das previsões foi superestimada. Atrasos no lançamento podem ter um impacto relativamente grande devido às missões de compartilhamento de viagens, mas são apenas um aspecto disso. Grande parte do crescimento deveria vir de constelações comerciais, mas a maioria delas ainda não aconteceu em escala e algumas já fizeram ou farão a transição para satélites maiores. Por último, Kulu (2022) criou uma previsão atualizada de lançamentos do CubeSats para os próximos 6 anos. Prevemos que haverá 2.080 nanosatélites lançados desde o início de 2022 até o final de 2027.

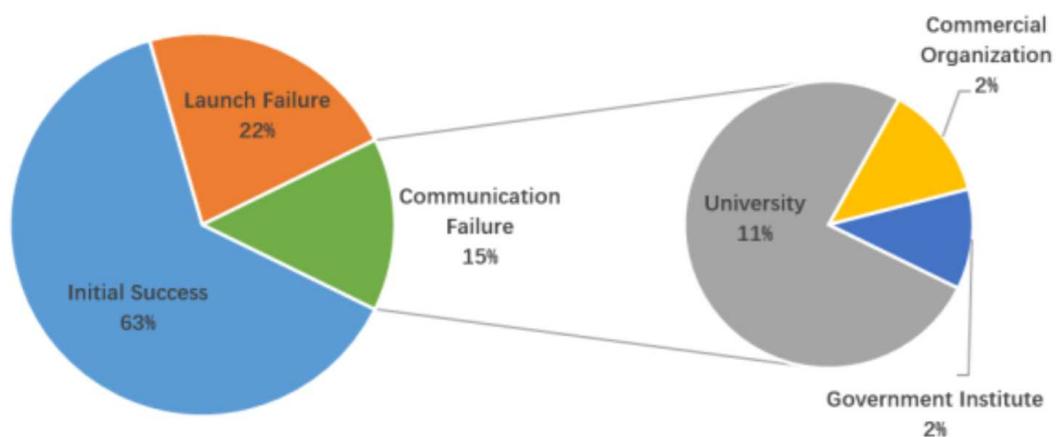
Panga et al. (2016) por meio de seu trabalho fornece os resultados de uma pesquisa de CubeSats lançada entre 2003 e 2015, incluindo quase todos os CubeSats lançados no período, para obter uma melhor compreensão do atual nível de tecnologia dos CubeSats e identificar tendências no desenvolvimento e crescimento global de tais projetos.

Como método de análise, os dados usados para a pesquisa foram colocados em um banco de dados e são originários de uma variedade de fontes, incluindo documentos, relatórios de design técnico, sites de projetos e vários bancos de dados

(on-line), sendo o banco de dados CubeSat desenvolvido pelo Shaanxi Engineering Laboratory for Microsatélites um das principais fontes. Embora nem todos os detalhes possam ser encontrados ou verificados, um total de 425 satélites foram usados para análise estatística.

Panga et al. (2016) destaca que se um CubeSat alcança ou não o sucesso, é baseado no cumprimento dos objetivos da missão que podem abranger ciência, tecnologia e educação. Para os fins desta análise, uma missão é definida como um sucesso inicial quando o CubeSat teve pelo menos um uplink e um downlink. Em 2003-2015, mais de 150 CubeSats (35% de todos os 425 CubeSats) não conseguiram se comunicar com as estações terrestres, considerando também falhas no lançamento. Contudo, comenta ser mais razoável considerar apenas as taxas de sucesso da missão para CubeSats lançados com sucesso. Depois de excluído o fator de lançamento, evidencia ver que os CubeSats desenvolvidos por universidades forneceram o maior percentual de falhas, com 76%, e, conseqüentemente, os CubeSats das universidades tiveram uma taxa de sucesso menor para desempenho em órbita em comparação com todos os CubeSats.

Figura 10 – Sucesso de missões de cubesats.



Fonte: Panga et al. (2016).

Por fim, Panga et al. (2016) conclui que os três pilares que sustentam o lançamento do CubeSat, empresas comerciais, universidades e governos, têm focos diferentes na seleção dos objetivos da missão. As empresas colocam muito mais peso em aplicações como a observação da Terra, enquanto os institutos de pesquisa do governo se concentram na demonstração de tecnologia e na ciência. Os CubeSats das universidades ainda mantêm as propriedades originais da educação. Mas com base nisso, eles receberam objetivos mais técnicos e científicos. O atributo de educação pode levar a uma menor taxa de sucesso que pode ser superada dando mais ênfase à confiabilidade técnica após vários lançamentos bem-sucedidos.

Ammons (2022) em sua tese de mestrado realiza uma análise de falha na sequência e no mecanismo de deployment, do sensor vetorial e do Pacote de Sensor Auxiliar (ASP - Auxiliary Sensor Package) presentes nos dois CubeSats da missão AERO-VISTA, para melhor informar esforços de teste adicionais, bem como para desenvolver o conceito de operações de deployment. O sensor vetorial é um conjunto de seis antenas - três antenas de loop, duas antenas dipolo e uma antena monopolo - que facilitarão a caracterização da rádio aurora da Terra.

O autor realiza um Análise de Árvore de Falhas para cada estágio da sequência de deployment. Após a construção dessas árvores de falhas, são indicados os pontos de telemetria disponíveis para a identificação dessas falhas, permitindo a categorização das falhas naquelas que podem ser identificadas em órbita versus aquelas que não podem ser identificadas em órbita. Além disso, cada Árvore de Falhas pode ser apresentada como uma Árvore de Eventos para visualizar melhor a sequência de eventos necessária para uma deployment bem-sucedida.

A sequência de deployment é dividida em três fases distintas: extensão, loop deployment e monopolo deployment. A extensão com falha apresenta o maior número de modos de falha que não serão identificáveis exclusivamente em órbita. O maior agrupamento de falhas não identificáveis na loop ocorre quando as portas da carga útil não abrem durante o estágio telescópico. Já o monopolo deployment apresenta o menor número de modos de falha.

Por fim, Ammons (2022) conclui que pontos importantes de telemetria identificados que são solicitados durante a tentativa de deployment devem incluir dados EPS e comandos recebidos/executados e status geral da espaçonave. Outros pontos, como imagens da câmera e status do puxador de pinos, devem ser consultados após o deployment. Para falhas que não são exclusivamente identificáveis, testes extensivos devem ser feitos para garantir que a probabilidade de ocorrência seja minimizada.

Rakalina et al. (2021) visa tornar as análises de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE - Model Based Systems Engineering) e Garantia de Missão Baseada em Modelo (MBMA - Model Based Mission Assurance) práticas para uma ampla gama de missões, de pequeno a grande porte, para apoiar decisões de projeto arquitetônico, de forma rápida e econômica, em todas as organizações. Além de explorar os conceitos básicos de modelagem e comunicar-se sobre o modelo, os parceiros mostraram que a análise de confiabilidade pode ser gerada a partir do modelo. A garantia de confiabilidade dos sistemas depende dos modos de falha, efeitos e análise de criticidade (FMECA- Failure Mode and Critical Analysis) e análise de árvore de falhas (FTA Fault Tree Analysis) com base na missão simulada. Foram testadas as estruturas básicas do metamodelo e comparados os resultados entre as agências NASA, ESA e JAXA.

Os autores fazem uso dos benefícios do SysML como linguagem para a

elucidação da arquitetura do sistema para CubeSats, pois são bem compreendidos e implementados em formatos de modelo padrão. Uma dessas estruturas básicas emprega máquinas para o desenvolvimento de FMEAs e FTAs. Quando as falhas são modeladas usando essa estrutura, os plug-ins (desenvolvidos pela NASA em um projeto de pesquisa de inovação em pequenas empresas) para a ferramenta SysML são capazes de gerar automaticamente uma tabela FMECA e árvores de falhas.

Uma metodologia de modelagem foi desenvolvida para estender o modelo do sistema (em SysML) com informações do modo de falha. A metodologia foi aplicada a um exemplo de sistema de energia do CubeSat (EPS - Electrical Power System) como o sistema mais crítico para o CubeSat. A FTA gerada para o efeito *No Bus Power*, mostra todas as falhas propagadas começando com a causa da falha, incluindo o caminho de propagação para o modo de falha *Kill Switch Stuck Off*.

Por fim, Rakalina et al. (2021) conclui que o benefício desse aplicativo é a capacidade de realizar rapidamente análises de confiabilidade, como árvores de falhas e uma tabela FMECA, demonstrando que a confiabilidade do sistema pode ser analisada no estágio inicial do projeto. A MBMA, do qual este é um exemplo, pretende ser aplicável a uma vasta gama de missões, desde pequenos satélites a grandes sistemas, para apoiar e analisar projetos de forma rápida e eficaz.

Sendo assim, tendo em vista o impacto das falhas nos trabalhos de Kulu (2022) e Panga et al. (2016), nota-se pelos trabalhos de Rakalina et al. (2021) e de Ammons (2022) a importância de uma análise e estudo de riscos nos projetos. Como apontado pelos autores, a utilização da análise de árvore de falhas permite um estudo a fundo do sistema por completo e, com isso, saber onde demandar energias para mitigar possíveis falhas que possam ocorrer no decorrer da missão.

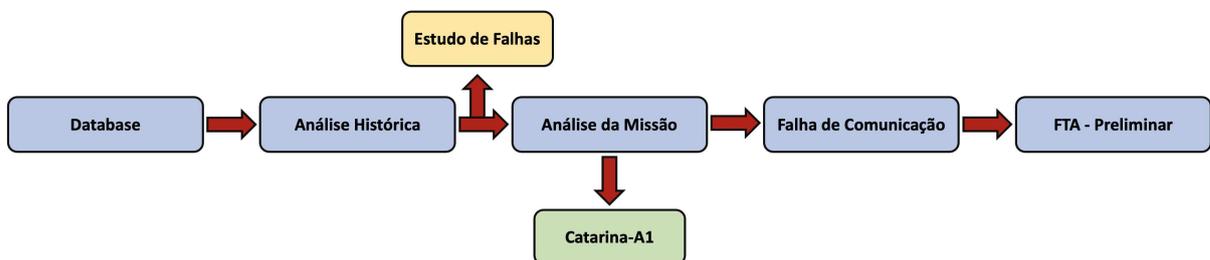
Com isso, a aplicação da FTA, ou demais métodos de análises de falhas e riscos, mesmo que de forma preliminar, auxilia na prevenção de falhas e, conforme apontado o crescimento dos lançamentos de nanosatélites por Kulu (2022) e o impacto das falhas evidenciado por Panga et al. (2016), a implementação de uma metodologia de estudo de riscos em projetos tende a reduzir as falhas e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade e taxa de sucesso das missões que estão a acontecer.

3 METODOLOGIA

Este capítulo irá fornecer uma visão geral das etapas e abordagens adotadas na condução da pesquisa, bem como uma justificativa para a escolha desses métodos. Além disso, serão discutidas as limitações e delimitações do trabalho. Por meio da aplicação de métodos definidos, busca-se garantir a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo uma análise aprofundada e fundamentada.

A Figura 11 indica a sequência do método adotado neste trabalho para análise de falhas. O processo foi iniciado pelo levantamento histórico de dados relacionados a lançamentos de cubesats através de bancos de dados disponíveis on-line. Com o levantamento, foi realizado o estudo quantitativo e qualitativo das falhas que ocorrem em cubesats e, posteriormente a apresentação da missão do CubeSat Catarina-A1, realizada uma sobreposição das informações de forma que se tornasse possível a definição da principal falha que pode influenciar na missão e, com isso, elaborar uma análise FTA preliminar do nanossatélite.

Figura 11 – Fluxograma do trabalho.



Fonte: Autor (2023).

3.1 DATABASE

Os bancos de dados de CubeSats se tratam de um recurso valioso para a comunidade espacial, fornecendo informações detalhadas sobre satélites em órbita. Esses bancos de dados coletam dados importantes, como parâmetros técnicos, missões, operadores e o status atual dos nanossatélites. Esses bancos de dados são mantidos por várias organizações e instituições, como agências espaciais, empresas privadas e comunidades acadêmicas. Eles estão disponíveis para pesquisadores, engenheiros, entusiastas do espaço e qualquer pessoa interessada em rastrear e obter informações sobre CubeSats em órbita (KULU, 2022).

As informações comumente disponíveis nos bancos de dados de CubeSats incluem:

1. Identificação e características técnicas: nome do satélite, fabricante, dimensões, massa, configuração (por exemplo, número de unidades - U - no formato 3U) e detalhes dos subsistemas de bordo, como fonte de alimentação, comunicação e controle de atitude.
2. Missão e Propósito: Uma descrição da missão do CubeSat, seus objetivos científicos ou tecnológicos e a contribuição que o satélite deseja fazer em uma área específica.
3. Operador: Informações sobre a entidade ou organização responsável pela operação do CubeSat, como universidades, empresas privadas ou órgãos governamentais.
4. Status e localização: o status atual do CubeSat (ativo, inativo, falha, etc.) e informações sobre sua localização atual e órbita, se disponível.
5. Histórico do lançamento: Detalhes do lançamento do CubeSat, como data, veículo de lançamento usado e local de lançamento.

Esses bancos de dados de CubeSat são atualizados regularmente quando novos satélites são lançados, missões são concluídas ou mudanças de status operacional ocorrem. Além disso, esses bancos de dados podem ser usados para pesquisa estatística, análise de tendências e planejamento de órbita e frequência para evitar colisões ou interferências entre CubeSats e outros objetos espaciais (KULU, 2022).

Embora os CubeSats tenham se tornado uma opção popular e barata para missões espaciais de menor escala, é importante perceber que esses satélites também estão sujeitos a certas falhas e desafios. Sendo assim, alguns dos principais problemas que podem fazer com que CubeSats venham sofrer falha são: (BOROWICZ, 2022; BOUWMEESTER; LANGER, 2016)

1. Limitações de energia: Os CubeSats têm limitações significativas em termos de energia disponível devido ao seu pequeno tamanho. As células solares usadas para gerar energia podem ter capacidade e eficiência limitadas, especialmente diante de mudanças orbitais, obstruções solares ou danos causados por detritos espaciais.
2. Falhas nos sistemas de comunicação: Devido ao seu pequeno tamanho, os CubeSats podem apresentar dificuldades na comunicação com as estações terrestres. Baixa potência de transmissão, limitações de antena e tempo de acesso limitado a estações terrestres podem afetar a qualidade e a confiabilidade das comunicações via satélite.
3. Bugs de Software: O desenvolvimento de software para CubeSats pode ser complexo e sujeito a erros. Problemas de codificação, falta de testes adequados e interações complexas entre sistemas podem levar a falhas operacionais e comportamento inesperado.

4. Fragilidade mecânica: CubeSats são projetados com materiais leves e estruturas delicadas para minimizar o peso. No entanto, esse recurso também pode torná-los mais suscetíveis a vibrações e impactos de detritos espaciais, o que pode levar a danos estruturais e mau funcionamento de componentes internos.
5. Falhas nos subsistemas: Como qualquer outro satélite, os CubeSats possuem vários subsistemas, como energia, controle de atitude, processamento de dados e cargas úteis. Cada um desses subsistemas pode sofrer falhas específicas, como componentes eletrônicos com defeito, sensores defeituosos ou sistemas de controle ineficientes.
6. Ambiente espacial hostil: O ambiente espacial apresenta muitos desafios, como flutuações de temperatura, radiação cósmica e exposição a micrometeoritos. Esses fatores podem afetar o desempenho e a vida útil dos componentes eletrônicos e, em alguns casos, levar a falhas prematuras.

A confiabilidade do satélite é um aspecto extremamente crítico no projeto geral de qualquer missão espacial, uma vez que tem impacto direto no sucesso da missão, sucesso parcial da missão ou até mesmo falhas catastróficas que levam à perda do CubeSat. Para mitigar esses riscos, é necessário realizar testes rigorosos, seguir boas práticas de engenharia, implementar redundância em sistemas críticos e garantir o planejamento adequado das operações em órbita. Deve ser lembrado que os CubeSats são estruturas de pequena escala e baixo custo e as limitações associadas devem ser levadas em consideração no planejamento de missões espaciais envolvendo esses satélites (ALBALOOSHI et al., 2023).

Tendo isso em vista, utilizaram-se as databases dispostas por Kulu (2014) e Swartwout (2021) para analisar e estudar os casos de CubeSats já lançados. Para a realização do estudo, os seguintes critérios foram definidos para as análises:

- Lançamentos realizados a partir de 2010;
- Lançamentos feitos até final de 2020;
- CubeSats variando de 0.25U até 3U.

Sendo assim, colocando os filtros acima nas databases, foi construída uma planilha no Excel contendo os 1178 CubeSats lançados no período com os dados de interesse para o estudo. Portanto, as informações relevantes consideradas nas análises foram:

- Nome do CubeSat;
- Código de identificação do CubeSat (NORAD ID);
- País fabricante;
- Dimensão do CubeSat;
- Tipo de organização;
- Órbita de voo;
- Status de operação;

- Data de lançamento;
- Categoria da missão;
 - Descrição da missão
- Ocorrência de falha;
 - Categorização da falha em caso positivo

Com as informações citadas, realizou-se um análise qualitativa e quantitativa no período analisado para compreender o comportamento e categorização das missões realizadas com os cubesats assim como o mapeamento de falhas que tornasse possível uma análise preliminar para estudar métodos de falhas que possam impactar o cumprimento da missão do nanossatélite Catarina-A1.

3.2 CONSTELAÇÃO CATARINA: CATARINA-A1

Desastres naturais recentes decorrentes de mudanças climáticas destacaram a necessidade de um sistema preventivo que alcance os setores da sociedade mais afetados pela falta de antecipação de situações de crise. Além disso, dados meteorológicos mais precisos ou extensos podem ser usados em vários aplicativos já em execução ou para fins de inovação. Portanto, a Constelação Catarina foi projetada para atender a esses e outros fatos relacionados ao Sistema Brasileiro de Coleta de Dados (SBCD) (UFSC, 2023c).

A Constelação Catarina deve fomentar o Setor Espacial Brasileiro, com enfoque na indústria catarinense (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2021). Os serviços nacionais, como a Defesa Civil e o Setor Agropecuário, que utilizam dados hidrometeorológicos medidos in loco precisam de meios para coletar os dados das plataformas de medição, preferencialmente nacionais, o que estimula a articulação da tríplice hélice, representados nesta etapa da Constelação Catarina pela indústria, (ISI-SE - Instituto SENAI de Inovação em Sistemas Embarcados) , academia (UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina) e governo (AEB - Agência Espacial Brasileira) (UFSC, 2023c).

A Frota A da Constelação Catarina tem como stakeholders iniciais a AEB, UFSC, ISI-SE, Defesa Civil e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). De forma que, para atender a esses clientes, os principais objetivos da missão podem ser definidos por: (UFSC, 2023c)

1. Demonstração de tecnologia para disponibilizar dados coletados de PCDs instalados em território brasileiro;
2. Desenvolvimento da indústria catarinense do setor espacial;
3. Desenvolvimento de recursos humanos.

3.2.1 Análise e Definição da Missão

O Programa Constelação Catarina, instituído pela Portaria nº 590, de 6 de maio de 2021, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)/Agência Espacial Brasileira, define:

"Compreende um conjunto de iniciativas consorciadas voltadas para o desenvolvimento sistemas baseados na utilização de nanossatélites, que se complementam através da partilha colaborativa de infraestruturas espaciais, conhecimentos, dados, serviços e aplicações espaciais, seguindo as orientações e instrumentos de cooperação previstos nesta Portaria e nos Acordos de Adesão ao Consórcio Catarina."(DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2021)

Esta iniciativa também contribui para o alcance dos seguintes objetivos da Política Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (PNDAE):

1. Estabelecimento competência técnico-científica na área espacial;
2. Seleção de alternativas tecnológicas para solução dos problemas brasileiros;
3. Desenvolvimento de soluções específicas para problemas específicos do nosso território ou sociedade;
4. Promoção do desenvolvimento de sistemas espaciais.

3.2.2 Arquitetura e Requisitos de Missão

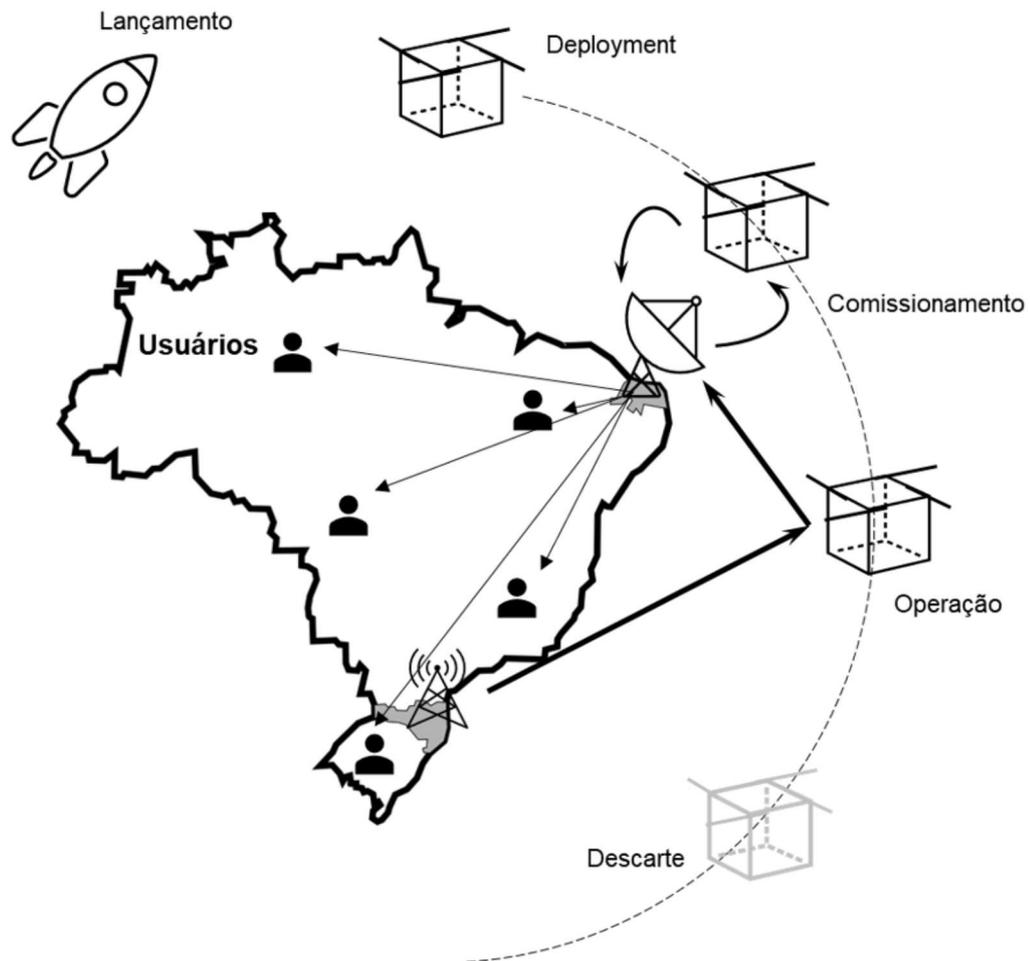
A arquitetura da missão da Frota A é composta pelos seguintes segmentos:

1. Segmento Espacial:
 - Plataforma de serviço;
 - Carga útil (Payload).
2. Segmento Solo:
 - Controle da missão;
 - Posto de seguimento e controle;
 - PCD em Santa Catarina.

De maneira geral, o design da missão, como definido por UFSC (2023c) e visto na Figura 12, consiste nas seguintes fases:

1. Lançamento;
2. Comissionamento do sistema espacial;
3. Operação;
 - Coleta de dados de uma PCD instalada em Santa Catarina;
 - Envio dos dados para a Estação Multimissão de Natal (EMMN);
 - Distribuição dos dados aos usuários através do SINDA.
4. Descarte do sistema espacial.

Figura 12 – Conceito geral da missão.

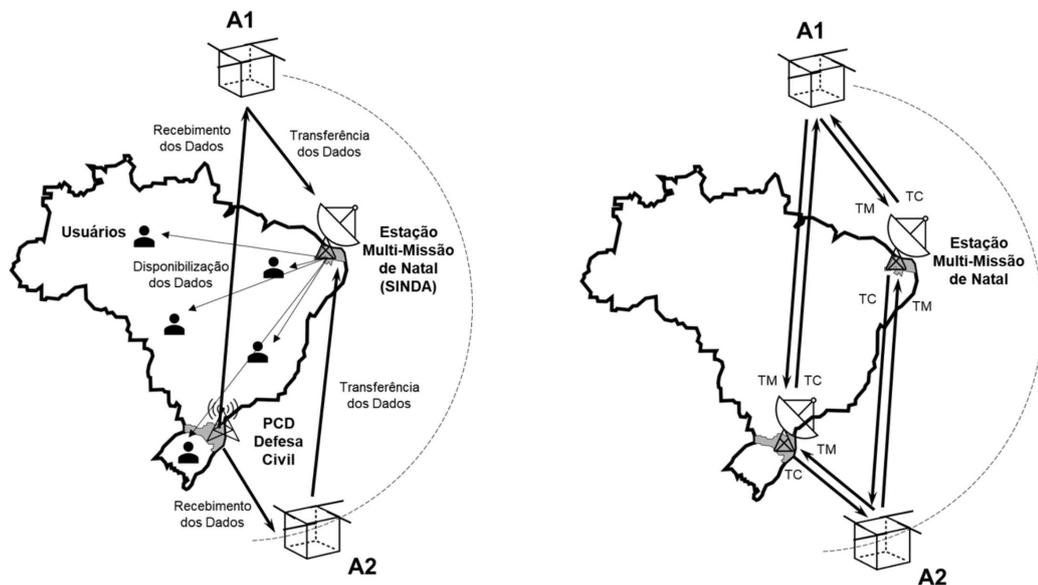


Fonte: UFSC (2023c).

Esse intercâmbio de dados pode ser realizado de duas maneiras como visto na Figura 13, na qual é possível visualizar a transmissão de dados de uma PCD instalada em SC para os sistemas espaciais Catarina-A1 e Catarina-A2 e destes sistemas para a EMMN e integração dos dados recebidos ao SINDA para disponibilidade aos usuários. Por outro lado, a figura da direita mostra a troca de dados para telecomando e telemetria

dos sistemas espaciais através da EMMN da estação de coleta de dados em SC.

Figura 13 – Cenários de operação.



Fonte: UFSC (2023c).

Portando, tendo em vista a arquitetura da missão, ressalta-se que, no segmento espacial, o Payload será um transmissor de comunicação ARGOS (Advanced Research and Global Observation Satellite) desenvolvido pelo INPE, denominado EDC, necessário para a comunicação com a PCD instalada em SC. Considerando o segmento solo da Frota A da Constelação Catarina, o mesmo deve ser configurado para atender plenamente aos requisitos de missão e deve ser capaz de fornecer os seguintes serviços:

- Monitoramento e controle do satélite;
- Análise de desempenho e falhas;
- Determinação e propagação da órbita e atitude do satélite;
- Manutenção de software embarcado;
- Recepção e disponibilização dos dados recolhidos;
- Recepção e disponibilização de dados de telemetria.

A operação do sistema espacial é projetada para coleta de dados em Órbita Terrestre Baixa (LEO - Low Earth Orbit), características que podem ser alcançadas com plataformas CubeSat padrão. Com isso, como avaliado em UFSC (2023b), foram analisadas as órbitas-limites de 500km, que representa a altitude mínima para que se obtenha um tempo de permanência em órbita não inferior a 12 meses, e a altitude de 650km, sendo o limite para respeitar o padrão das Diretrizes de Mitigação de Detritos Espaciais da Coordenação de Detritos Espaciais Interagências (IADC - Inter-Agency Space Debris Coordination), que define que o tempo máximo em órbita antes da reentrada de um nanossatélite é de 25 anos.

Além disso, a fim de se obter um ponto de contato mínimo entre sistema espacial, PCD e estação terrestre de pelo menos 1 interação por dia, no pior cenário, as órbitas de inclinação 20°, 51° e 97° podem ser usadas para completar a missão. Entretanto, ressalta-se que a órbita de 20° apresenta um número maior de pontos de contato médios quando comparada com a inclinação de 97°, o que a tornaria uma escolha óbvia para a órbita da missão. Porém, é de conhecimento amplo que os lançamentos mais comuns disponíveis são para inclinações próximas a 97° e encomendar um lançamento com inclinação ou altitude específica pode se tornar financeiramente inviável para o projeto (UFSC, 2023b).

Portanto, resumidamente, como determinado pela UFSC (2023a), o Catarina-A1 tem como requisitos de missão a serem cumpridos:

1. A Frota A deve coletar dados transmitidos por PCDs no território brasileiro;
2. Os dados coletados devem ser enviados para a Estação Multimissão de Natal (EMMN);
3. A EMMN deve controlar o Segmento Espacial da Frota A da Constelação Catarina;
4. O Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA) deve ser utilizado para distribuir os dados coletados pelo Segmento Espacial;
5. A conexão PCD-Segmento Espacial deve ser capaz de receber no mínimo 32 bytes por acesso;
6. A vinculação da coleta de dados deve ser compatível com o protocolo ARGOS;
7. A conexão EMMN-Segmento Espacial deve ser capaz de transportar não menos que 32 bytes por acesso;
8. Os dados da missão devem ser compatíveis com a estrutura de dados definida pelo Sistema Brasileiro de Coleta de Dados (SBCD)
9. Os CubeSat devem ser projetado e integrado pela própria equipe;
10. Os CubeSat devem ser capaz de operar em LEO a uma altitude entre 500 e 650 km e inclinação entre 20° a 100°.

3.3 MAPEAMENTO DE FALHAS DO PROJETO CUBESAT CATARINA-A1

A partir do documento MDD - Mission Design Definition (UFSC, 2023c), os principais elementos e recursos que podem ser afetados por qualquer tipo de falha são:

- Payload;
- Operação do segmento espacial;
- Operação do segmento solo;
- Operação de veículos lançadores;
- Recursos financeiros disponíveis;
- Infraestrutura disponível;
- Recursos humanos disponíveis;

- Cronograma do projeto;
- Orçamento do projeto.

Os níveis do espectro de severidade são usados para determinar que tipo de mitigação deve ser aplicada para o risco em questão. Este plano usa a tabela presente na Figura 14 como um guia de aceitação.

Figura 14 – Critérios de avaliação de aceitação de risco.

Very Low	Aceitar
	Difícilmente vale a pena tomar qualquer atitude. Geralmente são desconsiderados
Low, Medium	Aceitar/Eliminar/Mitigar/Transferir/Compartilhar
	Pode ser aceito, porém a aceitação pode ser revogada pelo Conselho administrativo. Neste caso, o risco deve ser tratado.
High, Very High	Eliminar / Mitigar / Transferir / Compartilhar
	Este risco deve ser tratado. Só pode ser aceito com justificação e consentimento do Conselho administrativo

Fonte: Adaptado de UFSC (2023d).

Avaliando os possíveis segmentos que podem ocorrer riscos, como destacado pela UFSC (2023d), os principais tipos de falha com sua classificação e modelo são destacados na tabela presente na Figura 15.

Figura 15 – Identificação e classificação de riscos.

Risco	Critério	Criticidade	Categoria
Incapaz de obter recursos financeiros adicionais para completar a missão (fase operacional e lançamento)	Very High	Catastrófico	Programático
Falta de componentes no mercado	Medium	Menor	Externo
Alta rotatividade da equipe de desenvolvimento	Very Low	Minor	Programático
Defesa Civil não disponibiliza PCD para realização dos testes	Very Low	Insignificante	Programático
Alta significativa do dólar pode não ter recursos suficientes para adquirir os sistemas	Medium	Maior	Externo
Não há carga útil pronta para comunicação com PCDs que atenda às necessidades do projeto	Low	Crítico	Técnico
A falha da estação terrestre pode torná-la não operacional para operação de constelação	High	Catastrófico	Externo
Disponibilidade do LIT para testes de qualificação de satélite	Low	Menor	Externo
Licenciamento operacional não disponível no momento do lançamento	Medium	Maior	Externo
Falha na operação do software	High	Catastrófico	Técnico
Falha na operação de hardware	High	Catastrófico	Técnico
Falha de carga útil secundária	Low	Menor	Técnico
Falha na operação do Software GSE	Low	Menor	Técnico
O EDC não cumpre os requisitos técnicos	Low	Crítico	Técnico
EDC não cumpre o prazo	Medium	Maior	Técnico
Recursos materiais insuficientes para testes preliminares	Low	Menor	Programático
Reprovação em testes AIT de aceitação (no INPE) impactando em atrasos	Low	Maior	Técnico
Requisitos metrológicos não conformes impactando em atrasos	Low	Menor	Técnico
O mecanismo do interruptor de interrupção falha e o satélite não liga	High	Catastrófico	Técnico
Sistemas COTS não disponíveis no mercado	Low	Maior	Externo
Falha de comissionamento do satélite	High	Catastrófico	Técnico
Satélite não sobrevive ao lançamento	Medium	Catastrófico	Técnico
Falha de implementação no centro da missão	High	Catastrófico	Programático

Fonte: Adaptado de UFSC (2023d).

Tendo em vista que a análise histórica faz menção a falhas relacionadas

a engenharia e operação, são desconsiderados os riscos relacionados a gestão e aquisição na missão. Foca-se totalmente em falhas relacionadas ao modo de operação, dentre elas: fornecimento de energia (EPS), comunicação, software, hardware, entre outros. Além disso, como na Figura 14, volta-se a atenção aos tipos de falha que possam comprometer o cumprimento da missão, ou seja, falhas que impossibilitam a coleta e transmissão de dados do satélite. Ademais, destaca-se que o estudo neste caso leva em consideração apenas falhas em frequência, não sendo analisado a severidade de cada uma.

3.4 ANÁLISE FTA DO CUBESAT CATARINA-A1

A análise de falhas desempenha um papel crucial no desenvolvimento e operação de CubeSats. Sendo que uma falha se define como o término da capacidade de um item em desempenhar a função estabelecida, ao passo que um defeito se define como qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos requisitos.

A utilização de métodos como FMEA, FMECA, FTA e RCA permite a identificação e a mitigação de falhas, contribuindo para a confiabilidade e o sucesso dessas missões. A aplicação dessas abordagens, juntamente com a utilização de boas práticas de projeto e testes rigorosos, é fundamental para aprimorar a qualidade e a confiabilidade dos CubeSats.

Pode-se destacar o trabalho de Borowicz (2022) no qual, por meio da análise FMECA, foram avaliados os riscos potenciais nos esforços para aumentar a confiabilidade da missão SeaLion. As estratégias de mitigação para cada modo de falha potencial incluíram um redesenho ou teste de funcionalidade, vibração e câmara de vácuo do projeto.

Por outro lado, o trabalho de Bidner (2010) apresenta uma visão geral da Análise de Árvore de Falhas realizada no CubeSat HERMES e oferece os benefícios que tal FTA apresenta para a missão. Além disso, destaca-se o artigo de Stesina e Corpino (2020) que evidencia eficazes testes realizados em modelos de CubeSats para entender a causa raiz de uma anomalia grave que ocorreu durante as operações da missão e-st@r-II CubeSat, uma missão desenvolvida dentro do Fly Your Satellite! Programa da Agência Espacial Europeia.

Sendo assim, tendo em vista a definição de missão do Catarina-A1, coleta, envio e distribuição de dados, foi desenvolvido uma FTA tendo como foco o modo de falha mais comumente reportado (ver Figura 24 mais a frente) que, conseqüentemente, se torna extremamente crítico para o cumprimento da missão, que seria a falha na comunicação.

Portanto, para a elaboração do FTA, levou-se em consideração que as falhas estão em nível de requisitos de projetos e não técnicos e, para a construção da análise

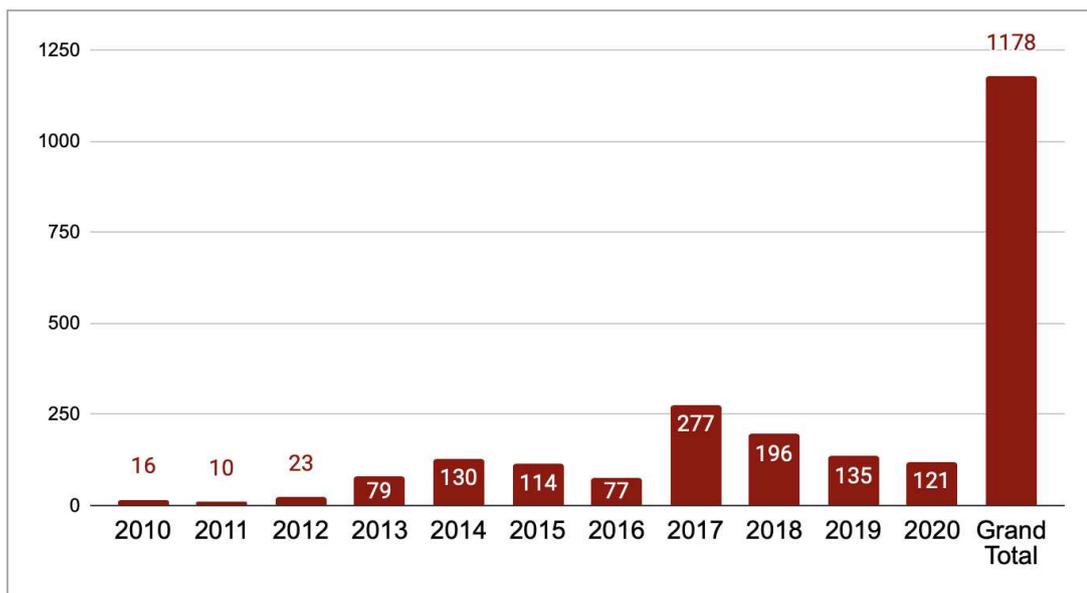
de árvores de falhas, tomou-se como base os trabalhos acima, assim como o uso do Manual de Árvore de Falhas com Aplicações Aeroespaciais (STAMATELATOS et al., 2002). Tal escolha foi feita sabendo que, para um estudo preliminar de falhas, o não aprofundamento técnico nos modos de falha não interfere na rastreabilidade dos mesmos e, conseqüentemente, na deposição de atenção para controle dos problemas. Além disso, com uma análise inicial e robusta, torna-se possível a realização de futuros projetos que permitam um maior aprofundamento técnico para maior contingência e controle das falhas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE HISTÓRICA

Após a coleta de informações das bases de dados e filtros indicados nas seções anteriores, o primeiro ponto a se destacar é o comportamento da curva de lançamentos de CubeSats ao longo dos anos, como visto pela Figura 16. A curva de número de lançamentos, mesmo que só avaliado os tamanhos de 0,25U a 3U, segue o comportamento da curva apresentado por Kulu (2022), onde algumas flutuações podem ser atribuídas a atrasos no lançamento, porque essas missões geralmente visam custos de lançamento mais baixos ou priorizam os primeiros lançamentos de novos foguetes.

Figura 16 – Lançamentos de CubeSats por ano.



Fonte: Autor (2023).

Outro tópico a se destacar é a distribuição geográfica da produção de CubeSats ao redor do mundo evidenciado pela Figura 18, com destaque para as regiões da América do Norte, Ásia e Europa. A América do Norte se destaca como a principal produtora, representando mais de 75% da produção, principalmente impactado pelos Estados Unidos, seguida pela Ásia e Europa, como visto pela Figura 17. Tal fato pode ser destacado considerando fatores como:

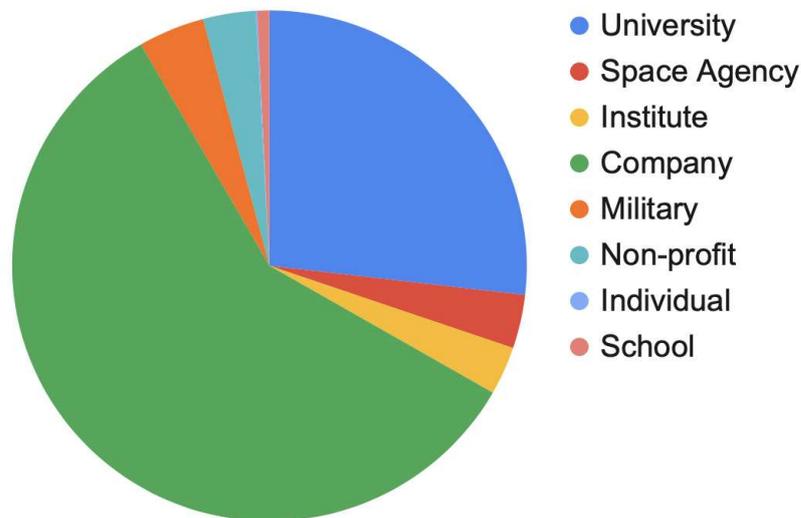
- Capacidade técnica e de infraestrutura;
- Investimentos governamentais e parcerias público-privadas;
- Políticas regulatórias e ambiente de negócios favoráveis.

Por outro lado, pode-se destacar a crescente participação na produção de

se uma predominância empresarial/privada na produção de aproximadamente 60%, destacando o foco no mercado comercial para fornecer serviços espaciais, como monitoramento ambiental, comunicações e observação da Terra, além de investimentos e desenvolvimento de negócios, impulsionando a produção de CubeSats e a comercialização de produtos e serviços relacionados.

As universidades vêm logo em seguida detendo aproximadamente 27% da produção por serem um ambiente propício oferecendo uma plataforma para pesquisa e desenvolvimento de tecnologia espacial por meio de programas educacionais. Juntamente a isto, a produção de CubeSats geralmente está associada à formação de estudantes, proporcionando experiência prática e promovendo o desenvolvimento de habilidades técnicas, além de oferecerem um trabalho em parceria com outras organizações para compartilhar recursos e conhecimento. Ademais, destaca-se os ramos Militares e Agências Espaciais com impacto de 4% aproximadamente cada uma. Geralmente, a vertente militar, trata-se de aplicações estratégicas e de defesa, enquanto o enfoque de agências é em liderar missões espaciais complexas e de grande escala, incluindo a produção de CubeSats como parte de projetos de pesquisa científica e exploração espacial (PANGA et al., 2016).

Figura 19 – Distribuição de produção por tipo de organização.

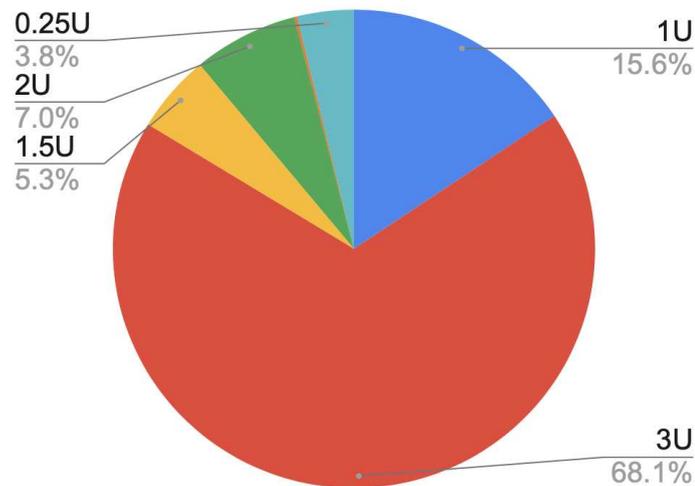


Fonte: Autor (2023).

Além disso, como visto pela Figura 20, é possível notar uma tendência na preferência de CubeSats de 3U sobre os de tamanhos inferiores. Os CubeSats no formato 3U apresentam vantagens em comparação aos tamanhos menores como a capacidade de carga útil expandida, a eficiência energética, a estabilidade orbital, a compatibilidade e padronização, bem como a capacidade de comunicação aprimorada. No entanto, é importante destacar que a escolha do tamanho do CubeSat deve ser baseada nas necessidades e requisitos específicos de cada missão, considerando os

recursos disponíveis e as metas a serem alcançadas.

Figura 20 – Distribuição de produção por dimensão.



Fonte: Autor (2023).

A especificação do CubeSat por seu design de engenharia e uso cada vez mais comum no setor espacial levou os CubeSats a se tornarem plataformas altamente versáteis. Eles podem ser usados para alcançar muitos objetivos de missão diferentes de forma econômica devido ao seu baixo custo e processo de desenvolvimento simples e integração na arquitetura da missão (CAPPELLETTI; ROBSON, 2021).

Como visto pela Figura 21, CubeSats possuem uma grande aplicabilidade em diferentes vertentes e, dentre elas, as mais comumente utilizadas sendo:

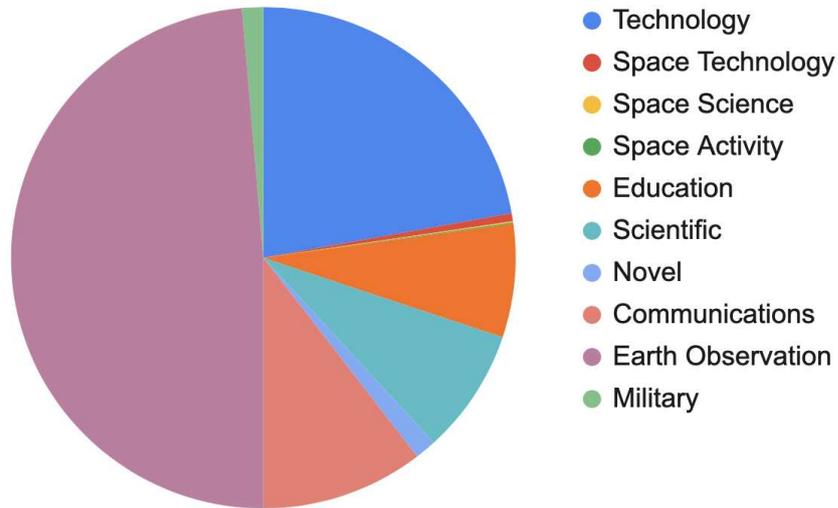
1. Observação da Terra;
2. Tecnologia espacial;
3. Comunicação;
4. Experimentação científica;
5. Educação.

A categoria de observação da Terra engloba missões destinadas a monitorar e coletar dados sobre o nosso planeta. Essas missões são amplamente utilizadas em estudos ambientais, mapeamento de recursos naturais, previsão climática e detecção de mudanças ambientais. As missões de tecnologia espacial envolvem a demonstração e teste de novas tecnologias e sistemas em ambiente espacial. Os CubeSats oferecem uma plataforma acessível para validar conceitos inovadores, como propulsão avançada, eletrônica de voo e comunicações avançadas. (BOARD et al., 2016)

Na área de comunicação, os CubeSats fornecem serviços de telecomunicações em áreas remotas ou afetadas por desastres naturais. Em missões científicas e de exploração espacial, contribuindo para pesquisas em áreas como astrofísica, estudos planetários, astrobiologia e exploração interplanetária. Assim como são utilizados como

ferramentas educacionais, proporcionando aos estudantes experiência prática na área espacial e promovendo o interesse pela ciência e tecnologia.(BOARD et al., 2016; CAPPELLETTI; ROBSON, 2021)

Figura 21 – Distribuição por tipo de missão.



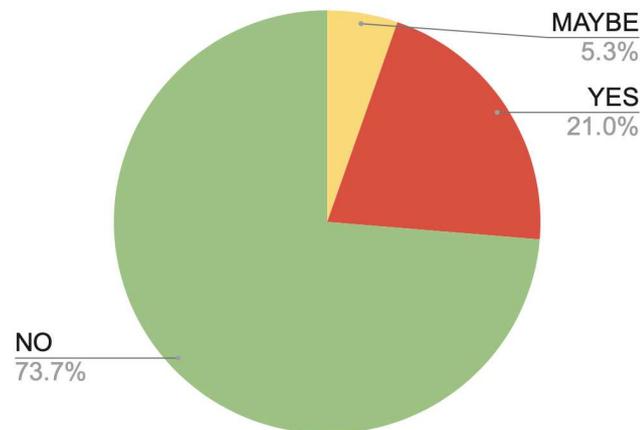
Fonte: Autor (2023).

Conseqüentemente, com o crescimento de lançamentos de CubeSats o número de falhas se torna cada vez mais perceptível pois é influenciada por diversos fatores, incluindo erros de projeto, falhas de componentes eletrônicos, problemas de comunicação e falhas de lançamento. De modo geral, pode se destacar pela Figura 22 que por volta de 21% dos lançamentos analisados no estudo apresentaram algum tipo de falha, não necessariamente catastrófica ou que comprometa a missão, mas que de alguma forma algum subsistema pode ter falhado.

Já na Figura 23, é possível ver o comparativo por dimensão de CubeSat e a quantidade de falhas que foram reportadas. Além disso, vale ressaltar que esse número pode ser maior, uma vez que uma parte considerável, classificada como "MAYBE", não

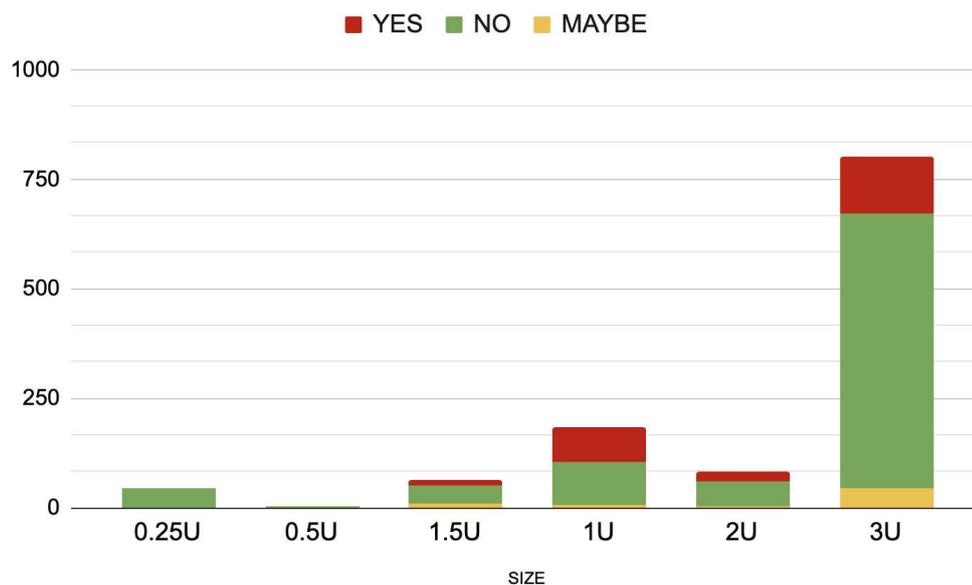
foi classificada devido à falta de informações publicadas.

Figura 22 – Percentual de falhas reportadas em lançamentos de CubeSats.



Fonte: Autor (2023).

Figura 23 – Falhas por dimensão de CubeSat.



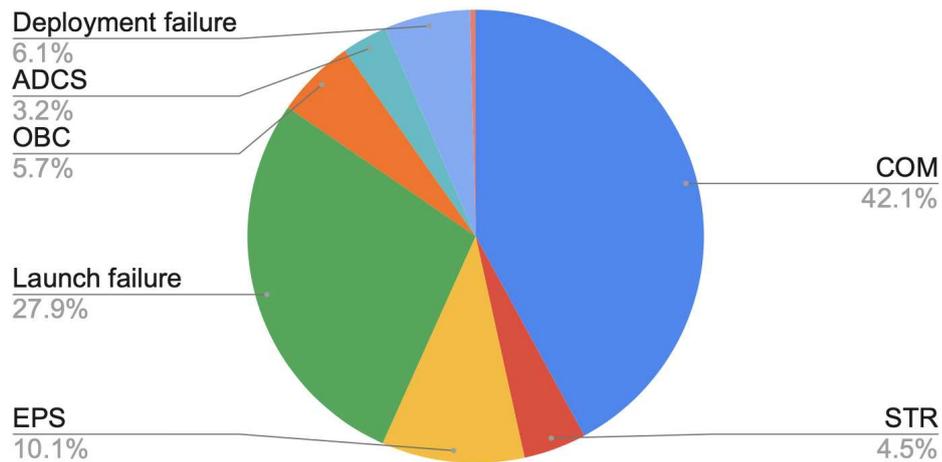
Fonte: Autor (2023).

A confiabilidade dos CubeSats é essencial para o sucesso de suas missões espaciais. No entanto, esses satélites estão sujeitos a diversos tipos de falhas que podem comprometer suas funcionalidades, sendo essas falhas de sistemas eletrônicos, estruturais, de propulsão, comunicação e falhas ambientais, como visto na Figura 24, cujas nomenclaturas são (KISELYOV, 2020):

- COM: Comunicação;
- EPS: Sistema de energia elétrica, incluindo antenas;
- OBC: Sistema de computador de bordo;

- ADCS: Sistema de determinação e controle de atitude;
- STR: Estrutura e deployables;
- Launch Failure: Falhas em lançamento;
- Deployment Failure: Falhas no deployment (liberação);
- Unknown: Falha desconhecida;

Figura 24 – Categorias de falhas.



Fonte: Autor (2023).

A comunicação é a falha que mais impacta nos CubeSats registrados nos bancos de dados pesquisados. Estas falhas podem ocorrer devido a problemas com antenas, transceptores, amplificadores ou interferências eletromagnéticas. Elas ainda podem resultar na perda de dados, interrupção das operações planejadas ou dificuldades na recepção de comandos do centro de controle em terra (KISELYOV, 2020).

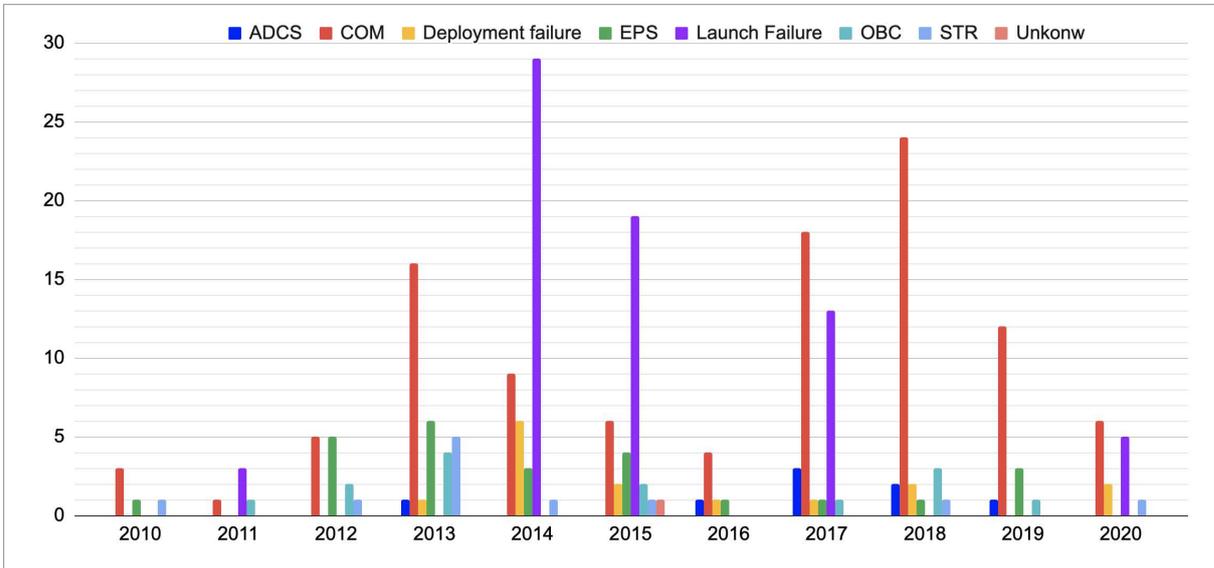
As falhas em componentes eletrônicos, outro principal motivo de falha em CubeSats, incluem circuitos integrados, transistores e sensores, e podem ocorrer devido a variações de temperatura, radiação espacial e estresse mecânico. Essas falhas podem afetar o desempenho dos sistemas de controle, comunicação, energia e processamento de dados (KISELYOV, 2020).

Por outro lado, falhas estruturais podem ocorrer devido a problemas de projeto, deficiências nos materiais utilizados ou sobrecarga durante o lançamento. Essas falhas podem resultar em deformações, quebras ou desalinhamentos estruturais, comprometendo a integridade do CubeSat e seus sistemas embarcados (KISELYOV, 2020).

Tendo isso em vista, fazendo uma análise do número de lançamentos que reportaram falhas ao longo dos anos e por categoria, a imagem presente na Figura 25 evidencia este comportamento. Analisando a imagem, como reportado anteriormente, nota-se a presença da falha de comunicação (COM) presente em todos os anos e,

majoritariamente, sendo o de maior incidência. Os anos onde são ultrapassados por falhas de lançamento se dá ao fato de que um foguete ao explodir no lançamento pode levar junto dezenas ou centenas de nanossatélites.

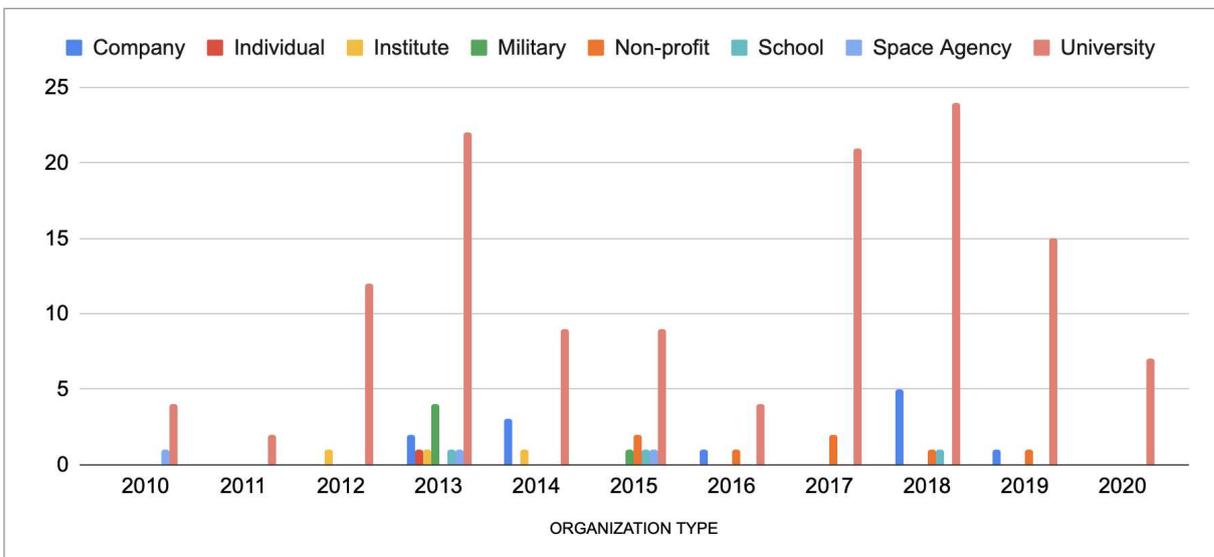
Figura 25 – Comportamento das falhas ao longo dos anos.



Fonte: Autor (2023).

Retirando as falhas de lançamento e de deployment, a Figura 26 evidencia o comportamento de falhas reportados por tipo de organização no decorrer dos anos. Apesar da predominância de produção e lançamento de CubeSats por empresas, como visto na Figura 19, nota-se que o maior número de falhas se concentra no ramo universitário.

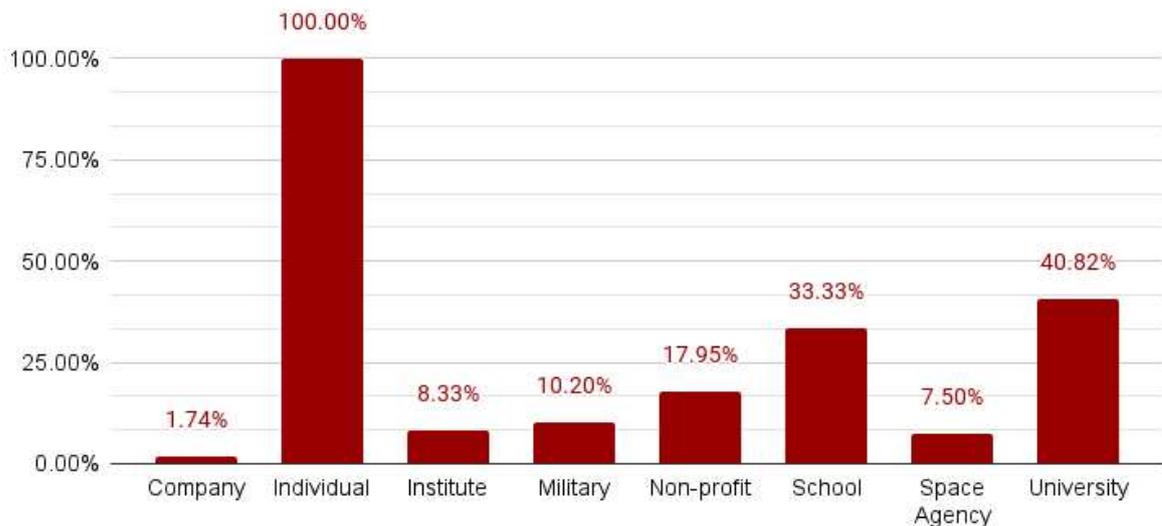
Figura 26 – Comportamento das falhas ao longo dos anos por tipo de organização.



Fonte: Autor (2023).

Observando a Figura 27, é possível perceber que, ao avaliar as falhas ocorridas pelo número total de lançamentos e não considerando o ramo individual por possuir apenas um lançamento que ocorreu falha, o maior percentual se encontra justamente nos ramos universitário e escolar. Este acontecimento pode ser relacionado a falta de apoio a projetos, ou seja, o acesso limitado a suporte e infraestrutura dedicados à missão, assim como a limitação em acessos a recursos financeiros e técnicos.

Figura 27 – Falhas relativas por tipo de organização.



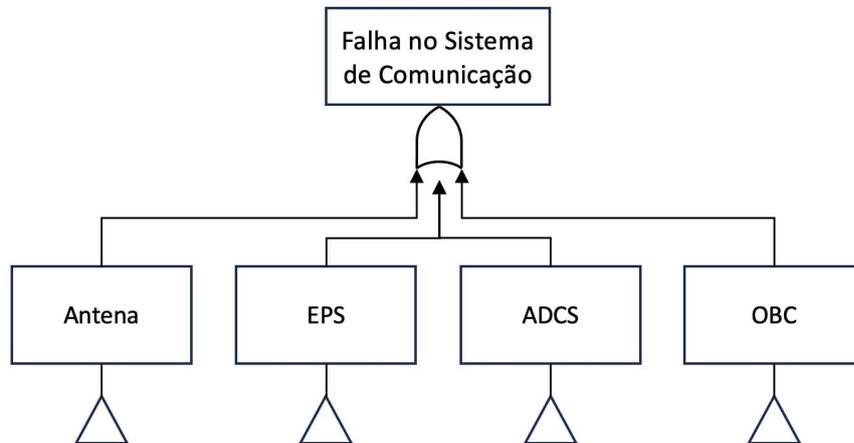
Fonte: Autor (2023).

4.2 ANÁLISE DE ÁRVORE DE FALHAS

Tendo em vista que a categoria relacionada a comunicação é a falha que mais ocorre em CubeSats, como visto na Figura 24, e esta ser a mais crítica na missão do Catarina-A1, a FTA foi construída com base nas classes que podem influenciar na perda parcial ou total de comunicação, como destacado na FTA presente na Figura 28. De modo geral, caso ocorra a falha de ao menos um dos sistemas destacados, seja Antena, EPS, ADCS ou OBC, a comunicação entre o segmento espacial e o segmento

solo é sujeita ao comprometimento do compartilhamento de dados.

Figura 28 – FTA - Comunicação.



Fonte: Autor (2023).

A antena, por ser responsável por transmitir e receber sinais entre o CubeSat e a estação terrestre, pode resultar em taxas de transferência de dados reduzidas, interrupções de sinal ou perda total de comunicação caso aconteça erros no sistema. Por outro lado, o Sistema de Energia Elétrica (EPS) fornece energia para todos os subsistemas do CubeSat, incluindo o sistema de comunicação. Erros no EPS, como regulação de energia defeituosa, por exemplo, pode causar interrupções de energia no sistema de comunicação, resultando em comunicação intermitente ou até mesmo perda total de energia do sistema de comunicação.

Avaliando o Sistema de Determinação e Controle de Atitude (ADCS), que é responsável pela orientação e estabilidade do CubeSat, caso falhas sejam reportadas como o posicionamento desalinhado ou instável da antena pode levar à má recepção ou transmissão do sinal, reduzindo a eficácia da comunicação. Por último, o Computador de Bordo (OBC), por gerenciar a operação geral e a coordenação do CubeSat, erros no sistema podem levar à corrupção de dados, atrasos no processamento de sinais ou até mesmo falhas no sistema.

Tendo isso em mente, ressalta-se que esses subsistemas estão interconectados e erros em um sistema podem gerar efeitos em cascata em outros. Por exemplo, uma interrupção de energia causada por um erro do sistema EPS pode levar ao mau funcionamento do sistema OBC, afetando os protocolos de comunicação. Da mesma forma, uma antena desalinhada devido a erros do sistema ADCS pode afetar diretamente a recepção e a transmissão do sinal.

4.2.1 Análise da Antena

Primeiramente, ao estudar a comunicação de satélites, o subsistema da Antena se destaca por tratar de enviar e receber dados e comandos. Realizando a FTA com

uma visão em nível do projeto os fatores mais impactantes que podem impossibilitar o compartilhamento de informações se encontram evidenciados na Figura 29. Para um melhor entendimento da imagem, nota-se a divisão da FTA em 2 seções, de forma que os efeitos topos de cada uma que impossibilita o compartilhamento de dados são:

- Seção 1 - Precisão de apontamento da antena;
- Seção 2 - O não deployment da antena (não liberação).

Analisando a seção 1, a antena pode se encontrar fora da angulação de operação devido ao erro no algoritmo de terminação de codificação, que se relaciona a uma falha ao sistema responsável pela determinação de atitude e controle no CubeSat (ADCS). Outro fator impactante seria uma insuficiência no fornecimento de energia ao magnetômetro, relacionada ao sistema EPS, o que causaria um mal funcionamento do equipamento e, conseqüentemente, o mal posicionamento da plataforma na órbita. Por outro lado, olhando o segmento solo, a própria estação pode estar erroneamente voltada ao céu, causando a falha na transmissão de dados.

Na seção 2, na falha no deployment da antena, o cubesat pode ficar preso internamente no P-POD (Poly Picosatellite Orbital Deployer - Implantador Orbital Poly Picosatellite), a estruturas de armazenamento do CubeSat e ejeção do mesmo em órbita, causado por uma falha de comando emitida pelo computador de bordo (OBC), liberando a antena prematuramente e travando o nanossatélite no interior da estrutura. Outro motivo seria a insuficiência energética, diretamente relacionado ao sistema EPS, impossibilitando a liberação da antena. Ademais, o ocorrência de falhas mecânicas podem impactar diretamente os interruptores (switches) ou pinos de fixação da antena, incapacitando o devido funcionamento do subsistema.

4.2.2 Análise EPS

Ao avaliar o sistema de fornecimento de energia, a Figura 30 apresenta o FTA do sistema EPS e evidencia várias vertentes que podem influenciar negativamente na capacidade de comunicação do Catarina-A1. Analisando individualmente por seção, as falhas que diretamente inviabilizam a transmissão de dados são:

- Seção 1 - Baixa corrente elétrica e Conversores de tensão sem fornecimento;
- Seção 2 - Problemas de carregamento;
- Seção 3 - Problemas de fiação;
- Seção 4 - Falha nos interruptores e Problemas de armazenamento de energia.

Na seção 1, a insuficiência elétrica, pode ocorrer devido a problemas de conexão entre os painéis solares e fontes, causando um decréscimo no que seria necessário para suprir todo o CubeSat. Além disso, problemas de conectividade entre baterias e as fontes se não monitorados os circuitos internos corretamente, que deveria ser guiada pelo computador de bordo, pode prescrever medições errôneas dos dados.

Ademais, ainda observando a primeira seção, a deficiência na geração de potência elétrica pelos painéis solares pode causar tanto uma baixa corrente elétrica no sistema quanto o mal funcionamento dos conversores de tensão. Esta falha da geração de potência, por sua vez, pode ser alavancada devido a ocorrência de danos estruturais causados por detritos espaciais, pela montagem errada do sistema ou até mesmo pelo surgimento de uma corrente reversa caso ocorra falha no diodo do sistema.

Por outro lado, ao analisar a seção 2, as baterias podem não carregar completamente em casos em que somente ocorre a recarga em períodos luminosos da órbita ou caso estejam fora da janela de operação conforme as fichas técnicas. Além disso, as baterias podem fornecer valores de energia abaixo dos reportados, que por sua vez pode ser causado devido ao mal processamento dos chips de carregamentos, por uma falha no by-pass dos painéis solares ou por erros nos circuitos do sistema, seja o circuito de segurança ou no monitoramento de dados pelo computador de bordo.

Além destes, pela seção 3, nota-se que o derretimento dos fios que conectam os subsistemas pode estar diretamente vinculado ao mal funcionamento do circuito de proteção ou uma sobrecarga de corrente elétrica do sistema que, portanto, impossibilitam as transmissões de dados internos no CubeSat. Por fim, na seção 4, é possível destacar que o sistema de fornecimento elétrico pode descumprir os requisitos uma vez que venha ocorrer uma falha direta nos interruptores ou caso seja noticiado um problema no armazenamento de energia no sistema como um todo.

4.2.3 Análise ADCS

A terceira vertente que diretamente está vinculada a descaracterização da missão do Catarina-A1 é o Sistema de Determinação e Controle de Atitude. Como visto pela Figura 31, pode ser influenciado por diversos fatores e, também, apresenta influência dos demais sistemas. Avaliando diretamente e subdividindo em seções como feito nas FTAs anteriores, as falhas topo para cada uma são:

- Seção 1 - Imprecisão no apontamento da antena;
- Seção 2 - Mal funcionamento do transmissor;
- Seção 3 - Falha na propulsão;
- Seção 4 - Giroscópio.

Analisando a primeira seção, como já destacado na Figura 29, a direcionabilidade da antena fica comprometida pela falha no algoritmo de determinação e decodificação, e por problemas de funcionamento do magnetômetro que, por sua vez, pode vir a falhar devido a flutuações do campo magnético e falha no fornecimento de energia, ou seja, o sistema EPS do CubeSat.

O mal funcionamento do transmissor, seção 2, diretamente pode atrapalhar o sistema ADCS, seja pelo comprometimento total ou parcial das funções de

transmissão de dados. Esta falha pode estar vinculada diretamente ao sistema de computador de bordo, caso esteja comprometida a transmissão interna de comandos. Ademais, a incompatibilidade entre frequências de operações dos sistemas pode causar interferência com os sensores, podendo ser causada, como visto, por uma reconfiguração do sistema devido a radiação do ambiente externo onde o CubeSat está inserido.

Por outro lado, averiguando a seção 3, problemas causados na propulsão satelital podem inviabilizar a orientação necessária a se manter a transmissão de dados efetiva que, por sua vez, pode estar vinculada a falhas na transmissão de dados por parte do OBC. Por fim, operabilidade do giroscópio, seção 4, pode ser comprometida em casos que ocorrem altas velocidades angulares do equipamento, que podem ser causadas por uma falha na montagem ou devio ao excesso de vibrações no sistema.

4.2.4 Análise OBC

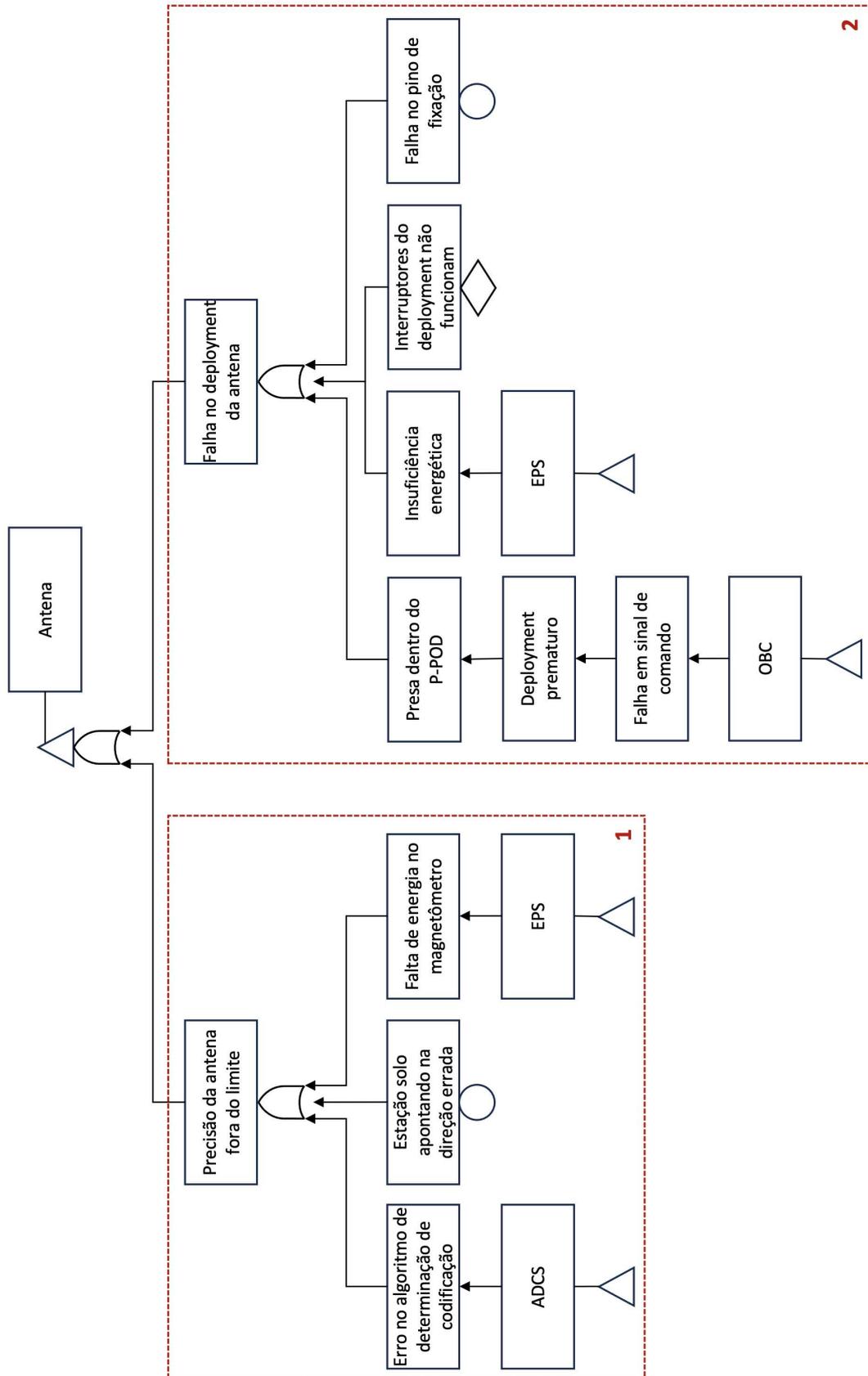
Por fim, o último sistema fortemente capaz de prejudicar o sistema de comunicação e transferência de dados entre os segmentos espacial e solo é o de computador de bordo. Assim como evidenciado na Figura 32, as falhas topos de cada seção que afetam fortemente a viabilidade da missão se tratam de:

- Seção 1 - Insuficiência de dados;
- Seção 2 - Perda de dados de temperatura;
- Seção 3 - Falha no temporizador.

De modo geral, por ser o computador de bordo, todos estão vinculados de alguma forma a falhas eletrônicas. A falta de dados no sistema, seção 1, pode ocorrer devido a falhas em componentes eletrônicos causadas por cargas eletrostáticas ou pelo impactos que a radiação causa no sistema, diminuindo a capacidade de armazenamento de informações. Por outro lado, esta falha por ser causada por uma falha de comunicação de demais sistemas, envolvendo sensores, conversores de tensão, sistemas de decodificação, dentre outros.

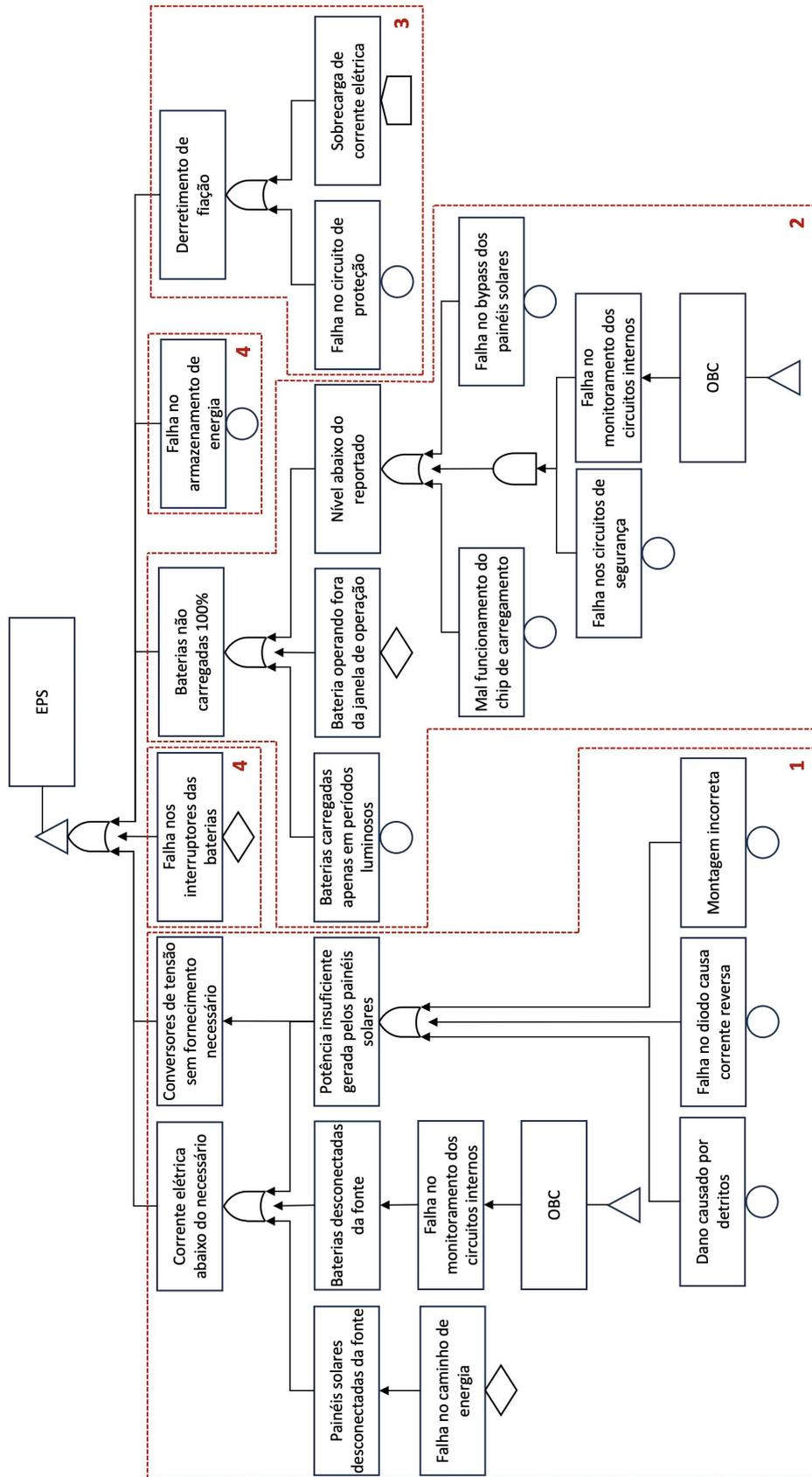
Além do mais, assim como a radiação causa bastante impacto nos sistemas devido ao ambiente espacial ser rigoroso e desafiador, as grandes variações de temperatura sentidas pelo CubeSat podem influenciar tanto quanto, seja causado por uma falha na leitura dos sensores termais ou pelo suprimento energético deficiente. Por fim, a operabilidade do temporizador pode ser diretamente afetada devido a um falha no software empregado que, por sua vez, atuando erroneamente, pode transmitir os dados inconsistentemente.

Figura 29 – FTA - Antena.



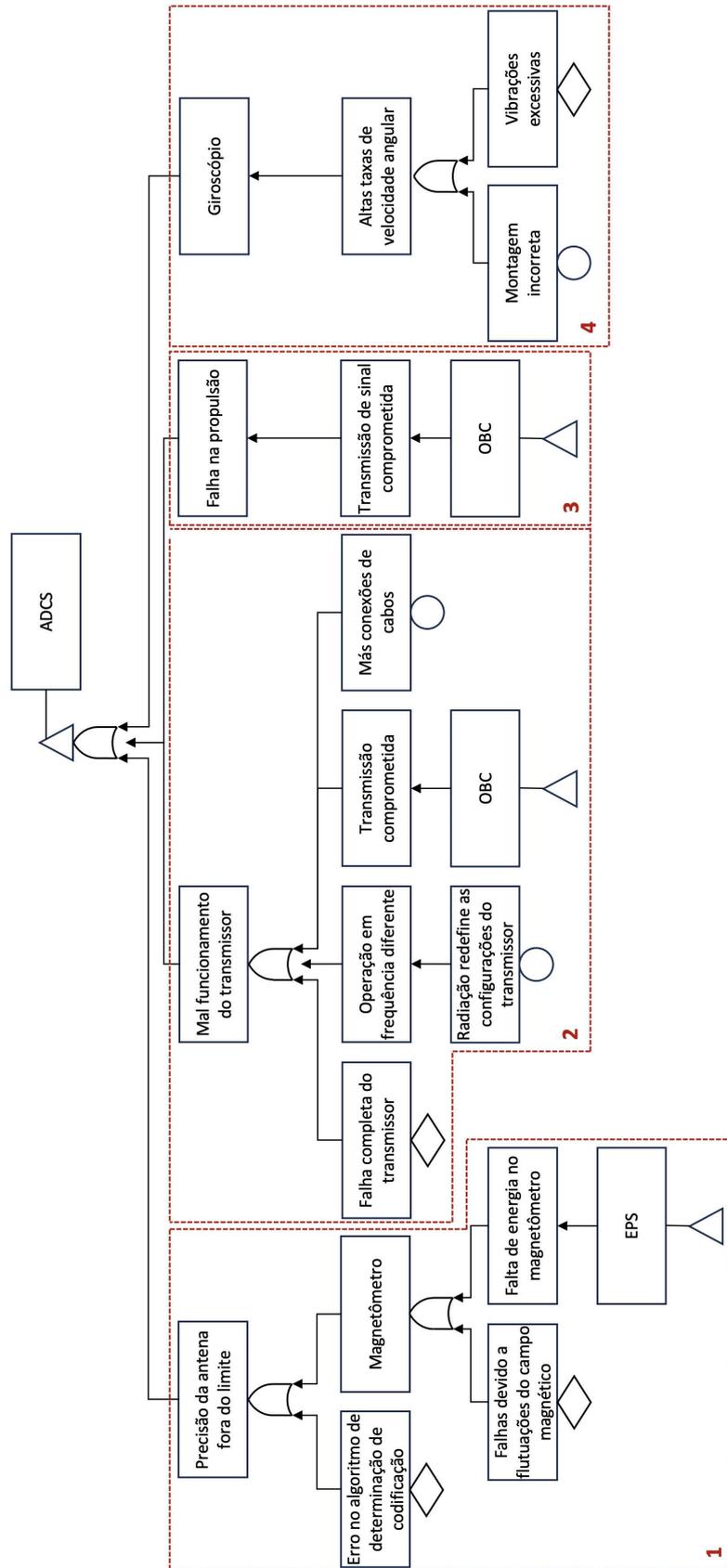
Fonte: Autor (2023).

Figura 30 – FTA - Sistema de Energia Elétrica.



Fonte: Autor (2023).

Figura 31 – FTA - Sistema de Determinação e Controle de Atitude.



Fonte: Autor (2023).

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As normatizações desempenham um papel crucial para garantir o sucesso, a interoperabilidade e a sustentabilidade das missões de CubeSats. Além de garantirem a compatibilidade entre diferentes CubeSats, permitindo que eles sejam lançados em conjunto e operem de forma eficiente em órbita, a aplicabilidade de normas definem requisitos técnicos e de qualidade que devem ser atendidos durante todo o processo de desenvolvimento e fabricação. Ao seguir essas normas, os fabricantes podem garantir que os CubeSats sejam projetados e construídos com os mais altos padrões, minimizando assim os riscos de falhas ou acidentes em órbita.

Ao aderir aos padrões estabelecidos, as missões CubeSat podem maximizar suas chances de sucesso, contribuindo para a viabilidade de longo prazo das atividades espaciais. A padronização é um fator importante no avanço da tecnologia CubeSat e permite a realização de projetos espaciais inovadores. Realizando a aplicação e acompanhamento das normas, a quantidade de falhas (Figura 25) tende a diminuir e, conseqüentemente, projetos universitários, os mais impactados conforme visto nas Figuras 26 e 27, tornam-se mais confiáveis no cumprimento de requisitos técnicos com a implementação de processos robustos de garantia de qualidade.

Ao olhar a natureza das falhas destacadas pelas análises de árvores de falhas nas Figuras 29, 30, 31 e 32, nota-se a compatibilidade de pontos destacados na tabela de riscos elencados do Catarina-A1 presente na Figura 15, como o caso de ocorrer falha no segmento solo, inoperabilidade de software e hardware, a falha do interruptor e, conseqüentemente, não ligando o satélite, e a própria falha no comissionamento que pode ocorrer por falhas destacadas nas FTAs, por problemas de fornecimento de energia, de controle e determinação de atitude e, também, do computador de bordo. Desta forma é possível ver que parte dos fatores identificados aqui nas FTAs já foram apresentados como riscos ao projeto do Catarina-A1, enquanto outros não foram ainda identificados como riscos. Ainda, a análise apresentada de FTA possibilita uma complementação à análise de riscos ao possibilitar um monitoramento da ligação entre riscos e prováveis fatores de causas.

Tendo isso em vista, assim como a importância de seguir uma padronização, conforme destacado no início do trabalho e pela já aplicação da ECSS na Constelação Catarina, as normas ECSS representam um conjunto de padrões que abordam especificamente a garantia de qualidade, confiabilidade e gerenciamento de riscos na indústria espacial. Com base nas análises feitas preliminarmente neste estudo, uma gestão da qualidade e análise de sistemas pode ser levada mais a fundo nos itens elencados nas FTAs para obtenção de um projeto mais confiável e seguro tendo como base as normas:

- ECSS-Q-ST-20C: estabelecimento de um sistema abrangente de garantia de

qualidade para projetos espaciais. Abrange processos para gerenciamento de requisitos, gerenciamento de configuração, verificação e validação e documentação (ECSS., 2018).

- ECSS-Q-ST-30C: fornece diretrizes para avaliar e demonstrar a confiabilidade dos sistemas espaciais. Abrange processos de engenharia de confiabilidade, incluindo previsão, análise e demonstração de confiabilidade (ECSS., 2017a).
- ECSS-M-ST-40C: fornece orientação sobre processos de gerenciamento de projetos, incluindo gerenciamento de riscos. Abrange a identificação de riscos, análise, avaliação e estratégias de mitigação (ECSS., 2009a).
- ECSS-Q-ST-30-02C: fornece uma abordagem sistemática para identificar, analisar, avaliar e mitigar os riscos ao longo do ciclo de vida do projeto. Também aborda aspectos como comunicação de riscos e monitoramento de riscos (ECSS., 2009b).
- ECSS-Q-ST-80C: fornece orientação sobre processos de garantia de produtos de software, incluindo requisitos de software, design, desenvolvimento e verificação (ECSS., 2017b).

Portando, tendo como base alguns dos padrões ECSS, o projeto pode ser levado com olhar mais técnico de forma a contribuir para a garantia de qualidade, confiabilidade e gerenciamento de riscos na indústria espacial. Cada padrão fornece orientação detalhada sobre aspectos específicos, permitindo uma implementação seguindo as melhores práticas que venham garantir o sucesso e a segurança do projeto. Destaca-se aqui que os riscos do Catarina-A1 apresentados neste trabalho na Figura 15 já foram levantados com base na ECSS-M-ST-40C e na ECSS-Q-ST-30-02C, citadas acima.

5 CONCLUSÕES

Com a finalização desta pesquisa, os resultados obtidos forneceram pontos significativos para a contribuição de um melhor entendimento desse campo em constante evolução.

Historicamente falando, previamente, CubeSats eram predominantemente utilizados por instituições acadêmicas e de pesquisa, mas, com o tempo, a indústria comercial e governos também passaram a aproveitar as vantagens oferecidas por esses pequenos dispositivos. Essa tendência de aumento no número de lançamentos de CubeSats evidencia sua importância e relevância no cenário espacial atual.

No que diz respeito à análise quantitativa, observa-se uma ampla participação de países ao redor do mundo no lançamento de CubeSats. Países como Estados Unidos, Rússia, Japão e alguns membros da União Europeia foram identificados como os principais atores nesse campo. Essa diversidade de nações envolvidas demonstra o caráter global e colaborativo da indústria espacial relacionada aos CubeSats.

Em relação à análise qualitativa das falhas, identificou-se que a maioria das ocorrências estava relacionada a problemas de comunicação, falhas no sistema de energia e perda de controle. Esses dados ressaltam a importância de aprimorar as tecnologias de comunicação e garantir uma maior confiabilidade nos sistemas de energia desses nanossatélites. Além disso, a análise qualitativa também destacou a necessidade de um maior investimento em testes e validações durante o processo de desenvolvimento e uso de sistemas de redundância desses dispositivos, a fim de minimizar falhas e aumentar a taxa de sucesso dos lançamentos.

O estudo das falhas sobre o Catarina-A1 fornece subsídios valiosos para o aprimoramento das tecnologias utilizadas no projeto, visando a redução de problemas futuros e o aumento da eficiência operacional. Com isso, esta análise preliminar permite que esses resultados possam servir de base para futuros estudos e aprimoramento da gestão da qualidade sobre o projeto da Costelação Catarina, principalmente em abrir a oportunidade de uma aplicação a fundo nas normas ECSS para garantir maior confiabilidade ao longo de todo projeto.

Devido aos estudos preliminares aqui apresentados, o trabalho abre margem para realização de estudos guiados no objetivo de se avaliar a severidade das falhas destacadas, a realização de um diagrama de impacto e a aplicação da rastreabilidade de falhas no projeto. Pois, ao se aplicar a rastreabilidade de falhas ao longo do projeto, caso alterações sejam realizadas em qualquer etapa, se torna possível identificar as origens de falhas e aplicar um estudo e projeto de mitigação das mesmas.

Além disso, é importante relatar que, somente a análise histórica possibilita

um bom direcionamento a qual ou quais métodos de falha deve ser voltado a atenção da equipe. Tal afirmação pode ser feita pois ao avaliar as categorias de falhas mais comumente reportadas e tendo a definição da missão a ser realizada, o cruzamento entre essas informações já possibilita um passo inicial para uma gestão da qualidade e análise de redução de riscos.

Para mitigar esses riscos, é essencial realizar testes rigorosos, seguir boas práticas de engenharia e garantir um planejamento adequado para as operações em órbita. Para garantir uma maior confiabilidade do CubeSat ao longo do tempo de vida da missão: redundância total do subsistema ou teste aprimorado serve de escolhas para abordarem a resolução de riscos. De maneira geral, os testes mais rigorosos apresentam o benefício adicional de aumentar o volume potencial de carga útil e tem um custo de plataforma mais baixo em comparação com um satélite com subsistemas redundantes, ainda mais lembrando que CubeSats são estruturas compactas e que não demandam de excessos de espaços para redundâncias. (BOUWMEESTER et al., 2022).

Portanto, como objetivo proposto, as análises histórias dos lançamentos de CubeSats foram evidenciadas e analisadas, assim como evidenciado o impacto das falhas no geral e por modelos de CubeSats, assim como evidenciando as categorias que mais afetam os mesmos. Com isso, pode-se notar que a falha com maior indício de acontecer é, também, a mais crítica de interferir no Catarina-A1 e, com isso, concretizou-se a construção da análise de árvore de falhas preliminar voltada a falha de comunicação do satélite, possibilitando a abertura a futuros trabalhos mais profundos para a área.

REFERÊNCIAS

- ALBALOOSHI, A.; JALLAD, A.-H. M.; MARPU, P. R. Fault analysis and mitigation techniques of the i2c bus for nanosatellite missions. **IEEE Access**, IEEE, v. 11, p. 34709–34717, 2023.
- AMMONS, K. J. **Concept of Operations and Failure Analysis for a Complex Deployable CubeSat Antenna Payload**. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2022.
- BIDNER, F. Fault tree analysis of the hermes cubesat. **University of Colorado at Boulder, USA**, 2010.
- BOARD, S. S.; SCIENCES, E. National Academies of; MEDICINE et al. **Achieving science with CubeSats: Thinking inside the box**. [S.l.]: National Academies Press, 2016.
- BOROWICZ, R. C. **Failure Mode, Effects and Criticality Analysis of a Very Low Earth Orbit CubeSat Mission**. Tese (Doutorado) — Old Dominion University, 2022.
- BOUWMEESTER, J.; LANGER, M. **Results of CubeSat Survey on Electrical Interfaces amp; Reliability**. [S.l.]: TU Delft, 2016.
- BOUWMEESTER, J.; MENICUCCI, A.; GILL, E. K. Improving cubesat reliability: Subsystem redundancy or improved testing? **Reliability Engineering & System Safety**, Elsevier, v. 220, p. 108288, 2022.
- CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY. **CUBESAT DESIGN SPECIFICATION**. San Luis Obispo, 2009. Disponível em: https://srl.utu.fi/AuxDOC/tke/radmon/cubesat_standard.pdf. Acesso em: 15 jun. 2022.
- CAPPELLETTI, C.; ROBSON, D. Cubesat missions and applications. Elsevier, p. 53–65, 2021.
- COELHO, P. F. R. **Istnanosat-1 quality assurance, risk management and assembly, integration and verification planning**. Tese de Mestrado — Técnico Lisboa, 2016. Lisboa, p. 109.
- CORONEL, G.; LOUREIRO, G.; BOGOSSIAN, O. Possible benefits of a cots-based process on a satellite remote sensing mission based on software industry results. *In: Workshop em Engenharia e Tecnologias Espaciais Proceedings*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, v. 1, 2015.
- DAVOLI, F.; KOUROGIORGAS, C.; MARCHESE, M.; PANAGOPOULOS, A.; PATRONE, F. Small satellites and cubesats: Survey of structures, architectures, and protocols. **International Journal of Satellite Communications and Networking**, Wiley Online Library, v. 37, n. 4, p. 343–359, 2019.
- DECKER, Z. S. **A systems-engineering assessment of multiple CubeSat build approaches**. Tese de Doutorado — Massachusetts Institute of Technology, 2016. Cambridge, p. 101.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **PORTARIA Nº 590, DE 6 DE MAIO DE 2021**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-590-de-6-de-maio-de-2021-318713594>. Acesso em: 11 jun. 2022.

DUNWOODY, R.; REILLY, J.; MURPHY, D.; DOYLE, M.; THOMPSON, J.; FINNERAN, G.; SALMON, L.; O'TOOLE, C.; REDDY AKARAPU, S. K.; ERKAL, J.; OTHERSS. Thermal vacuum test campaign of the eirsat-1 engineering qualification model. **Aerospace**, MDPI, v. 9, n. 2, p. 99, 2022.

ECSS. **ECSS – A Single Set of European Space Standards**. Noordwijk, The Netherlands, 1996. Disponível em: <https://ecss.nl/home/ecss-a-single-set-of-european-space-standards/>. Acesso em: 12 oct. 2022.

ECSS., E. E. S. A. for the members of. **ECSS-E-00A Rev. 1 Space Engineering: Policy and Principles. European Cooperation for Space Standardization**. [S.l.]: ESA Requirements and Standards Division Noordwijk, 1996.

ECSS., E. E. S. A. for the members of. **ECSS-M-ST-40C Rev. 1 Space project management: Configuration and information management. European Cooperation for Space Standardization**. [S.l.]: ESA Requirements and Standards Division Noordwijk, 2009.

ECSS., E. E. S. A. for the members of. **ECSS-Q-ST-30-02C Space product assurance: Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA). European Cooperation for Space Standardization**. [S.l.]: ESA Requirements and Standards Division Noordwijk, 2009.

ECSS., E. E. S. A. for the members of. **ECSS-Q-ST-30C Rev.1 Space product assurance: Dependability. European Cooperation for Space Standardization**. [S.l.]: ESA Requirements and Standards Division Noordwijk, 2017.

ECSS., E. E. S. A. for the members of. **ECSS-Q-ST-80C Rev.1 Space product assurance: Software product assurance. European Cooperation for Space Standardization**. [S.l.]: ESA Requirements and Standards Division Noordwijk, 2017.

ECSS., E. E. S. A. for the members of. **ECSS-Q-ST-20C Rev. 2 Space product assurance: Quality assurance. European Cooperation for Space Standardization**. [S.l.]: ESA Requirements and Standards Division Noordwijk, 2018.

ELSTAK, J.; AMINI, R.; HAMANN, R. 3.4. 3 a comparative analysis of project management and systems engineering techniques in CubeSat projects. *In*: INCOSE International Symposium **Proceedings**. Wiley Online Library, Singapura, v. 19, n. 1, p. 545–559, 2009.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Cubesats: Tiny Payloads, Huge Benefits for Space Research**. France, 2022. Disponível em: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/CubeSats. Acesso em: 10 jun. 2022.

FIESC. **Satélites catarinenses começam a ser desenvolvidos nos próximos meses**. Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://ocp.news/colunista/pedro-colunista/constelacao-catarina-entra-em-desenvolvimento>. Acesso em: 11 jun. 2022.

- KAPURCH, S. J. **NASA systems engineering handbook**. [S.l.]: Diane Publishing, 2010.
- KISELYOV, I. Model-based reliability engineering: A methodology to enhance reliability analysis in student-based cubesat design projects. 2020.
- KRIEDTE, W. **ECSS: an initiative to develop a single set of European space standards**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 386. 321 p.
- KRITZINGER, D. **Aircraft system safety: Assessments for initial airworthiness certification**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2016.
- KULU, E. **Database | nanosats.eu** |. Airtable, 2014. Disponível em: <https://airtable.com/shrafcwXODMMKeRgU/tbldJoOBP5wINOJQY>.
- KULU, E. Nanosatellite launch forecasts-track record and latest prediction. **36th Annual Small Satellite Conference**, 2022.
- LAHRICHI, A. Heat transfer modeling and simulation of masat-1. **Al Akhawayn University School of Science and Engineering, Ifran, Morocco**, v. 44, 2017.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **CubeSats Overview**. Washington, 2018. Disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/cubesats/overview. Acesso em: 10 jun. 2022.
- NERVOLD, A. K.; BERK, J.; STRAUB, J.; WHALEN, D. A pathway to small satellite market growth. **Advances in Aerospace Science and Technology**, v. 1, n. 01, p. 14–20, 2016.
- OBERHOLZER, J. F.; UHEIDA, E.; OOSTHUIZEN, G. Resource efficient process chain development of a modular cubesat spaceframe. **Procedia Manufacturing**, Elsevier, v. 35, p. 917–928, 2019.
- OCP NEWS. **Constelação Catarina entra em desenvolvimento**. Jaraguá do Sul, 2021. Disponível em: <https://ocp.news/colunista/pedro-colunista/constelacao-catarina-entra-em-desenvolvimento>. Acesso em: 11 jun. 2022.
- PANGA, W.; BO, B.; MENG, X.; YU, X.; GUO, J.; ZHOU, J. Boom of the cubesat: A statistic survey of cubesats launch in 2003–2015. p. 26–30, 2016.
- PRAUSE, C. R.; BIBUS, M.; DIETRICH, C.; JOBI, W. Software product assurance at the German space agency. **Journal of Software: Evolution and Process**, Wiley Online Library, v. 28, n. 9, p. 744–761, 2016.
- RAKALINA, T. et al. Model based systems engineering for cubesat mission reliability. **Aerospace**, NASA, 2021.
- SILVA, A.; LOUREIRO, G. Quality assurance of complex systems-satellite AIT. *In*: 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management **Proceedings**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Nova Iorque, v. 1, n. 1, p. 935–939, 2009.

- SOUZA, J. P. E.; ALVES, J. M.; SILVA, M. B. Qualidade no setor aeroespacial: uma investigação sobre suas principais características. **XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte**, 2011.
- STAMATELATOS, M.; VESELY, W.; DUGAN, J.; FRAGOLA, J.; MINARICK, J.; RAILSBACK, J. Fault tree handbook with aerospace applications. nasa Washington, DC, 2002.
- STESINA, F.; CORPINO, S. Investigation of a cubesat in orbit anomaly through verification on ground. **Aerospace**, MDPI, v. 7, n. 4, p. 38, 2020.
- SWARTWOUT, M. The first one hundred CubeSats: A statistical look. **Journal of small Satellites**, v. 2, n. 2, p. 213–233, 2013.
- SWARTWOUT, M. **CubeSat Census**. M. Swartwout, 2021. Disponível em: <https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/cubesat-database/census?authuser=0>.
- TOORIAN, A.; DIAZ, K.; LEE, S. The CubeSat approach to space access. *In*: 2008 IEEE Aerospace Conference **Proceedings**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Nova Iorque, v. 4, n. 1, p. 1–14, 2008.
- UFSC. Catarina-A1: Technical Requirements Specification. 2023.
- UFSC. Fleet A: Mission Analysis. 2023.
- UFSC. Fleet A: Mission Definition Document. 2023.
- UFSC. Fleet A: Risk Management Plan. 2023.
- VILLELA, T.; COSTA, C. A.; BRANDÃO, A. M.; BUENO, F. T.; LEONARDI, R. et al. Towards the thousandth cubesat: A statistical overview. **International Journal of Aerospace Engineering**, Hindawi, v. 2019, 2019.