

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

THIAGO CELESTINO CARREIRO

FERRAMENTAS DE ENGENHARIA DE REQUISITOS PARA PROJETOS DE
CUBESAT: UM ESTUDO DE CASO

Joinville
2025

THIAGO CELESTINO CARREIRO

FERRAMENTAS DE ENGENHARIA DE REQUISITOS PARA PROJETOS DE
CUBESAT: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, no Curso de Engenharia Aeroespacial, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Talita Sauter Possamai

Coorientadora: Me. Damylle Cristina Xavier Donati

Joinville

2025

THIAGO CELESTINO CARREIRO

FERRAMENTAS DE ENGENHARIA DE REQUISITOS PARA PROJETOS DE
CUBESAT: UM ESTUDO DE CASO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, no Curso de Engenharia Aeroespacial, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 28 de novembro de 2025.

Banca Examinadora:

Dra. Talita Sauter Possamai
Orientadora/Presidente

Dr. Antônio Otaviano Dourado
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Cristiano Vasconcellos Ferreira
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, a Deus, por me guiar em cada passo deste caminho e permitir que eu superasse os obstáculos ao longo da graduação.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Talita Possamai, pela oportunidade de iniciação científica e pela orientação ao longo deste trabalho. Seus conhecimentos, contribuições e apoio foram fundamentais para o meu aprendizado e para o desenvolvimento desta pesquisa. Expresso também minha gratidão à minha coorientadora, Me. Damylle Xavier, pelas ideias, sugestões e pelo suporte ao longo de todo o processo, sem os quais este trabalho não existiria.

Agradeço à equipe do LARS, especialmente à Ludmilla e ao Henrique, pela colaboração e apoio durante o desenvolvimento do projeto. Estendo meus agradecimentos ao Prof. Dr. André Ogliari, ao Rodrigo Rodrigues e a Paola Pienta, pois suas orientações e feedbacks ampliaram minha compreensão do tema e contribuíram significativamente para este estudo.

Expresso minha profunda gratidão à minha mãe, Vera, e ao meu pai, Eder, por todo o carinho, apoio e suporte ao longo da graduação. Nada disso seria possível sem vocês. Agradeço também à minha irmã, Lorraine, pela amizade, pela parceria e por estar sempre torcendo por mim, mesmo com a distância.

Agradeço aos amigos que esta jornada acadêmica me proporcionou, em especial aos membros da Sem Saída e da Bateria Nota Cem, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo apoio e motivação ao longo da graduação. Estendo também meus agradecimentos aos membros da Kosmos e do Eficem pelas convivências compartilhadas e pela confiança depositada em mim e nos projetos que desenvolvemos juntos.

Aos professores do curso, agradeço pelos conselhos, pela ajuda, pelos conhecimentos transmitidos e pela paciência com que guiaram o meu aprendizado.

Agradeço aos meus amigos de fora da UFSC, Débora, Arthur Rigueira, Arthur Almeida, Joubert, Gabriel, Gerson e Lucas, pelas palavras de encorajamento, pela amizade incondicional e por estarem sempre disponíveis quando precisei.

Por fim, agradeço a Mônica Nunes por todo o amor, apoio e compreensão demonstrados ao longo dessa jornada. Sua parceria e incentivo foram essenciais para que eu mantivesse o foco e concluísse tanto a graduação quanto este trabalho.

RESUMO

Os incêndios florestais constituem uma das principais ameaças à integridade da Floresta Amazônica, gerando perdas ambientais, econômicas e sociais significativas. Nesse contexto, o FritzSat Tatá foi proposto como um nanossatélite destinado ao monitoramento da região amazônica, com foco na detecção inicial de focos de calor e na avaliação dos danos causados pelos incêndios, incluindo o acompanhamento da vegetação afetada e dos gases emitidos. Diante disso, apresenta-se neste trabalho o processo de definição dos requisitos do CubeSat proposto, desenvolvido a partir da aplicação de princípios da Engenharia de Sistemas espaciais e de ferramentas utilizadas na disciplina de Projeto de Produto, com o intuito de avaliar e complementar esse processo. A metodologia baseou-se na identificação e análise das necessidades dos stakeholders, convertidas em metas e objetivos de missão e posteriormente desdobradas em requisitos, tendo como insumos a análise das interfaces internas e externas do CubeSat e a elaboração do conceito de operações (ConOps). Além disso, aplicou-se a Casa da Qualidade (QFD) e uma tabela de tradução para avaliar sua aplicabilidade como ferramentas de apoio ao processo tradicional de definição de requisitos. Como resultado, obteve-se um conjunto estruturado de requisitos de missão, sistema e técnicos para a carga útil, garantindo rastreabilidade entre as necessidades iniciais e as especificações dos componentes. Dessa forma, o estudo reforça a importância de uma abordagem integrada na concepção de missões espaciais de pequeno porte, contribuindo para o desenvolvimento de uma metodologia aplicada à definição de requisitos em nanossatélites e para o fortalecimento da capacidade nacional de desenvolvimento de tecnologias voltadas ao monitoramento ambiental.

Palavras-chave: cubesats; requisitos; engenharia de sistemas; qfd

ABSTRACT

Wildfires represent one of the main threats to the integrity of the Amazon Rainforest, causing significant environmental, economic, and social losses. In this context, the FritzSat Tatá was proposed as a nanosatellite designed to monitor the Amazon region, focusing on the early detection of heat sources and the assessment of wildfire impacts, including the monitoring of affected vegetation and emitted gases. Accordingly, this work presents the process of defining the requirements for the proposed CubeSat, developed through the application of Systems Engineering principles for space missions and tools commonly used in Product Design, with the aim of evaluating and complementing this process. The methodology was based on the identification and analysis of stakeholder needs, which were converted into mission goals and objectives and subsequently decomposed into requirements, using as inputs the analysis of the CubeSat's internal and external interfaces and the development of the Concept of Operations (ConOps). In addition, the House of Quality (QFD) and a translation table were applied to assess their applicability as support tools for the traditional requirements definition process. As a result, a structured set of mission, system, and payload technical requirements was obtained, ensuring traceability between initial needs and component specifications. Thus, the study highlights the importance of an integrated approach in the design of small satellite missions, contributing to the development of a methodology for requirements definition in nanosatellites and to strengthening national capabilities in environmental monitoring technologies.

Keywords: cubesats; requirements; systems engineering; qfd.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de possíveis configurações de CubeSats.....	18
Figura 2 – Organização das normas da ECSS.....	25
Figura 3 – Principais atividades e revisões presentes no ciclo de vida da ECSS	27
Figura 4 – Modelo V proposto pela ECSS.....	29
Figura 5 – Modelo de tradução de requisitos estabelecido pela NASA.....	34
Figura 6 – Infográfico de diminuição da cobertura vegetal da Amazônia	43
Figura 7 – Ciclo hidrológico em ecossistemas florestais	46
Figura 8 – Comparação das mudanças de design entre montadoras japonesas e americanas.....	49
Figura 9 – Matrizes sequenciais do QFD	50
Figura 10 – Estrutura da matriz casa da qualidade	52
Figura 11 – Classificação dos atributos de produto proposta por Fonseca	54
Figura 12 – Matriz de apoio ao levantamento das necessidades.....	55
Figura 13 – Matriz de apoio à conversão dos requisitos de usuário em requisitos de projeto	56
Figura 14 – Análise comparativa entre quantidade de trabalhos produzidos	60
Figura 15 – Fluxograma das etapas adotadas para obtenção dos requisitos	61
Figura 16 – <i>Rich picture</i> desenvolvida para o FritzSat Tatá.....	77
Figura 17 – Esboço das interfaces identificadas para o FritzSat Tatá.....	84
Figura 18 – Modos de operação para o FritzSat Tatá	90
Figura 19 – ConOps para a missão FritzSat Tatá	91
Figura 20 – Tabela de tradução para o atributo de desempenho.....	99
Figura 21 – Recorte da matriz de relacionamento da casa da qualidade (QFD).....	105
Figura 22 – Matriz de correlação entre os requisitos de projeto.....	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Categorias de informação e seus significados no contexto de projeto ...	53
Quadro 2 – Símbolos utilizados na matriz de correlação da QFD.....	72
Quadro 3 – Metas e objetivos declarados para a missão.....	78
Quadro 4 – Requisitos de missão declarados para o FritzSat Tatá	81
Quadro 5 – Identificação das interfaces internas e externas do sistema espacial	85
Quadro 6 – Requisitos de sistema e técnicos derivados para o requisito de missão FST-RM-01.....	97
Quadro 7 – Requisitos de projeto listados na matriz QFD	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Símbolos utilizados na matriz de relacionamento da QFD	72
Tabela 2 – Principais bandas aplicadas no sensoriamento remoto por infravermelho	87
Tabela 3 – Classificação das necessidades e suas importâncias para a QFD	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADCS – Attitude Determination and Control System
AEB – Agência Espacial Brasileira
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CONOPS – Conceito de Operações
COTS – Commercial off-the-Shelf
EMMN – Estação Multi-Missão de Natal
ECSS – European Cooperation for Space Standardization
EPS – Electrical Power and Distribution
FST – FritzSat Tatá
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LARS – Laboratory of Applications and Research in Space
LIT – Laboratório de Integração e Testes
MDR – Mission Definition Review
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NGOs – Needs, Goals and Objectives
OBDH – On Board Command and Data Handling
ONGs – Organizações Não Governamentais
PDR – Preliminary Design Review
PLD – Payload
PNAE – Programa Nacional de Atividades Espaciais
QFD – Quality Function Deployment
RM – Requisitos de Missão
RS – Requisitos de Sistema
RT – Requisitos Técnicos
SNR – Relação Sinal-Ruído
SRR – System Requirements Review
STR – Structural Subsystem
TT&C – Telemetry Tracking and Command
TCS - Thermal Control System
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	17
1.1.1. Objetivo Geral.....	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1. DESENVOLVIMENTO DE CUBESATS	18
2.2. ENGENHARIA DE SISTEMAS.....	22
2.2.1. ECSS.....	23
<u>2.2.1.1. Norma ECSS-P-00</u>	<u>24</u>
<u>2.2.1.2. Norma ECSS-M-ST-10C</u>	<u>25</u>
<u>2.2.1.3. Norma ECSS-E-ST-10C.....</u>	<u>30</u>
2.3. ENGENHARIA DE REQUISITOS.....	31
2.3.1. Identificação e análise das partes interessadas.....	34
2.3.2. Necessidades, Metas e Objetivos	35
2.3.3. Conceito de Operações	36
2.3.4. Interfaces do Sistema	38
2.3.6. Declaração de Requisitos.....	39
2.4. CONTEXTUALIZAÇÃO DA MISSÃO	42
2.4.1. FritzSat Tata: monitoramento de incêndios.....	44
2.5. DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE.....	47
2.5.1. Casa da Qualidade	50
2.5.2. Tabela de Tradução.....	53
2.6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	56
3. METODOLOGIA	61
3.1. IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS STAKEHOLDERS	63
3.2. DEFINIÇÃO DAS METAS E OBJETIVOS DA MISSÃO	64
3.3. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS DE MISSÃO	65
3.4. IDENTIFICAÇÃO DAS INTERFACES.....	66
3.5. ANÁLISE PRELIMINAR DOS COMPONENTES DA CARGA ÚTIL	66
3.6. DEFINIÇÃO DO CONCEITO DE OPERAÇÕES	67
3.7. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS DE SISTEMA	68

3.8. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS TÉCNICOS DO PAYLOAD	69
3.9. DESENVOLVIMENTO DA TABELA DE TRADUÇÃO	70
3.10. APLICAÇÃO DA CASA DA QUALIDADE.....	71
4. APRESENTAÇÃO DE DADOS	73
4.1. IDENTIFICAÇÃO DOS STAKEHOLDERS	73
4.2. DEFINIÇÃO DAS METAS E OBJETIVOS DA MISSÃO	77
4.3. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS DE MISSÃO	80
4.4. IDENTIFICAÇÃO DAS INTERFACES.....	83
4.5. ANÁLISE PRELIMINAR DOS COMPONENTES DA CARGA ÚTIL	86
4.5.1. Sensor térmico infravermelho.....	86
4.5.2. Espectrômetro	88
4.6. DEFINIÇÃO DO CONCEITO DE OPERAÇÕES	89
4.7. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS DE SISTEMA E TÉCNICOS	92
4.8. ANÁLISE DA TABELA DE TRADUÇÃO PARA REQUISITOS	99
4.9. ANÁLISE DA CASA DA QUALIDADE	101
4.9.1. Priorização das necessidades dos stakeholders	101
4.9.2. Desdobramento das necessidades em requisitos de projeto	102
4.9.3. Matriz de relacionamento e priorização dos requisitos	104
4.9.4. Matriz de correlação entre os requisitos técnicos	107
4.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
6. CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS	115
APÊNDICE A – TABELA DE REQUISITOS PARA O FRITZSAT TATÁ ..	123
APÊNDICE B – TABELA DE TRADUÇÃO DE REQUISITOS.....	125
APÊNDICE C – CASA DA QUALIDADE	127

1. INTRODUÇÃO

O New Space é uma expressão adotada para caracterizar o setor espacial global após as intensas transformações, impulsionadas pelo surgimento de novas tecnologias, pela adoção de novos modelos de negócios e de desenvolvimento de produtos e pela crescente participação do setor privado, aspecto central desse cenário. Apesar de ser um processo amplo, os satélites miniaturizados, em especial os CubeSats, destacam-se como uma tendência desse novo modelo, por proporcionarem um acesso mais ágil, simplificado e de menor custo ao espaço (Golkar; Salado, 2021; Paikowsky, 2017).

O padrão CubeSat foi desenvolvido em 1999 pelos professores Bob Twiggs e Jordi Puig-Suari, com o intuito de proporcionar aos alunos uma experiência prática no desenvolvimento, planejamento e operação de uma plataforma orbital (Alanazi; Straub, 2019). Contudo, a combinação de características, como padronização, baixo custo e curto tempo de desenvolvimento, permitiu que seu uso se expandisse para além do âmbito educacional, passando a ser empregado em demonstrações tecnológicas, pesquisas científicas e aplicações comerciais (European Space Agency, 2023).

No setor espacial brasileiro, o desenvolvimento de nanossatélites está, até o momento, associado a parcerias entre universidades nacionais e órgãos governamentais, como a Agência Espacial Brasileira (AEB) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O lançamento do NanosatC-BR 1, em 2014, fruto dessa colaboração, marcou o início da participação acadêmica em missões espaciais brasileiras, com instituições de ensino envolvidas em nove dos dez lançamentos realizados até então (BRASIL, 2023).

Apesar de impulsionar o crescimento dos projetos de CubeSats, a redução da complexidade e dos custos também resultou em um aumento dos riscos, visto que, em muitos casos, esses dispositivos priorizam demonstrações tecnológicas em detrimento do sucesso completo (Paikowsky, 2017). Como consequência, os CubeSats apresentam uma alta taxa de falhas, cerca de 21% dos lançamentos até 2018, sendo a principal causa a ausência de processos adequados de verificação em nível de sistema (Cervone *et al.*, 2023; Dunwoody *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, a engenharia de sistemas destaca-se como uma metodologia relevante para o desenvolvimento de nanossatélites, uma vez que estabelece diversas atividades que fornecem um controle e orientação ao longo de todo o ciclo de vida do sistema. Nesse sentido, a definição de requisitos desempenha um papel crucial dentro dessa abordagem, sendo responsável por estruturar o desenvolvimento do projeto, reduzindo riscos e garantindo a conformidade com as restrições e objetivos estabelecidos (Berthoud *et al.*, 2019; Karpuch, 2010).

Apesar da importância desse processo, projetos de CubeSats ainda apresentam falhas decorrentes de deficiências na análise e declaração de requisitos, o que gera definições ambíguas, incompletas e de difícil compreensão (Alanazi; Jones; Straub, 2019). A complexidade dessa etapa, aliada à ausência de documentação clara e à inexperiência dos desenvolvedores, compromete a confiabilidade do projeto e amplia a vulnerabilidade ao longo do ciclo de vida do sistema, resultando no aumento dos riscos técnicos e no comprometimento de prazos e custos (Alanazi; Straub, 2019; Berthoud *et al.*, 2019).

Tendo isso em vista, o presente trabalho busca analisar a viabilidade de ferramentas que otimizem o processo de definição de requisitos em projetos de CubeSats, preenchendo lacunas metodológicas e aprimorando a eficiência dessa etapa. Para isso, o estudo propõe a avaliação comparativa de ferramentas da disciplina de projeto de produto em contraste com a abordagem tradicional da engenharia de sistemas, baseada nas normas ECSS da Agência Espacial Europeia.

Como estudo de caso, adota-se a missão FritzSat, uma constelação de nanossatélites idealizada pelo Laboratory of Applications and Research in Space (LARS) da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Tecnológico de Joinville (UFSC-CTJ). O objetivo da missão é o monitoramento do território amazônico brasileiro por meio de CubeSats.

Dentro dessa constelação, destaca-se o FritzSat Tata, voltado ao monitoramento de incêndios, selecionado como base para o desenvolvimento da metodologia proposta. A escolha se justifica não apenas por interesse pessoal, mas também por refletir desafios típicos de projetos acadêmicos, como restrições orçamentárias, diversidade de cargas úteis e a necessidade de atender a diferentes requisitos.

1.1. OBJETIVOS

Buscando solucionar a falta de ferramentas aplicáveis na definição e distinção entre os níveis hierárquicos dos requisitos em projetos de CubeSat, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a viabilidade de aplicação da casa da qualidade e da tabela de tradução, ferramentas da metodologia de projeto de produto, na definição de requisitos em projetos de CubeSats, de modo a complementar a abordagem tradicional baseada na engenharia de sistemas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir as etapas do processo de definição de requisitos da engenharia de sistemas aplicadas a projetos de CubeSats;
- Aplicar a metodologia para identificar os requisitos de missão, de sistema e técnicos da carga útil, com o propósito de demonstrar o processo de definição;
- Construir uma tabela de tradução para auxiliar na conversão das necessidades dos stakeholders em requisitos de projeto;
- Aplicar a matriz casa da qualidade (QFD) para correlacionar necessidades e requisitos;
- Avaliar a contribuição e a utilidade das ferramentas empregadas no processo de definição dos requisitos de projetos CubeSats.

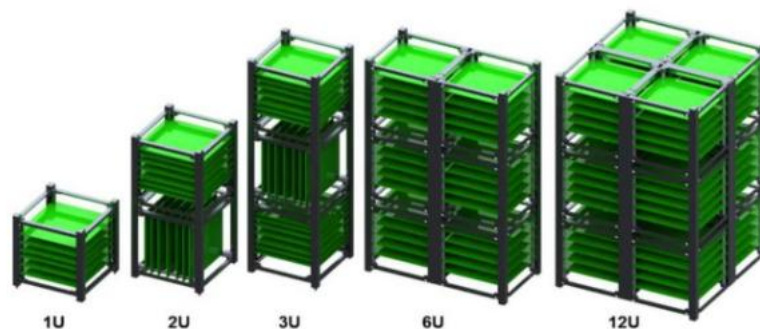
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. DESENVOLVIMENTO DE CUBESATS

Os CubeSats são uma classe de nanossatélites caracterizados por seu baixo custo, curto tempo de desenvolvimento e tamanho padronizado. O conceito foi desenvolvido em 1999 por Bob Twiggs e Jordi Puig-Suari, na Universidade Politécnica Estadual da Califórnia - California Polytechnic State University (Cal Poly), com o intuito de criar uma ferramenta educacional acessível que possibilitasse o projeto, a construção, os testes e a operação de sistemas espaciais em ambiente acadêmico (Golkar; Salado, 2021; Swartwout, 2013; Toorian; Diaz; Lee, 2008).

Esses dispositivos apresentam uma estrutura padrão, composta por uma unidade cúbica que facilita seu desenvolvimento, integração e lançamento. Essa unidade, denominada 1U, apresenta dimensões de 10 cm x 10 cm x 10 cm e massa inferior a 2 kg. Conforme ilustrado na Figura 1, múltiplas unidades podem ser agrupadas para formar configurações maiores, como 3U, 6U e 12U, oferecendo flexibilidade para missões com diferentes necessidades de volume e massa (California Polytechnic State University, 2022; Villela *et al.*, 2019).

Figura 1 – Exemplos de possíveis configurações de CubeSats



Fonte: Lahrichi (2017).

A padronização dos CubeSats é definida pelo CubeSat Design Specification (CDS), documento mantido pela Cal Poly e que estabelece as especificações técnicas e de design para o desenvolvimento de CubeSats. Além de definir o formato do sistema, essa norma apresenta requisitos críticos para garantir a compatibilidade

mecânica, elétrica e operacional, assegurando também a conformidade com protocolos de segurança de voo (California Polytechnic State University, 2022; Villela *et al.*, 2019).

Internamente, a estrutura do CubeSat é organizada em subsistemas que operam de forma integrada e coordenada para aumentar a confiabilidade do conjunto e mitigar riscos operacionais. Cada subsistema é composto por um conjunto de componentes responsáveis por executar funções específicas e essenciais para o sucesso da missão. A seguir, são apresentados os principais subsistemas e suas respectivas funções (Arneodo; Di Giovanni; Marpu, 2021; Lahrichi, 2017):

- Subsistema Estrutural – Structural Subsystem (STR): É o subsistema responsável por garantir a integridade física do satélite, suportando as cargas mecânicas e as vibrações do lançamento, além de proteger os componentes internos durante toda a missão;
- Subsistema de Suprimento de Energia – Electrical Power System (EPS): Responsável por gerar, armazenar e distribuir a energia elétrica para todos os componentes. Para isso, utiliza painéis solares para a geração, baterias para o armazenamento e uma unidade de distribuição de potência (PDU) para o fornecimento regulado;
- Subsistema de Controle Térmico – Thermal Control System (TCS): Mantém todos os componentes dentro de suas faixas de temperatura operacionais, protegendo-os das variações extremas do ambiente espacial por meio de métodos passivos (como revestimentos) ou ativos (como aquecedores);
- Subsistema de Gerenciamento de Dados de Bordo – On-Board Data Handling (OBDH): Atua como o processador central do satélite. É responsável por executar o software de voo, gerenciar a coleta, o armazenamento e o processamento de dados, como os coletados pela carga útil, e coordenar as operações dos demais subsistemas;
- Subsistema de Determinação e Controle de Atitude – Attitude Determination and Control System (ADCS): Determina e ajusta a orientação do satélite no espaço, utilizando sensores e atuadores para garantir o apontamento preciso necessário para a coleta de dados e para a comunicação;

- Subsistema de Telemetria, Rastreamento e Comando – Telemetry, Tracking, and Command (TT&C): Estabelece a comunicação bidirecional entre o satélite e a estação de solo. Suas funções dividem-se em transmitir dados da missão e de telemetria, processo conhecido como *downlink*, e receber comandos de operação, processo de *uplink*;
- Carga Útil – Payload (PLD): É o subsistema que executa a missão principal do CubeSat. Seus componentes variam conforme os objetivos da missão, podendo incluir câmeras de imageamento, sensores científicos, receptores de rádio ou qualquer outro experimento a ser testado em órbita.

Além de promover a redução de custos, a aceleração do tempo de desenvolvimento e a padronização de sistemas, os CubeSats destacam-se também pela adoção de componentes comerciais prontos para uso – Commercial Off-The-Shelf (COTS). Essa prática confere maior agilidade e flexibilidade ao projeto, evitando os desafios técnicos e os elevados investimentos atrelados ao desenvolvimento de componentes proprietários, tradicionalmente associados a missões com satélites convencionais (Alanazi; Straub, 2019; Puig-Suari; Turner; Ahlgren, 2001).

As vantagens apresentadas por esses nanossatélites, aliadas à crescente participação de entidades privadas no setor espacial e aos novos modelos de pesquisa e desenvolvimento, impulsionaram a expansão dessa tecnologia do ambiente acadêmico para aplicações científicas, comerciais e governamentais. Atualmente, esses dispositivos são empregados em diversas missões, como monitoramento ambiental, telecomunicações, observação climática e desenvolvimento de novas tecnologias (Alanazi; Straub, 2019; Selva; Krejci, 2012; Swartwout, 2013).

Dessa forma, os primeiros anos da plataforma, com lançamentos iniciados em 2003, foram marcados por um forte viés acadêmico e experimental. Esse fato é comprovado por meio de uma análise dos cem primeiros satélites colocados em órbita, em que 37% possuíam um caráter educacional, 34% eram destinados à demonstração tecnológica, 23% a pesquisas científicas e 6% a comunicações (Swartwout, 2013). Um levantamento realizado por Cervone et al. (2023), no entanto, revela um cenário significativamente distinto para os lançamentos até 2022, no qual as missões de caráter educacional passaram a representar apenas 9% de um total de 1.652 CubeSats. Em contrapartida, o estudo aponta um novo perfil de missões

dominantes: 40% para observação da Terra, 24% para demonstração de tecnologia, 8% para pesquisas científicas e 3% para outras finalidades.

Apesar de sua crescente utilização e dos benefícios associados, os CubeSats ainda enfrentam desafios significativos decorrentes das restrições da miniaturização, como a capacidade energética limitada e as restrições nos sistemas de comunicação, influenciadas pelo tamanho das antenas (Arneodo; Di Giovanni; Marpu, 2021; Liu *et al.*, 2022). Adicionalmente, fatores como o ambiente espacial adverso, com variações extremas de temperatura, e a inexperiência dos desenvolvedores contribuem para a redução da confiabilidade e para a elevada taxa de falhas da plataforma, que representa cerca de 21% dos lançamentos até 2018 (Alanazi; Straub, 2019; Villela *et al.*, 2019).

O crescente interesse comercial pelo setor, aliado ao acúmulo de experiência e à consolidação da herança de voo, permitindo que novos projetos se beneficiem do conhecimento e das documentações desenvolvidas, contribuíram para a redução gradual das falhas. Estudos apontam uma tendência positiva no desempenho das missões CubeSat, com taxa de sucesso superior a 70% dos lançamentos realizados até 2022 (Cervone *et al.*, 2023; Villela *et al.*, 2019).

Mesmo com esse progresso, a taxa de falhas permanece alta quando comparada aos satélites convencionais, correspondendo a 10% dos lançamentos até 2022, das quais 40% são atribuídas à chamada “mortalidade infantil”. Esse fenômeno refere-se a falhas nas fases iniciais da missão, como durante o lançamento ou nos primeiros momentos em órbita, frequentemente causadas pela falta de verificações em nível de sistema e deficiências no projeto, fabricação ou integração dos subsistemas (Cervone *et al.*, 2023; Villela *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, a aplicação da engenharia de sistemas destaca-se como uma disciplina essencial para a redução de falhas em projetos de CubeSats, uma vez que define processos que orientam e garantem a confiabilidade ao longo de todo o ciclo de vida do projeto. Dentro desse escopo, a engenharia de requisitos destaca-se como uma de suas etapas mais críticas, uma vez que os requisitos são responsáveis por traduzir as necessidades e restrições impostas pelas partes interessadas, guiando o projeto ao longo de todo o desenvolvimento (Alanazi; Straub, 2019, NASA, 2007).

2.2. ENGENHARIA DE SISTEMAS

A engenharia de sistemas é uma abordagem multidisciplinar, metódica e iterativa empregada no desenvolvimento de sistemas complexos, abrangendo todas as fases do ciclo de vida, desde a concepção até o descomissionamento. Essa disciplina compreende um conjunto de atividades voltadas ao desenvolvimento de sistemas capazes de atender às necessidades das partes interessadas, respeitando as restrições impostas e otimizando o desempenho, custo, segurança e cronograma, mesmo em ambientes de alta incerteza (Arrichiello, 2015; INCOSE, 2006; NASA, 2007).

Em vez de focar isoladamente nos componentes, essa disciplina promove uma visão integrada do sistema como um todo, garantindo que as necessidades das partes interessadas sejam traduzidas em soluções técnicas. Um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos interconectados que operam de forma coordenada para alcançar um objetivo comum, incluindo hardware, software, firmware, recursos humanos, informações e outros elementos de suporte (Arrichiello, 2015; ECSS, 2017; NASA, 2007).

Nesse contexto, o ciclo de vida de um projeto é um conceito fundamental, pois fornece uma estrutura para a realização das atividades, auxiliando no gerenciamento de riscos, custos, prazos e qualidade. Esse modelo é composto por uma sequência de fases distintas separadas por marcos de revisão, em que se avalia o progresso e a maturidade do sistema para autorizar sua transição para a fase seguinte. Embora a nomenclatura possa variar entre as diferentes normas, as fases de um ciclo de vida comumente incluem: concepção, desenvolvimento, produção, utilização, suporte e desativação (INCOSE, 2006; NASA, 2007).

No âmbito espacial, uma simples falha no sistema pode comprometer toda a missão. Diante disso, é necessário um controle rigoroso de todas as etapas do desenvolvimento, considerando a elevada complexidade técnica, os altos custos e os riscos associados. Esse cenário evidencia a importância da adoção de práticas consolidadas nas normas de engenharia de sistemas do setor, como as diretrizes da European Cooperation for Space Standardization (ECSS), mantidos pela Agência Espacial Europeia (ESA), e da National Aeronautics and Space Administration (NASA) (de Almeida *et al.*, 2021; NASA, 2007; Ndao *et al.*, 2024).

Embora normas tradicionais desempenhem papel essencial na confiabilidade das missões, sua aplicação integral em projetos de CubeSats muitas vezes se mostra complexa, especialmente para equipes iniciantes, diante de restrições típicas como prazos e orçamentos limitados. Como consequência, algumas etapas da engenharia de sistemas podem ser flexibilizadas ou omitidas, o que pode comprometer o desempenho e a longevidade da missão (Alanazi; Straub, 2019; Ndao *et al.*, 2024).

Essa realidade não justifica o abandono das boas práticas, mas evidencia a necessidade de adaptar os processos sem omitir tarefas essenciais, como a definição de requisitos, a análise de riscos e a validação nas revisões do projeto. A adoção de uma metodologia simplificada, com revisões intermediárias e entregas bem definidas, pode aumentar significativamente as chances de sucesso, mesmo em cenários restritivos (Alanazi; Straub, 2019; Ndao *et al.*, 2024).

A escolha da ECSS como referência principal neste trabalho justifica-se por sua ampla adoção na indústria espacial e por sua abordagem modular, que permite flexibilidade na adaptação a diferentes níveis de complexidade. A norma fornece diretrizes detalhadas sobre gestão da qualidade, confiabilidade e segurança, elementos essenciais para o sucesso de missões espaciais (ECSS, 2009; Ndao *et al.*, 2024). Para enriquecer a análise, conceitos do manual de engenharia de sistemas da NASA (NASA Systems Engineering Handbook) serão utilizados de forma complementar, visando fornecer perspectivas adicionais sobre boas práticas aplicáveis a CubeSats.

2.2.1. ECSS

A iniciativa ECSS foi estabelecida em 1993 com o intuito de criar um conjunto único de normas para apoiar todos os projetos espaciais europeus. Desenvolvidas a partir da cooperação entre agências governamentais e a indústria do setor, essas normas buscavam unificar os padrões e processos vigentes, uma vez que a divisão anterior gerava problemas como custos elevados, menor competitividade industrial e maior risco de erros (Kriedte; El Gammal, 1995; Kriedte, 1996).

Em vez de impor métodos específicos, a ECSS define os requisitos que devem ser atendidos em cada etapa do projeto para garantir sua conformidade e confiabilidade. Essa abordagem baseada em critérios, oferece flexibilidade para que empresas e instituições adaptem suas metodologias internas aos padrões exigidos.

Desse modo, a aplicação das normas da ECSS torna-se viável mesmo em ambientes com recursos limitados, como o acadêmico, sem comprometer a qualidade e a confiabilidade dos sistemas espaciais (ECSS, 2009; Ndao *et al.*, 2024).

É importante destacar que, um projeto espacial é composto por um segmento espacial e um segmento terrestre, implementados simultaneamente. Ambos dependem do segmento de serviço de lançamento e possuem interfaces correspondentes, formando, juntos, um sistema espacial integrado (ECSS, 2009; Kriedte, 1996).

Diante disso, os padrões da ECSS são aplicáveis aos diferentes segmentos de uma missão espacial, com a documentação organizada em quatro ramos: gestão de projetos, garantia da qualidade, engenharia e sustentabilidade espacial, sendo esse último incorporado posteriormente. A primeira tarefa da ECSS foi elaborar um documento político, intitulado Standardization Policy (Política de Normalização), registrado sob o número ECSS-P-00 (Kriedte, 1996).

2.2.1.1. Norma ECSS-P-00

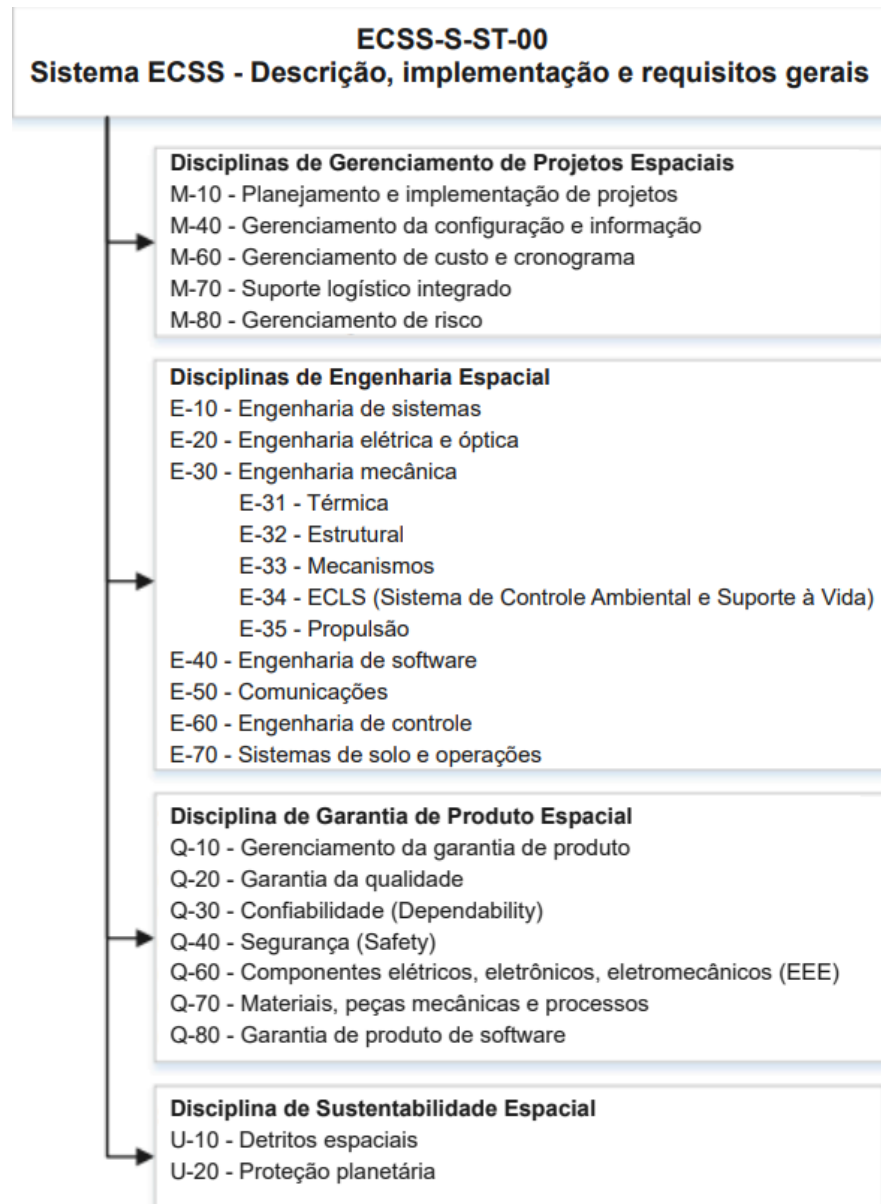
Este documento estabelece os objetivos, políticas e a estrutura organizacional necessários para a implementação de um conjunto coerente de normas para o desenvolvimento e a operação de sistemas espaciais. A organização da norma aborda os diferentes aspectos do sistema, incluindo escopo, objetivos, implementação, autoridade, organização e documentação (ECSS, 2024; Kriedte, 1996).

A política da ECSS determina que os padrões devem promover a melhoria contínua dos métodos e prevenir o trabalho desnecessário. Para isso, a experiência de projetos anteriores é sistematicamente incorporada às normas, e os usuários são incentivados a informar o secretariado da ECSS sobre suas experiências, visando corrigir eventuais inadequações. Adicionalmente, os padrões devem satisfazer clientes europeus e internacionais, encorajar a eficiência e a competitividade industrial, limitar a variedade de produtos e processos, e considerar os potenciais impactos negativos dos sistemas espaciais (ECSS, 2024; Kriedte, 1996).

Um dos aspectos principais da ECSS é a arquitetura da documentação, projetada para facilitar a organização e a recuperação de informações dentro do sistema de padrões. A Figura 2, apresentada a seguir, ilustra a organização da

documentação, fornecendo os detalhes necessários para distinguir as disciplinas e atividades em cada um dos segmentos.

Figura 2 – Organização das normas da ECSS



Fonte: Adaptado de ECSS (2020)

2.2.1.2. Norma ECSS-M-ST-10C

A norma ECSS-M-ST-10C oferece uma visão geral dos elementos e processos empregados no planejamento e na execução de projetos espaciais, estabelecendo um conjunto de diretrizes para gerenciar um projeto desde a concepção inicial até a sua conclusão. Para isso, a norma descreve os principais

elementos de planejamento e implementação, identificando os requisitos necessários para garantir um desenvolvimento de projeto coerente e integrado nos quatro ramos da ECSS (ECSS, 2009).

De acordo com a ECSS (2009), a gestão do projeto é estruturada em quatro etapas principais:

- Definição de requisitos e restrições, com base na declaração de missão;
- Estabelecimento de fases e marcos para monitorar custos, prazos e desempenho técnico;
- Decomposição do projeto, com os seguintes objetivos:
 - Atribuir tarefas e responsabilidades;
 - Garantir o alinhamento entre as atividades;
 - Viabilizar o planejamento e as estimativas de custos;
- Organização da equipe para assegurar a execução de todas as atividades necessárias.

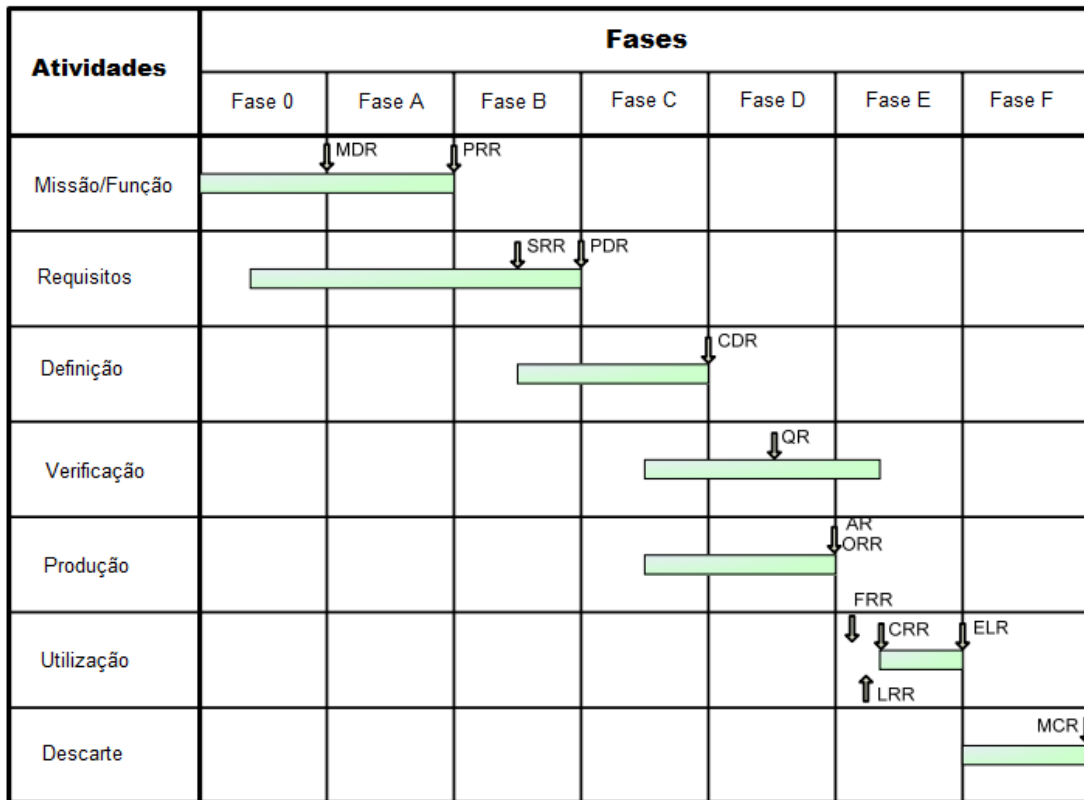
O primeiro passo para a realização dessas atividades é a identificação dos stakeholders, que são responsáveis por decisões estratégicas que influenciam todo o desenvolvimento do projeto (NASA, 2007). Os stakeholders são indivíduos, grupos ou instituições afetados diretamente pelo desenvolvimento ou que possuem interesse em um produto ou projeto. Diversas partes interessadas podem estar envolvidas na concepção de um sistema, sendo o stakeholder chave o cliente direto do produto, que exerce papel central ao definir os objetivos da missão e influenciar diretamente nos requisitos e decisões técnicas (ECSS, 2009; NASA, 2007).

Um dos pontos centrais da norma ECSS-M-ST-10C é a definição do ciclo de vida para sistemas espaciais, organizado em sete fases distintas, conforme apresentado na Figura 3. Esse ciclo de vida oferece uma estrutura clara para o desenvolvimento do projeto, possibilitando o gerenciamento sistemático de riscos, custos, prazos e requisitos (ECSS, 2009).

A metodologia apresentada na norma organiza o desenvolvimento de sistemas espaciais em fases bem definidas, nas quais estão distribuídas todas as atividades necessárias. As transições entre essas fases são marcadas por revisões formais e pontos críticos de decisão, que permitem avaliar o cumprimento dos requisitos estabelecidos antes de prosseguir para a etapa seguinte. A Figura 3

apresenta a sequência das principais atividades e revisões ao longo do ciclo de vida do sistema (ECSS, 2009).

Figura 3 – Principais atividades e revisões presentes no ciclo de vida da ECSS



Fonte: Adaptado de ECSS (2009).

Entre as atividades previstas, destaca-se o processo de definição de requisitos, que se inicia na Fase 0, junto com a definição da missão, e se estende até o final da Fase B, momento em que são revisados e consolidados. Nesse período, são conduzidas quatro revisões principais (ECSS, 2009):

- Revisão de Definição de Missão (Mission Definition Review - MDR): valida os objetivos do projeto;
- Revisão Preliminar de Requisitos (Preliminary Requirements Review - PRR): realiza a análise inicial dos requisitos;
- Revisão de Requisitos do Sistema (System Requirements Review - SRR): verifica de forma completa se o sistema atende aos requisitos definidos;
- Revisão Preliminar de Projeto (Preliminary Design Review - PDR): avalia a concepção preliminar e a consistência das soluções propostas.

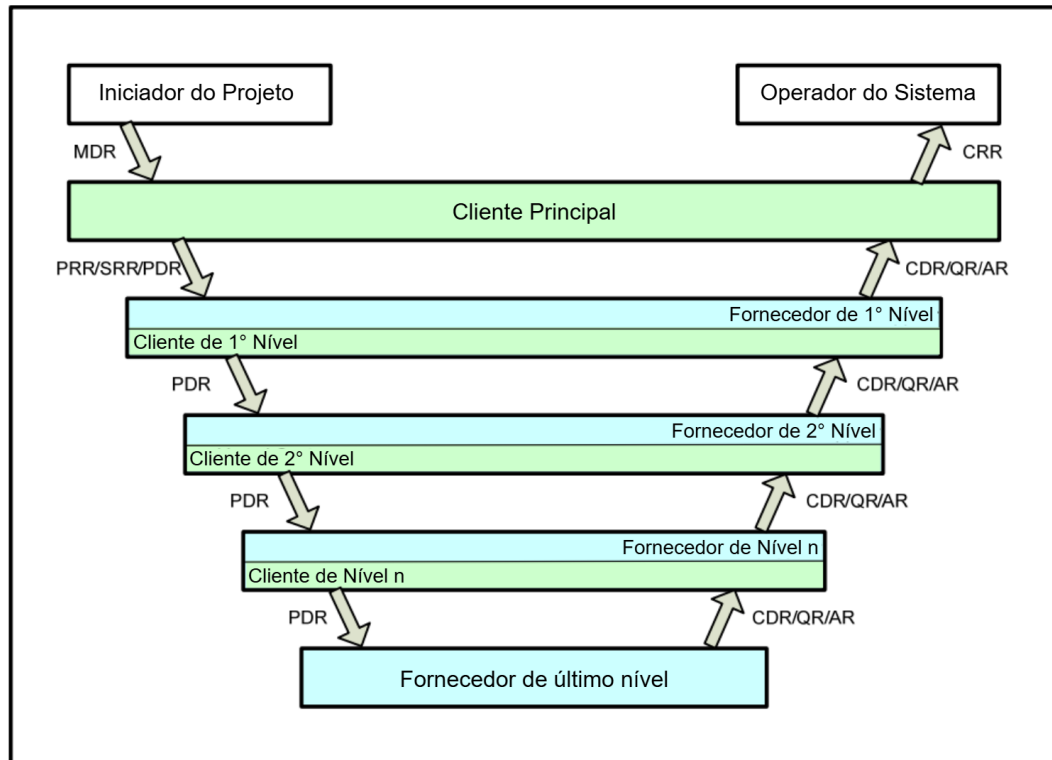
De forma geral, essas revisões têm como objetivo verificar se o projeto está apto para avançar para a fase seguinte, assegurando que os requisitos foram corretamente definidos, as atividades foram realizadas e que o desenvolvimento permanece alinhado aos objetivos estabelecidos. As fases do ciclo de vida, bem como suas atividades principais estão apresentadas a seguir (ECSS, 2009):

1. Fase 0: Define-se a missão, seus objetivos e requisitos iniciais, a partir da análise de viabilidade preliminar e da identificação das necessidades dos stakeholders;
2. Fase A: Avalia-se a viabilidade técnica e econômica dos conceitos propostos, consolidando os requisitos da missão e desenvolvendo os planos iniciais de gerenciamento, engenharia e qualidade, com foco em custos, cronogramas e tecnologias necessárias;
3. Fase B: Compreende o desenvolvimento do projeto preliminar do sistema, com a definição de sua arquitetura, especificações e a alocação dos requisitos do sistema aos subsistemas e seus componentes;
4. Fase C: Ocorre a consolidação do projeto detalhado, com a tradução dos requisitos técnicos em especificações de componentes, a validação do design com protótipos e a finalização dos planos de montagem, integração e testes;
5. Fase D: Realiza-se a fabricação, a montagem, a integração e a verificação do modelo de voo, concluindo com a avaliação de sua prontidão para o lançamento;
6. Fase E: Corresponde à etapa de lançamento, comissionamento em órbita e operação de rotina do sistema para o cumprimento dos objetivos da missão;
7. Fase F: É a fase final, na qual se encerra a missão com as operações de desativação, a passivação dos sistemas e o descarte seguro do satélite, em conformidade com as regulamentações vigentes.

Outro ponto de destaque apresentado na norma é o modelo “V” (V-model), que estabelece a relação entre o ciclo de vida do projeto, os processos de revisão e a gestão de requisitos em sistemas espaciais. Esse modelo, ilustrado na Figura 4, complementa o ciclo de vida ao representar, de forma integrada, o processo de

decomposição e integração do sistema, evidenciando a rastreabilidade entre os requisitos definidos e as atividades de verificação e teste (ECSS, 2009; ECSS, 2017).

Figura 4 – Modelo V proposto pela ECSS



Fonte: Adaptado de ECSS (2009).

Na fase inicial do ciclo de vida, lado esquerdo do modelo V, ocorre o processo de definição e decomposição dos requisitos que tem início na Fase 0, com a declaração da missão. A partir da MDR, em que são estabelecidos os objetivos fundamentais, o projeto avança com a elaboração e detalhamento progressivo dos requisitos de sistema e de subsistemas, revisados nas etapas de PRR e SRR. Essa etapa descendente se estende até a PDR, assegurando que os requisitos de nível superior sejam compreendidos e traduzidos em especificações técnicas para cada subsistema (ECSS, 2009, ECSS, 2017).

O ponto de inversão do modelo é marcado pela Critical Design Review (CDR), momento em que o projeto detalhado é validado antes do início da implementação física. A partir desse ponto, o processo segue pela perna direita do V, na fase ascendente de integração e verificação. Nessa etapa, partindo dos componentes mais básicos até a formação do sistema completo, cada elemento é testado em relação aos requisitos definidos na fase descendente (ECSS, 2009, ECSS, 2017).

É importante destacar a diferença entre os conceitos de verificação e validação dos requisitos. Em termos gerais, a verificação avalia se o produto satisfaz as especificações declaradas, enquanto a validação examina se o produto atenderá às necessidades reais dos usuários. Em outras palavras, verifica-se se o sistema foi construído corretamente, enquanto se valida se foi construído o sistema correto (ECSS, 2010).

Dessa forma, esse modelo cria um ciclo onde cada requisito definido na fase descendente tem sua contrapartida de verificação na fase ascendente, garantindo completa rastreabilidade. As revisões atuam como pontos de controle críticos, não apenas autorizando a passagem para a próxima fase, mas também validando que o trabalho realizado está alinhado com os objetivos da missão (ECSS, 2009, ECSS, 2017).

2.2.1.3. Norma ECSS-E-ST-10C

A ECSS-E-ST-10C estabelece o padrão de referência para a engenharia de sistemas em projetos espaciais na Europa. O propósito central da norma é fornecer uma estrutura metodológica unificada, assegurando consistência técnica e confiabilidade ao longo de todo o ciclo de vida de sistemas espaciais (ECSS, 2017).

Diante disso, sua aplicação é orientada por quatro objetivos principais (ECSS, 2017):

- Estabelecer requisitos técnicos para criar bases sólidas no desenvolvimento de sistemas espaciais;
- Reduzir riscos técnicos e otimizar custos em projetos;
- Especificar tarefas, objetivos e entregáveis da engenharia de sistemas;
- Implementar o modelo cliente–sistema–fornecedor em aplicações espaciais.

Além disso, a norma define um conjunto de processos aplicáveis desde a concepção até a fase operacional dos sistemas espaciais. Essa estrutura integra cinco funções principais, conforme apresentado na ECSS-E-ST-10C (ECSS, 2017):

- Engenharia de requisitos: análise, validação, alocação e manutenção dos requisitos ao longo do ciclo de vida;

- Análise: resolução de conflitos entre requisitos, apoio à decomposição funcional e avaliação da eficácia global do sistema;
- Projeto e configuração: definição da arquitetura física, funcional e de software;
- Verificação: demonstração da conformidade dos produtos entregues com os requisitos especificados, incluindo qualificação e aceitação;
- Integração e controle de engenharia de sistemas: coordenação das diferentes disciplinas de engenharia e dos participantes em todas as fases do projeto.

É importante destacar que a norma reúne 106 requisitos, organizados em blocos que facilitam a consulta e a interpretação, porém, sua aplicação deve ser ajustada conforme a categoria do produto. Para esse fim, a cláusula 7 da ECSS-E-ST-10C apresenta uma tabela de adaptação, que indica a aplicabilidade dos requisitos principais e de seus anexos de acordo com o tipo de sistema em desenvolvimento (ECSS, 2017).

Além disso, o documento está estruturado em duas partes principais. A primeira, apresentada no Capítulo 4, Visão Geral da engenharia de sistemas, fornece uma descrição abrangente da disciplina, abordando processos, funções e tarefas típicas em cada fase do ciclo de vida. Conceitos fundamentais, como o ciclo de vida e o modelo em V, introduzidos pela norma ECSS-M-ST-10C, também são tratados de forma complementar (ECSS, 2017).

A segunda parte do documento abrange o Capítulo 5, Requisitos gerais, e o Capítulo 7, Matriz de pré-adaptação e Anexos., que especificam os resultados esperados da engenharia de sistemas e o nível de maturidade requerido em cada etapa. Entre os tópicos centrais estão o plano de engenharia de sistemas, a análise de interfaces, a gestão de riscos e, sobretudo, a engenharia de requisitos, tema central do trabalho (ECSS, 2017).

2.3. ENGENHARIA DE REQUISITOS

A engenharia de requisitos constitui uma etapa central no desenvolvimento de projetos espaciais, como missões com CubeSats, pois estabelece as especificações que orientam o projeto e avaliam o desempenho do sistema. Um requisito é definido como uma necessidade ou condição formalmente estabelecida, que deve ser mensurável e verificável, de modo a garantir que o sistema atenda aos objetivos da

missão, às restrições impostas e às expectativas das partes interessadas (Cappelletti; Robson, 2021; ECSS, 2017; NASA, 2007).

A qualidade dos requisitos está diretamente associada ao sucesso da missão, uma vez que requisitos mal definidos podem gerar escolhas inadequadas, aumento de riscos, necessidade de retrabalho e comprometimento de prazos e custos. Em contrapartida, requisitos bem estruturados favorecem a validação do sistema, contribuem para a mitigação de riscos e eliminam ambiguidades que poderiam comprometer a comunicação e, consequentemente, o desempenho do projeto (Alanazi; Jones; Straub, 2019; ECSS, 2017).

Nesse contexto, a norma ECSS-E-HB-10-02A (2009) define um conjunto de características indispensáveis para a formulação de requisitos de qualidade. Segundo o documento, os requisitos devem ser (ECSS, 2009):

- Necessários: vinculados a uma função ou demanda real do sistema;
- Mensuráveis: definidos em termos quantificáveis e verificáveis;
- Justificáveis: fundamentados formalmente, com indicação do responsável pela definição;
- Rastreáveis: com origem e desdobramento identificáveis ao longo do projeto;
- Claros: redigidos de forma inequívoca, sem ambiguidades;
- Singulares: expressos individualmente, sem sobreposição de exigências;
- Completos: contendo todas as informações necessárias para sua compreensão;
- Verificáveis: passíveis de comprovação por meio de testes, análises ou inspeções.

É importante destacar que os requisitos não são estáticos, uma vez que cada entrada é precedida por uma linha de base e pode evoluir ao longo do projeto, caso se mostre inviável, imponha limitações excessivas ou se torne irrelevante após modificações no sistema. Além disso, os requisitos são organizados em hierarquias estruturadas, o que assegura a rastreabilidade e permite que alterações em níveis superiores impactem, de forma controlada, os níveis inferiores (Cappelletti; Robson, 2021; ECSS, 2017; NASA, 2007).

No contexto de projetos espaciais, os requisitos podem ser classificados em técnicos e não técnicos. Os requisitos não técnicos situam-se no nível de programa

ou projeto e abrangem fatores organizacionais, humanos e programáticos que influenciam a missão, como cooperação entre fornecedores ou treinamento operacional de um CubeSat. Embora não definam diretamente o funcionamento do sistema, estabelecem o quadro de restrições e expectativas que orienta a formulação dos requisitos técnicos (ECSS, 2009; NASA, 2007).

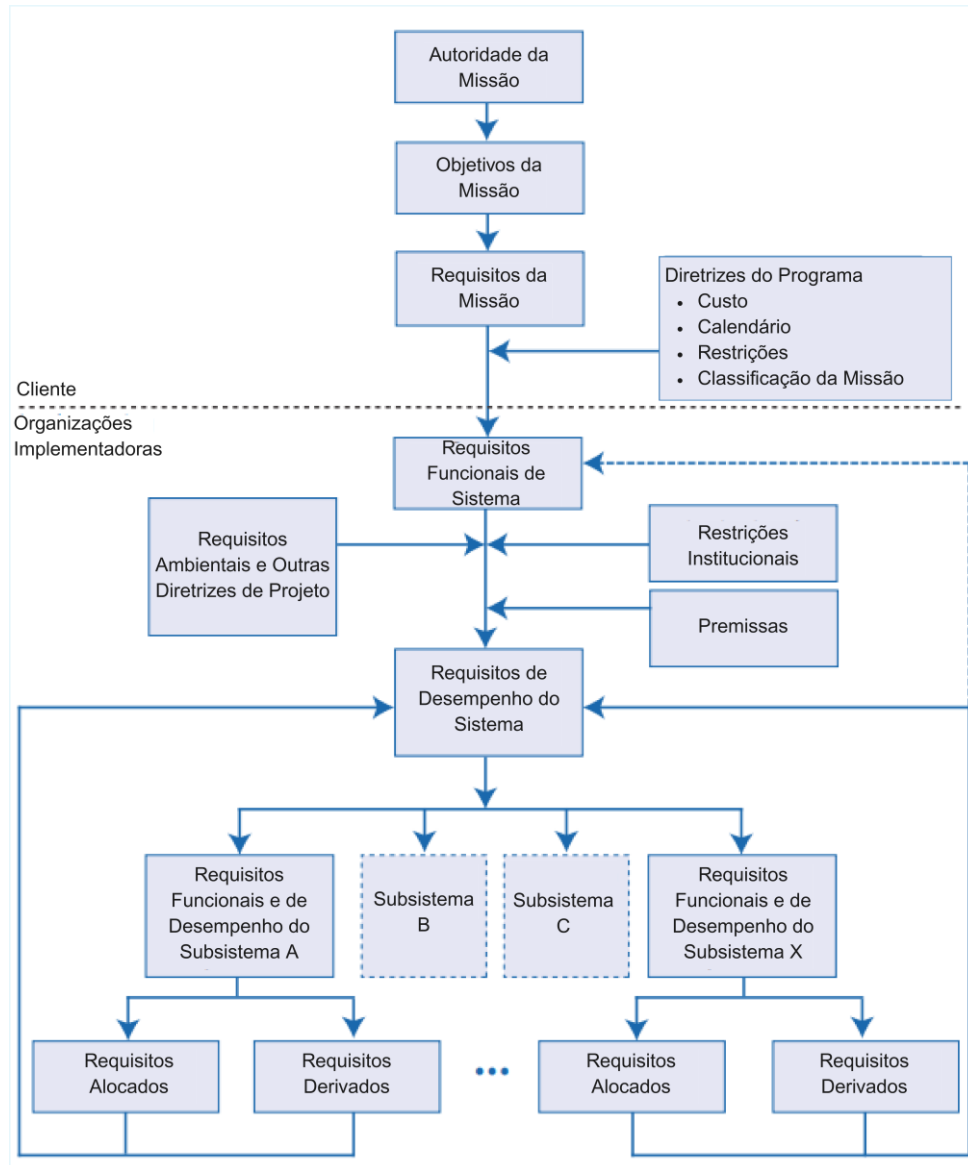
Os requisitos técnicos, por sua vez, englobam (ECSS, 2009; NASA, 2007):

- Funcionais: descrevem as funções e as capacidades que o sistema deve possuir para alcançar os objetivos da missão, como resolução de sensores, capacidade de armazenamento de dados e potência de transmissão.
- De desempenho: definem os níveis esperados para as funções do sistema, incluindo precisão, confiabilidade e eficiência operacional.
- De interface: referem-se às conexões entre os elementos do sistema, garantindo que todos os subsistemas interajam corretamente e de forma integrada.
- Transversais: abrangem condições do ambiente espacial, como radiação, cargas térmicas, acústicas e mecânicas, além de requisitos de segurança, confiabilidade e fatores humanos.

A consideração de todos esses requisitos gera um conjunto completo e consistente de especificações técnicas, a partir do qual o sistema pode ser arquitetado e projetado. O manual de engenharia de sistemas da NASA exemplifica esse processo por meio de uma estrutura hierárquica, apresentada na imagem 5, na qual os requisitos de missão, de caráter mais amplo, são progressivamente desdobrados em requisitos de sistema, subsistemas e, por fim, componentes (NASA, 2007).

Por fim, destaca-se que, para a declaração e o desdobramento dos requisitos, é importante considerar um conjunto de processos de entrada, uma vez que orientam diretamente sua formulação e decomposição. Entre os principais elementos estão a identificação dos stakeholders e de suas necessidades, a definição das metas e objetivos da missão, a caracterização das interfaces e funções dos subsistemas, e a elaboração do conceito de operações (Concept of Operations - ConOps), que estabelece a visão operacional da missão (ECSS, 2017; NASA, 2007).

Figura 5 – Modelo de tradução de requisitos estabelecido pela NASA



Fonte: Adaptado de NASA (2007).

2.3.1. Identificação e análise das partes interessadas

O processo de definição de requisitos começa pela identificação dos stakeholders e compreensão de suas expectativas, etapa inicial da engenharia de sistemas, uma vez que todas as fases subsequentes dependem diretamente dessas informações. Esse processo é essencial para garantir o alinhamento entre os envolvidos e assegurar que o produto final atenda aos objetivos estabelecidos nas fases iniciais (ECSS, 2017; NASA, 2007).

Como destacado anteriormente, stakeholders são indivíduos, grupos ou instituições que exercem influência sobre um projeto ou são diretamente impactados

por seus resultados. Além do cliente principal, que representa o usuário direto do produto, outras partes interessadas também desempenham papéis relevantes ao longo do ciclo de vida do sistema, seja por serem afetadas pelos resultados ou por assumirem responsabilidades de suporte e manutenção. Entre esses stakeholders podem estar órgãos governamentais, fornecedores, investidores e operadores (NASA, 2007; ECSS; 2009).

A identificação de clientes e usuários finais do sistema tende a ser mais direta, enquanto a definição das demais partes interessadas apresenta maior complexidade, variando conforme a natureza e o escopo do projeto. Para que o processo de definição dos requisitos seja conduzido adequadamente, essa etapa deve envolver todas as partes relevantes em conjunto com a equipe de projeto, de modo que funções, características, comportamentos, aparência e desempenho do produto sejam definidos de forma consensual. Esse alinhamento cria expectativas realistas, reduz a probabilidade de surgimento de requisitos significativos em fases posteriores e evita o aparecimento de funcionalidades não planejadas (ECSS, 2017; NASA, 2007).

2.3.2. Necessidades, Metas e Objetivos

A definição de necessidades, metas e objetivos (Needs, Goals and Objectives - NGOs) resulta das expectativas dos clientes e constitui um mecanismo essencial para garantir o alinhamento entre implementadores, clientes e demais partes interessadas. Esse processo proporciona clareza quanto ao problema a ser resolvido e ao seu escopo, evitando divergências de entendimento que poderiam comprometer o desenvolvimento do sistema (NASA, 2007).

As necessidades representam a base do processo, sendo formuladas como declarações singulares e objetivas que descrevem o problema a ser solucionado, sem propor diretamente a solução. Cada necessidade deve se referir a um único aspecto do problema identificado, evitando que diferentes demandas sejam misturadas em uma mesma declaração. Essa separação é essencial para manter a clareza, definir prioridades corretamente e garantir que as expectativas das partes interessadas sejam plenamente atendidas (NASA, 2007).

As metas derivam das necessidades e expressam o conjunto de expectativas gerais sobre o sistema. A partir dessas declarações é possível compreender melhor o problema e direcionar esforços para as áreas consideradas mais críticas. Embora não

sejam necessariamente quantitativas ou mensuráveis, as metas devem permitir avaliar qualitativamente se foram alcançadas, servindo como ponte entre as necessidades e os objetivos (NASA, 2007).

Os objetivos, por sua vez, representam níveis ou alvos específicos de desempenho que o sistema deve alcançar. Cada objetivo está vinculado a uma meta e deve ser definido com base em critérios claros (NASA, 2007):

- Especificidade: orientar desenvolvedores, clientes e testadores sobre os resultados esperados;
- Mensurabilidade e verificabilidade: permitir avaliação objetiva do sucesso do sistema;
- Viabilidade: equilibrar ambição e exequibilidade;
- Orientação para resultados: focar no que deve ser obtido, e não no modo de implementação.

Um conjunto bem estruturado de NGOs ajudam a manter rastreabilidade hierárquica, garantindo que cada meta derive de uma necessidade e que cada objetivo esteja associado a uma meta correspondente. Essa rastreabilidade assegura que o sistema seja projetado para atender as demandas do cliente e das demais partes interessadas, evitando a inclusão de elementos que não agreguem valor ao projeto (NASA, 2007).

Todas essas informações são posteriormente revisadas e analisadas após o desenvolvimento do conceito de operações, sendo então consolidadas em um documento. Esses elementos podem ser organizados em relatórios, planilhas, modelos ou outros formatos adequados ao produto. Uma vez consolidados, quaisquer alterações adicionais devem passar por um processo de aprovação, envolvendo tanto as partes interessadas quanto a equipe técnica (NASA, 2007).

2.3.3. Conceito de Operações

O conceito de operações (ConOps) descreve como o sistema será operado para atingir seus objetivos dentro do ambiente previsto. Em missões espaciais, como aquelas envolvendo CubeSats, esse documento fornece uma visão detalhada da

missão, abrangendo as fases do ciclo de vida do projeto, os modos de operação e as interações entre subsistemas (Asundi; Fitz-Coy, 2013; NASA, 2007).

Além de ser um insumo importante para consolidação da etapa anterior, ConOps desempenha um papel importante na decomposição dos requisitos da missão em requisitos funcionais e de desempenho do sistema, auxiliando também na comunicação e compreensão da missão para os diferentes stakeholders e garantindo a rastreabilidade das especificações de nível superior e inferior. Por esse motivo, deve ser elaborado nas fases iniciais do projeto, uma vez que a análise dos modos de operação pode revelar requisitos e funções que passariam despercebidos se não fossem avaliados de maneira estruturada (NASA, 2007).

O ciclo de vida em órbita de um CubeSat pode ser dividido em diferentes modos de operação, cada um projetado para atender a necessidades específicas da missão. Entre os mais comuns, destacam-se (Asundi; Fitz-Coy, 2013):

- Modo de inicialização e implantação: acionado após o lançamento, garantindo que o satélite não interfira na missão primária e realize tarefas específicas, como abertura de antenas;
- Modo de segurança: assegura funções mínimas, transmite telemetria básica e mantém a integridade do sistema;
- Modo de baixo consumo de energia: otimiza a geração elétrica e valida objetivos secundários;
- Modo de missão: concentra-se na execução do objetivo principal, como apontamento de precisão e coleta de dados científicos;
- Modo de comunicação: permite recepção de comandos e envio de dados à estação em solo;
- Modos de contingência: incluem verificação e diagnóstico para correção de falhas, avaliação da saúde dos subsistemas e restabelecimento do funcionamento nominal

Não existe uma ordem definida de funcionamento, uma vez que esses modos podem ser acionados de forma cíclica ou adaptativa ao longo da operação, compondo a lógica que sustenta a missão do CubeSat. Dessa forma, o ConOps deve contemplar cenários para todas as situações significativas, permitindo que o projeto considere

contingências e implemente soluções adequadas, como a inclusão de equipamentos específicos para determinadas fases da missão, por exemplo, uma antena adicional para comunicação (Asundi; Fitz-Coy, 2013; NASA, 2007).

Por fim, esse processo pode ser representado em diferentes formatos, como documentos textuais, gráficos, simulações, modelos ou vídeos, dependendo da complexidade e das necessidades da missão. Independentemente do formato, seu principal resultado é fornecer uma perspectiva operacional clara do sistema, facilitando a compreensão de metas, objetivos e restrições, e servindo como base sólida para o desenvolvimento de requisitos (NASA, 2007).

2.3.4. Interfaces do Sistema

As interfaces podem ser definidas como pontos de conexão entre elementos de um sistema, nos quais ocorrem interações que podem envolver transmissão de dados, transferência de energia, fluxo de massa ou propagação de sinais físicos, como elétricos, térmicos e mecânicos. De acordo com a literatura, as interfaces podem abranger diferentes aspectos, como (ECSS, 2024; NASA, 2007; Sejera *et al.*, 2022):

- Estruturais: acoplamentos e integrações mecânicas entre módulos;
- Térmicos: dissipação e troca de energia térmica;
- Elétricos e de sinal: transmissão de energia, dados e comandos;
- Homem-sistema: interação operacional entre usuários e sistemas.

O gerenciamento de interfaces envolve a especificação das propriedades e funções de cada componente, bem como a definição das conexões entre eles, considerando limitações, protocolos e condições operacionais. Esse processo constitui uma função central da engenharia de sistemas, visto que na construção de sistemas espaciais como CubeSats, não basta assegurar que cada subsistema opere de maneira isolada, é fundamental garantir que todos funcionem de maneira integrada (ECSS, 2024; Fosse; Delp, 2013; NASA, 2007).

No contexto espacial, as interfaces podem ainda ser classificadas em três categorias principais (ECSS, 2024):

- Intrassegmento: conexões dentro de um mesmo segmento, como o espacial, o terrestre ou o de lançamento;
- Intersegmento: conexões entre diferentes segmentos, como entre o segmento espacial e o de solo;
- Cadeia de fornecimento: conexões entre níveis distintos da cadeia produtiva, envolvendo clientes e fornecedores.

Dessa forma, as interfaces não apenas definem pontos de conexão, mas também orientam o processo de engenharia ao identificar funções e requisitos necessários para a união dos subsistemas. Uma compreensão abrangente de suas características permite estabelecer critérios de desempenho mais precisos, reduzir incertezas de integração e assegurar a operação confiável de sistemas espaciais (ECSS, 2024; NASA, 2007).

Em projetos de CubeSats, a definição e a gestão das interfaces assumem um papel importante devido as restrições de massa, volume e energia, bem como à necessidade de integração com sistemas de lançamento e operação em órbita. Uma especificação inadequada pode comprometer a funcionalidade do nanossatélite, gerando falhas, como interferências em cargas primárias e perda de comunicação com a estação de solo (Alanazi; Straub, 2019; ECSS, 2024; Sejera *et al.*, 2022).

2.3.6. Declaração de Requisitos

O manual de engenharia de sistemas da NASA, destaca a decomposição lógica, apresentada na Figura 5, como processo central de declaração de requisitos, permitindo que programas e projetos atendam às expectativas das partes interessadas. Essa abordagem busca identificar o que deve ser realizado pelo sistema em cada nível hierárquico, assegurando a rastreabilidade das necessidades iniciais até os parâmetros técnicos de menor nível (NASA, 2007).

Nesse modelo, os requisitos de usuário representam o nível mais alto, traduzindo necessidades, expectativas e restrições das partes interessadas. A partir deles derivam-se metas e objetivos, posteriormente transformados em requisitos de missão e de sistema. Cada requisito corresponde a uma parte da missão ganhando forma, guiando decisões de design, integração de subsistemas e planejamento

operacional em órbita (Asundi; Fitz-Coy, 2013; Cappelletti; Robson, 2021; NASA, 2007).

Os requisitos de missão, apresentam maior especificidade em relação as necessidades, e descrevem o propósito do sistema espacial em termos do que deve ser alcançado, sem impor soluções técnicas. Dessa maneira, asseguram que os objetivos principais da missão sejam atingidos de forma eficiente, dentro das restrições impostas. Exemplos incluem vida útil mínima, tipo de órbita e desempenho da carga útil (Asundi; Fitz-Coy, 2013; Cappelletti; Robson, 2021; NASA, 2007).

Após a definição dos requisitos de missão, são estabelecidos os requisitos de sistema, que especificam como os segmentos espacial, de solo e de lançamento devem ser projetados e operados para atender aos objetivos estabelecidos. Em seguida, são derivados os requisitos técnicos dos subsistemas e de seus componentes, detalhando as características necessárias para garantir a realização das funções com o desempenho esperado. Esse encadeamento descendente assegura a rastreabilidade desde a declaração da missão até as especificações de menor nível, evitando lacunas e mantendo o alinhamento com as declarações de alto nível (Asundi; Fitz-Coy, 2013; Cappelletti; Robson, 2021; NASA, 2007).

No contexto europeu, a metodologia da ECSS apresenta um processo análogo, estruturado de acordo com o modelo V, apresentado anteriormente. Os requisitos são inicialmente definidos nas fases descendentes do ciclo de vida, sendo progressivamente refinados conforme novas análises, simulações e restrições surgem ao longo do desenvolvimento análises, simulações e testes. Nas fases ascendentes do V, ocorre a integração e a verificação dos requisitos (ECSS, 2009; ECSS, 2017).

A identificação de requisitos concentra-se nas fases 0, A e B do ciclo de vida, iniciando-se com uma visão geral e evoluindo progressivamente para maior nível de detalhe. Nessa etapa, são declarados os objetivos da missão, avaliados os possíveis conceitos e elaborado o documento de especificações técnicas (Technical Specification - TS), documento que traduz necessidades, ambiente e restrições em requisitos técnicos preliminares (ECSS, 2009).

A TS constitui o documento central do processo de declaração de requisitos segundo a ECSS. Sua evolução ocorre pela análise de conceitos alternativos, pela seleção do conceito mais adequado e pela incorporação de ajustes sucessivos até alcançar uma versão final. Ao final da fase B, os requisitos são revisados e validados,

assegurando que a solução proposta atenda às metas e objetivos da missão e seja, assim, formalmente consolidada (ECSS, 2009).

Dessa forma, nota-se a similaridade entre as normas, visto que tanto a NASA quanto a ECSS estruturam o processo de declaração de requisitos como um fluxo hierárquico, onde necessidades e expectativas das partes interessadas são traduzidas em requisitos de missão, requisitos de sistema e, posteriormente, de subsistemas e componentes (ECSS, 2017; NASA, 2007).

2.3.7. Verificação de Requisitos

Além da declaração, a verificação dos requisitos é um processo fundamental no desenvolvimento de um sistema espacial, cujo propósito é assegurar que cada requisito definido seja efetivamente atendido pelo sistema desenvolvido. Como destacado anteriormente, esse processo ocorre no lado ascendente do modelo V (ECSS, 2017; ECSS, 2010).

É importante destacar a diferença entre os conceitos de verificação e validação. Em termos gerais, a verificação avalia se o produto satisfaz as condições impostas, enquanto a validação examina se o produto irá atender às necessidades reais dos usuários. Em outras palavras, verifica-se se o sistema foi construído corretamente, enquanto se valida se foi construído o sistema correto (ECSS, 2010).

Os objetivos detalhados do processo de verificação incluem (ECSS, 2010):

- Demonstrar a qualificação do projeto e do desempenho em conformidade com os requisitos especificados;
- Garantir que o produto esteja em conformidade com o projeto qualificado, livre de defeitos de fabricação e apto para uso;
- Confirmar a integridade e o desempenho do produto em etapas específicas do ciclo de vida, como lançamento, comissionamento, eventos de missão e finalização.

Para atingir esses objetivos, a verificação pode ser conduzida por diferentes métodos, cada um adequado a tipos específicos de requisitos. A análise representa o método mais utilizado nas etapas iniciais, envolvendo cálculos teóricos, modelagens e simulações computacionais que permitem demonstrar a conformidade com os

requisitos sem a necessidade imediata de ensaios físicos. Por sua vez, os testes consistem na realização de experimentos controlados, em condições reais ou simuladas, com o objetivo de confirmar previsões obtidas na análise e verificar o desempenho do sistema em cenários operacionais (ECSS, 2010).

A revisão de projeto é outro método de verificação e ocorre em marcos específicos do desenvolvimento, quando especialistas avaliam as soluções de engenharia adotadas e sua aderência aos requisitos definidos, além de identificar ajustes necessários. Por fim, a inspeção envolve a verificação visual ou física de componentes, subconjuntos ou interfaces, assegurando conformidade com as especificações e normas aplicáveis e contribuindo para a integridade do produto final (ECSS, 2010).

2.4. CONTEXTUALIZAÇÃO DA MISSÃO

Desde o início, o projeto FritzSat teve como foco principal a coleta de dados do território amazônico, com o objetivo de avaliar e mitigar os impactos do desmatamento. A expansão agropecuária, a extração ilegal de madeira e a construção de infraestrutura são alguns dos fatores que têm contribuído significativamente para esse processo, resultando em um crescimento expressivo das áreas desmatadas. A Figura 6 ilustra a redução da cobertura vegetal em contraste com o avanço das áreas destinadas à agricultura e, principalmente, às pastagens, no período de 1985 a 2024 (Imazon, 2014; BRASIL, 2020).

Em sua concepção inicial, o FritzSat foi idealizado como um nanossatélite de imageamento voltado para a identificação de áreas desmatadas. Contudo, a análise de outros problemas ambientais, como as queimadas e os incêndios descontrolados, ampliou o escopo da missão, uma vez que tais fenômenos afetam gravemente o bioma amazônico, com impactos que incluem danos diretos à fauna e flora, a emissão de gases de efeito estufa e a alteração do regime de chuvas (Eller, 2020; Marengo; Souza Junior, 2018).

Além disso, a bacia amazônica, que abriga o maior rio do mundo em volume de água, o rio Amazonas, é um sistema ecologicamente complexo e extremamente sensível às mudanças climáticas e às atividades humanas, como o desmatamento e a construção de barragens, que intensificam os impactos ambientais na região. O desmatamento e as queimadas podem afetar o ciclo hidrológico, modificando o

2.4.1. FritzSat Tata: monitoramento de incêndios

A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical úmida do planeta, caracterizada por clima quente, elevados índices de precipitação e notável diversidade biológica, configurando-se como a maior reserva de biodiversidade terrestre. Sua extensão corresponde a aproximadamente 49% do território brasileiro, representando um terço das reservas mundiais de florestas tropicais úmidas, 20% da disponibilidade global de água doce superficial e importantes reservas minerais (BRASIL, 2025; Marengo; Souza Junior, 2018).

Nas últimas décadas, a região tem enfrentado profundas alterações em seus regimes climáticos, em que o padrão anterior de duas estações bem definidas (uma chuvosa e outra menos chuvosa) deu lugar a extremos que variam entre inundações severas e secas intensas, com impactos diretos sobre ecossistemas e populações locais. Nesse sentido, as queimadas exercem grande influência sobre esse cenário, uma vez que contribuem para a emissão de gases de efeito estufa e para o acúmulo de carbono na atmosfera, agravando o processo de mudanças climáticas (Fearnside, 2022; Lemos; Silva, 2011; Marengo; Souza Junior, 2018)

Além disso, o uso extensivo e desordenado do fogo constitui um dos principais fatores de degradação ambiental na Amazônia. Essa prática provoca a mortalidade de árvores e a secagem do sub-bosque, o que torna o ambiente progressivamente mais suscetível a novas queimadas, que apresentam temperaturas mais elevadas a cada ocorrência (Fearnside, 2022). Como evidência, o ano de 2019 registrou 89.178 focos de queimadas, um aumento de 30% em relação a 2018 e o maior índice desde 2010, confirmando a crescente vulnerabilidade da floresta a incêndios recorrentes (Eller, 2020).

Nesse contexto, é importante diferenciar dois conceitos relacionados ao uso do fogo: incêndio florestal e queima controlada. Incêndio florestal é definido como fogo descontrolado que atinge a vegetação, podendo ter origem antrópica, por ação intencional ou negligência, ou natural, como descargas elétricas. Em contrapartida, a queima controlada é uma técnica agrícola ou florestal planejada, na qual o fogo é utilizado de forma controlada, restrita a áreas delimitadas e com intensidade regulada (BRASIL, 2010).

Na Amazônia, os incêndios florestais são, em grande parte, exclusivamente de origem antrópica, sendo raros os eventos naturais devido às altas taxas de

precipitação. Nesse contexto, o uso do fogo está diretamente ligado à conversão da floresta em áreas agropecuárias, principalmente para a formação de pastagens extensivas. Além disso, outras práticas incluem o sistema de corte e queima para agricultura de subsistência e a implantação de monocultivos em larga escala (Barcellos *et al.*, 2019; Marengo; Souza Junior, 2018).

Como consequência, as queimadas provocam impactos diretos sobre os ecossistemas, incluindo perda de biodiversidade, alterações na composição vegetal e degradação do solo, aumentando a erosão e empobrecimento de nutrientes. Além disso, a queima de biomassa libera grandes quantidades de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), intensificando o aquecimento global e reduzindo a capacidade da floresta de absorver carbono (Barcellos *et al.*, 2019; Fearnside, 2022).

O nível de gases de efeito estufa atingiu recordes recentes, com o CO_2 acumulando-se na atmosfera mais rapidamente do que em qualquer outro período da história, o que representa um aumento superior a 10% nas últimas duas décadas (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2023). Além disso, em 2024, a temperatura média global ultrapassou 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais, marco estabelecido pelo Acordo de Paris como limite para evitar impactos climáticos catastróficos (COPERNICUS, 2025).

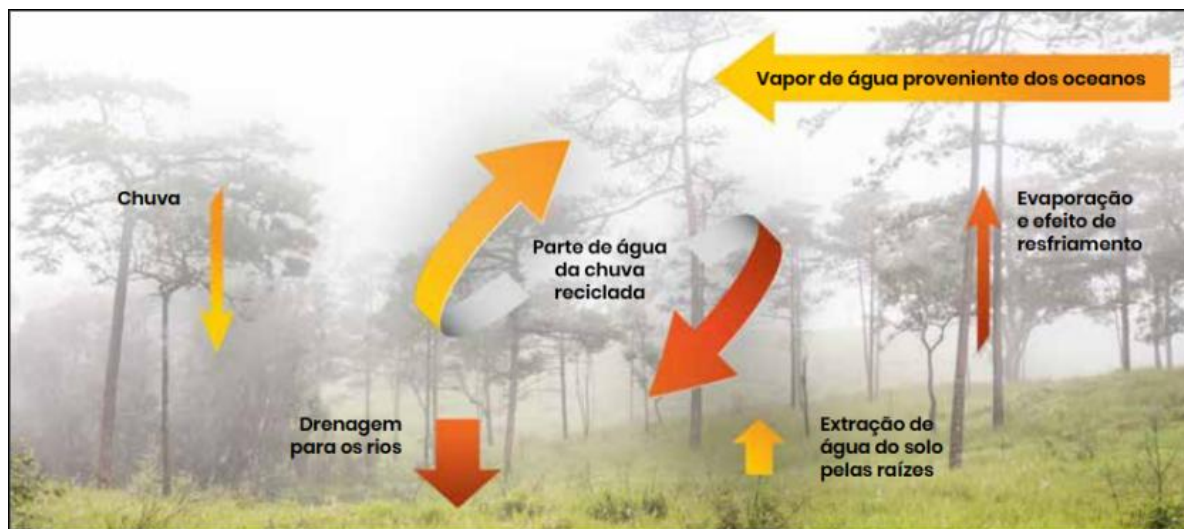
Outro impacto relevante das queimadas relaciona-se ao ciclo hidrológico, pois a redução da cobertura florestal compromete a evapotranspiração, processo responsável por reciclar a umidade da chuva para a atmosfera, como ilustrado na Figura 7. Por meio desse mecanismo, a floresta transporta grandes volumes de umidade, influenciando diretamente o regime de chuvas não apenas na região, mas também em grande parte da América do Sul (Gabardo; Sarzedas; Silva, 2021; Marengo; Souza Junior, 2018; Fearnside, 2022).

Além dos impactos climáticos, as queimadas afetam a saúde pública, uma vez que a emissão de partículas e gases tóxicos aumenta a incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, principalmente em crianças, idosos, gestantes e pessoas com comorbidades (Barcellos *et al.*, 2019). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022), cerca de 99% da população mundial respira ar poluído, fato que resulta em 7 milhões de óbitos anuais.

Diante dessas consequências, métodos de detecção e monitoramento são essenciais para planejar ações de controle e avaliar os impactos ambientais do fogo.

Desde o lançamento do Landsat em 1972, sensores orbitais têm permitido detectar alterações na cobertura florestal e identificar focos de calor a partir de bandas termais e infravermelho médio (Batista, 2004).

Figura 7 – Ciclo hidrológico em ecossistemas florestais



Fonte: Marengo; Souza Junior (2018)

Nas últimas décadas, o Brasil tem se beneficiado dos avanços em sensoriamento remoto e processamento de imagens, possibilitando a análise de padrões espaciais e temporais do desmatamento e das queimadas. Instituições como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e a Fundação Estadual do Meio Ambiente de Mato Grosso (FEMA-MT) geram dados e relatórios com metodologias próprias. Embora distintas e baseadas, em grande parte, em satélites estrangeiros, essas abordagens contribuem de forma complementar para o monitoramento ambiental e para a formulação de políticas públicas contra o desmatamento (Margulis, 2003; Batista, 2004).

Adicionalmente, projetos colaborativos como o MapBiomas, criado em 2015, ampliaram ainda mais a capacidade de monitoramento. Com presença em 14 países, incluindo toda a América do Sul e Indonésia, o MapBiomas fornece bases de dados de alta resolução, fornecidos por sistemas espaciais, sobre uso da terra, desmatamento, focos de incêndio e variáveis ambientais, subsidiando políticas públicas e estratégias de conservação (MapBiomas, 2025).

A dimensão territorial do Brasil e a complexidade de seus ecossistemas exigem, no entanto, sistemas de sensoriamento cada vez mais sofisticados, com algoritmos avançados e capacidade ampliada de previsão e resposta a incêndios. Adicionalmente, evidencia-se a necessidade estratégica do desenvolvimento de sistemas próprios nacionais, a fim de garantir a soberania tecnológica no monitoramento ambiental, conforme estabelecido no Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) (Batista, 2004; Brasil, 2021).

Nesse cenário, os CubeSats surgem como uma plataforma tecnológica promissora para suprir parte dessa demanda. Suas características, como baixo custo, maior frequência de revisita e a capacidade de operar em constelações, permitem ampliar significativamente a cobertura espacial e temporal das detecções, além de aumentar a precisão do mapeamento e a eficiência do monitoramento em tempo real (Alanazi; Straub, 2019; Choi; Davis, 2021).

2.5. DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE

O processo de desenvolvimento de produto tem como finalidade estabelecer as especificações finais de projeto, convertendo informações gerais como necessidades do cliente, restrições tecnológicas, exigências do mercado e diretrizes estratégicas da empresa em soluções viáveis de engenharia. Dessa forma, essa etapa se situa na interface entre a empresa e o mercado, buscando propor soluções alinhadas às expectativas do cliente e adequadas ao contexto competitivo (Reitz; Alves; Linhares, 2010).

Ao longo do ciclo de vida do produto, surgem múltiplos requisitos a serem considerados, o que demanda ferramentas que permitam relacionar de forma estruturada as expectativas dos usuários com os requisitos técnicos. Essa necessidade se torna evidente no projeto informacional, fase inicial do desenvolvimento do produto em que ocorre a coleta e a organização das informações de mercado, bem como a definição das especificações que orientarão as etapas subsequentes (Melo Filho; Cheng, 2010; Reitz; Alves; Linhares, 2010).

É nesse contexto que se insere o desdobramento da função qualidade (quality function deployment – QFD), ferramenta aplicada no projeto informacional para apoiar a transformação das informações qualitativas sobre o cliente em especificações de projeto, orientando a engenharia para os aspectos que agregam valor ao usuário

(Melo Filho; Cheng, 2010; Reitz; Alves; Linhares, 2010). Segundo Fonseca (2000), essa fase corresponde ao momento em que informações genéricas são convertidas em requisitos quantitativos, representando os principais problemas técnicos a serem resolvidos.

Diante disso, o QFD constitui um método sistemático que traduz as necessidades e expectativas dos clientes, coletivamente denominadas "Voz do Cliente" (VoC), em parâmetros técnicos para o projeto e a produção. Dessa forma, sua aplicação garante a rastreabilidade dos requisitos do usuário ao longo das etapas do projeto, evitando perdas e distorções (Chan; Wu, 2002; Melo Filho; Cheng, 2010).

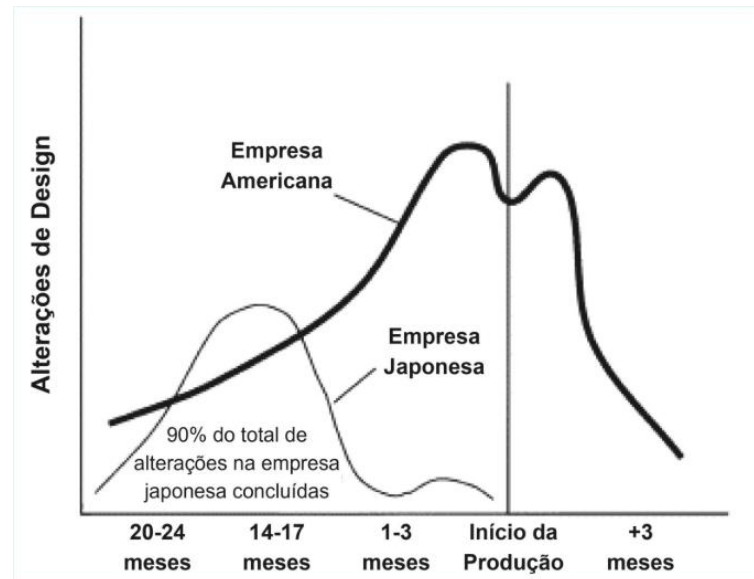
Desenvolvido no Japão na década de 1960 por Yoji Akao e Shigeru Mizuno, o QFD surgiu como uma resposta estratégica ao controle total da qualidade, cenário em que as indústrias japonesas necessitavam de inovações para aumentar a competitividade. Diante disso, esse método foi concebido para garantir a qualidade desde a concepção do projeto, buscando antecipar e prevenir falhas de produção ao garantir que as especificações técnicas estivessem diretamente alinhadas às expectativas dos clientes (Chan; Wu, 2002; Melo Filho; Cheng, 2010).

A concepção original do QFD abrange duas abordagens complementares. A primeira, o desdobramento da qualidade (QD), concentra-se em traduzir a voz do cliente em características de engenharia. Já a segunda, desdobramento da função qualidade no sentido restrito (QFDR), detalha as atividades operacionais e de gestão necessárias para que a equipe execute e mantenha a qualidade planejada. Dessa forma, essas duas abordagens se complementam, uma vez que o QD foca na qualidade do produto sob a ótica do cliente, enquanto o QFDR se concentra nos processos necessários para assegurar essa qualidade (Melo Filho; Cheng, 2010).

A eficácia desse método é evidenciada por sua capacidade de reduzir significativamente as alterações de projeto, principalmente em estágios avançados. A Figura 8 apresenta um gráfico comparativo entre montadoras japonesas que aplicavam o QFD e empresas americanas que não o utilizavam, indicando que estas últimas realizaram um número maior de alterações de design, o que resultou em

atrasos no cronograma e aumento da complexidade dos projetos (Matzler; Hinterhuber, 1998; Melo Filho; Cheng, 2010).

Figura 8 – Comparação das mudanças de design entre montadoras japonesas e americanas



Fonte: Matzler e Hinterhuber (1998)

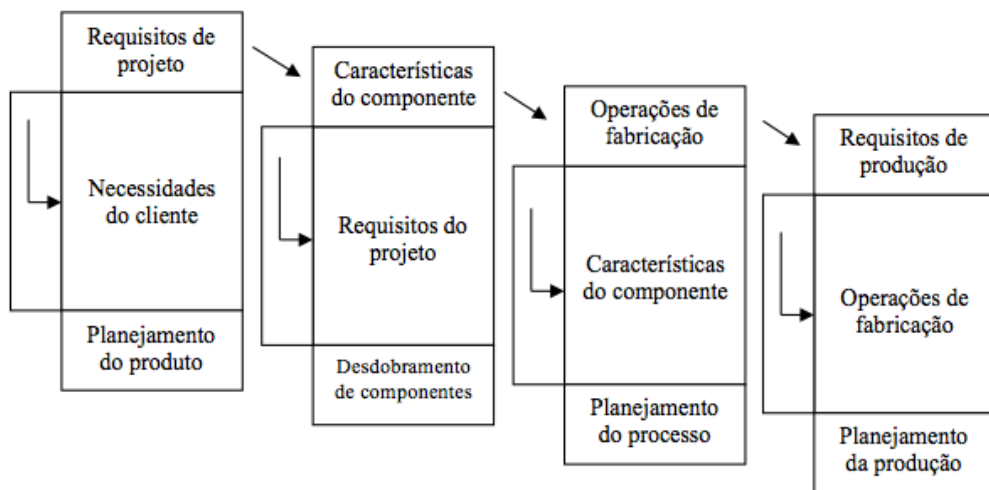
Com sua difusão internacional, especialmente nos Estados Unidos, a metodologia foi adaptada, resultando em uma aplicação frequentemente mais restrita ao desdobramento da qualidade. No Brasil, onde o QFD foi introduzido a partir de 1995, predomina essa abordagem ocidental, aplicada principalmente nos setores automobilístico e de alimentos (Carnevalli; Sassi; Miguel, 2004; Chan; Wu, 2002; Melo Filho; Cheng, 2010).

Na perspectiva ocidental, essa implementação é comumente estruturada em um processo de quatro fases sequenciais, apresentado na Figura 9, no qual o resultado de uma matriz serve como dado de entrada para a seguinte, assegurando a rastreabilidade dos requisitos. As matrizes correspondentes são apresentadas a seguir (Melo Filho; Cheng, 2010):

- Matriz I (Planejamento do produto ou casa da qualidade): converte os requisitos do cliente (os "o quês") em requisitos técnicos priorizados para o produto (os "comos");

- Matriz II (Desdobramento dos componentes): transforma os requisitos técnicos da Matriz I em características de peças e componentes;
- Matriz III (Planejamento do processo): utiliza essas características para orientar a escolha dos processos de fabricação e montagem mais adequados;
- Matriz IV (Planejamento da produção): desdobra os processos em instruções de trabalho e mecanismos de controle para assegurar a qualidade final;

Figura 9 – Matrizes sequenciais do QFD



Fonte: Cheng e Melo Filho (2010)

2.5.1. Casa da Qualidade

A primeira e mais importante matriz do modelo QFD é a casa da qualidade (house of quality - HoQ), assim chamada por sua estrutura gráfica que se assemelha a uma casa, como ilustrado na figura 10. Essa ferramenta é central para a fase de planejamento, pois permite visualizar, de forma clara, a relação entre as necessidades do cliente e as especificações de engenharia do produto. O principal propósito da HoQ é traduzir expectativas subjetivas em metas técnicas, servindo como um guia para o desenvolvimento do produto (Melo Filho; Cheng, 2010; Rozenfeld *et al.*, 2006).

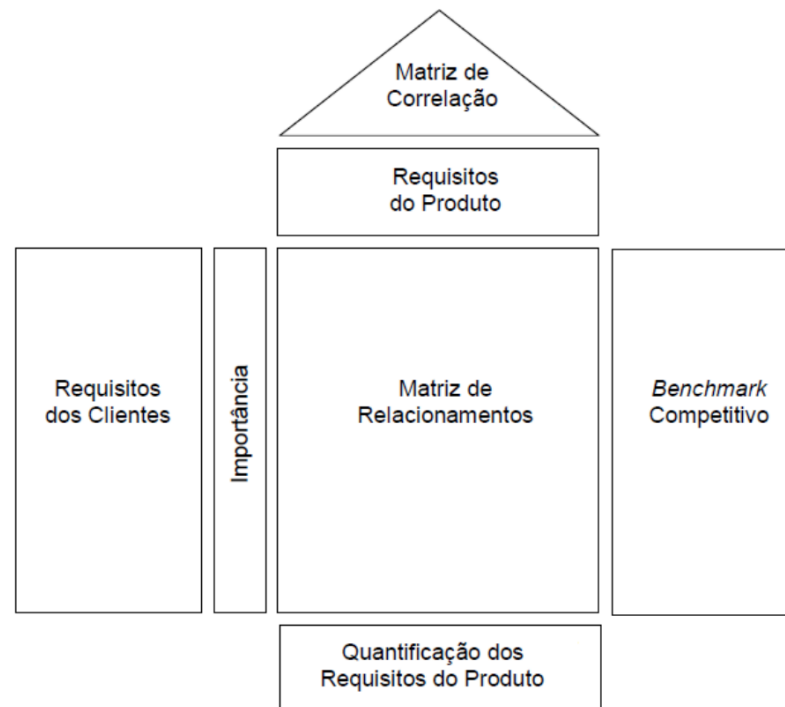
A construção da casa da qualidade, embora possa apresentar variações metodológicas dependendo do autor e da localidade, segue uma sequência lógica de etapas para garantir a integridade da tradução dos requisitos. Os processos estão sendo apresentados a seguir, conforme os trabalhos de Matzler; Hinterhuber (1998) e Rozenfeld *et al.* (2006):

1. Requisitos do cliente (os “o quês”): Esta seção da matriz representa a voz do cliente, listando as exigências e expectativas do consumidor sobre o produto. As necessidades são coletadas por meio de técnicas qualitativas, como entrevistas e grupos focais, em que os dados são expressos na linguagem natural dos consumidores. Posteriormente, essas informações são agrupadas e estruturadas em um formato adequado para o projeto.
2. Nível de importância para o cliente: Após a confirmação dos requisitos de usuário, a equipe atribui um valor numérico para cada especificação, com o intuito de refletir sua prioridade sob a ótica do consumidor. Este passo permite que os recursos do projeto sejam concentrados nos aspectos de maior impacto na satisfação do cliente. Para isso, são utilizadas escalas numéricas, como 1 a 5, 1 a 7, ou 1 a 9, em que o menor valor indica baixa importância e o maior valor representa um requisito de alta prioridade.
3. Benchmark competitivo: Nesta etapa, realiza-se uma análise comparativa de como o produto em desenvolvimento e seus principais concorrentes atendem aos requisitos do cliente já listados. Esta avaliação permite a identificação das forças, fraquezas e oportunidades estratégicas de mercado.
4. Requisitos técnicos do produto (os “comos”): Os requisitos de usuário são traduzidos em requisitos de projeto que são parâmetros mensuráveis e controláveis. Esses requisitos detalham, em linguagem de engenharia, como o produto irá satisfazer cada demanda do consumidor. O princípio da rastreabilidade é crucial, exigindo que cada necessidade do cliente corresponda a, no mínimo, um requisito técnico.
5. Matriz de relacionamento central: Considerada como o corpo da HoQ, esta matriz estabelece e quantifica a correlação entre os requisitos de usuário e os requisitos técnicos do projeto. A intensidade dessa relação é ponderada por meio de uma escala numérica, tipicamente classificada como forte (9), média (3), fraca (1) ou nula (0). A análise da matriz é fundamental para identificar quais características técnicas possuem o maior impacto na satisfação do cliente, orientando a priorização de recursos.
6. Matriz de correlação técnica (telhado): Posicionada no topo da estrutura, a matriz de correlação mapeia as interdependências entre os próprios requisitos técnicos. Seu objetivo é identificar se a alteração em uma característica de

engenharia impacta positivamente ou negativamente as demais. Essa análise de *trade-offs* é crucial para solucionar os desafios de engenharia e otimizar o projeto.

7. Metas técnicas e priorização: Por fim, com base na importância atribuída pelos clientes e na força das relações na matriz central, calcula-se a importância ponderada de cada requisito técnico. Este resultado quantitativo define as metas de projeto e orienta a alocação de recursos, garantindo que as especificações finais estejam alinhadas as prioridades do consumidor.

Figura 10 – Estrutura da matriz casa da qualidade



Fonte: Rozenfeld et al. (2006)

Dessa forma, mesmo quando utilizada isoladamente, a casa da qualidade permite explorar as vantagens da avaliação matricial entre necessidades do cliente e requisitos de projeto, servindo como um recurso importante para a definição das especificações do produto, mesmo sem englobar todo o desdobramento do QFD. De modo geral, essa metodologia proporciona clareza e rastreabilidade para as especificações, apoiando a tomada de decisões e contribuindo para a melhoria da qualidade (Fonseca, 2000; Melo Filho; Cheng, 2010).

2.5.2. Tabela de Tradução

No desenvolvimento de produtos, um dos principais desafios é converter as necessidades dos clientes, muitas vezes subjetivas e imprecisas, em requisitos objetivos e mensuráveis para orientar a equipe de projeto. Para auxiliar nesse processo, Fonseca (2000) propõe um método de classificação de atributos de produto, que funciona como uma ferramenta de apoio ao gerenciamento de requisitos na fase de projeto informacional.

Inicialmente, o autor destaca a diferença entre os níveis de especificação de um produto, apresentada no Quadro 1, que distingue necessidades, requisitos de usuário, requisitos de projeto e especificações. Em seguida, justifica a escolha do termo atributo em detrimento de característica ou propriedade, argumentando que propriedade é geralmente associado a materiais, enquanto característica descreve algo que já existe. Desse modo, como o projeto informacional ocorre antes da existência física do produto, o termo atributo é mais preciso, pois representa uma qualidade que o produto deverá ter (Fonseca, 2000).

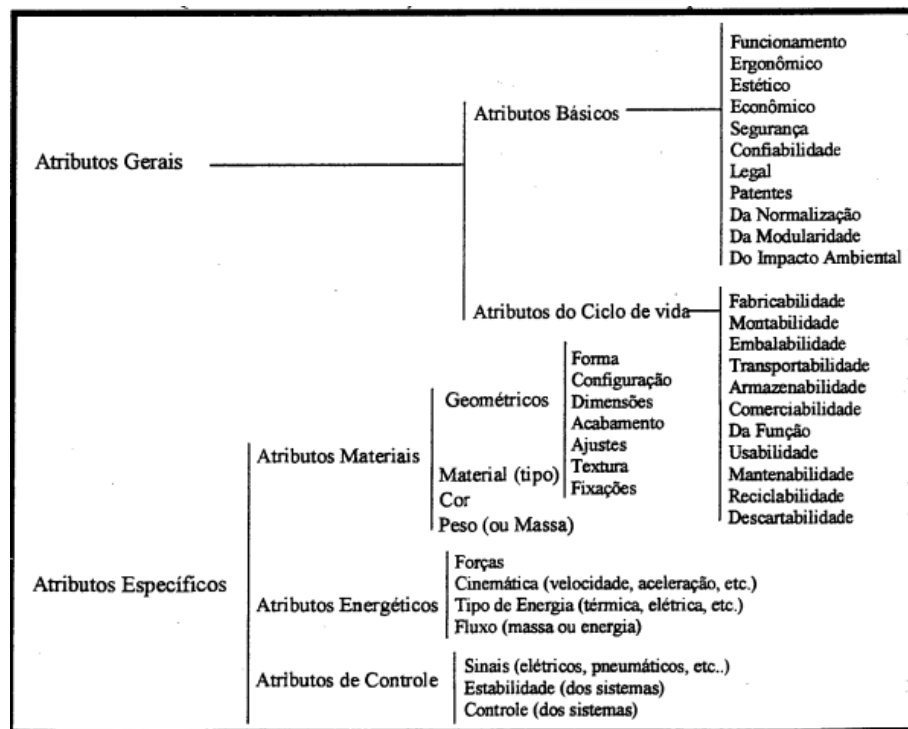
Quadro 1 – Categorias de informação e seus significados no contexto de projeto

Categoria de informação	Significado
Necessidade	Declaração direta de usuário ou cliente
Requisito de usuário	Necessidade em linguagem de projeto
Requisito de projeto	Requisito mensurável, aceito para o projeto
Especificação de projeto	Requisito de projeto especificado

Fonte: Fonseca (2000)

Para criar um guia de projeto que fosse ao mesmo tempo abrangente e conciso, Fonseca (2000) desenvolveu um processo de pesquisa e síntese. O autor analisou diversas listas de verificação (checklists) de produtos propostas por outros autores e, com base em sua experiência em projetos de engenharia, identificou, hierarquizou e consolidou os atributos mais representativos e comuns aos produtos industriais. O resultado deste processo foi uma estrutura de classificação que divide os atributos do produto em dois grandes grupos, que por sua vez são subdivididos, criando uma hierarquia clara. A estrutura completa desta classificação é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Classificação dos atributos de produto proposta por Fonseca



Fonte: Fonseca (2000)

Os grupos são definidos da seguinte forma (Fonseca, 2000):

1. Atributos Específicos: São as características físicas, objetivas e diretamente mensuráveis do produto, como forma, dimensões, cor e peso, responsáveis por configurar os detalhes do produto e por manifestar os atributos gerais. Fonseca (2000) os subdivide em três categorias principais: materiais, energéticos e controle (ou sinal);
2. Atributos Gerais: São características mais abstratas que expressam as respostas do produto às necessidades do cliente e às exigências do seu ciclo de vida. Esses atributos se dividem em dois subgrupos:
 - a. Atributos do Ciclo de Vida: Estão relacionados com as fases pelas quais o produto passa ao longo do seu ciclo de vida, abrangendo aspectos como fabricação, montagem, manutenção e reciclagem.
 - b. Atributos Básicos: Correspondem aos fatores essenciais de competitividade, pelos quais o produto é avaliado no mercado. Incluem

aspectos como desempenho, segurança, economia, ergonomia e estética.

Essa classificação de atributos serve como uma ferramenta de apoio na identificação dos requisitos de um produto, uma vez que oferece aos desenvolvedores uma fonte de atributos potenciais, funcionando como uma espécie de lista de verificação. Além disso, ao estruturar a análise, o método facilita a transformação dos requisitos de usuário em requisitos técnicos que guiarão o desenvolvimento do projeto.

O método busca, portanto, estabelecer ferramentas de apoio à obtenção das especificações de projeto, especialmente através de combinações matriciais das diferentes categorias de atributos. A Figura 12 apresenta um exemplo prático de aplicação da ferramenta, em que os atributos básicos são cruzados com as fases do ciclo de vida para realizar a identificação dos requisitos de usuário para uma cadeira escolar.

Figura 12 – Matriz de apoio ao levantamento das necessidades

Ciclo de Vida	Atributos básicos do produto					
	Funcionamento	Ergonomia	Estética	Econômico	Normalização	Modular
Produção		Ter facil soldagem		Ser pintado sem desperdício		
Montagem		Ter facilitada a montagem				
Transporte				Ter facilitado o transporte		
Armazenagem				Ter facilitada a armazenagem		
Função	Ter porta material		Ter cor agradável	Ter estrutura leve		Estrutura resistente
Uso	Ter mesa mais larga, Ter mesa inclinada	Ser ergonômico, Não seja dura				
Manutenção				Ter facilidade de manutenção	Ter uniões normalizadas	

Fonte: Adaptado de Fonseca (2000)

Outra aplicação dessa proposta, ilustrada na Figura 13, demonstra como os requisitos de usuário, posicionados nas linhas da matriz, são relacionados com os atributos específicos do produto, dispostos nas colunas. As interseções entre as linhas e colunas permitem à equipe de projeto avaliar e decidir como cada atributo de design se relaciona com as necessidades do cliente, resultando na geração dos requisitos de projeto correspondentes (Fonseca, 2020).

Figura 13 – Matriz de apoio à conversão dos requisitos de usuário em requisitos de projeto

Requisitos de usuário	Atributos específicos de produto										
	Geométricos	Material	Cor	Peso ou massa	Forças	Cinemática	Tipo Energia	Fluxo	Sinais	Estabilidade	Qualidade
Ter fácil soldagem	Reduzir Juntas										
Ser pintada sem desperdícios	Usar peças similares										
Ter mínimo tempo de produção	Elementos normalizados										
Ter custo mínimo de produção	Mínimo de peças										
Ter facilitada a montagem	Reduzir Juntas										
Ter facilitado o transporte	Formas encaixáveis										
Ter facilitada a armazenagem	Formas empilháveis										
Ter cor agradável		Madeira e tubo	Evitar cores vivas								
Ter estrutura leve	Estrutura modular										
Ter estrutura resistente	Decidir seções dos										
Ter mesa e encosto maiores	Incrementar as áreas de										

Fonte: Adaptado de Fonseca (2000)

Diante disso, a conversão dos requisitos do cliente em requisitos de projeto é uma etapa fundamental no processo de design, uma vez que traduz as necessidades subjetivas dos usuários em parâmetros mensuráveis, que definem as características definitivas do produto. Uma abordagem sistemática, baseada na classificação de atributos, não apenas serve como um método de conversão, mas também permite que a equipe de projeto obtenha um ponto de partida claro e verificável para o desenvolvimento. Esse processo pode ainda ser expandido com a adição de atributos mais específicos, de acordo com a necessidade de cada projeto (Fonseca, 2020).

2.6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista a elevada taxa de falhas observada em projetos de CubeSats, especialmente aqueles desenvolvidos em âmbito acadêmico, Alanazi e Straub (2019) investigaram as origens dessas falhas e como elas podem ser evitadas por meio da aplicação de uma metodologia baseada em engenharia de sistemas. Segundo os autores, até 2017 cerca de 40% dos CubeSats lançados falharam em atingir seus objetivos, principalmente em razão da negligência na fase de concepção do projeto, o que resulta em missões com propósitos pouco claros, requisitos ambíguos e ausência de documentação adequada.

Após apresentar esse cenário de falhas, os autores identificam as principais causas que levam ao insucesso dos CubeSats acadêmicos, focando nos motivos antes do lançamento. Diante disso, destacam-se sete motivos principais (Alanazi; Straub, 2019):

- Excesso de tempo de desenvolvimento, frequentemente superior ao previsto de um a dois anos devido à inexperiência dos participantes ou à evasão de estudantes que se formam antes da conclusão;
- Utilização de componentes comerciais (COTS), escolhidos por seu menor custo em comparação a componentes espaciais qualificados, mas que apresentam funcionalidade limitada;
- Falta de infraestrutura de testes, que compromete a verificação do desempenho;
- Problemas na análise de requisitos, decorrentes de falhas de comunicação entre desenvolvedores e partes interessadas;
- Inexperiência das equipes, que aprendem por tentativa e erro e nem sempre permanecem até o término do projeto;
- Ausência de documentação adequada, que dificulta a continuidade e o acompanhamento técnico das atividades.

Em seguida, com o objetivo de identificar os fatores que mais influenciam o sucesso das missões, os autores apresentam um estudo estatístico realizado com 120 estudantes envolvidos em projetos de CubeSat. Os resultados indicaram que a probabilidade de êxito é significativamente maior quando a equipe consegue cumprir os requisitos de projeto, especialmente no que se refere ao desempenho técnico, a integração de subsistemas, a potência e a comunicação (Alanazi; Straub, 2019).

Esse fator apresentou a maior correlação com o sucesso da missão, se sobressaindo em relação a outros aspectos analisados, como a redução do tempo de desenvolvimento e as soluções de design. Com isso, conclui-se que o sucesso de um CubeSat universitário depende, sobretudo, de um projeto bem estruturado e executado conforme seus objetivos previamente definidos (Alanazi; Straub, 2019).

Por fim, os autores propõem uma metodologia de engenharia de sistemas adaptada ao contexto acadêmico, com o propósito de garantir rastreabilidade,

consistência e verificação de requisitos. Essa abordagem enfatiza conceitos como o ciclo de vida do sistema, a identificação dos subsistemas e interfaces, bem como as atividades associadas à definição, validação e verificação de requisitos. O objetivo dos autores é estabelecer um modelo de referência, fundamentado nas dificuldades observadas, que possa ser aplicado em projetos futuros, contribuindo para reduzir custos e tempo de desenvolvimento (Alanazi; Straub, 2019).

Nesse mesmo sentido, Ndao et al. (2024) apresentam uma metodologia voltada à definição de requisitos para CubeSats, com o objetivo de reduzir a elevada taxa de falhas observada nesse tipo de projeto. Para isso, os autores propõem o desenvolvimento de uma estrutura capaz de orientar as práticas de engenharia de sistemas, assegurando sua adaptação às particularidades desses nanossatélites e sua conformidade com os padrões consolidados do setor espacial.

Apesar de destacar a importância da aplicação da engenharia de sistemas, o trabalho ressalta que a complexidade e o nível de exigência das normas existentes, tornam sua aplicação pouco viável para CubeSats, que geralmente operam com poucos recursos, prazos reduzidos e equipes limitadas. Tendo isso em vista, os autores propõem um procedimento que combina a norma ISO 29110, adotada como estrutura base por sua organização, com requisitos de entrega selecionados da ECSS-E-ST-10C, escolhidos conforme sua relevância e aplicabilidade ao desenvolvimento de CubeSats (Ndao et al., 2024).

O método de construção da proposta é estruturado em três etapas principais. A primeira consiste na comparação entre as normas, de modo a analisar a compatibilidade entre a estrutura de processos, atividades e tarefas. Em seguida, realiza-se a seleção dos requisitos mínimos, com o apoio de especialistas, considerando como relevante os requisitos que contribuem para o gerenciamento da complexidade do projeto sem impactar de forma significativa seus custos ou cronogramas. Por fim, os requisitos selecionados são integrados às tarefas da ISO, por meio de ajustes textuais, inclusão de instruções complementares e, quando necessário, criação de novas tarefas (Ndao et al., 2024).

A primeira versão dessa metodologia foi aplicada no projeto ExpleoLissa, dedicado ao desenvolvimento de um nanossatélite reconfigurável em órbita. Os resultados preliminares indicam que a combinação entre as normas gerou uma abordagem promissora para padronizar processos, reduzir riscos e aprimorar a qualidade dos projetos de CubeSats. Ainda assim, os autores ressaltam a

necessidade de simplificar determinados processos e expandir a análise para outros ramos da ECSS, especialmente o de verificação de requisitos (Ndao *et al.*, 2024).

Seguindo essa mesma linha de pensamento, Kwon *et al.* (2023) apresentam uma nova estrutura para o desenvolvimento de sistemas espaciais, voltada à melhoria do método tradicional de engenharia de sistemas. O objetivo é criar uma abordagem complementar capaz de esclarecer a conexão entre os objetivos da missão e os requisitos técnicos finais, além de estabelecer critérios quantitativos para avaliar alternativas de projeto e otimizar o sistema final.

Dentro dessa abordagem, uma das ferramentas centrais é a Quality Function Deployment (QFD), também conhecida como casa da qualidade. Esse processo é empregado para converter as necessidades dos clientes em requisitos de projeto mensuráveis e avaliar as correlações entre essas especificações, por meio da atribuição de pesos de importância que expressam a força de cada relação. Por meio dessa aplicação, é possível estabelecer uma hierarquia de requisitos priorizados, que serve de base para as etapas subsequentes do projeto, como análises, modelagem e verificação (Kwon *et al.*, 2023).

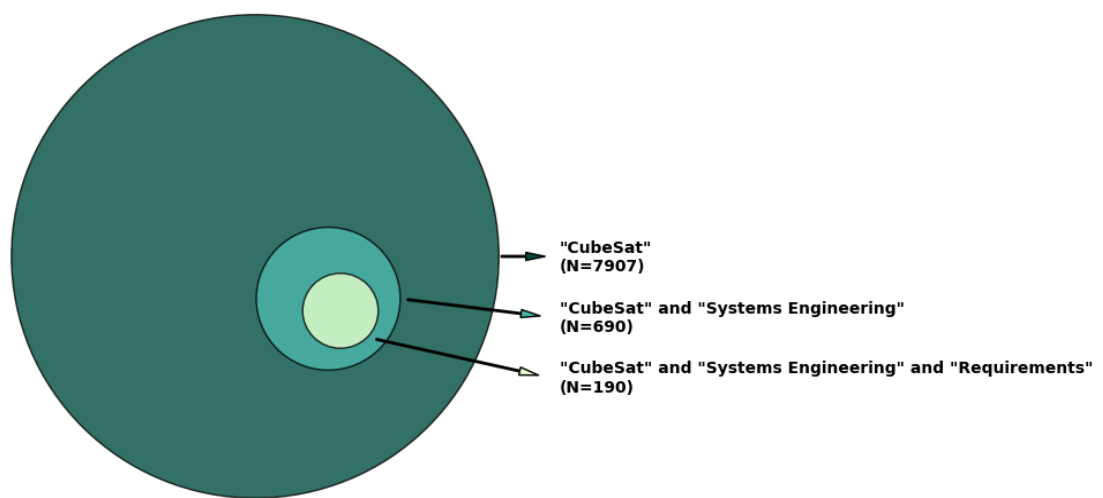
A aplicação da metodologia no desenvolvimento de um satélite de comunicações demonstrou que o uso do QFD proporciona uma visão integrada do projeto, aumentando a coerência entre os objetivos e os requisitos mapeados. Além disso, os autores destacam sua relevância para a rastreabilidade e priorização das especificações, bem como para o estabelecimento de métricas quantitativas de desempenho, fortalecendo o vínculo entre a concepção da missão e a definição das soluções de engenharia (Kwon *et al.*, 2023).

Apesar das vantagens apresentadas, o estudo ressalta que a aplicação do QFD pode se tornar complexa quando o projeto envolve diversas arquiteturas possíveis para atender aos objetivos de missão, o que tende a aumentar o tempo de desenvolvimento. Ainda assim, os autores concluem que o QFD desempenhou um papel importante na tradução das necessidades em requisitos técnicos, na priorização dessas especificações e no apoio ao processo de tomada de decisão (Kwon *et al.*, 2023).

Embora estudos recentes tenham avançado no tema, ainda se observa uma lacuna na literatura sobre metodologias de engenharia de sistemas e definição de requisitos aplicadas a CubeSats. Dos 7.907 trabalhos encontrados na plataforma SCOPUS para o termo “CubeSat”, apenas uma parcela aborda simultaneamente

CubeSats, engenharia de sistemas e requisitos, indicando que a maior parte das pesquisas se concentra em outros aspectos do desenvolvimento. Para ilustrar essa diferença, a Figura 3 apresenta a relação proporcional das publicações no período de 2000 a 2025, utilizando filtros de palavras-chave progressivos: “CubeSat”, “CubeSat” AND “Systems Engineering” e “CubeSat” AND “Systems Engineering” AND “Requirements”.

Figura 14 – Análise comparativa entre quantidade de trabalhos produzidos



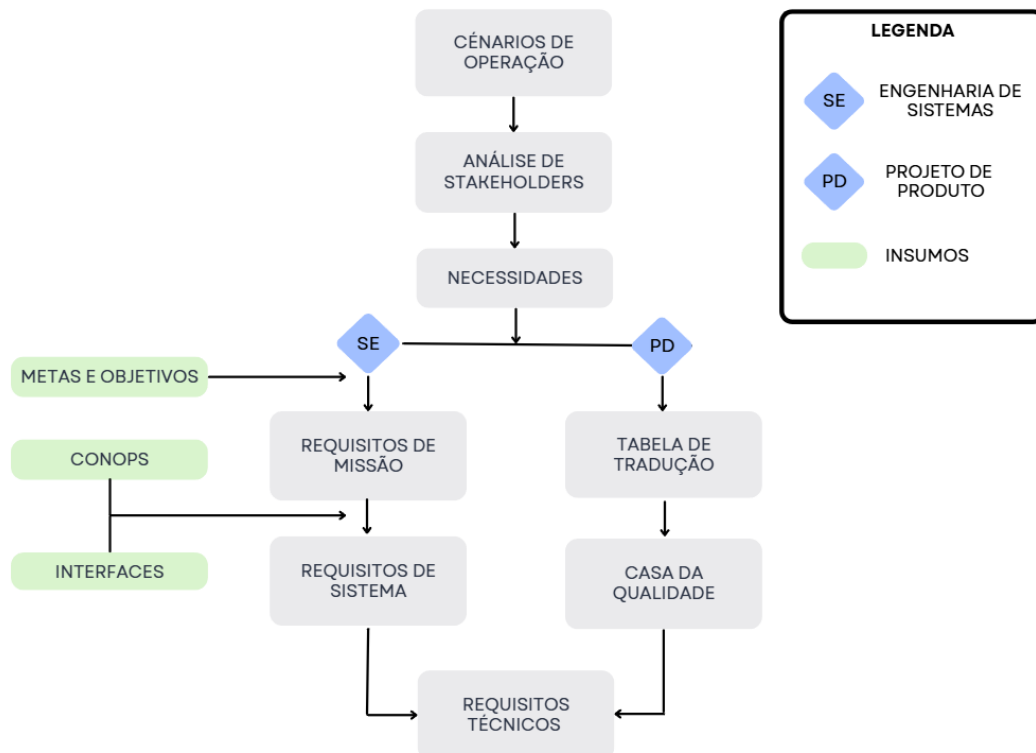
Fonte: Autor (2025)

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para a definição dos requisitos de missão, de sistema e técnicos para os componentes da carga útil do CubeSat FritzSat Tatá, desenvolvido com o propósito de identificar e monitorar incêndios na região amazônica. O trabalho adota duas abordagens complementares para a tradução das necessidades em requisitos técnicos, permitindo a comparação entre métodos de diferentes áreas de conhecimento: a engenharia de sistemas e o projeto de produto.

O fluxograma apresentado na Figura 15 ilustra a sequência das etapas realizadas na metodologia, destacando as atividades de cada abordagem e os insumos utilizados no processo de obtenção dos requisitos. O diagrama apresenta o fluxo sequencial das análises conduzidas, desde a identificação das necessidades até a definição dos requisitos técnicos, evidenciando a integração entre as abordagens de engenharia de sistemas e de projeto de produto.

Figura 15 – Fluxograma das etapas adotadas para obtenção dos requisitos



Fonte: Autor (2025)

A primeira abordagem, fundamentada na engenharia de sistemas, foi conduzida de acordo com as diretrizes estabelecidas pelas normas da ECSS, complementadas por recomendações do manual da NASA. Essa metodologia segue o princípio de decomposição hierárquica, partindo das necessidades e restrições dos stakeholders, declarações de alto nível, até a formulação dos requisitos técnicos. Diante disso, esse processo compreendeu as seguintes etapas:

1. Identificação dos stakeholders e levantamento de necessidades, com base em revisões documentais e reuniões;
2. Definição das metas e objetivos da missão, estabelecendo o alinhamento entre as necessidades e o propósito do sistema;
3. Declaração dos requisitos de missão;
4. Gestão e mapeamento de interfaces, determinando as relações internas e externas do CubeSat;
5. Definição preliminar dos componentes da carga útil;
6. Desenvolvimento do conceito de operações (ConOps), descrevendo os modos de operação e cenários de missão;
7. Formulação dos requisitos de sistema e de payload, derivados diretamente dos requisitos de missão e apoiados pelas análises anteriores.

Esse procedimento tem como objetivo principal estabelecer uma linha metodológica estruturada e rastreável, capaz de transformar necessidades qualitativas em parâmetros técnicos verificáveis, a partir de insumos que facilitem a identificação, a organização e a tradução das informações ao longo do processo de desenvolvimento. Ressalta-se que as etapas iniciais referentes à constelação FritzSat foram conduzidas de forma colaborativa pela equipe do Laboratory of Applications and Research in Space (LARS) da Universidade Federal de Santa Catarina.

A segunda abordagem, vinculada à engenharia de projeto de produto, tem como propósito avaliar o potencial de ferramentas consolidadas nessa área para aprimorar o processo de definição de requisitos em sistemas espaciais. Com isso, aplicou-se duas ferramentas principais:

- Matriz casa da qualidade (QFD): utilizada para estabelecer a correlação entre as necessidades dos stakeholders e os requisitos técnicos do sistema,

permitindo priorizar funções, identificar possíveis lacunas e avaliar relações de dependência e conflito entre os requisitos (*trade-offs*);

- Tabela de tradução: empregada nas etapas iniciais do desenvolvimento do produto, com a finalidade de converter de forma estruturada as necessidades dos usuários em requisitos mensuráveis, verificáveis e rastreáveis.

Diante disso, a metodologia empregada neste trabalho busca comparar a abordagem tradicional da engenharia de sistemas com o uso de ferramentas de projeto de produto, a fim de avaliar como essas metodologias podem ser integradas para tornar o processo de definição de requisitos em CubeSats mais simples, ágil e completo. Essa avaliação permite identificar as vantagens e limitações de cada abordagem, destacando o potencial das ferramentas de projeto de produto em complementar e enriquecer o processo tradicional de engenharia.

3.1. IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS STAKEHOLDERS

O processo de definição de requisitos iniciou-se pela análise dos stakeholders, uma vez que suas necessidades e restrições influenciam todas as fases subsequentes do desenvolvimento. Tendo em vista a importância desse processo para a missão, realizou-se as seguintes atividades:

- Mapeamento dos stakeholders, incluindo suas relações hierárquicas e funcionais no contexto do projeto;
- Identificação dos interesses, necessidades e expectativas de cada parte em relação ao desenvolvimento da missão;
- Levantamento dos recursos e contribuições de cada parte, como dados técnicos, financiamento e aprovações legais;
- Análise documental de contratos, regulamentos, legislações, relatórios de missões similares e artigos científicos, assegurando a inclusão de todas as partes envolvidas.

No caso da missão FritzSat Tatá, por se tratar de uma iniciativa teórica desenvolvida internamente pelo laboratório e sem cliente final definido, as

necessidades foram inicialmente identificadas em reuniões com os membros da equipe, conforme descrito em Donati et al. (2024). Entretanto, com objetivo de tornar o processo de definição de requisitos mais completo, buscou-se identificar novas necessidades para o FritzSat Tatá em relação ao estudo de Donati et al. (2024).

Com esse intuito, realizou-se pesquisas fundamentadas em missões similares, como a OroraTech e a FireSat, ambas voltadas à detecção precoce de incêndios por CubeSats. Além disso, foram realizadas reuniões com professores e profissionais da área para realizar a validação das necessidades identificadas. Por fim, essas informações foram consolidadas em uma tabela com o intuito de facilitar a identificação nas próximas fases.

Como síntese desse processo, elaborou-se uma *rich picture* com os principais stakeholders do projeto, apresentada na Figura 16, a fim de representar visualmente a complexidade das relações, interesses e contribuições das partes interessadas. A imagem inicial foi construída de forma colaborativa, a partir de esboços individuais produzidos pelos membros da equipe e posteriormente integrados em um modelo único durante reuniões e debates coletivos (Donati *et al.*, 2024). A partir desse modelo, realizou-se a adaptação da figura para o FritzSat Tatá, uma vez que a versão inicial contemplava toda a constelação e novas necessidades foram identificadas nesta etapa.

3.2. DEFINIÇÃO DAS METAS E OBJETIVOS DA MISSÃO

Após a identificação das partes interessadas e o levantamento de suas necessidades, iniciou-se a etapa de definição da missão, bem como de suas metas e objetivos. Essa fase teve início com a consolidação da missão proposta para o FritzSat Tatá, revisitando-se a formulação previamente adotada a fim de garantir o alinhamento com as novas necessidades mapeadas.

Em seguida, realizou-se a declaração das metas e objetivos da missão, por meio de reuniões com a equipe do LARS. Nesta etapa, as metas foram identificadas a partir das necessidades levantadas, de modo que o atendimento a cada uma delas passou a representar, qualitativamente, o sucesso da missão. Logo após, os objetivos correspondentes foram formulados para detalhar as condições e resultados esperados, traduzindo as intenções de cada meta em parâmetros verificáveis.

Em função das novas necessidades identificadas para a detecção de incêndios, foram realizadas modificações na Meta 1 e em seus respectivos objetivos, originalmente apresentados no estudo de Donati et al. (2024), de modo a contemplar os novos requisitos de usuário. Por fim, as metas e os objetivos foram organizados em uma tabela, a fim de facilitar sua identificação, hierarquização e rastreabilidade nas etapas subsequentes.

3.3. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS DE MISSÃO

Com base nas necessidades, metas e objetivos identificados, a etapa seguinte da metodologia consistiu em traduzir essas diretrizes de alto nível em requisitos de missão. Essa fase tem como propósito converter os objetivos em declarações claras, mensuráveis e verificáveis, que representam as exigências operacionais e de desempenho sob a perspectiva do usuário final.

Esse processo foi realizado por meio do desdobramento de cada objetivo, buscando identificar um ou mais requisitos capazes de assegurar seu atendimento. Vale destacar que, a relação entre objetivos e requisitos não é necessariamente única, visto que um mesmo objetivo pode estar associado a diferentes requisitos, assim como um requisito pode contribuir para o cumprimento de mais de um objetivo. Com base nessa análise, elaborou-se uma lista de requisitos de missão, contemplando todas as metas e objetivos estabelecidos.

A fim de garantir a rastreabilidade ao longo de todo o ciclo de vida do sistema, cada requisito de missão foi codificado no formato FST-RM-N, onde FST corresponde ao projeto, RM indica a categoria e N representa a numeração sequencial. Adotou-se essa codificação com o intuito de facilitar a identificação e o acompanhamento de cada requisito, desde a sua origem até a sua implementação no sistema.

Esse processo também foi realizado de forma colaborativa, com o intuito de promover a discussão e a análise conjunta dos requisitos, favorecendo a construção de um conjunto coerente e consensual. Por fim, buscando facilitar a visualização e garantir a rastreabilidade, os requisitos foram organizados em um quadro que os relaciona diretamente às metas e objetivos da missão.

3.4. IDENTIFICAÇÃO DAS INTERFACES

Após a consolidação dos requisitos de missão, a metodologia avançou para a elaboração dos requisitos de sistema, etapa que demanda maior nível de especificidade e maturidade do projeto. Para apoiar esse processo, realizou-se a identificação das interfaces, uma vez que o mapeamento e a formalização das interações do CubeSat são essenciais para identificar os subsistemas e suas respectivas funções necessárias para a realização da missão.

Inicialmente, considerou-se o CubeSat como uma caixa preta, sem detalhamento de seus elementos internos. Essa visão foi gradualmente refinada à medida que as interfaces foram identificadas. O mapeamento iniciou-se pelas relações externas do nanossatélite e, posteriormente, avançou para os subsistemas internos, de modo que cada ponto de interação foi entendido como uma necessidade a ser atendida.

O conjunto dessas interações foi representado em um diagrama do CubeSat, com o objetivo de facilitar a visualização da arquitetura do sistema e a identificação das interfaces críticas associadas ao payload, foco central deste trabalho. Ressalta-se que foram consideradas apenas as principais interfaces que influenciam a carga útil, uma vez que os requisitos de sistema e técnicos são direcionados especificamente a esse subsistema.

Em seguida, elaborou-se um quadro contendo a identificação das interfaces, os elementos envolvidos, uma descrição e a classificação correspondente, organizadas conforme o tipo de interação. Com base nesse mapeamento, foram identificadas as funções básicas do CubeSat e as relações entre seus subsistemas, proporcionando uma visão mais clara da arquitetura do sistema.

3.5. ANÁLISE PRELIMINAR DOS COMPONENTES DA CARGA ÚTIL

A etapa seguinte da metodologia consiste na definição do conceito de operações da missão (CONOPS). Antes dessa formulação, entretanto, foi conduzido um estudo preliminar dos componentes da carga útil, com o objetivo de estabelecer uma referência técnica inicial para a elaboração do conceito.

O FritzSat Tatá tem como propósito central a identificação de incêndios e monitoramento dos danos associados na região amazônica, por meio da aquisição de

dados capazes de indicar sinais de combustão em estágio inicial. Diante disso, nesta etapa, buscou-se identificar os principais componentes utilizados em missões similares baseadas em CubeSats, como a OroraTech, reconhecida pela capacidade de detecção precoce de incêndios (Ororatech, 2024).

Além disso, foram realizadas pesquisas em materiais técnicos e publicações científicas a fim de compreender os desempenhos necessários para a realização da missão. Por fim, realizou-se uma breve análise de mercado com o intuito de identificar equipamentos COTS (Commercial Off-The-Shelf) disponíveis, a fim de verificar sua aplicabilidade à carga útil do FritzSat Tatá.

3.6. DEFINIÇÃO DO CONCEITO DE OPERAÇÕES

Na sequência da definição preliminar do payload, foi elaborado o Conceito de Operações (ConOps) do projeto, com o intuito de descrever de forma integrada como o FritzSat Tatá deve operar ao longo de seu ciclo de vida. Esse processo fornece uma visão clara do funcionamento do sistema espacial em órbita, atuando como elemento de ligação entre os requisitos de missão e os requisitos técnicos que serão definidos posteriormente.

O desenvolvimento do ConOps consistiu na definição dos modos de operação em órbita, elaborados a partir das necessidades levantadas, da identificação dos componentes da carga útil e da análise das interfaces do sistema. Para a execução dessa atividade, além da consulta a normas internacionais do setor espacial, foram analisados documentos técnicos e relatórios de missões anteriores, com o objetivo de fundamentar a seleção dos modos operacionais e assegurar a definição de funções abrangentes e coerentes com o escopo do projeto.

Como forma de consolidar esse processo, foram elaboradas duas representações gráficas complementares. A primeira consiste em um diagrama dos modos de operação, que apresenta as transições possíveis entre os diferentes estados do CubeSat e suas interdependências funcionais. A segunda ilustra o CubeSat em órbita, reunindo os modos operacionais e suas interações com a estação de solo e com o cenário de coleta de dados, com o intuito de simplificar a visualização do funcionamento geral do sistema.

3.7. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS DE SISTEMA

A partir da lista de requisitos de missão, e considerando como insumos o ConOps e as interfaces previamente estabelecidas, realizou-se a declaração dos requisitos de sistema para o FritzSat Tatá. Essa etapa representa o elo intermediário entre o que deve ser alcançado pela missão e o modo como o sistema espacial deve ser projetado, traduzindo as expectativas operacionais em especificações técnicas que definem o desempenho global do sistema, ainda sem detalhamento em nível de subsistemas ou componentes individuais.

O processo foi conduzido de forma estruturada, contemplando três etapas principais:

- Análise dos requisitos de missão: cada requisito foi revisitado e decomposto em um ou mais requisitos de sistema, assegurando rastreabilidade e consistência com as metas e objetivos previamente definidos;
- Consideração do ConOps: foi realizada uma análise detalhada do ConOps para caracterizar o comportamento esperado do sistema em diferentes cenários operacionais, com o objetivo de identificar funções críticas, como aquisição de dados, processamento, priorização e transmissão;
- Análise das interfaces: foram examinadas as interfaces internas e externas com o propósito de mapear restrições e capacidades necessárias, uma vez que a interdependência entre subsistemas influencia diretamente a formulação de requisitos mais realistas e completos.

Assim como na etapa dos requisitos de missão, foi realizada a codificação das especificações identificadas, com o objetivo de assegurar a rastreabilidade ao longo do ciclo de vida do sistema. Cada requisito de sistema foi numerado seguindo a mesma lógica anteriormente aplicada, possibilitando seu acompanhamento.

Para distinguir os tipos de requisitos, adotou-se a seguinte convenção:

- FST-RS-F-XX.YY: para requisitos funcionais;
- FST-RS-D-XX.YY: para requisitos de desempenho;

Onde XX corresponde ao requisito de missão de origem e YY indica a ordem sequencial do requisito de sistema derivado.

3.8. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS TÉCNICOS DO PAYLOAD

Com base nos requisitos de sistema e na definição preliminar dos componentes da carga útil, foi conduzido realizou-se o processo de declaração dos requisitos técnicos do subsistema de payload. Essa etapa tem como objetivo determinar o desempenho mínimo necessário dos componentes responsáveis pela coleta de dados, a fim de atender as necessidades funcionais e de desempenho identificadas nos níveis superiores.

Diante disso, cada declaração do sistema foi analisada e traduzida em parâmetros técnicos específicos, detalhando as características e valores necessários para o atendimento das funções relacionadas ao subsistema de payload. Em seguida, foram estabelecidos requisitos técnicos para orientar o desenvolvimento e assegurar a coerência entre os diferentes níveis de projeto.

Para garantir que todas as especificações fossem representadas, foi realizada uma análise de catálogos de equipamentos COTS, bem como de documentos técnicos de missões anteriores baseadas em CubeSats. Essa atividade teve como objetivo identificar faixas e valores de desempenho adequados para cada requisito, buscando assegurar que o payload atendesse aos objetivos da missão dentro das restrições do sistema.

Assim como nos demais níveis, adotou-se uma estrutura hierárquica de codificação para garantir a rastreabilidade entre as diferentes camadas do projeto. A numeração seguiu o formato FST-RT-P-XX.YY.ZZ, em que:

- XX indica o requisito de missão de origem;
- YY indica o requisito de sistema do qual foi derivado;
- ZZ indica o requisito técnico correspondente ao componente da carga útil;
- P identifica o subsistema de payload.

Por fim, os requisitos identificados foram consolidados em uma tabela, reunindo os requisitos de missão, de sistema e técnicos do payload, de modo a evidenciar sua origem e hierarquia. Essa consolidação foi realizada com o objetivo de fornecer uma

visão integrada e estruturada do projeto, possibilitando a rastreabilidade de cada requisito ao longo do ciclo de vida do sistema.

3.9. DESENVOLVIMENTO DA TABELA DE TRADUÇÃO

Após a identificação dos requisitos por meio da abordagem tradicional, baseada na engenharia de sistemas, buscou-se explorar ferramentas da metodologia de projeto de produto que pudessem ser aplicadas ao processo de desdobramento de requisitos. O objetivo foi tornar a tradução das necessidades em requisitos técnicos mais direta e estruturada, facilitando a identificação, priorização e hierarquização das especificações.

A primeira etapa desse processo consistiu na construção de uma tabela de tradução, elaborada a partir da estrutura proposta por Fonseca (2000) e adaptada ao contexto de missões CubeSat. Essa ferramenta foi concebida para servir como ponto de partida no levantamento das necessidades de usuário e na declaração dos requisitos, auxiliando na sua organização desde as fases iniciais do projeto.

A elaboração da tabela de tradução teve início com a análise de artigos, normas e documentações de missões baseadas em CubeSats, com o objetivo de identificar um conjunto representativo de requisitos de usuário. Além disso, para apoiar esse levantamento, foram conduzidas discussões com professores e profissionais da área, contribuindo para a identificação e validação das especificações listadas.

A partir desse processo, foram identificadas necessidades recorrentes de clientes em missões CubeSat, bem como os requisitos técnicos correspondentes a essas expectativas. Em seguida, consolidou-se essas informações em uma tabela, com o intuito de facilitar o processo de tradução dos requisitos de usuário para requisitos técnicos verificáveis.

Após o mapeamento dessas especificações, realizou-se uma segunda análise com base nas ideias apresentada no trabalho de Fonseca (2000). O objetivo dessa etapa foi identificar perguntas-chave que pudessem apoiar o processo de levantamento das necessidades dos clientes, atuando como um checklist para orientar a formulação dos requisitos de usuário.

Por fim, elaborou-se uma classificação de atributos adaptada ao contexto dos CubeSats, contemplando aspectos como desempenho, confiabilidade e restrições de

recursos. Essa classificação teve como objetivo organizar as informações de forma sistemática, facilitando a identificação das necessidades e sua tradução em requisitos de projeto. Após a elaboração da versão inicial, foram realizadas reuniões de consolidação com os membros do LARS, resultando em uma primeira versão validada da tabela de tradução.

3.10. APLICAÇÃO DA CASA DA QUALIDADE

A matriz casa da qualidade foi desenvolvida após a construção da tabela de tradução, seguindo os princípios da metodologia QFD (Quality Function Deployment). Essa etapa teve como objetivo complementar o processo de desdobramento das necessidades em requisitos técnicos para o FritzSat Tatá, permitindo a análise das relações existentes entre as expectativas dos usuários e as especificações do sistema.

O processo teve início com a análise das necessidades identificadas nas etapas iniciais, seguida da atribuição de pesos de importância para cada item. Para isso, foi utilizada uma escala de cinco pontos, em que 1 representa menor relevância e 5, maior relevância. Como não há um cliente específico para a missão, realizou-se essa classificação de forma colaborativa em reuniões com os membros do LARS.

Em seguida, foi realizada a tradução das necessidades em requisitos técnicos de projeto, garantindo que cada declaração fosse expressa de forma mensurável e verificável. Além disso, também foram definidas as unidades de medida associadas a cada especificação, sendo que algumas possuem caráter binário, avaliadas em sim ou não, como o requisito de criptografia.

Considerando que o processo de tradução pode gerar ambiguidades, em função da diversidade de subsistemas e componentes envolvidos em uma missão CubeSat, a tabela de tradução, desenvolvida na etapa anterior, foi utilizada como ferramenta de apoio para garantir consistência entre as necessidades dos usuários e as especificações de projeto. Além disso, considerando que o número de requisitos influencia diretamente na complexidade da análise, priorizou-se a inclusão daqueles relacionados a aquisição e entrega de dados, bem como aos parâmetros gerais do sistema espacial, como custo e confiabilidade.

Após o processo de tradução, realizou-se a análise de relacionamento entre os requisitos de usuário e os requisitos técnicos, representada na matriz por meio de

símbolos que expressam o grau de correlação, conforme apresentado na Tabela 1. A partir dessas relações, a importância de cada requisito técnico foi calculada pelo somatório ponderado entre a importância da necessidade e o peso da correlação, possibilitando a classificação e priorização dos requisitos técnicos de acordo com a visão dos clientes.

Tabela 1 – Símbolos utilizados na matriz de relacionamento da QFD

Símbolo	Relação	Fator
▲	Forte	9
•	Média	3
▼	Fraca	1
	Nenhuma	0

Fonte: Autor (2025)

Após a definição de prioridades, realizou-se a análise de correlação entre os requisitos técnicos, representada no “telhado” da casa da qualidade. Inicialmente, foram definidos os sentidos desejáveis de variação (aumento, redução ou condição neutra) para cada especificação, buscando identificar se o desempenho ideal corresponde a um valor maior, menor ou indiferente.

Em seguida, realizou-se o preenchimento da matriz de correlação, utilizando a escala de intensidade apresentada no Quadro 2, com o objetivo de representar as interações entre os parâmetros técnicos e apoiar a análise de *trade-offs*. Nessa etapa, buscou-se identificar as interdependências entre os requisitos e compreender como a variação de um parâmetro técnico pode influenciar os demais, contribuindo para uma avaliação mais consistente do desempenho do sistema.

Quadro 2 – Símbolos utilizados na matriz de correlação da QFD

Símbolo	Correlação	Descrição
++	Muito positiva	A melhoria de um requisito facilita significativamente a melhoria de outro
+	Positiva	A melhoria de um requisito facilita a melhoria de outro
	Sem correlação	A melhoria de um requisito não tem impacto direto no outro
-	Negativa	A melhoria de um requisito dificulta ou prejudica a melhoria de outro
--	Muito negativa	A melhoria de um requisito cria um conflito direto com a melhoria de outro

Fonte: Autor (2025)

4. APRESENTAÇÃO DE DADOS

4.1. IDENTIFICAÇÃO DOS STAKEHOLDERS

O processo de definição dos requisitos do projeto teve início com a análise dos stakeholders, etapa fundamental da engenharia de sistemas para a construção da missão, pois as necessidades das partes interessadas orientam todo o desenvolvimento do sistema. A identificação desses atores, acompanhada de suas respectivas contribuições e interesses, constituiu o primeiro resultado intermediário do processo metodológico, servindo de base para a formulação das declarações posteriores.

O cenário considerado para o projeto consiste em uma empresa privada contratando um laboratório vinculado a uma instituição de ensino para o desenvolvimento de uma missão de monitoramento de incêndios. O objetivo principal é obter dados que permitam a identificação inicial de focos, de modo a subsidiar ações de controle e combate às chamadas na Floresta Amazônica. A empresa cliente pode utilizar os dados gerados para uso próprio ou para distribuição a clientes finais, assegurando a integração das informações com relatórios e sistemas de monitoramento já existentes.

Nesse contexto, o Laboratório de Aplicações e Pesquisas em Espaço (LARS), do Departamento de Engenharia da Mobilidade da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), assume o papel de fornecedor do sistema espacial. O projeto FritzSat Tatá encontra-se alinhado aos valores institucionais da universidade, voltados à excelência acadêmica, à inovação e à contribuição para a sociedade. Dessa forma, a missão reflete os três pilares da universidade: ensino, pela capacitação de alunos e docentes; pesquisa, pela busca de soluções para um problema concreto; e extensão, pela aplicação do conhecimento em benefício da comunidade.

Tendo isso em vista, o objetivo central da UFSC como stakeholder é promover a capacitação de alunos, docentes e empresas locais, contribuindo para o fortalecimento do setor espacial em Santa Catarina e no Brasil. Entre os objetivos específicos da universidade, destacam-se a consolidação de metodologias para engenharia de requisitos e design de missão, a formação de profissionais qualificados e a ampliação da visibilidade científica e tecnológica da instituição.

No que se refere ao sistema de solo, a decisão entre desenvolver uma nova estação ou utilizar estruturas já existentes será tomada a partir de uma análise de viabilidade, de modo a garantir o alinhamento com os objetivos institucionais. Como alternativa, considera-se a utilização de infraestruturas consolidadas, como a Estação Multimissão de Natal (EMMN), que poderá oferecer suporte às operações, caso se mostre mais adequada aos objetivos da missão.

Além da universidade, o projeto conta com a participação de uma empresa privada, identificada como cliente principal e financiadora, cujo interesse motivou o desenvolvimento da missão. As necessidades dessa organização orientam o processo de concepção do sistema espacial, com foco na aquisição e no processamento de dados da Amazônia para identificação de incêndios em estágios iniciais e para o monitoramento de suas consequências. Esses dados destinam-se a uso próprio ou à comercialização para usuários finais, como órgãos governamentais e a defesa civil, para ações de prevenção e combate a incêndios, além da comunidade científica.

Paralelamente, a empresa busca explorar comercialmente as tecnologias desenvolvidas e ampliar sua projeção midiática, aspectos que reforçam sua credibilidade no mercado. Além disso, a organização busca a capacitação de colaboradores para a operação independente do CubeSat, promovendo a formação de recursos humanos qualificados e contribuindo para a expansão do setor espacial brasileiro.

O Governo Federal participa como stakeholder por meio de dois objetivos principais. O primeiro refere-se à atuação da Agência Espacial Brasileira (AEB) como facilitadora institucional, assegurando a conformidade do projeto com o Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), documento que estabelece as estratégias para o desenvolvimento da tecnologia espacial no país e para o fortalecimento da autonomia nacional, configurando-se como referência no setor espacial da América do Sul. Dessa forma, essa participação garante o alinhamento estratégico com as diretrizes nacionais e amplia a visibilidade pública do setor espacial brasileiro (BRASIL, 2020). Além disso, a AEB contribui para a captação de recursos financeiros, especialmente por meio de editais de fomento do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

O segundo objetivo do Governo Federal está relacionado com a preservação ambiental, uma vez que o aumento de queimadas e incêndios na região amazônica

tem causado impactos negativos na vegetação e contribuído para o aquecimento global. Nesse contexto, o projeto FritzSat Tatá adquire relevância estratégica ao alinhar-se com as diretrizes governamentais, como a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo, instituída pela Lei nº 14.944, de 2024, cujo propósito é reduzir a incidência e os danos causados pelos incêndios florestais. Essa política destina recursos para pesquisas e iniciativas tecnológicas voltadas ao manejo sustentável do fogo, à restauração de áreas afetadas e à conscientização pública. Além do interesse no projeto, o Governo Federal assume os papéis de financiador e facilitador institucional (BRASIL, 2025).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) participa do projeto por meio de duas de suas principais divisões: o Laboratório de Integração e Testes (LIT) e a Estação Multimissão de Natal (EMMN), considerada uma alternativa caso seja necessário utilizar uma infraestrutura de solo já existente. Dessa forma, o INPE atua como prestador de serviços, oferecendo suporte técnico por meio da execução de testes do sistema e da disponibilização do sistema de solo.

O LIT tem como propósito contribuir para a autonomia nacional, apoiar o setor produtivo e criar o ambiente necessário para o desenvolvimento de projetos espaciais. Nesse contexto, o laboratório é responsável pela qualificação de componentes e sistemas por meio de testes de integração e desempenho em condições diversas, como vácuo, temperaturas extremas e vibrações. Essas atividades asseguram que os satélites atendam às normas de operação espacial, garantindo sua capacidade de sobrevivência em ambiente orbital, a segurança e a conformidade com os requisitos técnicos, o que contribui para evitar falhas e custos elevados (BRASIL, 2021; BRASIL, 2025).

Já a EMMN desempenha um papel central na comunicação e no controle da missão, atuando nas funções de Telemetria, Rastreo e Comando. A estrutura da estação é compatível com diferentes tipos de missão e opera em diversas faixas de frequência e protocolos de comunicação, possibilitando o rastreo, o controle e a transmissão de comandos essenciais ao funcionamento dos satélites. Para sua utilização, o sistema espacial deve atender a requisitos específicos que assegurem a compatibilidade e a correta operação (Jotha, 2020; Hilário Castro *et al.*, 2023).

Por fim, a última parte interessada listada corresponde aos usuários finais dos dados, pertencentes a diferentes setores da sociedade. Além dos órgãos responsáveis pelo combate e prevenção de incêndios, destacam-se organizações não

governamentais voltadas à preservação ambiental, bem como instituições acadêmicas e científicas interessadas em pesquisas sobre os efeitos do fogo na vegetação e na emissão de gases de efeito estufa. Esses clientes são atendidos diretamente pela empresa privada, atuando apenas como usuários dos dados processados e não tendo suas necessidades formalmente declaradas no escopo do projeto.

Entre os grupos de usuários identificados para a missão, destacam-se:

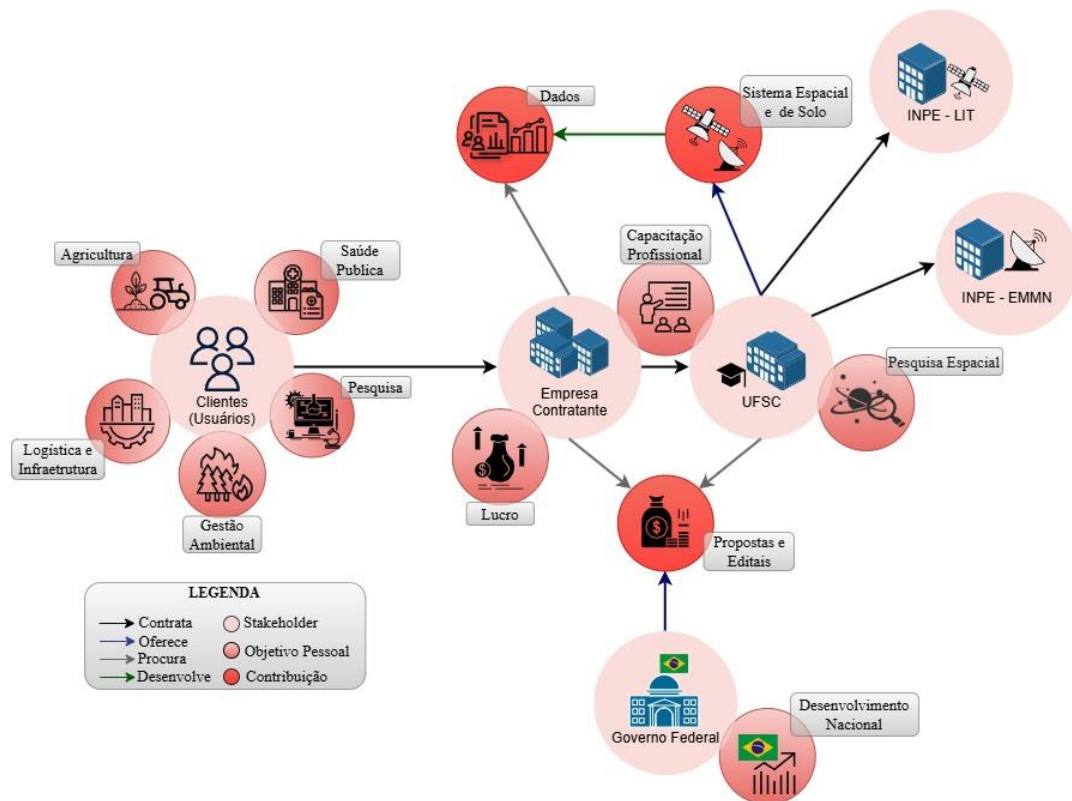
- Gestão ambiental: órgãos governamentais (Defesa Civil, Corpo de Bombeiros, secretarias ambientais) e organizações não governamentais que utilizam os dados para prevenção, alerta e combate a incêndios em tempo real, além do monitoramento e avaliação pós-evento;
- Pesquisa: instituições acadêmicas e centros de pesquisa que utilizam os dados para estudos sobre os efeitos do fogo na vegetação, na biodiversidade e na dinâmica de emissão de gases de efeito estufa;
- Agricultura: produtores rurais e empresas do agronegócio que aplicam os dados multiespectrais em agricultura de precisão, monitoramento da saúde da vegetação e gestão de recursos naturais;
- Infraestrutura e logística: agências de transporte aéreo e terrestre que utilizam informações sobre fumaça e qualidade do ar para o planejamento de rotas e a segurança operacional;
- Saúde pública: órgãos e agências de saúde que utilizam dos dados relativos à dispersão de fumaça e gases para avaliar os riscos à saúde respiratória da população em áreas afetadas por queimadas.

Como síntese desse processo, dois produtos foram gerados para apoiar as etapas subsequentes do projeto. O primeiro corresponde à lista consolidada das necessidades, que serviu de base para a definição das metas e objetivos da missão e para a matriz QFD. Ressalta-se que alguns stakeholders, como fornecedores de componentes, não foram formalmente considerados nesta etapa, embora possam exercer influência sobre o projeto.

Como segundo produto, foi desenvolvida uma *rich picture*, apresentada na Figura 16, como ferramenta visual para representar as relações e a dinâmica entre os

stakeholders. Essa representação gráfica sintetiza as ideias, facilitando a compreensão dos pontos mais relevantes e a consulta geral do projeto. Além disso, o processo de elaboração contribuiu para a identificação e o entendimento das influências de cada cliente, a partir das discussões realizadas durante sua construção.

Figura 16 – *Rich picture* desenvolvida para o FritzSat Tatá



Fonte: Adaptado de Donati *et al.* (2024)

4.2. DEFINIÇÃO DAS METAS E OBJETIVOS DA MISSÃO

A partir da compreensão das necessidades identificadas na etapa anterior, o processo de definição dos requisitos da missão evoluiu para a formulação das metas e objetivos. Essa atividade representa um resultado intermediário fundamental para a declaração dos requisitos, pois estabelece a ligação entre as demandas das partes interessadas e os parâmetros técnicos que orientarão o desenvolvimento do sistema espacial.

Diante disso, as metas e objetivos da missão foram consolidados no Quadro 3, com o propósito de organizar as informações e facilitar sua identificação. As metas (M) representam resultados amplos e de alto nível a serem alcançados pela missão,

enquanto os objetivos (O) correspondem a níveis específicos de desempenho que o sistema deve atingir para viabilizar o cumprimento dessas metas.

Destaca-se que, ao longo do processo, novas necessidades foram mapeadas e alguns objetivos adicionais foram definidos com o intuito de ampliar o escopo da missão e tornar o processo de declaração de requisitos mais completo. No entanto, por implicarem em um aumento da complexidade do sistema, esses objetivos foram classificados como arbitrários (OA), podendo ser revisitados e avaliados após as etapas de viabilidade. A não realização desses objetivos não compromete o sucesso da missão.

Quadro 3 – Metas e objetivos declarados para a missão

Metas	Objetivos
M.1: Disponibilizar dados sobre incêndios e seus impactos na Amazônia	O.1.1: Aquisição de dados para a identificação de incêndios em estágio inicial na Amazônia
	OA.1.2: Aquisição de dados para o mapeamento dos danos provocados pelos incêndios na Amazônia
	OA.1.3: Aquisição de dados para o monitoramento da concentração de gases do efeito estufa na Amazônia, em especial dióxido de carbono (CO ₂) e metano (CH ₄)
	O.1.4: Disponibilização de dados e relatórios em formatos compatíveis com sistemas de monitoramento e combate a queimadas, assegurando atualização periódica.
	O.1.5: Garantia de entrega dos dados com baixa latência, de modo a permitir resposta em tempo hábil.
M.2: Desenvolver documentação legada	O.2.1: Desenvolver metodologia para adaptação das normas de engenharia de sistemas de projetos espaciais para aplicação em projetos de nanossatélites
M.3: Desenvolver tecnologia de imageamento por nanossatélites nacional	O.3.1: Proporcionar acesso de dados ao cliente
	O.3.2: Treinamento dos funcionários
	O.3.3: Desenvolvimento de tecnologia nacional segundo o PNAE
M.4: Adquirir dados de imageamento do território Catarinense	OA.4.1: Aquisição de dados para a identificação de incêndios em estágio inicial no território catarinense
	OA.4.2: Aquisição de dados para o mapeamento dos danos provocados pelos incêndios no território catarinense
	OA.4.3: Aquisição de dados para estimar a concentração de gases do efeito estufa no território catarinense, em especial dióxido de carbono (CO ₂) e metano (CH ₄)

Fonte: Autor (2025)

A primeira meta do projeto foi estabelecida a partir das necessidades identificadas para o FritzSat Tatá e consiste em disponibilizar dados sobre incêndios na Amazônia, apoiando sua identificação em estágios iniciais e o monitoramento dos danos gerados sobre o território. Essa meta reflete a prioridade do projeto em fornecer dados confiáveis para subsidiar ações de prevenção e combate aos incêndios florestais na região amazônica.

Como objetivos primários dessa meta, destacam-se: a aquisição de dados para a identificação de incêndios em estágio inicial na Amazônia, considerado o objetivo central da missão; a garantia de baixa latência na entrega das informações, de modo a permitir resposta em tempo hábil; e a disponibilização de dados e relatórios em formatos compatíveis com sistemas de monitoramento e combate a queimadas, assegurando sua atualização periódica.

Além disso, foram definidos objetivos secundários que complementam a análise de incêndios e ampliam o escopo da missão, sendo estes: a aquisição de dados para o mapeamento dos danos provocados pelos incêndios, abrangendo a extensão das áreas queimadas e os impactos sobre a vegetação; e a aquisição de dados para o monitoramento da concentração de gases do efeito estufa produzidos pelas queimadas, em especial dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄).

A segunda meta do projeto foi definida a partir da necessidade de consolidar o conhecimento adquirido ao longo do desenvolvimento e garantir sua transferência para futuras iniciativas. Essa meta consiste em elaborar documentação legada, cujo objetivo central é desenvolver uma metodologia capaz de adaptar normas de engenharia de sistemas de projetos espaciais para aplicação em projetos de nanossatélites. Com isso, busca-se assegurar que práticas consolidadas no setor espacial possam ser aplicadas e ajustadas às particularidades desses sistemas, contribuindo para garantia de qualidade e segurança no desenvolvimento de futuras missões.

A terceira meta foi estabelecida em função da necessidade de ampliar a capacidade tecnológica nacional no setor espacial, com foco em nanossatélites. Essa meta prevê o desenvolvimento de tecnologia nacional de imageamento, fortalecendo a competência técnica do país nessa área. Para isso, foram definidos objetivos que envolvem a disponibilização dos dados de imageamento gerados aos clientes, a capacitação de funcionários da empresa parceira por meio de treinamentos e o desenvolvimento de tecnologia nacional em conformidade com as diretrizes do PNAE.

Por fim, a quarta meta do projeto decorre da necessidade de expandir a missão para outros contextos regionais, mantendo a coerência com a proposta inicial. Essa meta é semelhante a primeira, mas voltada especificamente ao território catarinense, contemplando atividades de monitoramento ambiental em âmbito estadual. Por se tratar de uma meta secundária, sua não realização não compromete o sucesso da missão principal. Ainda assim, sua inclusão amplia o escopo do projeto, permitindo explorar aplicações em diferentes biomas e fortalecendo o portfólio da empresa cliente.

Diante disso, as metas e objetivos forma a base do projeto, estabelecendo as diretrizes que orientam a formulação dos requisitos e asseguram a coerência entre as diferentes etapas de concepção da missão. A consolidação dessas informações em uma única tabela facilita a consulta e o rastreamento das declarações de alto nível nas fases seguintes do desenvolvimento do sistema.

4.3. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS DE MISSÃO

Como primeiro resultado deste trabalho, destaca-se a lista de requisitos de missão do FritzSat Tatá, derivados das metas e objetivos apresentados na etapa anterior. Essas especificações traduziram as diretrizes de alto nível, associadas aos interesses das partes envolvidas, em declarações claras que descrevem o propósito do sistema espacial em termos do que deve ser alcançado, sem impor soluções técnicas ou de desempenho.

Os requisitos de missão identificados foram consolidados juntamente com as metas e objetivos no Quadro 4, apresentado a seguir. Além de permitir a visualização clara das relações entre requisitos e objetivos, essa estrutura reforçou a rastreabilidade, ao indicar a origem do requisito, facilitando futuras revisões e atualizações durante o desenvolvimento do sistema.

Cada declaração foi redigida conforme as diretrizes da ECSS, assegurando que os requisitos fossem claros, verificáveis, rastreáveis, necessários, singulares e não ambíguos, contendo as informações necessárias para sua compreensão e futura verificação. Com isso, cada item foi codificado segundo o padrão FST-RM-XX, o que garantiu a rastreabilidade e organização. Além disso, essa codificação facilitou a identificação, a tradução e a integração entre os diferentes tipos de requisitos.

Quadro 4 – Requisitos de missão declarados para o FritzSat Tatá

Metas	Objetivos	Requisitos de Missão
M.1: Disponibilizar dados sobre incêndios e seus impactos na Amazônia	O.1.1: Aquisição de dados para a identificação de incêndios em estágio inicial na Amazônia	FST-RM-01: Adquirir dados de temperatura do solo do território amazônico, em condições diurnas e noturnas FST-RM-03: Transmitir a integralidade dos dados adquiridos para estações de solo designadas
	OA.1.2: Aquisição de dados para o mapeamento dos danos provocados pelos incêndios na Amazônia	FST-RM-02: Adquirir dados espectrais capazes de estimar a concentração de dióxido de carbono (CO ₂) e metano (CH ₄) sobre a região amazônica FST-RM-03: Transmitir a integralidade dos dados adquiridos para estações de solo designadas
	OA.1.3: Aquisição de dados para o monitoramento da concentração de gases do efeito estufa na Amazônia, em especial dióxido de carbono (CO ₂) e metano (CH ₄)	FST-RM-04: Adquirir dados que permitam a análise da cobertura vegetal e avaliação de áreas afetadas por queimadas FST-RM-03: Transmitir a integralidade dos dados adquiridos para estações de solo designadas
	O.1.4: Disponibilização de dados e relatórios em formatos compatíveis com sistemas de monitoramento e combate a queimadas, assegurando atualização periódica	FST-RM-06: Disponibilizar dados e relatórios sobre incêndios e seus impactos, com atualização mínima diária, em formatos compatíveis com sistemas de monitoramento e programas já utilizados por órgãos ambientais e de defesa civil FST-RM-07: Assegurar a atualização periódica dos dados e relatórios disponibilizados, com frequência mínima diária
	O.1.5: Garantia de entrega dos dados com baixa latência, de modo a permitir resposta em tempo hábil.	FST-RM-05: Garantir a disponibilização de informações críticas sobre a detecção de incêndios em até 15 minutos após a coleta

Fonte: Autor (2025)

Como o foco deste trabalho são os requisitos associados ao subsistema de payload, apenas os requisitos de missão da Meta 1 foram definidos. Essas declarações estabeleceram as condições necessárias para a aquisição de dados voltada à detecção de incêndios em estágios iniciais e ao monitoramento dos danos, servindo de base para o desenvolvimento futuro das especificações técnicas da carga útil. Os requisitos derivados dessa meta estão apresentados a seguir, acompanhados de uma breve descrição:

- FST-RM-01: Adquirir dados de temperatura do solo do território amazônico, em condições diurnas e noturnas, de modo a permitir a detecção de anomalias térmicas associadas a incêndios em estágio inicial.
 - Esse requisito é essencial para permitir a detecção e localização de áreas com elevação anômala de temperatura, possibilitando a identificação precoce de incêndios.
- FST-RM-02: Adquirir dados espectrais capazes de estimar a concentração de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) sobre a região amazônica.
 - Esse requisito permite o acompanhamento de variações nas emissões desses gases, reforçando a capacidade de detecção de incêndios e fornecendo dados complementares sobre seus impactos atmosféricos.
- FST-RM-03: Transmitir a integralidade dos dados adquiridos ou priorizados para estações de solo designadas, possibilitando sua integração em sistemas de alerta e relatórios operacionais.
 - Esse requisito assegura que os dados coletados pelo nanossatélite sejam efetivamente recebidos e processados, viabilizando seu uso em relatórios, aplicações de monitoramento e tomada de decisão.
- FST-RM-04: Adquirir dados que permitam a análise da cobertura vegetal e a avaliação de áreas afetadas por queimadas.
 - Esse requisito possibilita a estimativa de índices de vegetação e o acompanhamento da extensão das áreas queimadas, contribuindo para o monitoramento ambiental da região.
- FST-RM-05: Garantir a disponibilização de informações críticas sobre a detecção de incêndios em até 15 minutos após a coleta.
 - Esse requisito busca reduzir a latência na entrega dos dados, permitindo que ações de resposta em campo sejam iniciadas de forma rápida.
- FST-RM-06: Disponibilizar dados e relatórios sobre incêndios e seus impactos, em formatos compatíveis com sistemas de monitoramento e programas utilizados por órgãos ambientais e de defesa civil.
 - Esse requisito assegura a compatibilidade dos produtos da missão com plataformas existentes;
- FST-RM-07: Assegurar a atualização periódica dos dados e relatórios disponibilizados, com frequência mínima diária.

- Esse requisito garante que os produtos da missão sejam mantidos atualizados, assegurando a disponibilidade de informações recentes.

4.4. IDENTIFICAÇÃO DAS INTERFACES

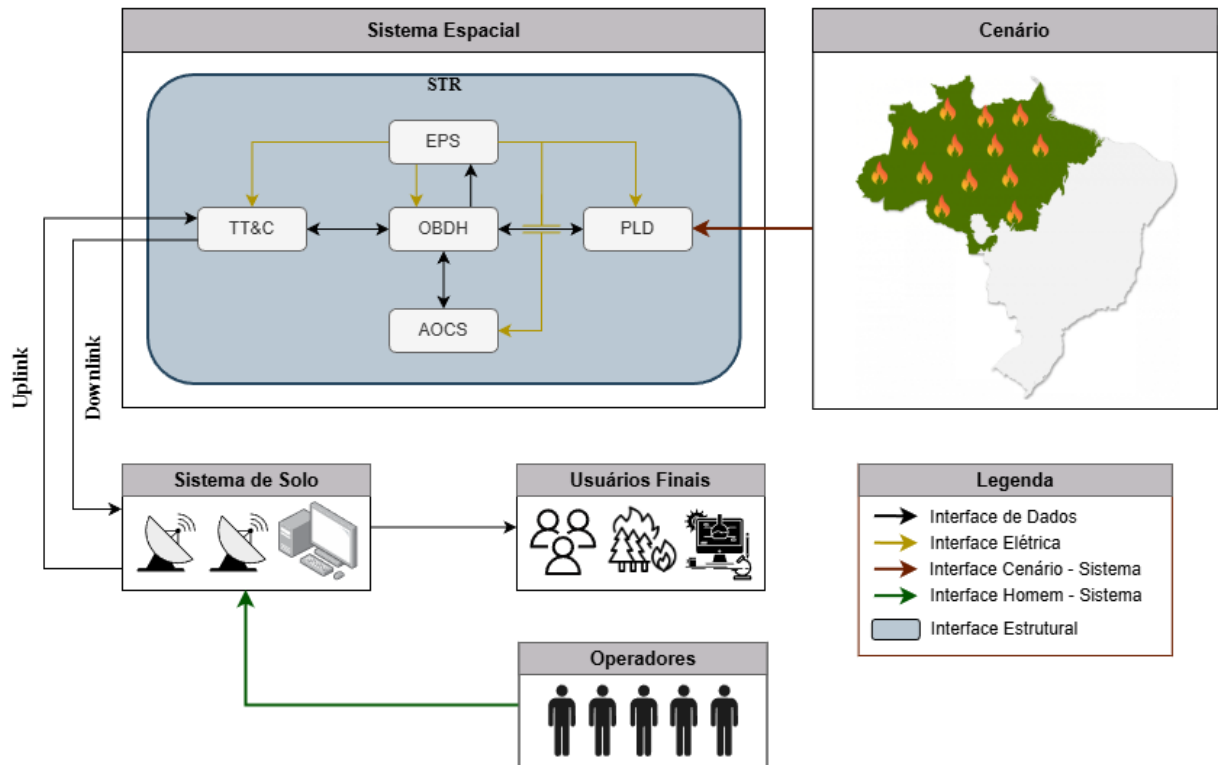
Após a consolidação dos requisitos de missão, as etapas seguintes da metodologia consistiram na definição dos insumos necessários para o desdobramento desses requisitos em níveis de sistema e técnicos, aplicáveis aos componentes da carga útil. Nesse contexto, a definição de interfaces destacou-se como uma etapa importante do processo, uma vez que, além de mapear as relações internas e externas do CubeSat, identificou algumas das funções necessárias para a realização da missão.

As interfaces identificadas estão apresentadas no Quadro 5, que sintetiza os tipos de interação e fornece uma breve descrição de cada item, facilitando a identificação dos elementos envolvidos e das trocas estabelecidas. Os subsistemas foram representados pelas siglas PLD (Payload), OBDH (On-Board Data Handling), STR (Estrutura), TT&C (Telemetria e Telecomando) e AOCS (Controle de Atitude e Órbita). Além disso, cada conexão recebeu uma identificação própria, sendo I.INT atribuída às interfaces internas e I.EXT às interfaces externas.

Além da tabela, a identificação das interfaces resultou também em um esboço esquemático, apresentado na Figura 17, que representa visualmente as conexões entre os subsistemas e suas relações com elementos externos. Esses dois resultados sintetizam de forma complementar o processo de mapeamento das interfaces, facilitando a visualização, a consulta e a rastreabilidade das informações.

A partir da análise das interfaces externas, foi evidenciada a necessidade de um subsistema de payload, responsável pela coleta dos dados relacionados aos incêndios, o que resultou na interface do sistema espacial com o território amazônico. Também foi identificada a necessidade de um subsistema de comunicações, destinado à transmissão dos dados coletados (*downlink*) e ao recebimento de comandos (*uplink*), configurando a interface com a estação de solo. Esta, por sua vez, mantém interface com os operadores, responsáveis pelo controle do CubeSat, e com os usuários finais, que acessam os dados processados e distribuídos.

Figura 17 – Esboço das interfaces identificadas para o FritzSat Tatá



Fonte: Autor (2025)

Internamente, foram identificadas diferentes interfaces entre os subsistemas do CubeSat. A primeira corresponde à conexão entre o payload e o OBDR, necessária para o armazenamento, processamento e encaminhamento dos dados. Essa interface está associada ao envio de informações, tanto aquelas coletadas pelo payload, destinadas à transmissão, quanto as recebidas do sistema de solo e enviadas à carga útil, o que demanda a existência de uma estação de controle de dados e de uma interface entre esses subsistemas.

O payload também mantém interface com o EPS, uma vez que seus componentes necessitam de um fornecimento contínuo de energia elétrica para o funcionamento. Além disso, estabelece uma conexão com o subsistema estrutural, responsável por garantir integração física, proteção e suporte mecânico, garantindo a integridade da carga útil.

A análise concentrou-se em destacar as interfaces que influenciam diretamente o funcionamento da carga útil, ainda que algumas não apresentem relação imediata. Entre essas, destaca-se a interface entre o AOCS e o OBDR, necessária para o correto apontamento do CubeSat em relação à região de interesse,

garantindo precisão durante a coleta de dados e contribuindo também para a eficácia das comunicações.

Quadro 5 – Identificação das interfaces internas e externas do sistema espacial

Interface	Elemento 1	Elemento 2	Tipo	Descrição
I.EXT-01	Sistema espacial	Cenário	Dados - Sensoriamento	Aquisição de radiação eletromagnética para obtenção de dados de temperatura e composição atmosférica
I.EXT-02	Sistema espacial	Sistema de Solo	Dados - Comunicação	Troca bidirecional, envio de dados de missão (<i>downlink</i>) e comandos (<i>uplink</i>)
I.EXT-03	Operadores	Sistema de Solo	Homem - Sistema	Interação para monitoramento da saúde do satélite, envio de comandos, visualização e tratamento de dados
I.INT-01	PLD	OBDH	Dados - Comando	Transferência bidirecional de dados brutos e comandos de controle do payload como ativação e interrupção
I.INT-02	PLD	EPS	Elétrica	Fornecimento de energia elétrica regulada para a operação dos sensores do payload
I.INT-03	PLD	STR	Mecânica - Térmica	Fixação, proteção física e gerenciamento das trocas de calor para manter o sensor em faixas adequadas para operação
I.INT-04	OBDH	TT&C	Dados / Comando	Transferência de dados processados para transmissão e distribuição dos comandos recebidos para os demais subsistemas
I.INT-05	OBDH	AOCS	Dados / Comando	Troca de dados para georreferenciamento e comandos para orientação do sistema, como manobras de apontamento

Fonte: Autor (2025)

A identificação e o mapeamento dessas interfaces permitiram compreender o funcionamento integrado do CubeSat, bem como identificar restrições e dependências existentes entre seus subsistemas. Por exemplo, o requisito de missão FST-RM-01, “Adquirir dados de temperatura do solo do território amazônico, em condições diurnas e noturnas,” evidenciou a necessidade de coleta de informações pelo payload sobre o território de interesse. Essas informações devem ser processadas e armazenadas pelo OBDH, a partir da interface existente entre esses dois subsistemas, o que destacou a necessidade de compatibilidade entre eles, de modo que um apoie o funcionamento do outro durante a operação da missão.

Em seguida, os dados tratados devem ser transmitidos ao solo, exigindo que o subsistema de comunicações, interligado ao OBDH, seja capaz de enviar as informações durante o *downlink* em uma taxa adequada, assegurando a entrega

oportuna dos produtos da missão. Com isso, a compreensão dessas interfaces permitiu o desdobramento dos requisitos de missão em requisitos de sistema e técnicos, garantindo a compatibilidade do sistema ao estabelecer de forma integrada as condições necessárias para alcançar o desempenho esperado.

4.5. ANÁLISE PRELIMINAR DOS COMPONENTES DA CARGA ÚTIL

A análise preliminar dos componentes da carga útil teve como objetivo identificar componentes capazes de atender as declarações realizadas nas etapas anteriores, em especial aquelas relacionadas à aquisição e processamento dos dados de missão. Dessa forma, os resultados apresentados a seguir representam um primeiro levantamento das possibilidades para compor a carga útil, servindo de base para a definição dos requisitos de sistema e técnicos, bem como para futuras análises de viabilidade e *trade-offs*.

Com base nos objetivos da missão, foram selecionados dois instrumentos como potenciais integrantes da carga útil, concebidos para atuar de forma complementar: um sensor térmico infravermelho, considerado o payload primário, e um espectrômetro. A seleção desta arquitetura foi fundamentada na estratégia de detecção precoce de incêndios, que requer a observação de assinaturas não visíveis, como o aumento anômalo da temperatura e a emissão de gases, antes que o fogo se torne perceptível visualmente.

4.5.1. Sensor térmico infravermelho

O sensor de Infravermelho Térmico (TIR) foi selecionado por sua capacidade de detectar anomalias de temperatura na superfície terrestre, que constituem a principal assinatura de um incêndio incipiente, mesmo antes do surgimento de chamas visíveis. Além disso, essa tecnologia de sensoriamento remoto apresenta alta precisão, ampla cobertura espacial e menor dependência de condições atmosféricas, o que a torna particularmente adequada ao monitoramento de incêndios, operando de forma eficaz tanto durante o dia quanto à noite (Sousa; Moutinho; Almeida, 2020; Wang; Xu; Guo, 2024).

O espectro infravermelho abrange comprimentos de onda entre 0,75 e 1000 μm , sendo comumente dividido em faixas com propriedades distintas. A tecnologia de sensoriamento remoto por infravermelho baseia-se na interpretação da energia

refletida ou irradiada por alvos na superfície terrestre, permitindo a obtenção de informações sobre sua natureza e condição. Os sensores TIR exploram uma porção específica desse espectro, correspondente às bandas MWIR e LWIR, que analisam a energia termal emitida intrinsecamente pelos materiais da superfície. As diferentes faixas do espectro infravermelho utilizadas em missões espaciais e seus respectivos comprimentos de onda estão apresentadas na Tabela 2 (Bouzoukis *et al.*, 2025; Wang, Xu; Guo, 2024).

Tabela 2 – Principais bandas aplicadas no sensoriamento remoto por infravermelho

Banda	Descrição	Faixa de comprimento de onda (μm)
Visível	Espectro visível	0,38 - 0,75
NIR	Infravermelho próximo	0,75 - 1,4
SWIR	Infravermelho de onda curta	1,4 - 3
MWIR	Infravermelho de onda média	3 - 8
LWIR	Infravermelho de onda longa	8 - 15
FIR	Infravermelho distante	15 - 1000

Fonte: Adaptado de Bouzoukis *et al.* (2025)

Nesse contexto, as bandas do infravermelho térmico MWIR e LWIR foram identificadas como as mais relevantes para a detecção de anomalias de temperatura na superfície terrestre, uma vez que identificam a radiação emitida. O MWIR (3-8 μm) apresenta alta sensibilidade a temperaturas elevadas, sendo eficaz na identificação de chamas e focos ativos de calor. Por outro lado, o LWIR (8-15 μm) é voltado à detecção de fontes de calor de menor intensidade, como áreas de combustão incipiente ou encobertos por fumaça, contribuindo para a detecção de focos em estágio inicial (Ororatech, 2024).

Dessa forma, esse tipo de sensor térmico possibilita a detecção de focos de calor tanto durante o dia quanto à noite, mantendo desempenho estável mesmo na presença de fumaça, o que o torna uma das ferramentas mais eficazes para o monitoramento de incêndios florestais. Apesar disso, destaca-se que o uso combinado das bandas MWIR e LWIR impõe restrições adicionais em CubeSats, pois requer detectores mais complexos, com maior demanda de energia, necessidade de sistemas de resfriamento, em alguns casos, e aumento de volume físico (Bouzoukis *et al.*, 2025; Ding *et al.*, 2025).

Além das bandas térmicas, faixas do infravermelho refletido, como o NIR e o SWIR, podem ser empregadas em análises complementares no monitoramento de

incêndios. O NIR é amplamente utilizado no acompanhamento da vegetação e de corpos d'água, enquanto o SWIR, por ser menos afetado por condições atmosféricas, mostra-se útil na avaliação da umidade do solo, na caracterização de minerais e na análise de áreas impactadas por desastres naturais (SWIFT GEOSPATIAL, 2025).

Com isso, a inclusão de múltiplas faixas do infravermelho, além do TIR, ampliaria significativamente a capacidade de análise da missão, permitindo uma caracterização mais completa dos incêndios. Contudo, devido a restrições de espaço, custo e condições de operação em órbita, a viabilidade da integração dessas bandas deverá ser posteriormente avaliada por meio de análises de viabilidade.

4.5.2. Espectrômetro

O espectrômetro foi selecionado como instrumento complementar ao sensor térmico, adicionando uma camada de confiabilidade à detecção de incêndios. Isso ocorre, pois esse componente é capaz de identificar gases resultantes da combustão, especialmente dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4), cuja concentração elevada em determinada região constitui forte indicador de atividade de fogo.

Em sistemas espaciais, o espectrômetro utiliza a luz solar refletida pela superfície terrestre como fonte de radiação, analisando sua interação com os gases atmosféricos. Durante o percurso, essa radiação sofre absorções em comprimentos de onda específicos, característicos de cada molécula. Como cada gás possui uma assinatura espectral única, o espectrômetro é capaz de identificar sua presença e quantificar sua concentração na coluna atmosférica (Clavier *et al.*, 2024; Del Campo-Hitschfeld *et al.*, 2023).

Quando configurado para operar em faixas de comprimento de onda adequadas, o espectrômetro permite estimar as concentrações de gases de efeito estufa, contribuindo para a identificação de incêndios, ainda que não seja o instrumento principal para essa finalidade. Além disso, por não depender da visibilidade óptica, mantém eficácia mesmo em condições de fumaça densa, complementando o desempenho do sensor térmico (Del Campo-Hitschfeld *et al.*, 2023; Jallad *et al.*, 2019).

Diante disso, a seleção das faixas espectrais do instrumento foi orientada pelas bandas de absorção características dos gases de interesse. Para atender aos

objetivos da missão, as bandas de dióxido de carbono (1,57 μm , 1,61 μm e 2,05 μm) e metano (1,67 μm e 2,25 μm) foram identificadas como as mais relevantes. Além disso, a análise considerou as bandas de gases interferentes, como vapor d'água (0,9 μm , 1,2 μm e 1,4 μm), oxigênio (1,25 μm) e monóxido de carbono (1,63 μm). Essas faixas representam as regiões de maior absorção da radiação solar refletida e constituem a base para a seleção técnica do espectrômetro (Del Campo-Hitschfeld et al., 2023; Jallad et al., 2019).

Além disso, a análise destacou outros dois parâmetros relevantes para a caracterização e seleção do espectrômetro. O primeiro é a resolução espectral, considerada o principal indicador de desempenho do sensor, pois define a capacidade de distinguir comprimentos de onda muito próximos entre si. Já a relação sinal-ruído (SNR) destacou-se por estar diretamente associada à qualidade das medições, sendo que valores elevados de SNR reduzem as incertezas e aumentam a confiabilidade das estimativas de concentração dos gases (Del Campo-Hitschfeld et al., 2023).

Com base nesses estudos, a integração entre o sensor térmico e o espectrômetro resulta em uma abordagem multiespectral capaz de detectar incêndios em diferentes estágios, acompanhar sua evolução e avaliar seus impactos. Ressalta-se, contudo, que essa definição possui caráter preliminar e está sujeita a revisão conforme as restrições de custo, demanda energética e disponibilidade de espaço no CubeSat. Dessa forma, a escolha final dos instrumentos deverá ser confirmada por meio de estudos de viabilidade e análises de *trade-offs*.

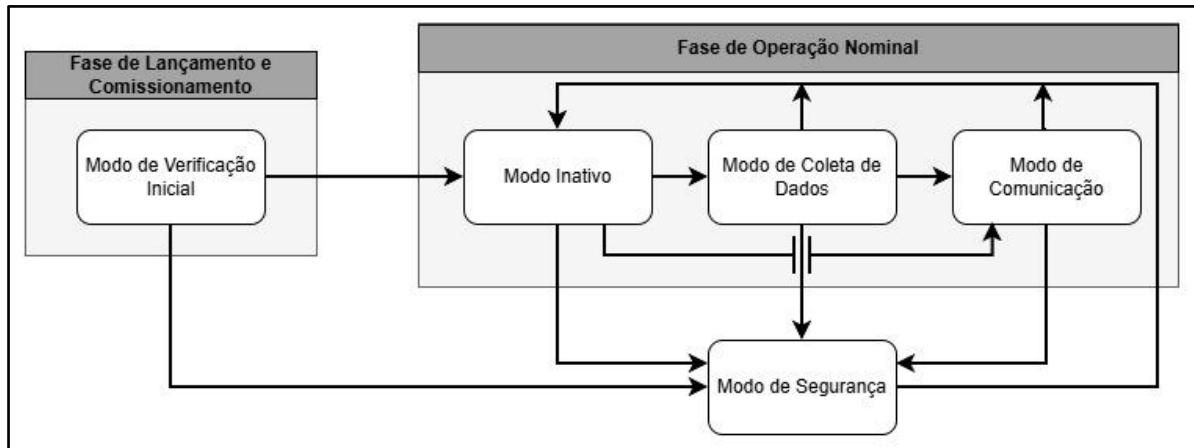
4.6. DEFINIÇÃO DO CONCEITO DE OPERAÇÕES

Como último insumo para o processo de definição dos requisitos, destaca-se o conceito de operações (ConOps), que representa o comportamento funcional do CubeSat FritzSat Tatá em órbita. Nesse contexto, o ConOps descreve os modos de operação estabelecidos para o cumprimento dos objetivos da missão, sintetizando, de forma gráfica e descritiva, os modos operacionais e suas respectivas transições

A Figura 18 apresenta o diagrama de modos de operação, que ilustra os principais estados de funcionamento do sistema e suas possíveis transições, considerando que não há um único caminho sequencial a ser seguido. O CubeSat opera inicialmente na fase de lançamento e comissionamento, em que o modo de verificação inicial é responsável pela checagem e ativação dos subsistemas após o

lançamento, assegurando as condições necessárias para o início da operação nominal.

Figura 18 – Modos de operação para o FritzSat Tatá



Fonte: Autor (2025)

Uma vez liberado, o FritzSat Tatá pode operar em diferentes estados sob condições normais. O modo inativo é empregado nos períodos sem coleta ou transmissão de dados, em que os subsistemas de alta demanda energética permanecem desligados, mantendo apenas funções essenciais, como a verificação e monitoramento da saúde do nanossatélite e o carregamento das baterias. Esse modo contribui diretamente para a otimização do consumo de energia e para a extensão da vida útil da missão.

No modo de coleta de dados, o CubeSat ativa os sensores térmicos e espectrométricos, realizando calibrações em alvos previamente definidos, como superfícies terrestres conhecidas ou padrões celestes. Em seguida, os dados são adquiridos pelo payload, processados e armazenados pelo computador de bordo (OBDH), que os classifica de acordo com sua relevância. As informações consideradas críticas são priorizadas para transmissão, enquanto as de menor importância são comprimidas ou armazenadas para envio posterior.

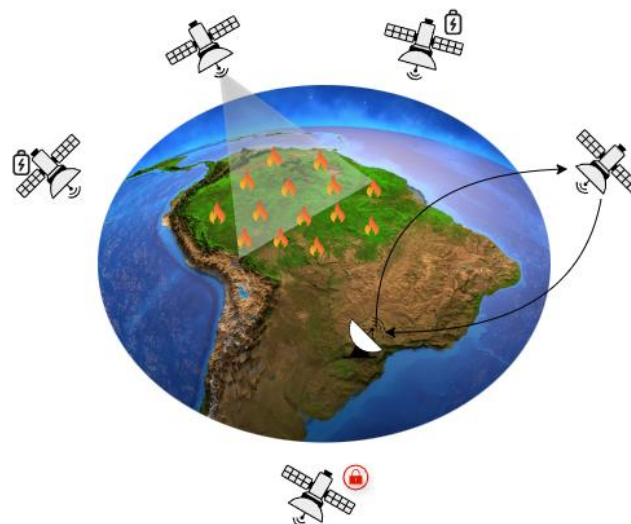
O modo de comunicação, acionado durante as passagens do CubeSat sobre a estação terrestre, corresponde ao período em que o sistema espacial realiza o *downlink* dos dados coletados e o *uplink* de comandos e atualizações. A principal função desse estado é assegurar o envio das informações prioritárias, principalmente

aquelas relacionadas à detecção precoce de incêndios, além de permitir ajustes operacionais da missão sempre que necessário.

Além dos modos de operação nominais, o sistema espacial pode entrar em modo de segurança em situações de falha crítica ou comportamento anômalo, como falhas no fornecimento de energia ou superaquecimento. Esse modo representa o estado de contingência do sistema, em que apenas as funções vitais permanecem ativas, incluindo o controle básico de atitude, a comunicação em baixa taxa de dados e a preservação de energia, assegurando a integridade do CubeSat até a intervenção da equipe de solo. Após a resolução dos problemas e liberação para retomada das operações, o CubeSat retorna ao modo inativo, realizando verificações básicas antes de restabelecer o funcionamento normal da missão.

Além do diagrama de estados, foi elaborada uma representação orbital do CubeSat, apresentada na Figura 19, com o objetivo de sintetizar graficamente o funcionamento da missão. Esses dois resultados visuais complementam-se ao facilitar a identificação dos diferentes modos de operação e oferecer uma perspectiva operacional clara do sistema, servindo como ferramenta de apoio para a comunicação e entendimento entre os diferentes stakeholders do projeto.

Figura 19 – ConOps para a missão FritzSat Tatá



Fonte: Autor (2025)

Resumidamente, durante as janelas de passagem sobre a Amazônia, o FritzSat Tatá atua prioritariamente em modo de coleta de dados e nas passagens sobre a estação de solo, executa a transmissão e o recebimento de comandos. Nos demais

períodos, o satélite permanece em modo inativo, mantendo apenas as funções básicas de telemetria e controle de atitude.

Diante disso, o conceito de operações consolidou o entendimento sobre o comportamento do sistema ao longo da missão, uma vez que permitiu compreender como o CubeSat executa suas funções, validando as informações obtidas na análise de interfaces e demonstrando o atendimento aos requisitos de missão estabelecidos. Com isso, o ConOps constituiu a base para a especificação dos requisitos de sistema, uma vez que cada modo e interação representado reflete uma necessidade operacional que deve ser atendida nos níveis inferiores do projeto.

4.7. DECLARAÇÃO DOS REQUISITOS DE SISTEMA E TÉCNICOS

Como produto final do processo de engenharia de sistemas, destaca-se a lista de requisitos de sistema e técnicos definidos para os componentes da carga útil do FritzSat Tatá. Essas declarações resultaram da aplicação integrada das etapas anteriores, consolidando a tradução das metas e objetivos da missão em diretrizes mais específicas, com características funcionais e quantitativas que orientam o desenvolvimento do sistema espacial.

Os requisitos de sistema correspondem à decomposição dos requisitos de missão, descrevendo as funções e os desempenhos necessários para que o sistema espacial atinja os objetivos estabelecidos. Embora apresentem valores de desempenho esperados, essas especificações não detalham componentes individuais, pois se referem ao nível de sistema, abrangendo os segmentos espacial, de solo e de lançamento, sem ainda abordar seus subsistemas ou elementos específicos. Os requisitos de sistema associados à Meta 1 são apresentados a seguir, acompanhados de uma breve descrição que destaca sua relevância para a missão.

- FST-RS-F-01.1: O sistema deve adquirir dados no espectro do infravermelho térmico adequados à identificação de focos incipientes de incêndio.
 - Assegura que o sistema espacial opere em bandas térmicas compatíveis com a detecção precoce de anomalias de temperatura.
- FST-RS-D-01.2: O sistema deve medir a temperatura da superfície terrestre do território amazônico com resolução térmica mínima de 1 °C.

- Define o limite de sensibilidade necessário para distinguir variações térmicas, garantindo a precisão e agilidade da detecção.
- FST-RS-D-01.3: O sistema deve adquirir dados térmicos com resolução espacial mínima de 30 m na superfície terrestre.
 - Determina a resolução espacial mínima necessária para individualizar focos de calor na superfície, definindo que cada pixel deve corresponder a uma área de aproximadamente 30 x 30 m (900 m²). Essa resolução garante detalhamento suficiente para detectar variações térmicas associadas a incêndios de pequena escala.
- FST-RS-D-01.4: O sistema deve assegurar revisita sobre a região de interesse em intervalo máximo de 15 minutos.
 - Estabelece o intervalo máximo entre observações sucessivas, reduzindo a latência na detecção de novos focos e permitindo o acompanhamento da propagação dos incêndios.
- FST-RS-D-01.5: O sistema deve georreferenciar os dados adquiridos com acurácia mínima de TBD m.
 - Garante que as informações térmicas sejam corretamente associadas às coordenadas geográficas, assegurando a localização precisa dos focos de calor.
- FST-RS-F-02.1: O sistema deve estimar a concentração de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) sobre a região amazônica.
 - Esse requisito permite o monitoramento de gases emitidos durante os incêndios, ampliando a capacidade do sistema de avaliar seus impactos atmosféricos e contribuindo também para a identificação de incêndios.
- FST-RS-D-02.2: O sistema deve detectar variações mínimas de concentração de 4 ppm para CO₂ e 25 ppb para CH₄.
 - Define a sensibilidade mínima necessária para que o sistema identifique mudanças relevantes na composição atmosférica decorrentes de eventos de queima.
- FST-RS-D-02.3: O sistema deve assegurar revisita sobre a região de interesse em intervalo máximo de 15 minutos.
 - Esse requisito é equivalente ao FST-RS-D-01.4.

- FST-RS-F-02.4: O sistema deve associar metadados de tempo, localização e parâmetros de aquisição, a cada estimativa de gases.
 - Garante que cada medida do sistema seja acompanhada de informações complementares, incluindo o instante da coleta, a posição geográfica e parâmetros de desempenho, como resolução, nível de ruído e incerteza. A presença desses metadados é fundamental para a validação científica dos resultados, a integração com outros sistemas e o acompanhamento temporal da evolução das emissões.
- FST-RS-F-03.1: O sistema espacial deve transmitir os dados e produtos adquiridos para estações de solo designadas.
 - Assegura que o segmento espacial possua capacidade de comunicação suficiente para a transferência confiável dos dados científicos e operacionais, garantindo que as informações sejam enviadas sem perdas ou corrompimentos.
- FST-RS-D-03.2: O sistema espacial deve garantir taxa efetiva de *downlink* em banda X.
 - Estabelece o desempenho mínimo de transmissão necessário para assegurar a entrega dos dados dentro dos prazos definidos pela missão.
- FST-RS-D-03.3: O sistema espacial deve suportar *uplink* de comandos em banda TBD.
 - Determina o desempenho mínimo necessário para o envio de comandos e atualizações, garantindo que as instruções sejam transmitidas com eficiência e integridade durante as janelas de contato.
- FST-RS-F-04.1: O sistema deve adquirir imagens multiespectrais do território amazônico que permitam a análise da saúde vegetal e a avaliação de áreas queimadas
 - Esse requisito assegura a geração de produtos capazes de estimar a condição da vegetação e quantificar os danos causados por queimadas.
- FST-RS-D-04.2: O sistema deve fornecer imagens multiespectrais com resolução espacial mínima de 100 m na superfície terrestre.
 - Define o detalhamento espacial necessário para análises de cobertura vegetal e detecção de alterações em grandes áreas florestais.

- FST-RS-F-04.3: O sistema deve associar metadados de tempo, localização e parâmetros de aquisição, a cada estimativa de gases.
 - Esse requisito é equivalente ao FST-RS-F-02.4.

Como destacado anteriormente, apenas os requisitos técnicos do subsistema de payload foram declarados neste trabalho, como forma de simplificar a metodologia proposta. Diante disso, foram considerados apenas os requisitos de sistema relacionados ao segmento espacial, excluindo aqueles referentes à estação de solo e ao lançamento.

As declarações de sistema foram desdobradas em requisitos técnicos, que definem os valores e parâmetros a serem atendidos por cada componente da carga útil, de modo a garantir o cumprimento das declarações de nível superior. Esse encadeamento descendente garante rastreabilidade e coerência entre os diferentes níveis de definição, evitando lacunas e assegurando o alinhamento entre as metas da missão e as especificações técnicas de menor nível, que servirão de base para as futuras especificações do modelo de engenharia.

Diante disso, os requisitos técnicos da carga útil foram elaborados com o propósito de assegurar que o payload desempenhe suas funções primárias de detecção de focos de incêndio e monitoramento ambiental, atendendo aos objetivos científicos da missão dentro das restrições de massa, volume e potência típicas de um CubeSat. Os requisitos técnicos identificados para o subsistema de payload do FritzSat Tatá são apresentados a seguir, acompanhados de uma breve descrição.

- FST-RT-P-01.1.1: O sensor térmico deve operar nas faixas espectrais MWIR e LWIR.
 - Garante a capacidade de detectar radiação térmica em diferentes comprimentos de onda, permitindo identificar variações de temperatura associadas a incêndios em condições diurnas e noturnas.
- FST-RT-P-01.2.1: O detector deve possuir $NETD \leq 100 \text{ mK}$ ($0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$).
 - Define a sensibilidade térmica mínima necessária para distinguir pequenas variações de temperatura na superfície terrestre. Um valor de NETD inferior a 100 mK permite detectar anomalias sutis associadas ao início de incêndios e avaliar gradientes térmicos em áreas afetadas.

- FST-RT-P-01.3.1: O sensor térmico deve proporcionar resolução espacial ≤ 30 m/pixel para uma altitude orbital de 550 km.
 - Determina o detalhamento espacial exigido pelo requisito de sistema, permitindo a identificação de incêndios de pequena escala.
- FST-RT-P-01.4.2: O sensor térmico deve possuir uma largura de faixa (swath) de, no mínimo, 400 km para garantir a resolução temporal da missão.
 - Estabelece a extensão mínima da faixa de imageamento necessária para cobrir a área de interesse dentro do intervalo de revisita de 15 minutos.
- FST-RT-P-02.1.1: O espectrômetro do payload deve operar na faixa espectral de 1,4–2 μm , sensível a CO_2 e CH_4 .
 - Garante que o instrumento seja capaz de detectar as bandas de absorção específicas desses gases.
- FST-RT-P-02.1.2: A resolução espectral deve ser ≤ 6 nm para uma altitude orbital de 550 km.
 - Define a capacidade de distinguir variações sutis na assinatura espectral dos gases de interesse, assegurando a precisão necessária para a estimativa de CO_2 e CH_4 em diferentes condições atmosféricas.
- FST-RT-P-02.2.2: O espectrômetro deve alcançar $\text{SNR} \geq 400$ para suportar precisão de detecção de $\text{CO}_2 \geq 5$ ppm e $\text{CH}_4 \geq 25$ ppb.
 - Determina a razão mínima entre o sinal e ruído, garantindo a qualidade dos dados espectrais e a confiabilidade das estimativas de concentração dos gases. Essa especificação é essencial para evitar incertezas significativas durante o processamento dos dados.
- FST-RT-P-04.1.1: O sensor multiespectral deve operar na faixa espectral VNIR.
 - Garante a capacidade de captar a refletância da vegetação em diferentes bandas do visível e do infravermelho próximo, possibilitando a análise da cobertura vegetal e a avaliação de áreas afetadas por queimadas.
- FST-RT-P-04.3.1: O sistema óptico e o detector devem proporcionar resolução espacial ≤ 100 m/pixel, considerando altitude orbital de 550 km.
 - Define o detalhamento mínimo necessário para mapear padrões de vegetação e delimitar áreas queimadas com precisão.

- FST-RT-P-04.3.2: O sensor deve apresentar razão sinal-ruído (SNR) ≥ 100 .
 - Determina a qualidade mínima das imagens adquiridas, assegurando contraste suficiente para o cálculo de índices espectrais e a classificação dos diferentes tipos de cobertura vegetal.

Diante disso, esses requisitos representam o conjunto de especificações identificadas para os componentes da carga útil do FritzSat Tatá. Assim como nas etapas anteriores, as informações foram consolidadas em um quadro, apresentado no Apêndice A devido à sua extensão, a fim de facilitar a visualização e a identificação da origem de cada requisito. O Quadro 6, apresentado a seguir, reúne o conjunto completo de declarações relacionadas ao requisito de missão FST-RM-01, permitindo observar sua decomposição até o nível técnico.

Quadro 6 – Requisitos de sistema e técnicos derivados para o requisito de missão FST-RM-01

Requisitos de Missão	Requisitos de Sistema	Requisitos Técnicos
FST-RM-01: Adquirir dados de temperatura do solo do território amazônico, em condições diurnas e noturnas	FST-RS-F-01.1: O sistema deve adquirir dados no espectro do infravermelho térmico adequados à identificação de focos incipientes de incêndio	FST-RS-P-01.1.1: O sensor térmico deve operar nas faixas espectrais MWIR e LWIR
	FST-RS-D-01.2: O sistema deve medir a temperatura da superfície terrestre do território amazônico com resolução térmica mínima de 1 °C	FST-RT-P-01.2.1: O detector deve possuir NETD ≤ 100 mK (0,1 °C)
	FST-RS-D-01.3: O sistema deve adquirir dados térmicos com resolução espacial mínima de 30 m na superfície terrestre	FST-RT-P-01.3.1: O sensor térmico deve proporcionar resolução espacial ≤ 30 m/pixel para uma altitude orbital de 550 km
	FST-RS-D-01.4: O sistema deve assegurar revisita sobre a região de interesse em intervalo máximo de 15 minutos	FST-RT-P-01.4.2: O sensor térmico deve possuir uma largura de faixa (swath) de, no mínimo, 400 km para garantir a resolução temporal da missão.
	FST-RS-D-01.5: O sistema deve georreferenciar os dados adquiridos com acurácia mínima de TBD metros	

Fonte: Autor (2025)

A rastreabilidade, destacada em diversas etapas do trabalho, constitui um aspecto essencial em sistemas complexos, uma vez que uma única modificação em um nível de declaração pode impactar diversas camadas do projeto. Alterações em metas ou objetivos, por exemplo, podem exigir ajustes nos requisitos derivados,

reforçando a necessidade de manter o rastreamento contínuo ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento.

Vale destacar que alguns requisitos de sistema não foram desdobrados até o nível técnico por não apresentarem relação direta com a carga útil. Um exemplo é o requisito “O sistema deve georreferenciar os dados adquiridos com acurácia mínima de TBD metros”, visto que a precisão é assegurada pelo subsistema de controle de atitude e complementada pelo computador de bordo durante o processamento dos dados.

Como parte desse processo, foram considerados diferentes componentes de sensoriamento, abrangendo sensores térmicos, espectrais e multiespectrais, com o objetivo de tornar o processo de definição de requisitos mais abrangente e representar de forma fiel as necessidades identificadas nas primeiras etapas. Essa abordagem, contudo, não implica a adoção simultânea de todos os sensores, uma vez que sua combinação pode elevar significativamente a complexidade técnica e os custos da missão. Dessa forma, os requisitos definidos poderão ser ajustados ao longo do desenvolvimento, caso sua implementação se mostre inviável.

Destaca-se que, os valores de desempenho atribuídos aos requisitos técnicos foram baseados em análises de missões e estudos de referência, como Santilli *et al.* (2018) e as missões FireSat, OroraTech, UVSQ-SAT NG e MeznSat, que possuem objetivos semelhantes de detecção de incêndios e monitoramento de gases de efeito estufa (Clavier *et al.*, 2024; EoPortal, 2025; Jallad *et al.*, 2019; Ororatech, 2024). A análise das documentações técnicas dessas missões, também realizadas por CubeSats, permitiu identificar parâmetros de desempenho plausíveis para o cumprimento dos objetivos do FritzSat Tatá.

Essas especificações não são imutáveis, podendo ser ajustadas ao longo do desenvolvimento da missão em função de estudos de viabilidade, testes de integração e disponibilidade tecnológica. Além disso, parâmetros como ângulo de visada, tamanho e quantidade de pixels, embora não listados explicitamente, estão representados de forma indireta por meio de requisitos agregados, como a resolução espacial dos sensores TIR e VNIR.

Por fim, a definição de requisitos não é um processo simples em sistemas complexos como os CubeSats, compostos por múltiplos subsistemas que precisam operar de forma integrada. Nesse contexto, os insumos obtidos nas etapas anteriores, como a análise de interfaces e o conceito de operações, foram determinantes para o

desdobramento dos requisitos, pois forneceram a base necessária para a identificação e compreensão das necessidades, funções críticas e relações de dependência entre os subsistemas.

4.8. ANÁLISE DA TABELA DE TRADUÇÃO PARA REQUISITOS

Como primeiro resultado da aplicação da metodologia de projeto de produto, destaca-se o desenvolvimento da tabela de tradução de requisitos, apresentada no Apêndice B e na Figura 20 para o atributo de desempenho. Essa ferramenta foi elaborada com base na metodologia proposta por Fonseca (2000) e adaptada a realidade dos CubeSats, por meio da análise de documentos de missões anteriores, permitindo a inclusão de especificações comuns a missões desse tipo.

A estrutura adotada para a tabela evidenciou a rastreabilidade, a hierarquia e as relações existentes entre as diferentes especificações do projeto, tornando-a uma ferramenta valiosa para a organização e identificação dos requisitos. Os atributos “desempenho”, “confiabilidade e vida útil”, “restrições de recursos” e “operabilidade”, estão associados a um conjunto de perguntas que orientam a identificação das necessidades e expectativas dos stakeholders. As respostas a esses questionamentos originaram os requisitos de usuário que foram traduzidos em requisitos técnicos, o que garantiu coerência entre os diferentes níveis de especificações.

Figura 20 – Tabela de tradução para o atributo de desempenho

Atributos para CubeSat	Perguntas para Levantamento de Necessidades dos Clientes	Requisitos de Usuário	Requisitos Técnicos	
Desempenho	- Qual é a função primária do sistema espacial? - Quais dados a carga útil deve coletar e com qual precisão? - Qual a área de interesse que o satélite deve cobrir? - Qual a frequência de coleta e de atualização dos dados? - Qual a latência máxima aceitável para o envio dos dados? - Qual o tempo máximo entre a detecção e a disponibilização dos dados ao usuário final? - Em quanto tempo os dados precisam ser processados e disponibilizados? - Os dados devem ser criptografados? - Quais variáveis ambientais devem ser monitoradas (ex.: temperatura, gases, vegetação)? - Há exigência de integração com bases de dados externas (ex.: INPE, IBAMA)?	- Adquirir imagens do território; - Detectar e monitorar incêndios; - Mapear rios, lagos e/ou vegetação; - Coletar dados de temperatura; - Estimar concentração de gases; - Garantir a qualidade da imagem/dado	- Resolução Espacial [m]; - Resolução Radiométrica [bits]; - Faixa Espectral [nm ou µm]; - Sensibilidade do Sensor [ppm]; - Campo de Visada (FOV) [°]; - Largura de faixa de varredura [km]; - Relação Sinal-Ruído (SNR) [dB];	Payload
		- Monitorar uma área em intervalos regulares; - Atualizar dados em frequência pré-definida; - Fornecer dados em uma frequência específica;	- Resolução Temporal [h ou min]; - Latência máxima de alerta [h ou min ou sec]; - Taxa de Aquisição de Dados [Hz];	Revisita
		- Coletar e armazenar dados de forma contínua; - Manter um histórico da missão; - Garantir segurança e confidencialidade das informações; - Processar dados a bordo para alertas rápidos; - Fornecer a localização precisa dos dados coletados;	- Capacidade de Armazenamento a Bordo [GB]; - Capacidade de Armazenamento do Histórico [meses]; - Capacidade de Processamento a Bordo [MIPS]; - Criptografia [Sim/Não];	Controle de Dados

Fonte: Autor (2025)

O atributo desempenho, contém os requisitos de usuário relacionados à realização da missão, como adquirir imagens do território e monitorar incêndios, que estão diretamente associados ao payload, resultando em requisitos técnicos como resolução espacial, faixa espectral, resolução radiométrica e campo de visada. Vale destacar que algumas unidades foram adicionadas a tabela, porém alguns requisitos podem ser mensurados de diferentes maneiras, com a latência máxima de alerta, que pode variar de segundos a dias, dependendo do contexto da missão.

De forma semelhante, o atributo restrições de recursos relaciona expectativas de custo, massa, energia e tempo de desenvolvimento a requisitos técnicos como tamanho do CubeSat, massa total, consumo de energia e custo total do projeto. O atributo operabilidade, por sua vez, abrange requisitos ligados à comunicação e operações de voo, garantindo, por exemplo, a capacidade de envio e recepção de dados, relacionados a requisitos técnicos como ganho da antena, processamento a bordo e taxa de envio de dados.

É importante destacar a interdependência entre os requisitos de diferentes atributos, uma vez que decisões relacionadas ao desempenho ou confiabilidade impactam diretamente custo, consumo energético e complexidade geral do sistema. Além disso, alguns requisitos técnicos aparecem em mais de um atributo, como a capacidade de processamento, que é relevante tanto para o desempenho, por influenciar a geração e o tratamento de dados, quanto para operabilidade, visto que afeta a resposta e a autonomia do sistema.

Diante disso, a ideia foi criar uma lista de verificação, semelhante à proposta por Fonseca (2000), servindo como referência na identificação das necessidades e de seus requisitos técnicos correspondentes em diferentes missões de CubeSats. As perguntas associadas aos diferentes atributos e os requisitos de usuário identificados funcionam como um ponto de partida, fornecendo um direcionamento, especialmente útil para desenvolvedores com pouca experiência.

Além disso, como o próprio nome sugere, a tabela facilitou a tradução dos requisitos de usuário em requisitos técnicos de projeto, apoiando também as etapas de desdobramento de requisitos. Essa ferramenta auxiliou diretamente no desenvolvimento da casa da qualidade e na identificação dos requisitos técnicos do FritzSat Tatá, uma vez que, ao reunir diversas especificações já consolidadas, garantiu que considerações importantes sobre o sistema não fossem ignoradas ao longo do processo.

Ressalta-se que esta é uma versão inicial da ferramenta, sendo necessária a validação por docentes e profissionais da área para identificar possíveis melhorias no conteúdo e na organização. O objetivo é que a tabela seja enriquecida ao longo do tempo, com a inclusão de novos requisitos de usuário e técnicos para ampliar a aplicabilidade da ferramenta para diferentes contextos.

4.9. ANÁLISE DA CASA DA QUALIDADE

4.9.1. Priorização das necessidades dos stakeholders

Após o desenvolvimento da tabela de tradução, foi construída a casa da qualidade, principal matriz do desdobramento da função qualidade (QFD), com o objetivo de complementar o processo de definição de requisitos e avaliar suas vantagens para o projeto. Como primeiro resultado dessa etapa, destaca-se a lista de necessidades e suas respectivas pontuações de importância, apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação das necessidades e suas importâncias para a QFD

Necessidades	Importância
Identificação de incêndios em estágios iniciais na Amazônia	5
Avaliar extensão, danos e severidade das áreas queimadas	4
Monitorar a saúde e a regeneração da cobertura vegetal	4
Monitorar a concentração de gases na atmosfera (CO ₂ /CH ₄)	4
Monitoramento diurno e noturno	5
Capacidade de monitorar a mesma área várias vezes ao dia	5
Fornecer uma localização precisa dos focos	4
Cobertura de áreas remotas e/ou de difícil acesso	4
Tempo de entrega rápido (até 15 min após detecção)	5
Disponibilidade de dados e relatórios online	3
Atualização diária dos dados disponíveis online	4
Operação autônoma mínima	2
Segurança da informação (Dados criptografados)	4
Acesso a informações de status e telemetria do satélite	1
O sistema deve apresentar um alto nível de confiabilidade	5
O projeto deve apresentar o menor custo possível	3
A vida útil deve ser de no mínimo 24 meses	5
Baixa complexidade	2

Fonte: Autor (2025)

As necessidades relacionadas à confiabilidade e vida útil, importantes para a realização e continuidade da missão, foram classificadas como as de maior relevância. Além disso, os requisitos de usuário ligados à detecção e entrega rápida dos dados, como “Identificação de incêndios em estágios iniciais na Amazônia” e “Tempo de entrega rápido (até 15 min após detecção)”, também receberam nota 5, representando o grau máximo de importância. Essa priorização está de acordo com o objetivo primário do projeto, que é identificar incêndios em estágio inicial na Amazônia.

Por outro lado, as necessidades associadas aos objetivos arbitrários, como “Avaliar extensão, danos e severidade das áreas queimadas”, “Monitorar a saúde e a regeneração da cobertura vegetal” e “Monitorar a concentração de gases na atmosfera (CO_2/CH_4)”, receberam nota 4, uma vez que, embora ampliem o escopo da missão e a utilidade do sistema, sua não realização não comprometeria o sucesso do projeto. As demais especificações foram avaliadas de forma proporcional, assegurando coerência com o contexto e com as metas estabelecidas para a missão.

Essa lista de necessidades priorizadas constitui um resultado importante do processo, servindo como insumo para as análises subsequentes da QFD, nas quais os requisitos técnicos são avaliados conforme sua contribuição para a satisfação dos stakeholders. Vale ressaltar que, assim como em outras etapas, esse processo de avaliação das necessidades foi realizado de forma colaborativa com a equipe do LARS, refletindo a visão dos membros sobre o peso de cada requisito de usuário, visto que não existe um cliente específico para a missão FritzSat Tatá.

4.9.2. Desdobramento das necessidades em requisitos de projeto

Após a classificação das necessidades, os requisitos técnicos de projeto foram derivados, traduzindo as expectativas dos stakeholders em especificações técnicas, de modo que a visão do cliente seja incorporada ao longo de todo o processo de desenvolvimento. As declarações de projeto identificadas estão apresentadas no Quadro 7, com suas respectivas unidades e uma descrição da sua importância para a missão.

Quadro 7 – Requisitos de projeto listados na matriz QFD

Ordem	Requisito de Projeto	Unidade	Descrição
4	Resolução Espacial	m	Capacidade do sensor de distinguir detalhes em uma imagem, permitindo a identificação de pequenos focos
6	Sensibilidade Térmica ($NE\Delta T$)	mK	Capacidade do sensor de detectar pequenas variações de temperatura, essencial para a identificação precisa de focos de calor
10	Largura de Faixa (Swath)	Km	Indica a largura da área coberta por cada imagem, influenciando a cobertura espacial da missão
12	Inclusão de faixas além de TIR	Sim ou não	Capacidade de incluir faixas espectrais adicionais além da faixa térmica, expandindo a capacidade de detecção
18	Faixa Espectral do Espectrômetro	μm	Define o intervalo de comprimentos de onda que o espectrômetro pode medir, determinando quais gases podem ser identificados
14	Resolução Espectral	nm	Indica a capacidade do espectrômetro de distinguir diferenças de comprimento de onda
14	SNR do Espectrômetro	Adimensional	A relação sinal-ruído determina a clareza dos dados espectrais, em que um SNR maior garante dados mais precisos
5	Precisão de apontamento	Graus	Capacidade do CubeSat de manter a precisão na direção do alvo, essencial para garantir que a imagem ou dado seja coletado corretamente
1	Resolução Temporal (Revisita)	Min	Frequência com que o CubeSat revisita a mesma área
17	Latência máxima do alerta	Min	O tempo máximo entre a detecção de um evento e o envio do alerta
8	Taxa de Transmissão de Dados (<i>Downlink</i>)	Mbps	Indica a capacidade de enviar dados do CubeSat para a Terra
13	Capacidade de Armazenamento a Bordo	Gb	Estabelece a quantidade de dados que o CubeSat pode armazenar antes de ser transmitido
7	Capacidade de Processamento a Bordo	MIPS	Refere-se ao poder computacional disponível a bordo para processar e analisar dados
16	Algoritmo de Criptografia	Sim ou não	Técnica utilizada para proteger os dados transmitidos, garantindo a segurança das informações
3	Vida Útil do Satélite	Meses	O tempo estimado que o CubeSat pode operar de maneira eficaz
2	Confiabilidade	%	A probabilidade de o sistema funcionar sem falhas durante sua missão e gerar dados úteis
11	Tamanho do CubeSat	U	A dimensão física do CubeSat, que afeta a capacidade de massa e volume
9	Custo Total do Projeto	USD	O custo total para projetar, construir, lançar e operar o CubeSat

Fonte: Autor (2025)

Em relação ao payload, a resolução espacial, a sensibilidade térmica e a largura de faixa (swath) estão diretamente ligadas ao sensor TIR, utilizado para a detecção inicial de incêndios, objetivo primário da missão. O requisito inclusão de faixas além do TIR está associada ao uso de uma câmera multiespectral, em vez do sensor infravermelho, para realizar também a avaliação dos danos causados pelas queimadas e a análise da vegetação e do solo. Por fim, a faixa espectral, a resolução espectral e o SNR (relação sinal-ruído) são parâmetros relacionados ao espectrômetro, cuja função é estimar a concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, objetivo arbitrário da missão.

Esses parâmetros representam as características técnicas do payload avaliadas na análise da QFD. Outros requisitos, como campo de visada e número de pixels do sensor, embora relevantes para o desempenho e para o cumprimento dos objetivos da missão, não foram incluídos devido à quantidade de requisitos já incorporados na matriz, o que aumentaria ainda mais a complexidade da análise. Além disso, alguns desses parâmetros são representados de forma indireta por outros já contemplados, como a resolução espacial e o SNR.

4.9.3. Matriz de relacionamento e priorização dos requisitos

A matriz de relacionamento, elaborada após a identificação dos requisitos de usuário e de projeto, destacou-se como um dos principais resultados desta ferramenta, uma vez que permitiu estabelecer as correlações entre as especificações de projeto e cliente. Devido ao tamanho da matriz QFD, sua versão completa está apresentada no Apêndice C, enquanto a Figura 21 ilustra uma fração do corpo da casa da qualidade, evidenciando as interdependências entre algumas das necessidades declaradas pelos stakeholders e as variáveis técnicas do payload.

A necessidade “Identificação de incêndios em estágios iniciais” apresentou uma relação forte com a resolução espacial e a sensibilidade térmica, parâmetros do sensor TIR ligados à detecção de pequenos focos e variações sutis de temperatura, sendo fundamentais para a detecção precoce de incêndios. Além disso, esse requisito de usuário também demonstrou relação forte com a precisão de apontamento, necessária para garantir a exatidão dos dados, com o processamento interno, e com a resolução temporal, que assegura o retorno do sistema espacial ao local observado no tempo adequado.

Em contrapartida, essa mesma necessidade estabeleceu uma relação média com os requisitos de largura de faixa, confiabilidade, custo e vida útil, indicando uma influência secundária nesses parâmetros. Por fim, apresenta uma relação fraca com os parâmetros do espectrômetro, uma vez que, embora esse instrumento contribua para a caracterização dos eventos, não é o principal responsável pela detecção inicial.

Figura 21 – Recorte da matriz de relacionamento da casa da qualidade (QFD)

Requisitos de Usuário Requisitos Técnicos	Importance	Resolução Espacial	Sensibilidade Térmica (NEΔT)	Largura de Faixa (Swath)	Inclusão de faixas além de TIR	Faixa Espectral do Espectrômetro	Resolução Espectral do Espectrômetro	SNR do Espectrômetro
Identificação de incêndios em estágios iniciais na Amazônia	5	▲	▲	●		▼	▼	▼
Avaliar extensão, danos e severidade das áreas queimadas	4	▲	●	▲	▲			
Monitorar a saúde e a regeneração da cobertura vegetal	4	▲	●	●	▲			
Monitorar a concentração de gases na atmosfera (CO ₂ /CH ₄)	4					▲	▲	▲
Monitoramento diurno e noturno	5		▲					
Capacidade de monitorar a mesma área várias vezes ao dia	5			▲				
Fornecer uma localização precisa dos focos	4	▲	●					

Fonte: Autor (2025)

As necessidades “Avaliar extensão, danos e severidade das áreas queimadas”, “Monitorar a saúde e a regeneração da cobertura vegetal” e “Monitorar a concentração de gases na atmosfera (CO₂/CH₄)” também apresentaram relações significativas com os parâmetros do payload. Nos dois primeiros casos, destacam-se os requisitos ligados ao sensor infravermelho e a inclusão de uma câmera multiespectral, enquanto o monitoramento de gases é fortemente associado ao espectrômetro, responsável por estimar as concentrações de gases do efeito estufa.

Essas necessidades também apresentaram relações médias com os requisitos de armazenamento e processamento de dados, uma vez que, além da coleta, é

necessário que as informações sejam processadas e armazenadas sem perdas. Já as relações com a transmissão de dados foram consideradas baixas, pois a taxa de *downlink* é tratada de forma mais direta por outras necessidades vinculadas à atualização e entrega de informações.

Vale destacar que, praticamente todas as necessidades possuem algum nível de relação com os requisitos de custo, confiabilidade e vida útil, já que o uso de componentes mais sofisticados aumenta a complexidade do sistema e, consequentemente, o custo e o risco operacional. Por exemplo, uma resolução espacial melhor requer sistemas ópticos mais complexos e, em alguns casos, mecanismos de resfriamento, o que eleva o custo e a complexidade, reduzindo a confiabilidade do sistema espacial.

Diante disso, as necessidades “O sistema deve apresentar um alto nível de confiabilidade”, “O projeto deve apresentar o menor custo possível”, “A vida útil deve ser de no mínimo 24 meses” e “Baixa complexidade” apresentaram relações com praticamente todos os requisitos de projeto. Nesse contexto, as especificações foram avaliadas de forma ponderada, buscando identificar como cada parâmetro impacta essas metas. Por exemplo, a utilização de uma câmera multiespectral aumenta a complexidade e o custo do sistema, apresentando uma relação média, enquanto a faixa espectral do espectrômetro exerce impacto menor sobre esses parâmetros, sendo avaliada como uma relação baixa.

A confiabilidade foi analisada sob duas perspectivas complementares. A primeira, confiabilidade dos dados, está associada à precisão na identificação dos incêndios, apresentando relações fortes com parâmetros como resolução espacial, sensibilidade térmica, resolução espectral, SNR do espectrômetro e precisão de apontamento. Por outro lado, a confiabilidade do sistema está relacionada à sua operação contínua em órbita, demonstrando relação forte com a vida útil e com o próprio requisito técnico de confiabilidade.

Ressalta-se que, assim como ocorre com a confiabilidade, existem necessidades cujo requisito de projeto é equivalente, como o custo, e nesses casos as relações foram classificadas como fortes, pois o requisito técnico representa diretamente o parâmetro associado à necessidade de usuário.

A avaliação das relações estabelecidas na matriz, combinada com as pontuações de importância, permitiu identificar os parâmetros de projeto mais relevantes para o atendimento dos objetivos da missão, possibilitando a

hierarquização dos requisitos técnicos conforme a prioridade do cliente. O Quadro 7 apresenta, na coluna “Ordem”, a classificação resultante desse processo, indicando a prioridade dos requisitos de projeto.

Os resultados obtidos indicam que revisita, confiabilidade e vida útil estão entre os parâmetros mais relevantes para o desempenho da missão. Esse fato era esperado, uma vez que, além de serem requisitos importantes em missões de CubeSats, esses parâmetros apresentam correlação com praticamente todas as necessidades dos clientes, principalmente com as de maior relevância.

Entre os requisitos do payload, a resolução espacial destaca-se em quarto lugar, seguida pela sensibilidade térmica (sexto), largura de faixa (swath) (décimo), inclusão de faixas além de TIR (décimo segundo) e os parâmetros do espectrômetro nas últimas posições. Esses resultados indicam que a resolução espacial e a sensibilidade térmica são os requisitos do payload com maior influência sobre o atendimento das necessidades do cliente, o que está de acordo com o objetivo primário da missão.

Entretanto, a análise de prioridades deve respeitar os valores mínimos estabelecidos para cada requisito, de modo a garantir a confiabilidade e correto funcionamento do sistema. Por exemplo, embora a resolução espacial tenha sido classificada como mais importante que o custo, a taxa de transmissão e o tamanho do CubeSat, esses parâmetros devem ser mantidos dentro dos limites definidos, garantindo a viabilidade da missão. Dessa forma, o tamanho do CubeSat não deve exceder o valor máximo permitido, a taxa de transmissão deve ser suficiente para a entrega confiável dos dados e o custo total do projeto deve permanecer dentro dos limites estabelecidos.

4.9.4. Matriz de correlação entre os requisitos técnicos

Por fim, como último resultado da metodologia empregada neste trabalho, destaca-se a matriz de correlações, representada pelo telhado da casa da qualidade na Figura 22. Essa análise evidenciou as interdependências entre os próprios requisitos técnicos, permitindo observar sinergias (correlações positivas) e conflitos (correlações negativas) existentes dentro do sistema.

As setas de direcionamento atribuídas aos requisitos auxiliaram na interpretação das correlações, permitindo identificar quais parâmetros devem ser

aumentados ou reduzidos para otimizar o desempenho do sistema. Diante disso, alguns requisitos restritivos, como o custo total do projeto e tamanho do CubeSat, devem ser minimizados, enquanto parâmetros ligados à eficiência e confiabilidade do sistema devem ser maximizados.

Figura 22 – Matriz de correlação entre os requisitos de projeto

	↓	↓	↑	↑	-	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑	-	↑	↑	↓	↓
	m	mK	m	S/N	μm	nm	°	min	min	Mb/s	Gb	MIPS	S/N	Meses	%	U	USD
Resolução Espacial																	
Sensibilidade Térmica (NEΔT)																	
Largura de Faixa (Swath)																	
Inclusão de faixas além de TIR																	
Faixa Espectral do Espectrômetro																	
Resolução Espectral do Espectrômetro																	
SNR do Espectrômetro																	
Precisão de apontamento																	
Resolução Temporal (Revisita)																	
Latência máxima do alerta																	
Taxa de Transmissão de Dados (Downlink)																	
Capacidade de Armazenamento a Bordo																	
Capacidade de Processamento a Bordo																	
Algoritmo de Criptografia																	
Vida Útil do Satélite																	
Confiabilidade																	
Tamanho do CubeSat																	
Custo Total do Projeto																	

Fonte: Autor (2025)

Vale destacar que, a resolução espacial, a sensibilidade térmica e a resolução espectral apresentam seta para baixo, uma vez que valores menores para essas propriedades resultam em um melhor desempenho do sistema. Além disso, existem alguns requisitos neutros, como o algoritmo de criptografia, que não apresentam uma tendência preferencial, pois seu impacto depende mais da presença ou ausência da funcionalidade do que de sua variação numérica.

De modo geral, todos os requisitos de projeto apresentaram correlação positiva com a confiabilidade. Apesar de alguns desses parâmetros aumentarem a complexidade do sistema, a missão FritzSat Tatá prioriza a confiabilidade dos dados mesmo que isso implique maiores custos e desafios de integração. Nesse contexto, requisitos como resolução espacial e sensibilidade térmica apresentaram correlações muito fortes com a confiabilidade, uma vez que são determinantes para a detecção precisa de incêndios em estágios iniciais, reduzindo a ocorrência de falsos positivos.

Por outro lado, a matriz evidenciou uma correlação negativa entre o custo e a maioria dos requisitos técnicos, apresentando relação positiva apenas com o tamanho do CubeSat, uma vez que dimensões menores reduzem as despesas de lançamento. Esses resultados refletem os *trade-offs* típicos de projetos desse tipo, nos quais o aprimoramento do desempenho exige o uso de componentes mais sofisticados, o que tende a elevar os custos, aumentar a complexidade e, em alguns casos, ampliar o volume ocupado no interior do nanossatélite.

Além disso, a análise dos requisitos do payload revelou alguns *trade-offs* importantes para missões de sensoriamento remoto. Por exemplo, a resolução espacial, que deve ser minimizada para permitir a identificação de pequenos focos de calor, apresentou correlações negativas com a largura de faixa e com a sensibilidade térmica, uma vez que resoluções menores tendem a restringir o campo de visão do sensor e reduzir a energia capturada. Esse requisito também demonstrou relação negativa com a vida útil e o tamanho do CubeSat, já que sensores de maior desempenho demandam componentes mais sofisticados e exigem maior consumo de energia, como destacado anteriormente.

Ademais, observou-se uma correlação fortemente negativa entre a resolução espacial e a resolução temporal, uma vez que imagens com maior nível de detalhamento cobrem uma área menor, aumentando o tempo necessário para imagear toda a região de interesse. Esse resultado é um insumo importante para as análises de viabilidade do sistema, pois complementa as informações de priorização obtidas pela QFD, em que a revisita foi classificada como prioridade máxima, enquanto a resolução espacial ocupou a quarta posição na hierarquia de importância. Diante disso, torna-se essencial manter o tempo de revisita baixo, assegurando a identificação de incêndios em estágio inicial e a entrega oportuna dos dados.

Contudo, a resolução espacial continua sendo um parâmetro importante para a confiabilidade da detecção, pois define a capacidade do sistema em reconhecer

pequenos focos de calor e evitar falsos positivos. Dessa forma, uma solução para esse conflito seria a implementação de uma constelação do FritzSat Tatá, capaz de cobrir a área de interesse em menor tempo e com resolução adequada, conciliando ambos os requisitos e equilibrando frequência de observação e precisão dos dados.

De forma complementar, a resolução espacial apresentou correlações positivas com a precisão de apontamento, uma vez que níveis mais altos de detalhamento exigem maior estabilidade e exatidão do sistema. Também foram observadas relações positivas com os parâmetros de taxa de transmissão, armazenamento e processamento interno, que precisam ser maiores para suportar o volume de dados gerado por imagens de maior resolução. Dessa forma, a otimização da resolução espacial demanda ajustes diretos em toda a cadeia de aquisição, processamento e transmissão, garantindo que o sistema espacial seja capaz de armazenar e transmitir os dados sem perdas.

Contudo, como destacado anteriormente, todos esses requisitos apresentam correlação negativa ou muito negativa com o custo e o tamanho do CubeSat. Dessa forma, esse resultado evidenciou a cautela necessária ao ampliar o nível de desempenho da resolução espacial, visto que esse parâmetro impacta diretamente os demais subsistemas que devem ser capazes de operar de forma integrada dentro das especificações e restrições declaradas para a missão.

Essa análise descrita para a resolução espacial foi realizada para as demais características do payload, verificando-se que correlações com os parâmetros de desempenho do sistema, como armazenamento, processamento, confiabilidade, vida útil e custo são similares. No entanto, algumas interações específicas apresentam diferença, como a largura de faixa que apresenta uma correlação muito positiva com a resolução temporal, uma vez que aumenta a área monitorada por passagem.

4.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos, a aplicação da QFD possibilitou identificar de forma estruturada as relações entre as especificações de projeto e as necessidades dos clientes, fornecendo um direcionamento alinhado aos interesses dos stakeholders e objetivos da missão. Essa ferramenta evidenciou os requisitos técnicos necessários para a realização da missão, sendo que o SNR do espectrômetro e sensibilidade

térmica do sensor foram formalmente declarados apenas após a análise proporcionada pela QFD.

Além disso, a análise das correlações complementou essa etapa ao revelar sinergias e conflitos entre os próprios requisitos técnicos, permitindo compreender como a otimização de uma especificação pode impactar positiva ou negativamente o desempenho global do sistema. Como os CubeSats operam de forma integrada, com subsistemas interdependentes, essa visualização evidenciou as relações internas e contribuiu para uma compreensão sistêmica do projeto, complementando a análise de interfaces da engenharia de sistemas.

Diante disso, as análises realizadas demonstraram que a QFD pode ser utilizada como uma ferramenta eficaz de apoio à identificação de requisitos, permitindo compreender de forma estruturada como as expectativas se traduzem em parâmetros de engenharia. Além disso, os resultados obtidos a partir dessa ferramenta representam insumos promissores para futuras etapas de tomada de decisão e análises complementares no desenvolvimento de CubeSats, como estudos de viabilidade e *trade-offs*.

Apesar dos resultados positivos, destaca-se a complexidade na aplicação da ferramenta, especialmente durante os processos de tradução das necessidades em requisitos de projeto e de preenchimento das matrizes. Essas etapas exigiram conhecimento técnico detalhado dos componentes do CubeSat para garantir a coerência das especificações e de suas interconexões. Além disso, o tempo de desenvolvimento da QFD também se mostrou uma limitação, visto que, mesmo com um número controlado de requisitos técnicos, o preenchimento e a análise das matrizes de relacionamento e correlação demandaram um esforço significativo de interpretação e revisão, tornando o processo demorado.

Uma alternativa para as limitações destacadas seria a utilização da ferramenta com um conjunto reduzido de requisitos, concentrando-se inicialmente em um único subsistema. Essa abordagem pode simplificar as análises, reduzir o tempo de execução e, ao mesmo tempo, proporcionar resultados mais específicos e detalhados, sem comprometer a qualidade da avaliação.

Dessa forma, tanto a QFD quanto a tabela de tradução apresentaram resultados importantes que facilitaram o processo de declaração dos requisitos, além de fornecerem direcionamentos importantes para as demais etapas de desenvolvimento do CubeSat. No entanto, essa abordagem não substitui as práticas

padrões, mas atua de forma complementar para formar um processo claro de definição, facilitando a hierarquização e a identificação das especificações. Dessa forma, é possível obter uma estrutura útil para reduzir as falhas de projetos CubeSats, principalmente para desenvolvedores iniciantes.

Por fim, destaca-se que, inicialmente, este trabalho buscava utilizar ferramentas da disciplina de projeto de produto para otimizar a definição de requisitos, com o intuito de facilitar e agilizar esse processo. Contudo, ao longo do desenvolvimento ficou clara a importância das etapas da engenharia de sistemas. O fluxo de atividades e insumos, como as metas, objetivos, interfaces e ConOps, além de fornecer uma orientação para a realização das declarações, proporcionou um entendimento e compressão sobre o funcionamento do sistema espacial ao evidenciar expectativas, restrições, relações e funções críticas.

6. CONCLUSÃO

Inicialmente concebidos como ferramentas educacionais, os CubeSats ganharam relevância no cenário espacial global, sendo empregado em diversas aplicações, devido ao baixo custo, à versatilidade e ao curto tempo de desenvolvimento. Entretanto, a alta taxa de falhas observada, especialmente em projetos de origem acadêmica, ainda evidencia deficiências nos processos de engenharia, como na definição e análise de requisitos, o que gera definições ambíguas, incompletas e de difícil compreensão, comprometendo a confiabilidade do sistema e o sucesso das missões.

Diante desse contexto, este trabalho buscou analisar a aplicação da tabela de tradução e da casa da qualidade (QFD), ferramentas da metodologia de projeto de produto, com o intuito de complementar a abordagem tradicional no processo de definição de requisitos em projetos de CubeSats. O estudo teve como base a missão FritzSat Tatá, proposta para o monitoramento de incêndios na Amazônia, e foi conduzido a partir da estrutura clássica da engenharia de sistemas, iniciando pela identificação das necessidades dos stakeholders e seguindo com a definição de objetivos de missão, a elaboração das interfaces e do conceito de operações.

A partir desses insumos, foram definidos os requisitos de missão, de sistema e técnicos da carga útil, que serviram de base para o desenvolvimento e aplicação das ferramentas de projeto de produto. A tabela de tradução mostrou-se útil para organizar e hierarquizar requisitos de usuário e técnicos, facilitando a rastreabilidade entre as diferentes especificações. Além disso, destacou-se por oferecer um ponto de partida para a definição de requisitos, especialmente útil para desenvolvedores em fases iniciais, ao orientar a identificação das necessidades dos clientes e sua conversão em parâmetros técnicos.

Já a casa da qualidade permitiu quantificar a importância relativa de cada requisito de projeto e identificar as interdependências existentes entre as especificações, fornecendo uma visão integrada do CubeSat, ao evidenciar como os diferentes parâmetros se relacionam e influenciam no desempenho da missão. Além disso, o processo de conversão das necessidades em requisitos de projeto contribuiu para a identificação de requisitos técnicos importantes para a realização da missão, resultando em um conjunto mais completo e coerente de especificações.

Ademais, a QFD forneceu informações relevantes para as etapas futuras de desenvolvimento do CubeSat. A análise da matriz de relacionamento evidenciou que revisita, confiabilidade e vida útil são parâmetros críticos para o sucesso da missão, enquanto resolução espacial e sensibilidade térmica se destacam como fatores determinantes para a eficácia do payload. Além disso, as correlações observadas entre resolução espacial, custo e revisita reforçam a utilidade da ferramenta nas decisões de projeto, oferecendo subsídios para estudos de viabilidade e definição de arquitetura.

Durante o desenvolvimento do trabalho, constatou-se que as etapas da engenharia de sistemas, embora complexas, permanecem fundamentais para o processo de definição de requisitos. Os resultados proporcionados por essa abordagem formaram uma base para o desenvolvimento do projeto, ao esclarecer o funcionamento do CubeSat, suas relações, internas e externas, e as funções necessárias para o cumprimento da missão.

Dessa forma, a aplicação das ferramentas de projeto de produto demonstrou-se eficaz para complementar a engenharia de sistemas, contribuindo para uma definição de requisitos mais clara, rastreável e estruturada. A aplicação da tabela de tradução e da casa da qualidade demonstrou potencial para ajudar na identificação de requisitos técnicos e aprimorar a rastreabilidade e a coerência entre os diferentes níveis de requisitos.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a validação da metodologia proposta junto a profissionais e docentes da área espacial, de modo a identificar pontos de melhoria para ampliar a aplicabilidade da abordagem. Sugere-se também a utilização dos resultados obtidos como base para estudos de viabilidade, análises de trade-off e decisões de arquitetura em futuras missões, avaliando o uso das ferramentas de projeto de produto como suporte à toma de decisão e integração de subsistemas em projetos CubeSat.

REFERÊNCIAS

- ALANAZI, Abdulaziz; STRAUB, Jeremy. Engineering methodology for student-driven CubeSats. **Aerospace**, v. 6, n. 5, 2019. DOI: 10.3390/aerospace6050054. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/6/5/54>. Acesso em: 10 out. 2024.
- ALANAZI, Abdulaziz; JONES, Andrew; STRAUB, Jeremy. Requirements Modeling Language and Automated Testing for CubeSats. *In*: 2019 IEEE AUTOTESTCON, 2019, National Harbor. **Anais [...]**. National Harbor: IEEE, 2019. p. 1-6. DOI: 10.1109/LADC53747.2021.9672594. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8961058>. Acesso em: 10 out. 2024.
- DE ALMEIDA, Danilo Pallamin; GRAICS, Bence; CHAGAS, Ronan Arraes Jardim; DE SOUSA, Fabiano Luis; MATTIELLO-FRANCISCO, Fatima. Towards Simulation of CubeSat Operational Scenarios under a Cyber-Physical Systems View. *In*: 2021 10th Latin-American Symposium on Dependable Computing, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: LADC, 2021. p. 1-4. DOI: 10.1109/LADC53747.2021.9672594. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9672594>. Acesso em: 9 jul. 2024.
- ARNEODO, F.; DI GIOVANNI, A.; MARPU, P. A review of requirements for gamma radiation detection in space using CubeSats. **Applied Sciences**, v. 11, n. 6, p. 2659, mar. 2021. DOI: 10.3390/app11062659.
- ARRICHIELLO, Vincenzo. Introduction to systems engineering. *In*: INCOSE Italia Conference on Systems Engineering, 2014, Roma. **Anais [...]**. Roma: INCOSE Italia, 2014. Disponível em: <https://ceur-ws.org/Vol-1300/TUT01.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2025.
- ASUNDI, Sharan; FITZ-COY, Norman. Design of command, data and telemetry handling system for a distributed computing architecture CubeSat. *In*: 2013 IEEE Aerospace Conference, 2013, Big Sky. **Anais [...]**. Big Sky: IEEE, 2013. p. 1-14. DOI: 10.1109/AERO.2013.6496901. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6496901>. Acesso em: 9 jul. 2024.
- BATISTA, Antonio Cartos. Detecção de incêndios florestais por satélites. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 2, p. 237-241, 2004. DOI: 10.5380/ufpr.v34i2.2402. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2402>. Acesso em: 23 ago. 2025.
- BARCELLOS, Christovam; XAVIER, Diego; HACON, Sandra; ARTAXO, Paulo; GRACIE, Renata; MAGALHÃES, Monica; MATOS, Vanderlei; MONTEIRO, Antônio Miguel; FEITOSA, Patrícia. Queimadas na Amazônia e seus impactos na saúde: a incidência de doenças respiratórias no sul da Amazônia aumentou significativamente nos últimos meses. **3º Informe técnico do Observatório de Clima e Saúde**. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde, 2019. Disponível em: https://climaesaude.icict.fiocruz.br/sites/climaesaude.icict.fiocruz.br/files/informe_observatorio_queimadas.pdf. Acesso em: 23 ago. 2025.

BERTHOUD, Lucy; SWARTWOUT, Michael; CUTLER, James; KLUMPAR, David; LARSEN, Jesper; NIELSEN, Jens Dalsgaard. University CubeSat project management for success. *In*: CONFERENCE ON SMALL SATELLITES, 33., 2019, Logan. **Anais [...]**. Logan: Utah State University, 2019. p. 1-17. Disponível em: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2019/smallsat/134/>. Acesso em: 9 jul. 2024.

BOUZOUKIS, Konstantinos-Panagiotis; MORAITIS, Georgios; KOSTOPOULOS, Vassilis; LAPPAS, Vaios. An Overview of CubeSat Missions and Applications. **Aerospace**, v. 12, n. 6, p. 550, 2025. DOI: 10.3390/aerospace12060550. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/12/6/550>. Acesso em: 9 out. 2025.

BRASIL. Agência Espacial Brasileira. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Nanossatélites movimentam o Programa Espacial Brasileiro**. Agência Espacial Brasileira, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/assuntos/noticias/nanossatelites-movimentam-o-programa-espacial-brasileiro>. Acesso em: 22 abr. 2024.

BRASIL. Agência Espacial Brasileira. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) 2022-2031**. Agência Espacial Brasileira, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/programa-nacional-de-atividades-espaciais>. Acesso em: 22 set. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass brasileiros**. IBGE educa, 2025. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jov%20ens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomass-brasileiros.html>. Acesso em: 18 set. 2024.

BRASIL. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Ministério do Meio Ambiente. **Apostila para formação de brigadista de prevenção e combate aos incêndios florestais**. Brasília, DF: ICMBIO, 2010. Disponível em: <https://share.google/Aa9IRRFVgUaLlt9Tx>. Acesso em: 18 set. 2024.

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **A taxa consolidada de desmatamento por corte raso para os nove estados da Amazônia Legal (AC, AM, AP, MA, MT, PA, RO, RR e TO) em 2019 é de 10.129 km²**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020. Disponível em: http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5465. Acesso em: 18 set. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Lei do Manejo Integrado do Fogo completa um ano com avanços na conservação de florestas**. 30 set. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/lei-do-manejo-integrado-do-fogo-completa-um-ano-com-avancos-na-conservacao-de-florestas>. Acesso em: 22 set. 2025.

CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY. **CubeSat design specification**: Rev. 14.1. The CubeSat Program, Cal Poly SLO. San Luis Obispo, CA: California Polytechnic State University, 2022. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72>

e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

CAPPELLETTI, Chantal; ROBSON, Daniel. CubeSat missions and applications. *In*: CAPPELLETTI, Chantal; BATTISTINI, Simone; MALPHRUS, Benjamin K. (Ed.). **CubeSat handbook**: from mission design to operations. Londres: Academic Press, 2021. p. 53–65. DOI: 10.1016/B978-0-12-817884-3.00002-3.

CARNEVALLI, José Antonio; SASSI, Andreza; MIGUEL, Paulo. Aplicação do QFD no desenvolvimento de produtos: levantamento sobre seu uso e perspectivas para pesquisas futuras. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 33–49, 2004. DOI: 10.1590/S0104-530X2004000100004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/TTzrsvxCJ8WsC9x88xL4HLJ/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 15 set. 2025.

CERVONE, A.; TOPPUTO, F.; FRANZESE, V.; RODRÍGUEZ PÉREZ-SILVA, A.; BENAVENT LEON, B.; DELMAS GARCIA, B.; MINACAPILLI, P.; ROSA, P.; BAY, G.; RADU, S. The path towards increasing RAMS for novel complex missions based on CubeSat technology. **Ceas Space Journal**, v. 16, n. 2, p. 203-224, jul. 2023. DOI: 10.1007/s12567-023-00499-5.

CHAN, Lai-Kow; WU, Ming-Lu. Quality function deployment: a literature review. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 143, n. 3, p. 463–497, 2002. DOI: 10.1016/S0377-2217(02)00178-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221702001789>. Acesso em: 15 set. 2025.

CHOI, Changrak; DAVIS, Anthony. GEOSCAN: Global Earth Observation using Swarm of Coordinated Autonomous Nanosats. *In*: 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO), 2022, Big Sky. **Anais [...]**. Big Sky: IEEE, 2022. p. 1-10. DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843775. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9843775>. Acesso em: 9 nov. 2024.

CLAVIER, Cannelle; MEFTAH, Mustapha; ROUANET, Nicolas; MARISCAL, Jean-François. A NIR spectrometer onboard Uvsq-Sat NG satellite for observing greenhouse gases. *In*: Earth Observing Systems, 29., 2024, San Diego. **Anais [...]**. San Diego: SPIE, 2024. p. 235-249. DOI: 10.1117/12.302868. Disponível em: <https://insu.hal.science/insu-04736375v1>. Acesso em: 10 out. 2025.

COPERNICUS. CLIMATE CHANGE SERVICE. **Global Climate Highlights 2024**. 10 jan. 2025. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>. Acesso em: 30 ago. 2025.

DEL CAMPO-HITSCHFELD, María Luisa; ARENAS, Nicolás; RIVERA, Marco; BALLESTEROS-PÉREZ, Pablo. Application of Spectrometry for Determining the Solar Radiation of Deciduous Trees' Shade: A Passive Energy Conservation Approach for Mediterranean Climates. **Buildings**, v. 13, n. 5, p. 1130, 2023. DOI: 10.3390/buildings13051130. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/5/1130>. Acesso em: 10 out. 2025.

DING, Fang; TANG, Guoliang; ZHANG, Tongxu; WU, Wenli; ZHAO, Bangjian; MIAO, Jingwen; LI, Dunping; LIU, Xu; WANG, Jianyu; LI, Chunlai. Spaceborne Lightweight and Compact High-Sensitivity Uncooled Infrared Remote Sensing Camera for Wildfire Detection. **Remote Sensing**, v. 17, n. 8, p. 1387, 2025. DOI: 10.3390/rs17081387. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/8/1387>. Acesso em: 10 out. 2025.

DONATI, Damylle C. X.; LEHMKUHL, Henrique M.; KOPKO, Ludmila; CARREIRO, Thiago C.; POSSAMAI, Talita Sauter. Systems Engineering of a Brazilian Amazon Imaging CubeSat Constellation: FritzSAT Mission. *In: LATIN AMERICAN CUBESAT WORKSHOP: CUBESAT-BASED SATELLITES AND THEIR APPLICATIONS*, 33., 2024, Salvador. **Companion Book v0.1**. Salvador: Lacw, 2024. p. 212-221. Disponível em: <https://cubesat.ufsc.br/2024/cb1.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2025

DUNWOODY, Rachel; REILLY, Jack; MURPHY, David; DOYLE, Maeve; THOMPSON, Joseph; FINNERAN, Gabriel; SALMON, Lána; O'TOOLE, Conor; AKARAPU, Sai Krishna Reddy; ERKAL, Jessica; MANGAN, Joseph; MARSHALL, Fergal; SOMERS, Eoghan; WALSH, Sarah; DE FAOITE, Daithí; HIBBETT, Mike; PALMA, David; FRANCHI, Loris; HA, Lily; HANLON, Lorraine. Thermal vacuum test campaign of the EIRSAT-1 engineering qualification model. **Aerospace**, v. 9, n. 2, p. 99, fev. 2022. DOI: 10.3390/aerospace9020099.

ECSS, Secretariat. **ECSS-E-HB-10-02A**: Verification guidelines. Noordwijk: Esa Requirements And Standards Division, 2010.

ECSS, Secretariat. **ECSS-E-HB-10-02A**: Technical requirements specification. Noordwijk: Esa Requirements And Standards Division, 2009.

ECSS, Secretariat. **ECSS-E-ST-10-24C REV.1**: Interface management. Noordwijk: Esa Requirements And Standards Division, 2024.

ECSS, Secretariat. **ECSS-E-ST-10C REV.1**: Space engineering: System engineering general requirements. Noordwijk: Esa Requirements & Standards Division, 2017.

ECSS, Secretariat. **ECSS-M-ST-10C REV.1**: Space project management: Project planning and implementation. Noordwijk: Esa Requirements & Standards Division, 2009.

ECSS, Secretariat. **ECSS-P-00C REV.1**: Standardization objectives, policies and organization. Noordwijk: Esa Requirements And Standards Division, 2024.

ECSS, Secretariat. **ECSS-S-ST-00C REV.1**: Description, implementation and general requirements. Noordwijk: Esa Requirements And Standards Division, 2020.

ELLER, Johanns. **Focos de queimadas na Amazônia crescem 30% em 2019**. 08 jan. 2020. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/focos-de-queimadas-na-amazonia-crescem-30-em-2019-1-24176803>. Acesso em: 19 set. 2024.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **CubeSats**. 27 set. 2023. Disponível em: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/CubeSats. Acesso em: 20 out. 2025.

FEARNSIDE, Philip M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. In: FEARNSIDE, Philip M. (ed.). **Destruição e conservação da floresta amazônica**. Manaus: Editora do INPA, 2022. p. 7–19. ISBN 978-85-211-0193-2. Disponível em: https://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2022/Destruicao-v1/Cap-1-Desmatamento_historia.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.

FONSECA, Antonio Jorge Hernández. **Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional**. 2000. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78276>. Acesso em 15 set. 2025.

FOSSE, Elyse; DELP, Christopher. Systems engineering interfaces: A model based approach. In: 2013 IEEE Aerospace Conference, 2013, Big Sky. **Anais [...]**. Big Sky: IEEE, 2013. p. 1-8. DOI: 10.1109/AERO.2013.6497322. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6497322>. Acesso em: 9 jul. 2024.

GOLKAR, Alessandro; SALADO, Alejandro. Definition of New Space—Expert Survey Results and Key Technology Trends. **IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems**, v.2, n.1, p. 2-9, 2021. DOI: 10.1109/JMASS.2020.3045851. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9298818>. Acesso em: 15 set. 2024.

GABARDO, Gislaine; SARZEDAS, Carolina Galvão; SILVA, Henrique Luis da. Queimadas na Amazônia brasileira: Brasil em chamas. **A educação ambiental em uma perspectiva interdisciplinar**, v. 4, n. 22, p. 332-343, 2021. DOI: 10.37885/200800872.

IMAZON. **O Aumento no Desmatamento na Amazônia em 2013: um ponto fora da curva ou fora de controle?**. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2014. Acesso em: 18 set. 2024.

INCOSE. **INCOSE SYSTEMS ENGINEERING HANDBOOK**. 3. ed. United States: INCOSE, 2006.

JALLAD, Abdul-Halim; MARPU, Prashanth; ABDUL AZIZ, Zulkifli; AL MARAR, Abdulla; AWAD, Mohammed. MeznSat—A 3U CubeSat for Monitoring Greenhouse Gases Using Short Wave Infra-Red Spectrometry: Mission Concept and Analysis. **Aerospace**, v. 6, n. 11, p. 118, 2019. DOI: 10.3390/aerospace6110118. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/6/11/118>. Acesso em: 23 ago. 2025.

JOTHA, Lúcio dos Santos. **ESTAÇÃO MULTIMIÇÃO DE NATAL - MANUAL TÉCNICOINPE**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020.

KRIEDTE, W. ECSS: an initiative to develop a single set of European space standards. **Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Engineering**, Noordwijk, v. 386, p.321, 1996.

KRIEDTE, W.; EL GAMMAL, Y. A new approach to European Space Standards. **ESA Bulletin**, Noordwijk, v. 81, p. 38-43, 1995.

KWON, Kybeom; MIN, Seunghyun; KIM, Jongbum; LEE, Kwangwon. Framework development for efficient mission-oriented satellite system-level design. **Aerospac**, v. 10, n. 3, p. 228, 2023. DOI: 10.3390/aerospace1003022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/3/228>. Acesso em: 20 set. 2025.

LAHRICHI, Anas. Heat transfer modeling and simulation of masat-1. **Al Akhawayn University School of Science and Engineering, Ifran, Morocco**, v. 44, 2017.

LEMOS, André Luiz Ferreira; SILVA, José de Arimatea. Desmatamento na Amazônia Legal: evolução, causas, monitoramento e possibilidades de mitigação através do Fundo Amazônia. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 98-108, 2011. DOI: 10.4322/floram.2011.027. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/gyXFGkZ3CPqd7HHCwbyTrVM/?lang=pt>. Acesso em: 18 set. 2024.

LIU, Sining; THEOHARIS, Panagiotis Ioannis; RAAD, Raad; TUBBAL, Faisel; THEOHARIS, Angelos; IRANMANESH, Saeid; ABULGASEM, Suhila; KHAN, Muhammad Usman Ali; MATEKOVITS, Ladislau. A survey on CubeSat missions and their antenna designs. **Electronics**, v. 11, n. 13, p. 2021, jun. 2022. DOI: 10.3390/electronics11132021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/13/2021>. Acesso em: 11 set. 2025.

MAPBIOMAS. **INFOGRÁFICOS**. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/infograficos/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

MAPBIOMAS (Brasil). **O Projeto**. 2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/o-projeto/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

MARENGO, José A.; SOUZA JUNIOR, Carlos. **Mudanças climáticas, impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo: Alana, 2018. Disponível em: <https://www.oamanhae hoje.com.br/>. Acesso em: 18 set. 2024.

MARGULIS, S. **Causas do desmatamento da Amazônia Brasileira**. 1. ed. Brasília: Banco Mundial, 2003.

MATZLER, Kurt; HINTERHUBER, Hans H. How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment. **Technovation**, [s. l.], v. 18, n. 1, 1998. DOI: 10.1016/S0166-4972(97)00072-2. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166497297000722>. Acesso em: 15 set. 2025.

MELO FILHO, Luiz de Rodrigues; CHENG, Lin Chih. **QFD: Desdobramento da Função Qualidade na Gestão de Desenvolvimento de Produtos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

NASA. **NASA Systems Engineering Handbook**. 1. ed. Whashington: NASA, 2007.

NDAO, Mamadou Lamine; BARON, Claude; KNUDSEN, Einar; JOAO, Kelson. Towards a systems engineering framework for CubeSats development. *In: IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 18., 2024, Montreal. **Anais [...]**. Montreal: IEEE, 2024. p. 1-8. DOI: 10.1109/SysCon61195.2024.10553549. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10553549>. Acesso em: 18 mar. 2025.

OMS. **Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre**. 4 abr. 2022. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre>. Acesso em: 30 ago. 2025.

ORORATECH. **Why Earth Observation is the Future of Fire Detection**. 21 set. 2024. Disponível em: <https://ororatech.com/resources/news-blog/why-earth-observation-is-the-future-of-fire-detection>. Acesso em: 22 set. 2025.

PAIKOWSKY, Deganit. What is new space?: the changing ecosystem of global space activity. **New Space**, v. 5, n. 2, p. 84-88, jun. 2017. DOI: 10.1089/space.2016.0027.

PUIG-SUARI, Jordi; TURNER, Clark; AHLGREN, William. Development of the standard CubeSat deployer and a CubeSat class picosatellite. *In: IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 1., 2001. **Anais [...]**. [S. l.]: IEEE, 2014. p. 1-347. DOI: 10.1109/AERO.2001.931726. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/931726>. Acesso em: 18 mar. 2025.

REITZ, Francini; ALVES, Salete Maria; LINHARES, José Carlos. Uso de matrizes QFD na fase de projeto informacional do processo de desenvolvimento de produto. *In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 6., 2010. **Anais [...]**. Campina Grande: ABCM, 2010.

ROZENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando Antônio; AMARAL, Daniel Capaldo; TOLEDO, José Carlos de; SILVA, Sergio Luis da; ALLIPRANDINI, Dário Henrique; SCALICE, Régis Kovacs. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo, SP: Saraiva, 2006.

SANTILLI, Giancarlo; VENDITTOZZI, Cristian; CAPPELLETTI, Chantal; BATTISTINI, Simone; GESSIN, Paolo. CubeSat constellations for disaster management in remote areas. **Acta Astronautica**, v. 145, p. 11-17, 2018. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.12.050. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576517303168>. Acesso em: 15 ago. 2025.

SEJERA, Marloun; YAMAUCHI, Takashi; ORGER, Necmi Cihan; OTANI, Yukihiisa; CHO, Mengu. Scalable and Configurable Electrical Interface Board for Bus System Development of Different CubeSat Platforms. **Applied Sciences**, v. 12, n. 18, p. 8964, 2022. DOI: 10.3390/app12188964. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/18/8964>. Acesso em: 20 set. 2025.

SELVA, Daniel; KREJCI, David. A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation. **Acta Astronautica**, v. 74, p. 50-68, 2012. DOI: 10.1016/j.actaastro.2011.12.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576511003742>. Acesso em: 11 set. 2025.

SILVA, Maria do Socorro Rocha da; RÍOS-VILLAMIZAR, Eduardo Antonio; MIRANDA, Átila Fonseca; GOMES, Nubia Abrantes; PASCOALOTO, Domitila; FERREIRA, Sávio José Filgueira; OLIVEIRA, Regison da Costa de; SANTANA, Genilson Pereira; CUNHA, Hillândia Brandão. Bacia hidrográfica do rio Amazonas: tipologia voltada para a gestão destes recursos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS*, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: ABRHidro, 2019.

SOUSA, Maria João; MOUTINHO, Alexandra; ALMEIDA, Miguel. Thermal infrared sensing for near real-time data-driven fire detection and monitoring systems. **Sensors**, v. 20, n. 23, 2020. DOI: 10.3390/s20236803. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6803>. Acesso em: 22 set. 2025.

SWARTWOUT, Michael. The first one hundred CubeSats: a statistical look. **Journal of Small Satellites**, v. 2, n. 2, p. 213-233, 2013

SWIFTGEOSPATIAL. **The Basics of Spectral Bands: NIR, SWIR, and RGB**. 12 mar. 2025. Disponível em: <https://swiftgeospatial.solutions/2025/03/12/the-basics-of-spectral-bands-nir-swir-and-rgb/>. Acesso em: 22 set. 2025.

TOORIAN, Armen; DIAZ, Ken; LEE, Simon. The CubeSat approach to space access. *In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE*, 2008, Big Sky. **Anais [...]**. Big Sky: IEEE, 2008. p. 1-14. DOI: 10.1109/aero.2008.4526293.

WANG, Sen; XU, Wei; GUO, Tianqi. Advances in thermal infrared remote sensing technology for geothermal resource detection. **Remote Sensing**, v. 16, n. 10, p. 1690, 2024. DOI: 10.3390/rs16101690. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/10/1690>. Acesso em: 20 set. 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Greenhouse gas concentrations surge again to new record in 2023**. 28 Out. 2024. Disponível em: <https://wmo.int/news/media-centre/greenhouse-gas-concentrations-surge-again-new-record-2023>. Acesso em: 30 ago. 2025.

VILLELA, Thyrsio; COSTA, Cesar A.; BRANDÃO, Alessandra M.; BUENO, Fernando T.; LEONARDI, Rodrigo. Towards the thousandth CubeSat: a statistical overview. **International Journal of Aerospace Engineering**, v. 2019, n. 1, 2019. DOI: 10.1155/2019/5063145.

APÊNDICE A – Tabela de requisitos para o FritzSat Tatá

Requisitos de Missão	Requisitos de Sistema	Requisitos Técnicos
FST-RM-01: Adquirir dados de temperatura do solo do território amazônico, em condições diurnas e noturnas	FST-RS-F-01.1 O sistema deve adquirir dados no espectro do infravermelho térmico adequados à identificação de focos incipientes de incêndio	FST-RS-P-01.1.1: O sensor térmico deve operar nas faixas espectrais MWIR e LWIR
	FST-RS-D-01.2: O sistema deve medir a temperatura da superfície terrestre do território amazônico com resolução térmica mínima de 1 °C	FST-RT-P-01.2.1: O detector deve possuir NETD ≤ 100 mK (0,1 °C)
	FST-RS-D-01.3: O sistema deve adquirir dados térmicos com resolução espacial mínima de 30 m na superfície terrestre	FST-RT-P-01.3.1: O sensor térmico deve proporcionar resolução espacial ≤ 30 m/pixel para uma altitude orbital de 550 km
	FST-RS-D-01.4: O sistema deve assegurar revisita sobre a região de interesse em intervalo máximo de 15 minutos	FST-RT-P-01.4.2: O sensor térmico deve possuir uma largura de faixa (swath) de, no mínimo, 400 km para garantir a resolução temporal da missão.
	FST-RS-D-01.5: O sistema deve georreferenciar os dados adquiridos com acurácia mínima de TBD m	
FST-RM-02: Adquirir dados espectrais capazes de estimar a concentração de dióxido de carbono (CO ₂) e metano (CH ₄) sobre a região amazônica	FST-RS-F-02.1: O sistema deve estimar a concentração de dióxido de carbono (CO ₂) e metano (CH ₄) sobre a região amazônica.	FST-RT-P-02.1.1: O espectrômetro do payload deve operar na faixa espectral de 1,4 – 2 μ m, sensível a CO ₂ e CH ₄
	FST-RS-D-02.2: O sistema deve detectar variações mínimas de concentração de 4 ppm para CO ₂ e de 25 ppb para CH ₄	FST-RT-P-02.1.2: A resolução espectral deve ser ≤ 6 nm para uma altitude orbital de 550 km
		FST-RT-P-02.2.2: O espectrômetro deve alcançar SNR ≥ 500 para suportar precisão de detecção de CO ₂ ≥ 5 ppm e CH ₄ ≥ 25 ppb
	FST-RS-D-02.3: O sistema deve assegurar revisita sobre a região de interesse em intervalo máximo de 15 minutos	
	FST-RS-F-02.4: O sistema deve associar metadados essenciais, tempo, localização e parâmetros de aquisição, a cada estimativa de gases	

Requisitos de Missão	Requisitos de Sistema	Requisitos Técnicos
FST-RM-03: Transmitir a integralidade dos dados adquiridos para estações de solo designadas	FST-RS-F-03.1: O sistema espacial deve transmitir os dados e produtos adquiridos para estações de solo designadas	
	FST-RS-D-03.2: O sistema espacial deve garantir taxa efetiva de downlink em banda X	
	FST-RS-D-03.3: O sistema espacial deve suportar uplink de comandos em banda S	
	FST-RS-F-03.4: O sistema espacial deve gerenciar as janelas de comunicação, respeitando restrições de atitude, potência e visibilidade.	
FST-RM-04: Adquirir dados que permitam a análise da cobertura vegetal e avaliação de áreas afetadas por queimadas	FST-RS-F-04.1: O sistema deve adquirir imagens multiespectrais do território amazônico que permitam a análise da saúde vegetal e avaliação de áreas queimadas	FST-RT-P-04.1.1: O sensor multiespectral deve operar na faixa espectral VNIR
	FST-RS-D-04.2: O sistema deve fornecer imagens multiespectrais com resolução espacial mínima de 100 m na superfície terrestre	FST-RT-P-04.2.1: O sistema óptico e detector devem proporcionar resolução espacial ≤ 100 m/pixel, considerando altitude orbital nominal de 550 km
		FST-RT-P-04.2.2: O sensor deve apresentar razão sinal-ruído (SNR) ≥ 100
	FST-RS-F-04.3: O sistema deve associar metadados de tempo, localização e parâmetros de aquisição, a cada estimativa de gases	
	FST-RS-F-04.4: O sistema deve captar imagens do território a cada 60 minutos	FST-RT-P-01.4.2: O sensor VNIR deve possuir uma largura de faixa (swath) de, no mínimo, 400 km para garantir a resolução temporal da missão.

APÊNDICE B – Tabela de tradução de requisitos

Atributos para CubeSat	Perguntas para Levantamento de Necessidades dos Clientes	Requisitos de Usuário
Desempenho	- Qual é a função primária do sistema espacial? - Quais dados a carga útil deve coletar e com qual precisão? - Qual a área de interesse que o satélite deve cobrir? - Qual a frequência de coleta e de atualização dos dados? - Qual a latência máxima aceitável para o envio dos dados? - Qual o tempo máximo entre a detecção e a disponibilização dos dados ao usuário final? - Em quanto tempo os dados precisam ser processados e disponibilizados? - Os dados devem ser criptografados? - Quais variáveis ambientais devem ser monitoradas (ex.: temperatura, gases, vegetação)? - Há exigência de integração com bases de dados externas (ex.: INPE, IBAMA)?	- Adquirir imagens do território; - Detectar e monitorar incêndios; - Mapear rios, lagos e/ou vegetação; - Coletar dados de temperatura; - Estimar concentração de gases; - Garantir a qualidade da imagem/dado
		- Monitorar uma área em intervalos regulares; - Atualizar dados em frequência pré-definida; - Fornecer dados em uma frequência específica;
		- Coletar e armazenar dados de forma contínua; - Manter um histórico da missão; - Garantir segurança e confidencialidade das informações; - Processar dados a bordo para alertas rápidos; - Fornecer a localização precisa dos dados coletados;
Confiabilidade e Vida Útil	- Qual a vida útil mínima esperada em órbita? - Qual o nível de confiabilidade aceitável (probabilidade de sucesso)? - Quais riscos são toleráveis durante a missão? - O sistema deve continuar operando após falhas parciais? - O sistema deve garantir a segurança cibernética? - Há necessidade de redundância?	- O sistema deve ter uma vida útil esperada de [TBD] meses/anos; - O projeto deve priorizar a baixa complexidade; - O projeto deve priorizar a minimização dos riscos de falha da missão; - Segurança cibernética; - Operar em extremos de térmicos; - Minimizar riscos de missão;
Restrições de Recursos	- Qual é o orçamento máximo disponível para desenvolvimento, lançamento e operação? - Existem restrições de massa, volume ou potência? - O projeto deve priorizar baixo custo ou maior durabilidade? - O uso de componentes COTS (Commercial Off-the-Shelf) é permitido? - Há restrições de fornecedores ou componentes com certificações específicas (espaciais ou COTS)? - Qual o tempo máximo aceitável para desenvolvimento e integração? - Há preferência por plataformas padronizadas (ex.: CubeSat 1U, 3U)?	- Ocupar o menor espaço possível; - Minimizar custos de desenvolvimento e operação; - Ser acessível para instituições de pesquisa; - Reduzir número de componentes exclusivos; - Lançamento em veículos secundários; - Baixo Custo;
		- Suportar o consumo máximo de energia durante as operações da carga útil e comunicação; - Ter a capacidade de entrar em modo de baixo consumo (modo de segurança); - Manter uma reserva de energia para operações de contingência; - Maximizar eficiência energética;
Operabilidade	- O sistema deve operar de forma autônoma ou supervisionada? - Qual o nível de intervenção humana desejado? - Quão rápida deve ser a comunicação entre solo e satélite? - Quais dados precisam ser enviados ou processados automaticamente? - Os dados precisam ser compatíveis com sistemas de alerta existentes (ex.: INPE, Defesa Civil)? - Os dados brutos gerados precisam de pré-processamento antes de serem entregues? - Qual o tempo máximo de resposta aceitável a comandos enviados da Terra? - O sistema deve ser capaz de atualizar software em órbita?	- Enviar dados críticos em tempo real; - Garantir que os dados coletados cheguem ao solo sem perdas; - Baixa latência na transmissão e recebimento; - Capacidade de solicitar o monitoramento de áreas específicas; - Receber e executar comandos remotos; - Garantir autonomia de operação durante períodos sem contato; - Disponibilizar os dados em formatos compatíveis com sistemas de alerta ou plataformas de terceiros;
		- Operar sem intervenção humana; - Tomada de decisão automática; - Capacidade de reconfiguração autônoma; - Operar com segurança em caso de falhas (modo seguro); - Capacidade de atualizar o software do satélite em órbita para corrigir falhas ou adicionar novas funcionalidades

Requisitos de Usuário	Requisitos Técnicos	Associação Principal
• Adquirir imagens do território; • Detectar e monitorar incêndios; • Mapear rios, lagos e/ou vegetação; • Coletar dados de temperatura; • Estimar concentração de gases; • Garantir a qualidade da imagem/dado	• Resolução Espacial [m]; • Resolução Radiométrica [bits]; • Faixa Espectral [nm ou μm]; • Sensibilidade do Sensor [ppm]; • Campo de Visada (FOV) [°]; • Largura de faixa de varredura [km]; • Relação Sinal-Ruído (SNR) [dB];	Payload
• Monitorar uma área em intervalos regulares; • Atualizar dados em frequência pré-definida; • Fornecer dados em uma frequência específica;	• Resolução Temporal [h ou min]; • Latência máxima de alerta [h ou min]; • Taxa de Aquisição de Dados [Hz];	Revisita
• Coletar e armazenar dados de forma contínua; • Manter um histórico da missão; • Garantir segurança e confidencialidade das informações; • Processar dados a bordo para alertas rápidos; • Fornecer a localização precisa dos dados coletados;	• Capacidade de Armazenamento a Bordo [GB]; • Capacidade de Armazenamento do Histórico [meses]; • Capacidade de Processamento a Bordo [MIPS]; • Criptografia [Sim/Não];	Controle de Dados
• O sistema deve ter uma vida útil esperada de [TBD] meses/anos; • O projeto deve priorizar a baixa complexidade; • O projeto deve priorizar a minimização dos riscos de falha da missão; • Segurança cibernética; • Operar em extremos de térmicos; • Minimizar riscos de missão;	• Vida Útil do Satélite [Meses ou Anos]; • Confiabilidade do Satélite [%]; • Redundância de Subsistemas [Sim ou Não]; • Frequência da Telemetria [s]; • Resistência à Radiação Total (TID) [krad]; • Faixa de Temperatura de Operação [°C]; • Taxa de Dissipação de Calor [W]; • Resistência a vibração de lançamento [gRMS];	Confiabilidade
• Ocupar o menor espaço possível; • Minimizar custos de desenvolvimento e operação; • Ser acessível para instituições de pesquisa; • Reduzir número de componentes exclusivos; • Lançamento em veículos secundários; • Baixo Custo;	• Custo Total do Projeto [USD]; • Custo de Operação [USD/ano]; • Volume do CubeSat [U]; • Massa do Satélite [Kg];	Custo
• Suportar o consumo máximo de energia durante as operações da carga útil e comunicação; • Ter a capacidade de entrar em modo de baixo consumo (modo de segurança); • Manter uma reserva de energia para operações de contingência; • Maximizar eficiência energética;	• Potência Elétrica Gerada pelos painéis solares [W]; • Capacidade da Bateria [Wh ou Ah]; • Eficiência do Sistema de Energia [%]; • Densidade Energética das Baterias [Wh/kg]; • Consumo de Energia [W];	Energia
• Cumprir prazo máximo de desenvolvimento;	• Tempo Máximo de Desenvolvimento [meses]; • Tempo de integração e testes;	Tempo
• Enviar dados críticos em tempo real; • Garantir que os dados coletados cheguem ao solo sem perdas; • Baixa latência na transmissão e recebimento; • Capacidade de solicitar o monitoramento de áreas específicas; • Receber e executar comandos remotos; • Garantir autonomia de operação durante períodos sem contato; • Disponibilizar os dados em formatos compatíveis com sistemas de alerta ou plataformas de terceiros;	• Taxa de Transmissão (Downlink) [Mbps]; • Taxa de Transmissão (Uplink) [Kbps]; • Latência de Comando [s]; • Latência Máxima de Telemetria [s]; • Ganho da Antena [dBi]; • Latência Máxima [s]; • Capacidade de Processamento a Bordo [MIPS]; • Capacidade de uplink para reconfiguração [kbps];	Comunicação
• Operar sem intervenção humana; • Tomada de decisão automática; • Capacidade de reconfiguração autônoma; • Operar com segurança em caso de falhas (modo seguro); • Capacidade de atualizar o software do satélite em órbita para corrigir falhas ou adicionar novas funcionalidades	• Capacidade de Processamento a Bordo [MIPS]; • Autonomia Operacional [Dias ou Semanas]; • Capacidade de Operação em Modo Seguro [Sim/Não];	Operações de Voo

APÊNDICE C – Casa da qualidade

Requisitos Técnicos		Importância	Resolução Espacial	Sensibilidade Térmica (NEΔT)	Largura de Faixa (Swath)	Inclusão de faixas além de TIR	Faixa Espectral do Espectrômetro	Resolução Espectral do Espectrômetro	SNR do Espectrômetro	Precisão de apontamento	Resolução Temporal (Revisita)	Latência máxima do alerta	Taxa de Transmissão de Dados (Downlink)	Capacidade de Armazenamento a Bordo	Capacidade de Processamento a Bordo	Algoritmo de Criptografia	Vida Útil do Satélite	Confiabilidade	Tamanho do CubeSat	Custo Total do Projeto
Requisitos de Usuário	Identificação de incêndios em estágios iniciais na Amazônia	5	▲	▲	•	▲		▲		▲	▲		▲	▲	▲		•	•	▲	•
	Avaliar extensão, danos e severidade das áreas queimadas	4	▲	•	▲	▲				•	▼		▼	•	•		▼	•	▼	▼
	Monitorar a saúde e a regeneração da cobertura vegetal	4	▲	•	•	▲				•	▼		▼	•	•		▼	•	▼	▼
	Monitorar a concentração de gases na atmosfera (CO2/CH4)	4					▲	▲	▲	•	▲		▼	•	•		▼	•	•	▼
	Monitoramento diurno e noturno	5		▲						▼	▲						▼	▼		▼
	Capacidade de monitorar a mesma área várias vezes ao dia	5				▲					▲						▼	▼		▼
	Fornecer uma localização precisa dos focos	4	▲	•						▲					•		•	•		•
	Cobertura de áreas remotas e/ou de difícil acesso	4	•			▲					▲						▼			▼
	Tempo de entrega rápido (até 15 min após detecção)	5											▲	▲	▼	▲	▼	•	▼	•
	Disponibilidade de dados e relatorios online	3										•		▲	▲	▼	•		▼	▼
Atualização diária dos dados disponíveis online		4									▲	•	▲	•	▼	▼	▼	▼	▼	▼
Operação autônoma mínima		2								▼				•	•		▲	▲	▼	•
Segurança da Informação (Dados criptografados)		4											▼	▼	▼	▲		•	▼	•
Acesso a informações de status e telemetria do satélite		1											•				•	•		▼
O sistema deve apresentar um alto nível de confiabilidade		5	▲	▲		•	▼	▲	▲	▲	▼		•	▼	•		▲	▲	•	•
O projeto deve apresentar o menor custo possível		3	•	•	▼	•	▼	•	•	•	•	•	•	•	•	•	▲	▲	▲	▲
A vida útil deve ser de no mínimo 24 meses		5	▼	▼		•	▼	▼	▼	•	▼		▼	▼	▼		▲	▲	•	•
Baixa complexidade		2	▼	▼	▼	•	▼	▼	▼	•	•	▼	▼	▼	▼	•	▲	▲	▲	•
Importância Absoluta			226	187	149	117	56	102	102	199	285	68	163	111	186	69	228	260	126	157
Importância Relativa			4	6	10	12	18	14	14	5	1	17	8	13	7	16	3	2	11	9

