

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AEROESPACIAL

Gabriel Cancian Demin

**PROJETO CONCEITUAL DE UMA SONDA ESTRATOSFÉRICA
REUTILIZÁVEL UTILIZANDO MBSE PARA ESTUDO DE MODELOS
CLIMÁTICOS E DE EVENTOS ONDULATÓRIOS NA ATMOSFERA**

Santa Maria, RS
2023

Gabriel Cancian Demin

**PROJETO CONCEITUAL DE UMA SONDA ESTRATOSFÉRICA REUTILIZÁVEL
UTILIZANDO MBSE PARA ESTUDO DE MODELOS CLIMÁTICOS E DE EVENTOS
ONDULATÓRIOS NA ATMOSFERA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Aeroespacial**. Defesa realizada por videoconferência.

Orientador: Prof. Eduardo Escobar Bürger

Santa Maria, RS
2023

Gabriel Cancian Demin

**PROJETO CONCEITUAL DE UMA SONDA ESTRATOSFÉRICA REUTILIZÁVEL
UTILIZANDO MBSE PARA ESTUDO DE MODELOS CLIMÁTICOS E DE EVENTOS
ONDULATÓRIOS NA ATMOSFERA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Aeroespacial**.

Aprovado em 11 de agosto de 2023:

**Eduardo Escobar Bürger, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)**

Andrei Piccinini Legg, Dr. (UFSM)

Christopher Shneider Cerqueira, Dr. (ITA)

Santa Maria, RS
2023

DEDICATÓRIA

Ao meu avô, Paulo Renato Marques Cancian, que me mostrou a importância de sonhar, me apoiou em cada passo de minha trajetória e acima de tudo, me ensinou que a base de tudo está no afeto e nas relações humanas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Justina Cancian, minha avó e mãe, por todo seu carinho, e incentivo, por seu infinito amor e seu auxílio em todas as etapas de minha vida;

Agradeço à Jorge Farias, meu tio e amigo, pelo amor e pela dedicação nesta fase de minha vida, e que me ajudou em todos momentos com incentivo e fraternidade;

Agradeço à minha mãe Tassiana Cancian, e meu pai Marcio Demin, pelo amor e apoio que me permitiram chegar até aqui;

Agradeço à Roberta Petry, minha namorada, melhor amiga e confidente, por todo seu amor e parceria desde o momento que nos conhecemos, por cada dia que me inspirou e incentivou, por compartilhar dos meus sonhos e estar sempre ao meu lado;

Agradeço aos professores pelos anos de dedicação na transmissão do conhecimento e pelo respeito e empenho em exercer a mais importante de todas as funções;

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Escobar Bürger, pela paciência, prestatividade, apoio, e parceria, nesta e outras etapas de minha graduação;

Agradeço aos meus amigos e colegas, os carregarei para sempre comigo, sua convivência e amizade tem protagonismo nesta trajetória;

Agradeço ao Estado Brasileiro e à Universidade Federal de Santa Maria pelo investimento em minha graduação por meio desta vaga em uma Universidade Pública, Gratuita e de Qualidade;

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, direta ou indiretamente. Espero que este trabalho possa ser útil e contribuir de alguma forma para a área em que atuamos.

"Seja quem você for, independente da posição que você tenha na vida, tenha sempre como meta: muita força e muita determinação. Sempre faça tudo com muito amor que um dia você chega lá, de alguma maneira você chega lá."

(Ayrton Senna da Silva)

RESUMO

PROJETO CONCEITUAL DE UMA SONDA ESTRATOSFÉRICA REUTILIZÁVEL UTILIZANDO MBSE PARA ESTUDO DE MODELOS CLIMÁTICOS E DE EVENTOS ONDULATÓRIOS NA ATMOSFERA

AUTOR: Gabriel Cancian Demin

Orientador: Eduardo Escobar Bürger

Este trabalho apresenta o projeto conceitual de uma sonda estratosférica utilizando Model-Based Systems Engineering (MBSE). O objetivo principal do estudo é coletar dados para comparação e validação de modelos de temperatura e vento, além de utilizar medições do sistema juntamente com outras observações para entender a origem de fenômenos ondulatórios na atmosfera. A metodologia utilizada foi a abordagem de engenharia de sistemas da NASA, que permitiu o desenvolvimento do projeto de forma sistemática e eficiente. Além disso, foi utilizado o MBSE, uma abordagem que utiliza modelos como ferramentas para integrar e gerenciar informações ao longo do ciclo de vida do projeto. A ferramenta de código aberto Capella foi utilizada para modelar o sistema, permitindo a obtenção de um conceito de solução a partir do problema capturado dos stakeholders, permitindo também visualizar as interfaces e a rastreabilidade de todos os elementos. Os resultados foram obtidos através de múltiplas iterações de engenharia de sistemas, culminando na definição da configuração final do sistema, contendo todos os componentes dos subsistemas, análise de custos e riscos. Concluiu-se que o conceito do sistema proposto resolve o problema identificado dos stakeholders e que o uso de MBSE e a abordagem de engenharia de sistemas foram cruciais para o sucesso do projeto.

Palavras-chave: Sonda Estratosférica. Projeto Conceitual. Engenharia de Sistemas. MBSE. Arcadia. Capella. Requisitos. Temperatura. Vento. Sistema. Subsistema.

ABSTRACT

CONCEPTUAL DESIGN OF A REUSABLE STRATOSPHERIC PROBE USING MBSE TO STUDY CLIMATE MODELS AND WAVE EVENTS IN THE ATMOSPHERE

AUTHOR: Gabriel Cancian Demin
ADVISOR: Eduardo Escobar Bürger

This work presents the conceptual design of a stratospheric probe using Model-Based Systems Engineering (MBSE). The main objective of the study is to compare and validate temperature and wind models, as well as to use system measurements along with other observations to understand the origin of wave phenomena in the atmosphere. The methodology used was the NASA systems engineering approach, which allowed the development of the project in a systematic and efficient way. In addition, MBSE was used, an approach that uses models as tools to integrate and manage information throughout the project life cycle. The open-source tool Capella was used to model the system, allowing the derivation of a solution concept from the captured stakeholders' problem, and also enabling the visualization of interfaces and traceability of all elements. The results were obtained through multiple systems engineering iterations, culminating in defining the final system configuration containing all subsystem components, cost and risk analysis. It was concluded that the proposed concept of the system solves the stakeholder problem previously identified, and that the use of MBSE and the systems engineering approach were crucial to the success of the project.

Keywords: Stratospheric Probe. Conceptual Design. Systems Engineering. MBSE. Arcadia. Capella. Requirements. Temperature. Wind. System. Subsystem.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas da atmosfera terrestre.	13
Figura 2 – Modelo V.	16
Figura 3 – Método Arcadia.	17
Figura 4 – Exemplo de sonda estratosférica e subsistemas.	18
Figura 5 – Exemplo de dados de vento e temperatura.	21
Figura 6 – Modelo final da análise operacional do projeto.	27
Figura 7 – CONOPS da missão.	31
Figura 8 – Máquina de estados do sistema.	31
Figura 9 – EPBS do projeto.	34
Figura 10 – Matriz de componentes e funções da arquitetura física.	35
Figura 11 – Sensor BMP180.	37
Figura 12 – Sensor MPU6050.	39
Figura 13 – Módulo GPS NEO-6M.	40
Figura 14 – Módulo transmissor RFM22B.	42
Figura 15 – Bateria(Li-ion) DLR18650.	43
Figura 16 – Regulador XL6009.	44
Figura 17 – Arduino Uno.	46
Figura 18 – Cartão Mini SD.	47
Figura 19 – Estrutura CubeSat em ABS.	48
Figura 20 – Revestimento poliestireno expandido.	49
Figura 21 – Weather balloon 800.	50
Figura 22 – Parachute 800.	51
Figura 23 – Esquemático final das interfaces do sistema.	53
Figura 24 – Vista isométrica sistema final.	55
Figura 25 – Vista lateral sistema final.	56
Figura 26 – Vista superior sistema final.	56
Figura 27 – Exemplo de formato de dados coletados.	62
Figura 28 – Matriz de risco.	66
Figura 29 – Árvore de falhas desenvolvida.	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Contribuições das referências utilizadas.....	24
TABELA 2 – Requisitos de stakeholders.....	29
TABELA 3 – Requisitos de sistema.....	30
TABELA 4 – Budget de massa do sistema.....	58
TABELA 5 – Budget de potência do sistema.....	60
TABELA 6 – Potenciais falhas e consequências identificadas no sistema.	65
TABELA 7 – Custo dos componentes do sistema.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AX.25	Amateur X.25
CONOPS	Concept of Operations
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
EPS	Expanded Polystyrene
EPBS	End-Product Breakdown Structure
FAB	Força Aérea Brasileira
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
GPESC	Grupo de Pesquisa em Engenharia de Sistemas
GPS	Global Positioning System
I2C	Inter Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MBSE	Model-Based Systems Engineering
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NTRS	NASA Technical Reports Server
SD	Secure Digital
SDR	Software Defined Radio
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
TIMED	Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	METODOLOGIA	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	SONDA ESTRATOSFÉRICA	18
2.2	PROJETO CONCEITUAL	19
2.3	ENGENHARIA DE SISTEMAS	19
2.4	MBSE E ARCADIA	19
2.5	MODELOS ATMOSFÉRICOS DE VENTO E TEMPERATURA	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
4	PROJETO CONCEITUAL	25
4.1	ANÁLISE OPERACIONAL	25
4.2	ANÁLISE FUNCIONAL	27
4.3	REQUISITOS E CONOPS	29
4.4	ANÁLISE LÓGICA	32
4.5	ANÁLISE FÍSICA	33
5	DESCRIÇÃO DO CONCEITO PROPOSTO	36
5.1	CARGA ÚTIL	36
5.2	SUBSISTEMA DE LOCALIZAÇÃO	39
5.3	SUBSISTEMA DE COMUNICAÇÃO	41
5.4	SUBSISTEMA DE POTÊNCIA	42
5.5	SUBSISTEMA DE COMPUTAÇÃO DE BORDO	44
5.6	SUBSISTEMA ESTRUTURAL	47
5.7	SUBSISTEMA TÉRMICO	48
5.8	RECUPERAÇÃO E REUTILIZAÇÃO	49
5.9	INTEGRAÇÃO FINAL	52
6	BUDGETS DO CONCEITO PROPOSTO	55
6.1	BUDGET DE MASSA	57
6.2	BUDGET DE POTÊNCIA	59
6.3	BUDGET DE COMUNICAÇÃO	61
7	ANÁLISE DE RISCOS	64
8	ANÁLISE DE CUSTOS	68
9	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
10	CONCLUSÃO	71
10.1	LIMITAÇÕES	72

10.2 TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
APÊNDICE A – MODELOS DESENVOLVIDOS NA ANÁLISE OPERACIONAL .	76
APÊNDICE B – ARQUITETURA OPERACIONAL FINAL	77
APÊNDICE C – MODELOS DESENVOLVIDOS NA ANÁLISE FUNCIONAL.....	78
APÊNDICE D – ARQUITETURA FUNCIONAL FINAL.....	79
APÊNDICE E – MODELOS DESENVOLVIDOS NA ANÁLISE LÓGICA	80
APÊNDICE F – ARQUITETURA LÓGICA FINAL.....	81
APÊNDICE G – ARQUITETURA FÍSICA FINAL.....	82
APÊNDICE H – CENÁRIO OPERACIONAL DO SISTEMA FÍSICO FINAL.....	83

1 INTRODUÇÃO

Segundo Soler (2014), a engenharia aeroespacial é uma das áreas que mais está crescendo na engenharia moderna, com uma ampla gama de aplicações que vão desde a exploração espacial até o desenvolvimento de sistemas de transporte avançados. Nesse contexto, o projeto conceitual de uma sonda estratosférica representa uma das tantas possibilidades inovadoras e úteis oferecidas para a exploração científica e tecnológica. Neste trabalho, será realizado, com o uso de Model-Based Systems Engineering (MBSE), um projeto conceitual de uma sonda estratosférica, examinando os principais desafios e oportunidades associados a essa abordagem.

Por meio de uma análise teórica e proposta de solução, será estudado como o uso de MBSE pode ajudar a desenvolver soluções eficazes e eficientes para problemas complexos no setor aeroespacial. O objetivo é fornecer uma visão abrangente do processo de projeto e destacar os benefícios potenciais dessa abordagem para futuros trabalhos na engenharia aeroespacial.

Para compreender a importância do projeto de uma sonda estratosférica, é preciso entender um pouco mais sobre a estratosfera e sua relação com a pesquisa e o desenvolvimento científico. A estratosfera é a segunda camada da atmosfera terrestre, localizada acima da troposfera e abaixo da mesosfera. É nesta camada que se encontra a camada de ozônio, que protege a Terra da radiação solar nociva. Além disso, a estratosfera é um ambiente de interesse científico por ser um ambiente extremo e pouco explorado, oferecendo a possibilidade de estudar fenômenos naturais raros, como auroras polares, meteoros e raios cósmicos.

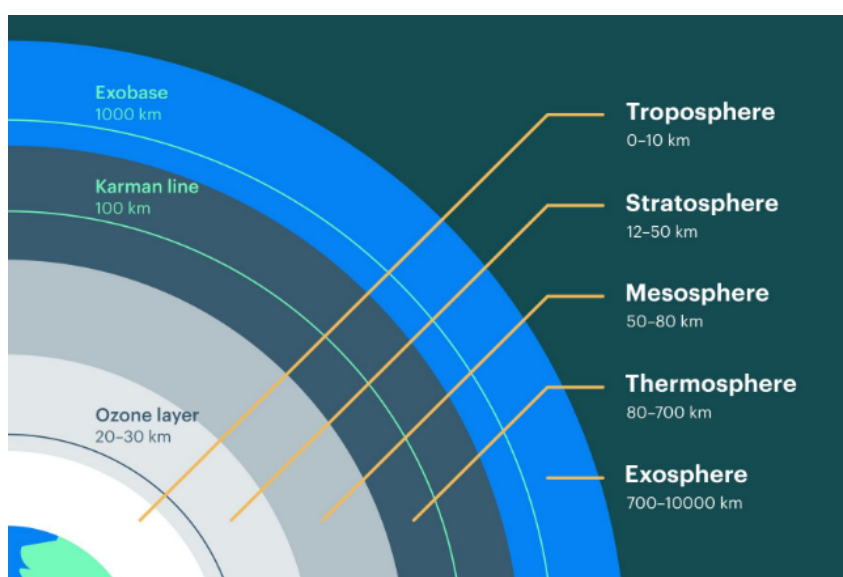


Figura 1 – Camadas da atmosfera terrestre.

Fonte: retirado de (AHRENS, 2015).

A partir da análise da Figura 1, é possível compreender melhor os desafios de explorar e estudar a estratosfera. Para isso, é preciso desenvolver sondas capazes de alcançar altitudes superiores a 20 km. No entanto, o desenvolvimento dessas sondas é um desafio significativo, pois elas devem ser projetadas para operar em condições extremas, incluindo temperaturas muito baixas, pressões extremamente baixas e altas velocidades de vento. Estas sondas devem ser capazes de coletar e transmitir dados científicos precisos, tornando o processo de projeto ainda mais complexo.

Neste cenário, o uso de Model-Based Systems Engineering (MBSE) se apresenta como uma abordagem promissora. De acordo com Voirin (2017), o MBSE está sendo cada vez mais utilizado no campo da engenharia de sistemas. Sua vasta gama de aplicações e benefícios faz com que sua utilização em projetos complexos traga diversos avanços em termos de metodologia, rastreabilidade e gestão de requisitos. O MBSE também pode permitir a realização de simulações e testes virtuais, reduzindo a necessidade de prototipagem física e acelerando o processo de desenvolvimento.

No entanto, o uso do MBSE no projeto de sondas estratosféricas também apresenta desafios significativos. Um dos principais desafios é a complexidade do sistema, que envolve uma grande quantidade de subsistemas e componentes interconectados. Além disso, o projeto de uma sonda estratosférica requer a integração de disciplinas, como mecânica, eletrônica, e ciência dos materiais, ponto que também será explorado neste trabalho.

Para lidar com esses desafios, o uso do MBSE no projeto de sistemas complexos deve ser acompanhado por um gerenciamento de projetos e uma visão multidisciplinar altamente capacitada. É necessário um entendimento sólido da metodologia do MBSE e sua aplicação no campo da engenharia aeroespacial para resultados positivos.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo fornecer uma visão geral abrangente do processo de projeto conceitual de uma sonda estratosférica usando MBSE. O trabalho apresentará uma revisão bibliográfica para contextualização do cenário atual referente ao tema. Além disso, será apresentada uma fundamentação sobre os principais conceitos teóricos abordados, como o próprio MBSE, o campo de aplicação de estudos atmosféricos e os modelos de vento e temperatura. Em seguida, será apresentada uma proposta de solução detalhada seguindo as etapas de projeto propostas pela metodologia adotada, incluindo a modelagem do sistema no Capella, o conceito final desenvolvido, os budgets e as análises de risco e custo.

A proposta de projeto apresentada no trabalho é baseada em uma sonda estratosférica hipotética, projetada para coletar dados científicos em altitudes próximas a 50 km. A sonda é composta por vários subsistemas interconectados, incluindo o sistema de localização, o sistema de comunicação, o sistema de potência, o sistema de computação de bordo, o sistema estrutural e o sistema térmico. O balão, o paraquedas e a carga útil completam o sistema. O estudo de caso apresentará a modelagem detalhada de cada um desses subsistemas, bem como a integração do sistema como um todo.

Um dos principais objetivos do trabalho é demonstrar como o uso do MBSE pode ajudar a lidar com a complexidade de um projeto, permitindo que se identifique e resolva qualquer problema de integração de maneira mais eficiente.

1.1 MOTIVAÇÃO

O estudo da atmosfera terrestre é uma área de grande importância para a compreensão do clima global, da dinâmica da atmosfera e dos efeitos dos poluentes atmosféricos na saúde humana e no meio ambiente. A atmosfera é uma camada complexa e dinâmica, composta por diferentes estratos que apresentam diferentes propriedades físicas e químicas.

Nesse contexto, as sondas estratosféricas desempenham um papel importante na coleta de dados atmosféricos, permitindo a obtenção de informações importantes sobre as características da atmosfera terrestre em diferentes altitudes. As sondas estratosféricas também podem ser utilizadas para a validação de modelos atmosféricos e para o estudo de fenômenos atmosféricos complexos, como ondas de gravidade e turbulências.

A sonda estratosférica projetada neste trabalho terá como principal objetivo coletar dados atmosféricos, incluindo temperatura, direção e velocidade do vento em diferentes altitudes. Esses dados serão utilizados para validar modelos atmosféricos e para melhorar a compreensão da dinâmica da atmosfera terrestre. A sonda poderá ser utilizada para o estudo de fenômenos de ondas atmosféricas, como ondas de gravidade por exemplo.

A importância deste trabalho reside no fato de que ele pode contribuir para a melhoria dos modelos atmosféricos e para o avanço do conhecimento na área de estudos atmosféricos. O uso de MBSE pode ser aplicado em outros projetos aeroespaciais.

Por fim, é preciso destacar a importância da interdisciplinaridade na engenharia aeroespacial. O uso do MBSE para a realização do projeto conceitual da sonda exerce um papel fundamental na definição e visualização, por meio dos diagramas, das principais decisões de projeto.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar o projeto conceitual de uma sonda estratosférica utilizando a metodologia de engenharia de sistemas baseada em modelos (MBSE). Especificamente, este trabalho visa:

- Propor um sistema de coleta de dados para comparar e validar modelos de temperatura e vento para as camadas superiores da atmosfera, utilizando dados coletados

pela sonda estratosférica projetada;

- Exemplificar a utilidade de MBSE na concepção de projetos aeroespaciais, demonstrando como essa metodologia pode ajudar a lidar com a complexidade de sistemas.

Em resumo, este trabalho tem como objetivo contribuir para a compreensão dos processos físicos e químicos da atmosfera, bem como para o desenvolvimento de metodologias eficientes para a realização de projetos conceituais. Além disso, exemplificar a utilidade do MBSE na concepção e modelagem de sistemas complexos.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a concepção do projeto foi baseada em uma abordagem de engenharia de sistemas, seguindo o modelo V, como descrito por Forsberg, Mooz e Cotterman (2005). Essa abordagem foi escolhida devido à sua capacidade de proporcionar uma visão integrada e sistêmica do projeto, garantindo que todos os requisitos do sistema sejam considerados e que as soluções propostas sejam testadas em diferentes níveis de detalhamento. A Figura 2 ilustra o modelo V.

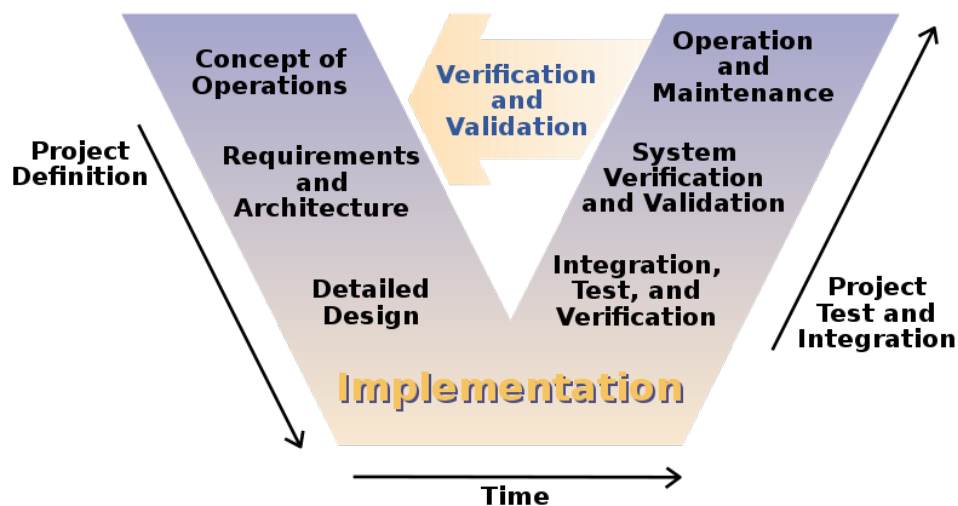


Figura 2 – Modelo V.

Fonte: retirado de (KAPURCH, 2010).

O processo de engenharia de sistemas seguido foi baseado no método de Engenharia de Sistemas da NASA, proposto por Kapurch (2010) com algumas adaptações e simplificações para atender às necessidades específicas do projeto. O processo incluiu a identificação de stakeholders, a definição de requisitos, a análise funcional, análise lógica e física do sistema, a síntese do sistema, a verificação dos requisitos, e a análise de risco.

Para auxiliar na análise e síntese do sistema, foi utilizado o Arcadia Capella, uma plataforma de modelagem de sistemas baseada na norma internacional ISO/IEC 42010. Essa ferramenta permitiu a modelagem de diferentes aspectos do sistema, como requisitos, funções, componentes e interfaces, em diferentes níveis de abstração. Tomando as definições e orientações apresentadas por Voirin (2017) como a principal referência no que diz respeito ao método Arcadia. A Figura 3 ilustra as etapas deste método.

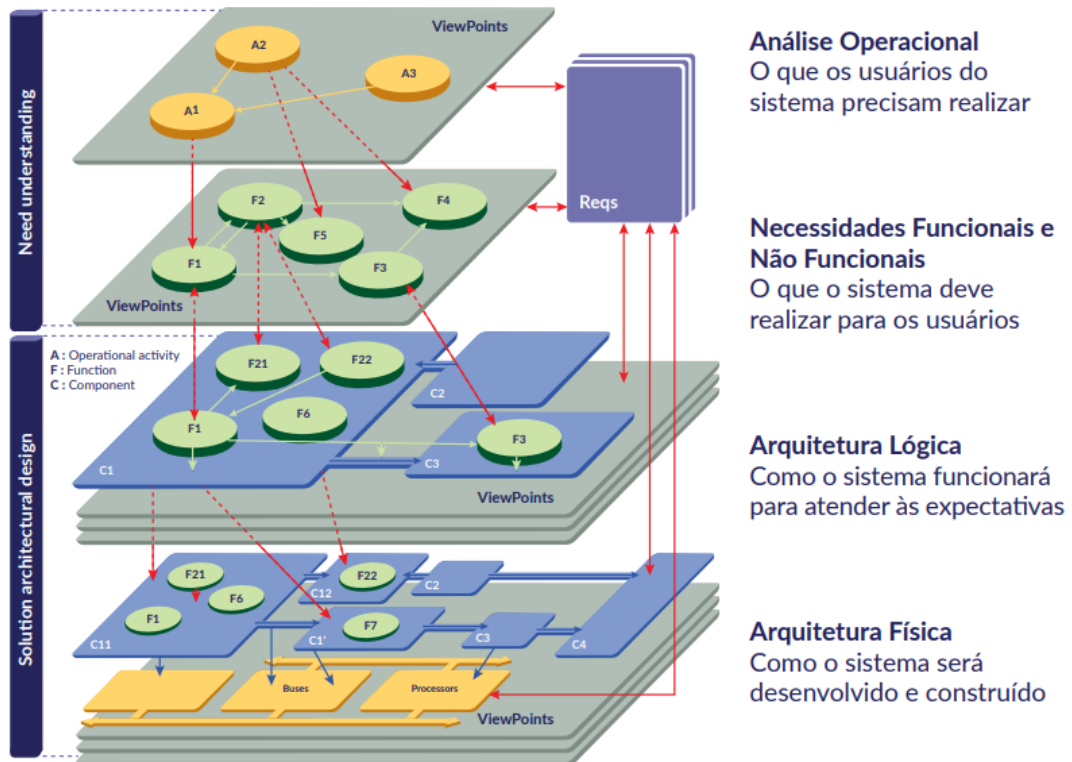


Figura 3 – Método Arcadia.

Fonte: retirado de (VOIRIN, 2017).

A metodologia geral para a concepção de projetos consistiu em uma abordagem iterativa, que envolveu a definição de objetivos, a análise dos requisitos, a proposta de soluções, a avaliação da proposta em relação aos requisitos e objetivos, e a iteração das soluções propostas. Essa metodologia foi aplicada em cada etapa do processo de engenharia de sistemas até a síntese final do sistema.

A metodologia adotada permitiu a integração eficiente de diversas disciplinas, garantindo que as soluções propostas fossem viáveis e atendessem aos requisitos do sistema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, serão apresentados com um breve embasamento teórico os principais tópicos abordados ao longo deste trabalho. Estes tópicos foram utilizados no trabalho como ferramentas diretamente relacionadas ao interesse e proposta do projeto, como aspectos metodológicos para o desenvolvimento do mesmo e como estudo de aplicação do sistema.

2.1 SONDA ESTRATOSFÉRICA

Segundo Sóbester (2011), uma sonda estratosférica é um tipo de veículo aéreo não tripulado que é projetado para operar na estratosfera, a camada da atmosfera terrestre que se estende entre cerca de 10 e 50 km acima da superfície da Terra. As sondas estratosféricas são usadas para realizar pesquisas científicas em áreas como meteorologia, astronomia, física e química atmosférica, além de serem usadas para testar tecnologias e equipamentos em ambientes extremos. Esses veículos são projetados para operar em altitudes onde a pressão atmosférica é muito baixa, e onde as temperaturas podem chegar a valores abaixo de -70°C . A Figura 4 apresenta um exemplo de conceito proposto para uma sonda estratosférica.

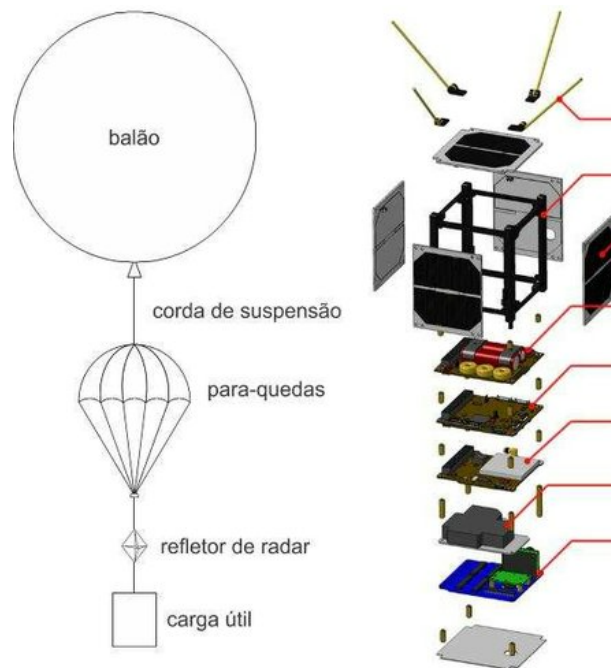


Figura 4 – Exemplo de sonda estratosférica e subsistemas.

Fonte: retirado de (SOUSA et al., 2022).

2.2 PROJETO CONCEITUAL

De acordo com Kapurch (2010), o projeto conceitual é a primeira etapa do processo de desenvolvimento de um sistema, na qual é feita uma análise inicial dos requisitos e das restrições do projeto, e são exploradas diferentes soluções conceituais para atender a esses requisitos. Nessa fase, são criados modelos e protótipos para testar e avaliar as soluções conceituais, e são realizadas análises de viabilidade técnica, financeira e operacional. O projeto conceitual é uma etapa crítica do processo de desenvolvimento de sistemas, pois é nele que as principais decisões de projeto são tomadas, e as escolhas feitas nessa fase podem ter um grande impacto no desempenho e nos custos do sistema final.

2.3 ENGENHARIA DE SISTEMAS

Segundo Weck, Roos e Magee (2011), a Engenharia de Sistemas é uma abordagem interdisciplinar para o desenvolvimento de sistemas complexos, que busca otimizar o desempenho, a eficiência e a confiabilidade do sistema como um todo. Ela envolve a integração de diversas disciplinas, incluindo engenharia elétrica, mecânica, de sistemas e outras áreas afins. O objetivo principal da engenharia de sistemas é garantir que todos os componentes de um sistema funcionem em conjunto de forma harmoniosa, para atender aos requisitos do cliente e aos objetivos do projeto.

2.4 MBSE E ARCADIA

Como definido por Voirin (2017), Model-Based Systems Engineering (MBSE) é uma metodologia que usa modelos para representar sistemas complexos. Esses modelos são usados para descrever o comportamento, as funções, as interações e as características físicas e de desempenho do sistema, e para gerenciar as informações e os requisitos do projeto. O MBSE tem como objetivo garantir que todos os aspectos do sistema sejam consistentes e integrados, para que o sistema possa ser projetado, desenvolvido, testado e mantido de maneira mais eficiente e eficaz.

Ainda segundo Voirin (2017), Arcadia (Architecture Analysis and Design Integrated Approach) é um método de Engenharia de Sistemas baseado em Model-Based Systems Engineering (MBSE) que fornece uma abordagem estruturada para a concepção, análise e desenvolvimento de sistemas complexos. O Arcadia utiliza modelos para representar diferentes aspectos do sistema, incluindo seus requisitos, arquitetura, comportamento e validação.

Voirin (2017) descreve o método Arcadia como apresentado a seguir. Sua composição é sustentada por quatro principais etapas ou níveis de modelagem: a análise operacional, a análise funcional, a análise lógica e a análise física. Cada uma fornece uma visão única sobre o sistema e permite uma análise holística do projeto.

Inicialmente definem-se os objetivos do sistema, identificam-se os requisitos dos stakeholders e se estabelece a visão geral do sistema. Também são definidas as restrições e os critérios de desempenho que o sistema deve atender.

Na análise lógica, são desenvolvidos modelos para descrever a estrutura do sistema, incluindo seus componentes, interfaces e interações. Esses modelos ajudam a garantir a coerência e a integração entre os diferentes elementos do sistema.

Na análise física, são elaborados modelos detalhados para descrever os aspectos físicos do sistema, incluindo a especificação de componentes, a alocação de funções e a definição de interfaces. Esses modelos são usados para guiar o processo de desenvolvimento do sistema e garantir que todas as partes do sistema sejam projetadas e implementadas corretamente.

Ao longo do processo de desenvolvimento, o método Arcadia também enfatiza a validação contínua do sistema por meio da realização de análises e testes. Os modelos criados no Arcadia permitem a simulação e a avaliação do desempenho do sistema, o que ajuda a identificar possíveis problemas e aprimorar o projeto antes da implementação final.

2.5 MODELOS ATMOSFÉRICOS DE VENTO E TEMPERATURA

A compreensão do comportamento da atmosfera é fundamental para a previsão do tempo e a compreensão dos fenômenos meteorológicos. A temperatura e o vento são duas variáveis meteorológicas importantes que afetam o clima e o tempo em uma determinada região. Modelos de temperatura e vento são usados para prever essas variáveis e entender seu comportamento ao longo do tempo.

De acordo com Wallace e Hobbs (2006), os modelos de temperatura são importantes para entender a distribuição térmica na atmosfera. A temperatura afeta a densidade do ar e, portanto, afeta a estabilidade da atmosfera. Modelos de temperatura são construídos para prever a temperatura em diferentes altitudes e em diferentes momentos do dia. Esses modelos são baseados em observações e análises históricas e podem ser usados para prever o comportamento futuro da temperatura em uma determinada região.

Os modelos de vento são usados para entender a circulação atmosférica e o transporte de massas de ar. A direção e a velocidade do vento afetam a dispersão de poluentes e a formação de nuvens e tempestades. Os modelos de vento são construídos a partir de observações e análises históricas, bem como de simulações numéricas usando equações físicas que descrevem a circulação atmosférica. Esses modelos podem ser usados para

prever o comportamento futuro do vento em uma determinada região e ajudar na previsão do tempo. A Figura 5 apresenta um exemplo de amostra de dados de vento e temperatura obtidos pelos modelos mencionados.

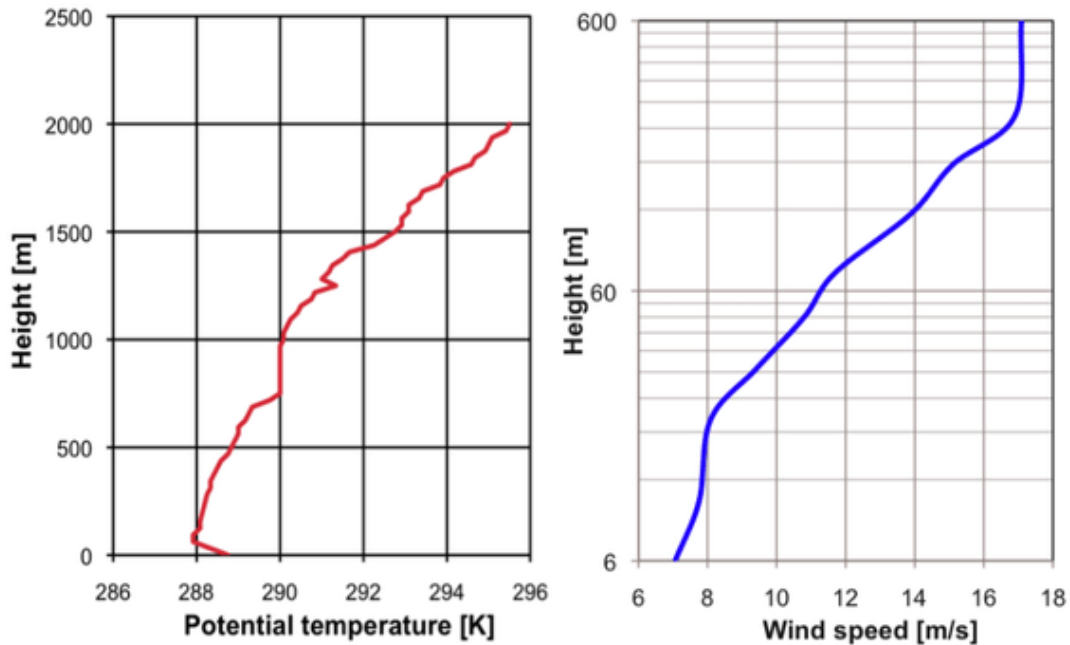


Figura 5 – Exemplo de dados de vento e temperatura.

Fonte: retirado de (WALLACE; HOBBS, 2006).

Além disso, segundo Ahrens (2015), os modelos de temperatura e vento são importantes para entender os fenômenos ondulatórios na atmosfera, como as ondas de gravidade atmosférica e as ondas internas. Esses fenômenos são importantes para a formação de nuvens, turbulência e outras características atmosféricas. Modelos numéricos são usados para simular esses fenômenos e entender melhor como eles afetam o clima e o tempo.

Os modelos de temperatura e vento são fundamentais para aplicações e estudos meteorológicos e de fenômenos ondulatórios na atmosfera. Eles são baseados em observações e análises históricas, bem como em simulações numéricas, e podem ser usados para prever o comportamento futuro dessas variáveis meteorológicas e entender melhor o comportamento da atmosfera.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção tem como objetivo fornecer uma visão geral das pesquisas relacionadas ao tema proposto por este trabalho, que trata da realização de um projeto conceitual de uma sonda estratosférica utilizando MBSE. A pesquisa bibliográfica foi realizada utilizando diversas bases de dados, incluindo NTRS - NASA Technical Reports Server, IEEE Xplore, Engineering Village, Web of Science, Periódicos Capes e Google Acadêmico. As palavras-chave utilizadas foram "Stratospheric Probe", "Atmospheric Probe", "Radiosonde", "Conceptual Design", "MBSE", "Arcadia" e "Systems Engineering". As buscas foram conduzidas tanto em inglês quanto em português, com filtros "E" e "OU" aplicados para abranger diferentes combinações de palavras-chave. Abaixo são apresentados os principais trabalhos utilizados como referência bibliográfica do projeto desenvolvido.

No trabalho "TIMED Instruments" Yee et al. (2003), apresentam um conjunto de quatro instrumentos de sensoriamento remoto da espaçonave TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) projetados para observar os parâmetros que definem o estado básico atmosférico e as entradas e saídas de energia da mesosfera e baixa termosfera e ionosfera. O estudo descreve os sensores de temperatura, vento, densidade e outros dispositivos desenvolvidos para medir as propriedades da atmosfera em diferentes altitudes. Os resultados obtidos contribuíram para o entendimento dos processos físicos e químicos que ocorrem na região da termosfera, ionosfera e mesosfera e como realizar a coleta de dados nestas condições.

Em "An In Situ Atmospheric Probe for Real Time Weather Monitoring" Adams et al. (2015), propõem uma sonda atmosférica in situ para monitoramento em tempo real do clima. O trabalho descreve o desenvolvimento de uma plataforma que coleta dados meteorológicos em diferentes altitudes, permitindo uma compreensão mais precisa das condições atmosféricas e aprimorando a previsão do tempo. Este trabalho foi relevante para o entendimento do funcionamento da coleta de dados atmosféricos.

Delmondes (2019) apresenta no trabalho "Proposta de uma Metodologia para o Desenvolvimento de um Subsistema de Telemetria e Comando para Plataformas Estratosféricas", o desenvolvimento de um subsistema de telemetria (downlink) e comando (uplink). O autor realizou as modelagens dos domínios específicos (eletrônica, mecânica e software) junto ao mapeamento dos requisitos e definição das arquiteturas físicas e lógicas do sistema. Vale ressaltar que a aplicação e carga útil desta referência foram de relevância secundária, e que a principal contribuição deste trabalho para o projeto está ligada aos aspectos relacionados aos subsistemas desta proposta. Compreender quais subsistemas compõem o suporte à carga útil e seus papéis dentro das interações dos sistemas, auxiliou na compreensão da composição de um sistema sonda.

No trabalho "Projeto de uma Sonda Estratosférica Didática para o Estudo de Enge-

nharia Aeroespacial"Silvaa, Lopesa e Barrosa (2019), apresentam um projeto baseado em padrões abertos para uma sonda a ser enviada até a estratosfera usando um balão meteorológico. O estudo aborda aspectos relacionados ao projeto, construção e operação da sonda, fornecendo uma abordagem prática para o projeto direcionado a aplicações semelhantes ao trabalho desenvolvido. Desta maneira, esta foi uma das principais referências no que diz respeito a escolha de componentes e aspectos operacionais da sonda.

No trabalho "Projeto In Situ: Conceito de Balão e Sonda Estratosférica"Sousa et al. (2019), apresentam o conceito de um balão e sonda estratosférica para realização de medições na atmosfera. O estudo aborda o projeto, construção e operação desses dispositivos, bem como os resultados obtidos a partir das medições realizadas. Este trabalho proporcionou ao projeto um contato inicial com o problema a ser resolvido junto ao stakeholder José Valentin Bageston, uma vez que a demanda do mesmo foi apresentada neste documento.

No trabalho "Lançamento de uma sonda atmosférica de baixo custo"Sousa et al. (2022), descrevem o lançamento de uma sonda atmosférica de baixo custo para coleta de dados meteorológicos. O estudo aborda o projeto e construção da sonda, bem como os resultados obtidos a partir das medições realizadas durante o lançamento. Este documento foi uma das principais referências utilizadas no que diz respeito a decisões de projeto e definições de componentes.

Os autores Kurmasheva et al. (2020) propõem no trabalho "A stratospheric and satellite CubeSat format probe for detecting relativistic runaway electron avalanches", o projeto de uma sonda estratosférica no formato CubeSat capaz de detectar esses eventos a uma altitude de cerca de 30 km ou mais. O objetivo do experimento é observar mudanças nos fluxos de elétrons de alta energia e radiação, bem como uma análise de possíveis correlações dos parâmetros medidos. O estudo aborda o projeto, desenvolvimento e teste da sonda. Essa referência contribuiu na definição dos subsistemas e aspectos globais de um sistema sonda.

No "Desenvolvimento de uma Sonda Atmosférica Sem Fio para estudos ambientais de baixo custo"Picanço et al. (2016), apresentam o desenvolvimento de uma sonda atmosférica wireless, projetada para auxiliar estudos ambientais de longa duração com poucos recursos financeiros. Dessa forma, o protótipo capta dados de temperatura, pressão e umidade relativa do ar, transmitindo essas informações em tempo real a um receptor remoto via radiofrequência. Este trabalho ofereceu opções de sensoriamento atmosférico em coleta de dados climáticos, contribuindo neste sentido com o projeto desenvolvido.

Através da revisão bibliográfica, foi possível obter uma compreensão mais aprofundada das diferentes abordagens e propostas existentes em aplicações semelhantes ou que utilizam para fins diversos um sonda estratosférica, assim auxiliando o autor na visualização de possibilidades e caminhos para as decisões de projeto a serem tomadas.

Ao considerar a metodologia de MBSE (Model-Based Systems Engineering) e a

aplicação do método Arcadia no desenvolvimento do projeto, os estudos revisados não a utilizaram e os documentos que contemplam sua utilização apresentaram propostas de aplicações bastante distantes do tema proposto neste trabalho. Desta maneira, os aspectos de projeto relacionados à utilização de MBSE estão atrelados majoritariamente a documentos de referência metodológica, ou mesmo materiais de suporte como os presentes em (GPESC, 2023). Esses materiais, atrelados aos documentos citados anteriormente, auxiliaram na concepção de uma visão abrangente das possibilidades de projeto, dos desafios técnicos e das soluções já propostas por outros autores. A Tabela 1 sintetiza as principais contribuições de cada uma das referências apresentadas.

Tabela 1 – Contribuições das referências utilizadas.

Referência	Contribuição
Yee et al. (2003)	Compreensão do ambiente e de fenômenos atmosféricos, e possibilidades de sensoria-mento.
Adams et al. (2015)	Coleta de dados atmosféricos e carga útil.
Delmondes (2019)	Definição de subsistemas e aspectos glo-bais de um sistema sonda.
Silvaa, Lopesa e Barrosa (2019)	Definição de componentes, semelhante aplicação e carga útil.
Sousa et al. (2019)	Semelhança de proposta de projeto e con-tato prévio necessidade stakeholder.
Sousa et al. (2022)	Definição de componentes, semelhante aplicação e carga útil.
Kurmasheva et al. (2020)	Definição de subsistemas e aspectos glo-bais de um sistema sonda.
Picanço et al. (2016)	Sensoriamento atmosférico em coleta de dados climáticos.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A revisão bibliográfica realizada permitiu compreender o estado atual da pesquisa acerca do tema de sondas estratosféricas, fornecendo referências relevantes para o desen-volvimento do projeto. As abordagens, metodologias e soluções propostas nos materiais revisados servirão como base para o avanço do estudo e decisões de projeto no conceito a ser proposto.

4 PROJETO CONCEITUAL

Nesta seção serão descritas as quatro etapas do processo de engenharia de sistemas, seguindo o método do Manual de Engenharia de Sistemas da NASA proposto por Kapurch (2010) e utilizando a ferramenta Arcadia Capella descrita por Voirin (2017) para os modelos do projeto.

Destacando que nesta seção, os modelos desenvolvidos no Capella terão suas características e detalhes descritos majoritariamente textualmente em suas respectivas análises descrevendo seus processos. Os modelos e diagramas completos do projeto estarão presentes nos apêndices. Cada seção seguirá o padrão de apresentar as atividades desenvolvidas sem os diagramas.

4.1 ANÁLISE OPERACIONAL

A análise operacional ou análise de stakeholders, visou identificar e compreender as partes interessadas envolvidas no projeto ou sistema. Foi realizado um levantamento detalhado para identificar as pessoas, organizações ou grupos afetados pelo projeto, e seus respectivos papéis no projeto.

Essa análise foi conduzida com o objetivo de estabelecer uma comunicação eficaz e colaborativa com as partes interessadas, promovendo um entendimento comum dos objetivos. Buscou-se identificar possíveis conflitos, oportunidades de parceria e restrições que poderiam impactar o projeto.

A análise de stakeholders envolveu a identificação das partes interessadas, a categorização de seus interesses, a análise de suas necessidades e expectativas, bem como o entendimento das influências e restrições que exerciam sobre o projeto. Essas informações foram utilizadas para orientar as atividades de desenvolvimento do sistema, garantindo que as decisões tomadas fossem adequadas e considerassem os interesses de todas as partes envolvidas.

As principais partes interessadas envolvidas no projeto são o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), a UFSM (Universidade Federal de Santa Maria), a Força Aérea Brasileira (FAB), os alunos e grupos de pesquisa da UFSM e o pesquisador Dr. José Valentin Bageston, pesquisador do INPE que lidera os estudos da alta atmosfera terrestre com experiência na área de instrumentação, e traz ao projeto o principal problema a ser contornado pelo conceito proposto. Um breve registro das partes interessadas e suas capacidades operacionais são apresentados a seguir.

- INPE: Como uma instituição de pesquisa, o INPE desempenha um papel crucial no

projeto. Eles têm um forte interesse nos dados coletados para pesquisa meteorológica e estudos atmosféricos. O pesquisador José Valentin Bageston é uma parte interessada específica dentro do INPE, trazendo sua expertise e conhecimentos na área. Suas principais necessidades incluem medições precisas e confiáveis de vento e temperatura na estratosfera, o que pode aprimorar a compreensão de fenômenos atmosféricos e validar modelos para estes dados.

- UFSM: Como uma universidade, a UFSM traz a aplicação acadêmica e pode trazer recursos para o projeto. Os alunos e grupos de pesquisa da UFSM são partes interessadas específicas dentro da universidade, podendo buscar o envolvimento no projeto como fonte de pesquisa e possíveis trabalhos futuros. Além de utilizar os dados coletados para fins educacionais e de pesquisa, aprimorando seus conhecimentos em engenharia aeroespacial e fenômenos atmosféricos e meteorológicos. Suas necessidades incluem acesso aos dados e oportunidades de envolvimento de estudantes no projeto.
- FAB: A Força Aérea Brasileira desempenha um papel fundamental em questões operacionais de missão, incluindo o espaço aéreo e o local de lançamento da sonda estratosférica. Eles são responsáveis por fornecer suporte logístico, coordenação e garantir a conformidade com as regulamentações e requisitos do espaço aéreo.

Ao considerar essas partes interessadas, é fundamental estabelecer um diálogo aberto e colaborativo para compreender suas necessidades, expectativas e restrições. O envolvimento do INPE e do pesquisador José Valentin Bageston são cruciais para garantir que os dados coletados pela sonda estratosférica sejam relevantes e de alta qualidade para a pesquisa meteorológica e estudos atmosféricos. A participação dos alunos e grupos de pesquisa da UFSM pode promover o desenvolvimento de habilidades e conhecimentos na área de engenharia aeroespacial, além de fornecer oportunidades para pesquisas futuras.

A cooperação com a Força Aérea Brasileira é essencial para garantir que as operações de lançamento da sonda estratosférica ocorram de forma segura e em conformidade com as regulamentações do espaço aéreo. A colaboração e o alinhamento com a FAB garantem o acesso aos recursos necessários para o sucesso da missão.

Estes pontos de análise das partes interessadas, suas necessidades e capacidades operacionais fornecem uma base sólida para o desenvolvimento do projeto conceitual da sonda estratosférica, permitindo a identificação e a consideração de todos os aspectos relevantes para atender às expectativas e requisitos dos principais envolvidos. Requisitos estes que serão apresentados futuramente.

Na plataforma Capella foram desenvolvidos os modelos de levantamento de atores e entidades operacionais e suas capacidades operacionais, bem como o fluxo de atividades e as interações entre os envolvidos. Vale destacar que nesta etapa de análise ainda

estão sendo discutidas exclusivamente as operações da missão, o sistema ainda não está presente nas análises e modelos. Para uma compreensão e visualização mais clara dos diagramas, os modelos desenvolvidos na etapa de análise operacional estão apresentados no Apêndice A. A Figura 6 apresenta o modelo final da análise operacional do projeto. Para melhor visualização este modelo também está apresentado no Apêndice B.

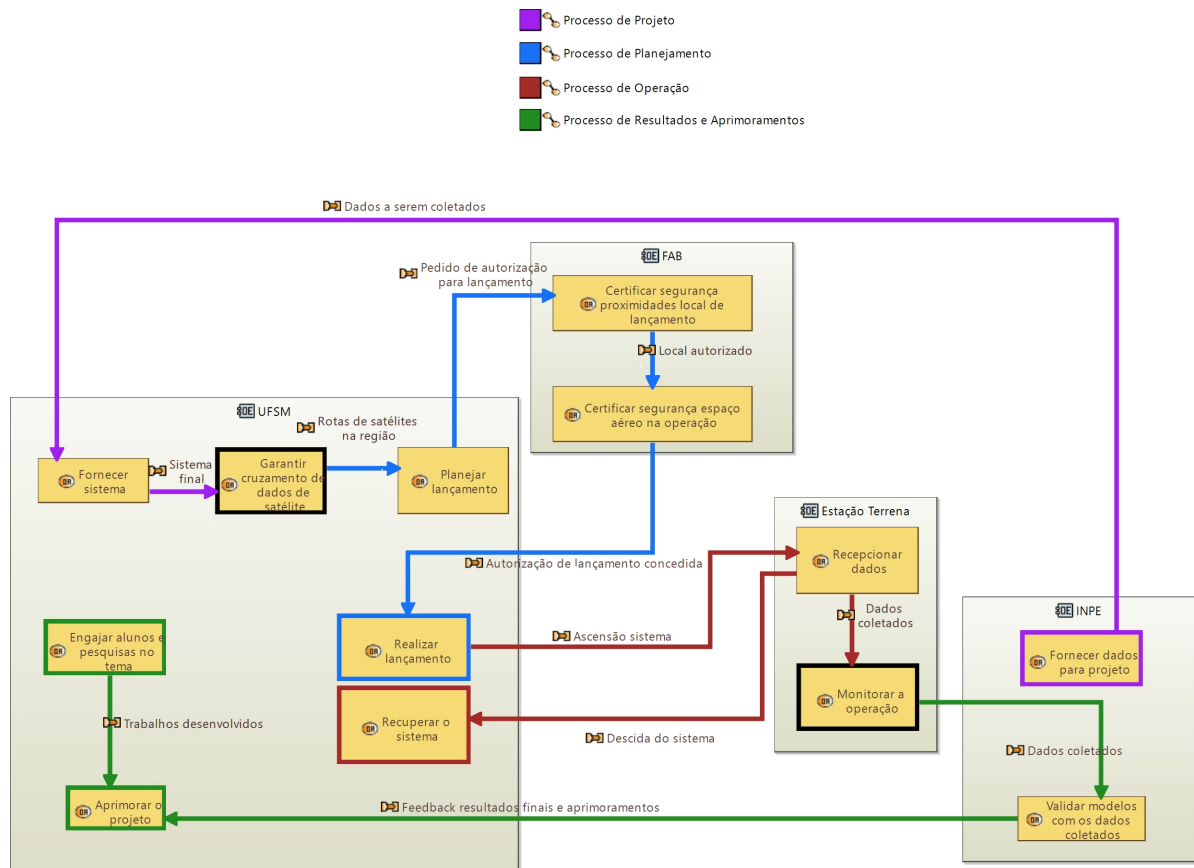


Figura 6 – Modelo final da análise operacional do projeto.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

4.2 ANÁLISE FUNCIONAL

Durante a etapa de análise funcional, o objetivo foi identificar, descrever e analisar as funções desempenhadas pelo sistema em desenvolvimento. Nesta etapa, além da presença dos stakeholders previamente apresentados, passa também a ser considerado o sistema em si. A presença do sistema é o grande salto proporcionado pela etapa de análise funcional, mas é preciso destacar que este sistema ainda é tratado como black box. Isto é, este sistema não é detalhado em suas características por inteiro, o principal objetivo desta etapa é definir as funções deste sistema e como o mesmo interage com os stakeholders durante a missão.

Inicialmente, foi realizada a identificação das funções do sistema, ou seja, todas as atividades que o sistema precisava executar para atender aos requisitos e objetivos estabelecidos. Essas funções foram oriundas não somente da análise do sistema em si, mas também de uma reunião com o professor Valentin, principal stakeholder interessado na proposta de solução do projeto. Foram identificadas e descritas as seguintes funções do sistema:

- Operar a uma altitude entre 40 km e 50 km;
- Coletar dados de temperatura, velocidade e direção do vento durante o voo;
- Armazenar os dados coletados em formato de arquivo de texto, com armazenamento ocorrendo a cada 30 segundos e utilizando um cartão de memória;
- Transmitir os dados coletados;
- Operar por aproximadamente 2 horas;
- Ser lançado em locais e períodos de intersecção com a trajetória de satélites, visando a complementação e comparação dos dados obtidos;
- Ser reutilizável após a missão.

Em seguida, as funções identificadas foram descritas de forma detalhada. Essa descrição envolveu estabelecer o propósito de cada função, definir suas entradas e saídas, bem como as transformações que ocorreram durante sua execução.

Durante a análise funcional, também foi realizada a identificação das dependências entre as funções. Isso incluiu entender quais funções dependiam umas das outras para serem executadas, quais possuíam relações de precedência ou sincronização, e quais eram independentes entre si.

A modelagem das funções foi outra etapa importante da análise funcional. Nesse processo, as funções identificadas e descritas foram representadas de forma estruturada e visualmente compreensível. Novamente, como explicado anteriormente, os diagramas desenvolvidos na análise funcional não serão apresentados nesta seção. Os mesmos estão representados no Apêndice C. Os diagramas, a partir desta etapa, apresentam um maior nível de detalhe. Por conta disso, a visualização dos diagramas fica comprometida em pequenas escalas. Sendo assim, os modelos serão apresentados exclusivamente nos apêndices. O modelo final da análise lógica está presente no Apêndice D.

Durante esta etapa funcional, foi essencial uma análise cuidadosa para garantir a coerência e consistência das funções identificadas. Isso envolveu verificar se todas as funções eram realmente necessárias, se não havia redundâncias ou omissões, e se as relações entre as funções eram adequadas. Este cuidado é primordial, uma vez que a

natureza de rastreabilidade do método acaba carregando erros para as etapas de análise subsequentes, o que pode ser bastante prejudicial.

A etapa funcional contribuiu para uma compreensão clara e estruturada das funções do sistema, fornecendo uma base sólida para que seja possível avançar até as próximas fases do projeto, como a definição da arquitetura e a especificação dos componentes do sistema. A seção seguinte irá apresentar aspectos da missão e sistema que foram mapeados até o final da análise funcional. Dessa maneira, é possível agrupar elementos como requisitos e diagramas para garantir a compreensão do sistema e missão antes de abordar as etapas de análise seguintes.

4.3 REQUISITOS E CONOPS

Nesta seção, serão apresentados os requisitos definidos tanto pelas capacidades operacionais e necessidades dos stakeholders, quanto pela análise funcional do sistema. Na sequência, a Tabela 2 expõe os requisitos atrelados aos stakeholders envolvidos. A Tabela 3 apresenta os requisitos globais do sistema, oriundos da análise funcional previamente abordada.

Tabela 2 – Requisitos de stakeholders.

ID	Requisito	Stakeholder
REQ_STK_01	Ser capaz de coletar e disponibilizar dados atmosféricos para suporte nas decisões de projeto e validação de resultados.	INPE
REQ_STK_02	Ser capaz de garantir a compatibilidade dos dados coletados com as necessidades das pesquisas em andamento no INPE.	INPE
REQ_STK_03	Ser capaz de realizar o lançamento (cruzar dados de satélites), operação e monitoramento do sistema.	UFSM
REQ_STK_04	Ser capaz de realizar o projeto conceitual com proposta de solução para coleta de dados atmosféricos.	UFSM
REQ_STK_05	Ser capaz de engajar alunos e grupos de pesquisa da UFSM em futuros trabalhos como aprimoramento e/ou seguimento do projeto.	UFSM
REQ_STK_06	Ser capaz de realizar pesquisas e desenvolver estudos científicos utilizando os dados coletados pelo sistema.	UFSM
REQ_STK_07	Ser capaz de garantir que o local de lançamento seja apropriado e atenda aos requisitos de segurança.	FAB
REQ_STK_08	Ser capaz de garantir a operação segura do sistema no espaço aéreo durante o período de operação.	FAB

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Os requisitos de sistema apresentados são referentes ao sistema de maneira global tendo em vista o cumprimento da missão. Na sequência do projeto serão realizadas as análises lógica e física, onde será explorado um maior detalhamento acerca dos papéis de cada componente e subsistema, com suas respectivas funções.

Tabela 3 – Requisitos de sistema.

ID	Requisito	Método de Verificação
REQ_MIS_01	O sistema deve operar a uma altitude entre 40 km e 50 km.	Análise
REQ_MIS_02	O sistema deve coletar dados de velocidade e direção do vento durante o voo.	Análise
REQ_MIS_03	O sistema deve coletar dados de temperatura durante o voo.	Análise
REQ_MIS_04	O sistema deve armazenar dados em formato de arquivo de texto.	Análise
REQ_MIS_05	O sistema deve armazenar dados a cada 30 segundos.	Análise
REQ_MIS_06	O sistema deve armazenar dados em um cartão de memória.	Análise
REQ_MIS_07	O sistema deve transmitir os dados coletados.	Análise
REQ_MIS_08	O sistema deve operar por um período de aproximadamente 2 horas.	Análise
REQ_MIS_09	O sistema deve ser lançado em locais e períodos de intersecção com a trajetória de satélites para complemento e comparação dos dados obtidos.	Análise
REQ_MIS_10	O sistema deve ser capaz de ser reutilizado após a missão.	Análise

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Esses são alguns dos principais requisitos identificados com base nos objetivos do projeto e nas necessidades dos principais stakeholders envolvidos, incluindo o INPE, a UFSM, a FAB e o pesquisador José Valentin Bageston. Esses requisitos fornecem diretrizes importantes para as subsequentes definições de arquitetura do sistema e consequentemente dos componentes a serem utilizados.

Com as análises operacionais e funcionais do sistema concluídas, é possível compreender o conceito operacional da missão proposta. Para visualização da missão é apresentado na Figura 7 o CONOPS do sistema desenvolvido. Vale destacar que a presença da Termosfera foi inibida na imagem devido a sua irrelevância para a missão. Além disso, é preciso enfatizar que a coleta e transmissão de dados ocorre ao longo de todo o voo. No entanto, destaca-se o momento de máxima altitude do sistema por ser a região de interesse na coleta dos dados.

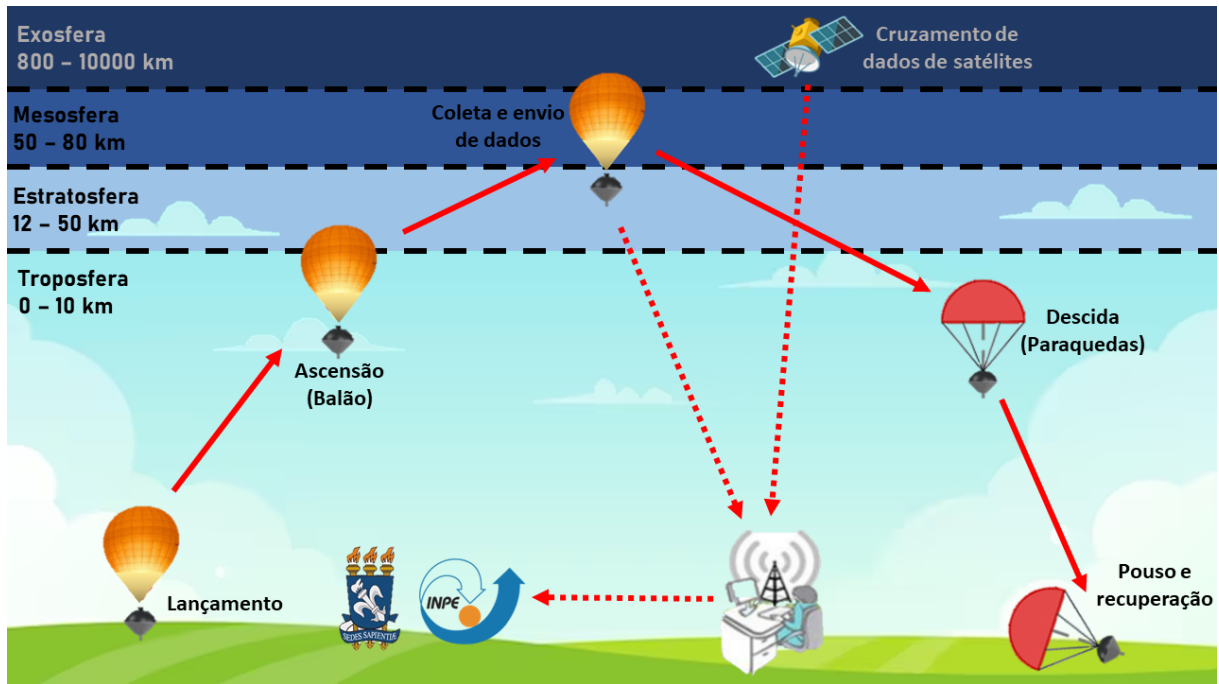


Figura 7 – CONOPS da missão.
 Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Outra ferramenta importante que pode ser utilizada para maior compreensão do projeto é a máquina de estados do sistema. De acordo com Borky e Bradley (2018), uma máquina de estados é um modelo utilizado para descrever o comportamento de um sistema ou componente que pode estar em diferentes estados e responder a eventos ou estímulos externos. A função de uma máquina de estados é controlar o fluxo de execução de um sistema, determinando como ele transita de um estado para outro com base em eventos específicos, permitindo um comportamento estruturado e controlado do sistema. A Figura 8 apresenta a máquina de estados do sistema desenvolvido.

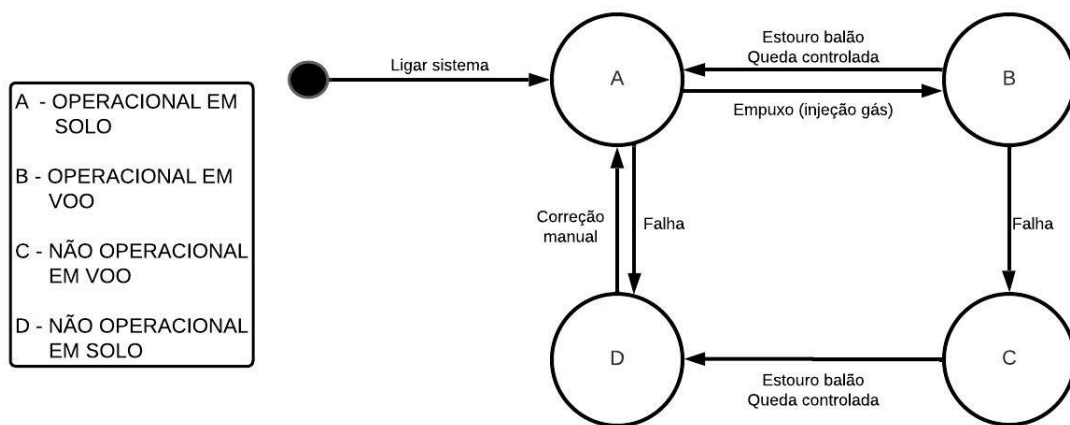


Figura 8 – Máquina de estados do sistema.
 Fonte: elaborado pelo autor (2023).

É importante que seja possível compreender corretamente os aspectos da missão

e sistema abordados até o momento, pois seguindo a análise de engenharia de sistemas, a próxima etapa refere-se a arquitetura lógica, onde mais uma vez o nível de detalhamento irá aumentar consideravelmente. Por isso os requisitos apresentados, o CONOPS e a máquina de estados do sistema se fazem importantes. Gradualmente o sistema proposto irá se mostrar mais complexo e desafiador e justamente por isso faz-se necessária essa completude na compreensão.

4.4 ANÁLISE LÓGICA

A etapa de análise lógica foi realizada para definir a arquitetura lógica do sistema, compreendendo a estrutura interna e as interações entre os elementos. Durante o processo, foram identificados os componentes lógicos e as interfaces do sistema, visando atender aos requisitos funcionais estabelecidos na análise anterior.

Para realizar essa análise, foram utilizadas as técnicas de modelagem, como diagramas de blocos funcionais e diagramas de sequência, entre outros modelos. Este processo é recorrente em todas as etapas de análise. Esses modelos permitem representar a estrutura e o comportamento do sistema de maneira clara e compreensível.

Mecanicamente o trabalho realizado é o mesmo, os modelos são gerados mais uma vez e novamente os diagramas intermediários nos permitem chegar a um modelo final muito mais detalhado. Porém, mais uma vez a análise dá um grande passo e o sistema tratado anteriormente na etapa funcional como black box passa a ser agora tratado como white box.

Assim, foi dada ênfase à decomposição do sistema em seus subsistemas e à definição das interfaces entre eles. Foram identificadas as trocas de informações entre os componentes e as restrições impostas pelas interfaces, garantindo a integração adequada e o correto funcionamento do sistema como um todo.

A análise lógica também considerou as restrições e os critérios de desempenho estabelecidos como consequência da análise funcional, buscando otimizar a arquitetura do sistema em termos de eficiência, confiabilidade e escalabilidade.

A análise lógica foi essencial para garantir a correta estruturação e a integração dos componentes do sistema, proporcionando uma visão detalhada da arquitetura interna e das interações entre eles. O salto no nível de detalhamento do sistema nesta etapa, como mencionado anteriormente, está na divisão do sistema em subsistemas. A definição correta destes subsistemas e suas interfaces é fundamental, uma vez que a próxima e última etapa do processo irá alocar componentes físicos a estes subsistemas.

Assim como nas etapas anteriores, a análise lógica do sistema resultou em alguns modelos intermediários antes da obtenção do modelo final, estes diagramas são apresentados no Apêndice E. Por meio dos modelos intermediários foi possível obter o modelo final

da análise lógica do projeto, o qual é apresentado no Apêndice F.

4.5 ANÁLISE FÍSICA

A etapa de análise física foi realizada para definir a arquitetura física do sistema, considerando os componentes físicos e sua distribuição espacial. Durante o processo, foram identificados os componentes físicos necessários para implementar as funções do sistema, levando em conta os requisitos estabelecidos nas análises anteriores.

Para realizar essa etapa, foram considerados aspectos como a seleção dos componentes, sua disposição física, as interfaces entre eles e as restrições de espaço, peso, energia e refrigeração. Também foram considerados os aspectos de segurança, confiabilidade e manutenibilidade do sistema, como por exemplo o acesso aos equipamentos através da estrutura.

Durante a análise física, foram identificados os componentes físicos necessários para cada função do sistema. Foram selecionados modelos específicos de componentes que atendessem aos requisitos técnicos, considerando critérios como histórico de projetos, compatibilidade entre os componentes e possíveis expansões de projeto.

Além disso, foram definidas as conexões e interfaces físicas entre os componentes, garantindo a correta interconexão e integração do sistema. Foram identificadas as interfaces necessárias para a transmissão de dados, energia e sinais entre os componentes. No entanto, é preciso destacar que os detalhes de cablagem não foram avaliados a nível dos principais componentes e se limitaram por exemplo ao nível de detalhe como número de entradas e saídas disponíveis em uma placa e não tanto ao tipo de cabo em si. Este foi um dos motivos pelos quais as escolhas de componentes apresentadas na seção seguinte foram bastante baseadas em afinidade de componentes em projetos prévios e cumprimento dos objetivos.

A análise física acarretou em um sistema completamente definido a nível de componentes. Sendo assim, esta etapa do método acabou por realizar também o escopo de atividades descrito na seção seguinte deste documento, onde o produto será descrito a nível de cada subsistema. Como saída desta etapa de análise, já é possível visualizar o sistema final completamente definido.

A análise física foi fundamental para garantir a correta implementação e integração dos componentes físicos do sistema, levando em consideração os requisitos técnicos, as restrições físicas e os critérios de estabelecidos.

Para a aplicação deste projeto, o escopo de análises do método Arcadia se encerra por aqui. Esta etapa de análise física representa o maior nível de detalhe possível a ser alcançado, apontando e definindo componentes e subcomponentes de cada subsistema. Com isso obtém-se a arquitetura física final do sistema proposto. O modelo final está

presente no Apêndice G.

Além da arquitetura final, é de suma importância, assim como na etapa anterior, compreender a operação desta arquitetura considerando o fator tempo. Ou seja, a visualização do modelo de cenário operacional é tão importante quanto a arquitetura em si. O modelo final para o cenário operacional do sistema físico final é apresentado no Apêndice H.

Com a definição da arquitetura física e componentes, é possível desenvolver um diagrama da estrutura do produto final, chamado de EPBS. Com este diagrama, é encerrada a etapa de projeto no Capella. A próxima seção irá descrever os componentes aqui definidos para futuras etapas. A Figura 9 apresenta o modelo final de EPBS do projeto.

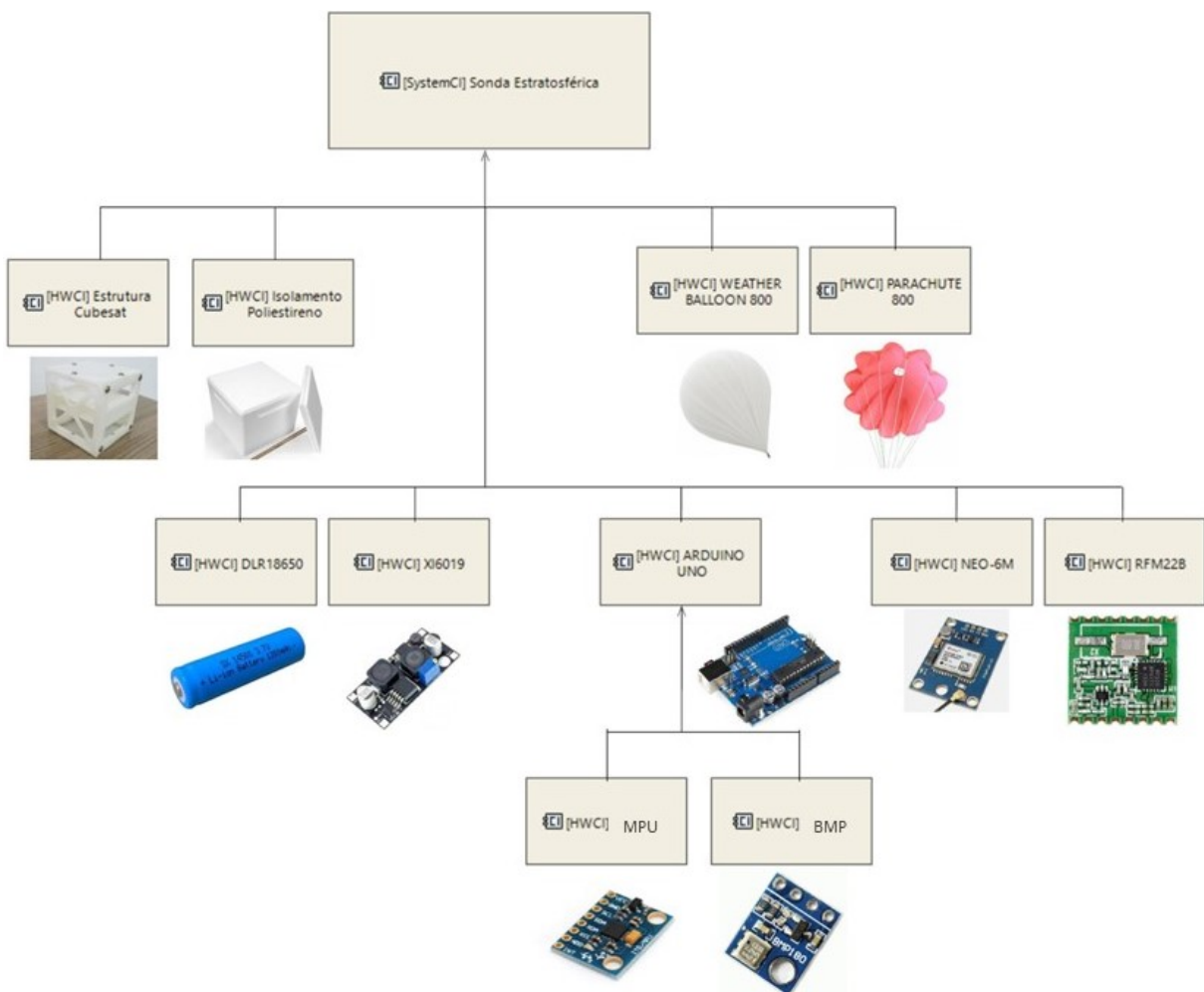


Figura 9 – EPBS do projeto.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Apenas como aspecto informativo também é apresentada outra excelente ferramenta do Capella, que não será utilizada neste projeto mas que serve como auxílio no planejamento das etapas de verificação de um projeto, a matriz de componentes e funções da arquitetura física. A Figura 10 apresenta parcialmente, por questões de visualização, um exemplo desta matriz.

	② Suportar mecanicamente todos componentes do sistema	② Gerar empuxo	② Descer até o solo em segurança	② Armazenar dados de localização	② Armazenar dados a cada 30 segundos
Physical System					
Estrutura primária					
Invólucro térmico					
Estrutura secundária					
Módulo de sensoriamento					
Módulo de Localização - Neo-6m NXP					
Arduino Uno					
Módulo de Energia					
Módulo de Transmissão - RFM22B					
Módulo de Armazenamento					
Wheeler Baloon 500					
Parachute 900					
Antena					
MPU6050					
BMP180					
Processador banda base					
Conversor DC/DC XL6019					
Micro SD					X
Processador					
Suportes e fixações	X				
Revestimento Poliestireno					
Cubetas ABS					
Envelope de expansão		X			
Válvulas de liberação do gás					
Vela			X		
Refletor de radar					
Modulador					
Antena					
Bateria (Li-ion) DLR19550					
Equipamentos estação terrena					
Antena					
Compilador TXT					
SDR					
Botão On/Off					
Regulador					

Figura 10 – Matriz de componentes e funções da arquitetura física.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

5 DESCRIÇÃO DO CONCEITO PROPOSTO

Nesta seção, serão apresentados os componentes selecionados para compor o sistema após o desenvolvimento do projeto no Capella e a realização de todas as etapas de análise do método Arcadia. Os componentes apresentados serão os principais elementos dos subsistemas da sonda, desconsiderando cablagens e subcomponentes não tão relevantes. Serão apresentadas algumas características importantes de cada um, e o motivo de sua escolha será discutido. Aspectos de cálculos e budgets destes componentes serão abordados na sequência, na seção intitulada "Budgets do Conceito Proposto".

Além disso, as referências citadas na seção "Revisão bibliográfica" também forneceram muitos esclarecimentos e opções acerca dos componentes a serem escolhidos. Destacando os trabalhos de Silvaa, Lopesa e Barrosa (2019) e Sousa et al. (2022), com aplicações relativamente semelhantes em suas propostas.

Os dados apresentados nesta seção são majoritariamente de datasheets encontrados no site (ALLDATASHEET, 2023). Os componentes desta seção que não estão relacionados a parte de circuitos e placas foram os únicos que tiveram suas especificações encontradas em sites e lojas de fornecedores como o site (STRATOFLIGHTS, 2023).

5.1 CARGA ÚTIL

O sensor BMP180 foi escolhido para coleta de dados de temperatura na sonda projetada devido às suas características técnicas e desempenho. Ele foi selecionado considerando os requisitos do projeto, levando em conta fatores como precisão, faixa de medição, tamanho compacto e baixo consumo de energia.

Ele é um sensor de alta precisão, cerca de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ na faixa de temperatura de -25°C a $+65^{\circ}\text{C}$. Essa precisão é adequada para aplicações meteorológicas, permitindo medições confiáveis e precisas das variações de temperatura na atmosfera.

Possui ampla faixa de medição de temperatura, que vai de -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$. Essa faixa abrange as temperaturas esperadas durante o voo da sonda estratosférica, garantindo que o sensor possa capturar dados relevantes em diferentes condições ambientais.

O sensor apresenta dimensões reduzidas, de apenas 3,6 mm x 3,6 mm x 0,93 mm. Essa característica é importante para a sonda, pois permite a integração do sensor em um espaço limitado, sem comprometer a estrutura e o design do sistema.

Possui ainda um baixo consumo de corrente, com um modo de operação normal de apenas 0,5 mA. Isso é essencial para a sonda, pois contribui para a eficiência energética do sistema, permitindo uma maior vida útil da bateria e minimizando a demanda por energia durante a missão. Especificações principais do sensor BMP180:

- Faixa de temperatura: -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$;
- Precisão: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- Resolução: $0,0625^{\circ}\text{C}$;
- Alimentação: 1,8 V a 3,6 V;
- Consumo de corrente (modo normal): 0,5 mA;
- Interface de comunicação: I2C;
- Dimensões: 3,6 mm x 3,6 mm x 0,93 mm;
- Massa: 1,20 g;

A escolha do sensor BMP180 para coleta de dados de temperatura na sonda se baseou em suas especificações técnicas favoráveis, que atendem aos requisitos de precisão, faixa de medição, tamanho compacto e baixo consumo de energia. Essas características garantem a confiabilidade e o bom desempenho na obtenção dos dados de temperatura durante a missão da sonda. A Figura 11 apresenta o BMP180.



Figura 11 – Sensor BMP180.

Fonte: retirado do site (ALLDATASHEET, 2023).

O sensor MPU6050 foi escolhido para coleta de dados de velocidade e intensidade de vento na sonda projetada devido às suas características técnicas e desempenho. Ele foi selecionado considerando os requisitos do projeto, levando em conta fatores como precisão, faixa de medição, tamanho compacto e interface de comunicação adequada.

Sendo um módulo inercial de seis eixos que combina um acelerômetro e um giroscópio em um único chip, ele foi escolhido para o módulo de potência na sonda projetada devido à sua precisão e capacidade de fornecer informações cruciais sobre a orientação e movimento da sonda durante a missão.

Ele é um sensor de alta precisão na medição de aceleração e campo magnético. Essa precisão é crucial para obter medições confiáveis e precisas da velocidade e intensidade do vento durante a ascensão da sonda estratosférica.

Possui uma ampla faixa de medição de aceleração linear e campo magnético, permitindo a captura de dados em diferentes intensidades de vento. Essa faixa é adequada para aplicações meteorológicas, garantindo que o sensor possa registrar uma ampla gama de velocidades e intensidades do vento.

O sensor apresenta dimensões reduzidas, facilitando sua integração na sonda sem comprometer o espaço disponível para outros componentes. Essa característica é importante para o projeto, pois permite a otimização do design e a minimização do peso e tamanho da sonda.

O MPU6050 possui uma interface I2C, que é amplamente utilizada em sistemas embarcados. Essa interface permite uma comunicação eficiente com o microcontrolador da sonda, facilitando a integração e a troca de dados entre o sensor e outros componentes do sistema. Especificações principais do sensor MPU6050:

- Faixa de medição de aceleração linear: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ ou $\pm 16g$;
- Resolução: 16 bits;
- Alimentação: 3,3V a 5,5V;
- Consumo de corrente: 3,9 mA em modo ativo, 5 A em modo de economia de energia;
- Interface de comunicação: I2C;
- Dimensões: 14 mm x 20 mm x 1,6 mm;
- Massa: 3,0 g;

A escolha do sensor MPU6050 para coleta de dados de velocidade e intensidade de vento na sonda foi baseada em suas especificações técnicas favoráveis, que atendem aos requisitos de precisão, faixa de medição, tamanho compacto e interface de comunicação adequada. Essas características garantem um desempenho confiável na obtenção dos dados de vento durante a missão da sonda. A Figura 12 apresenta o MPU6050.

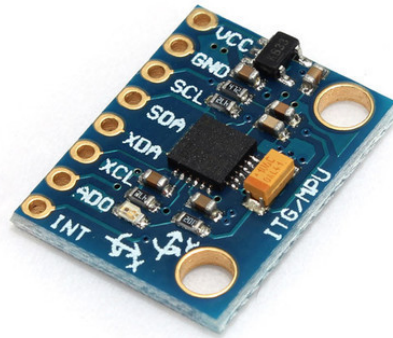


Figura 12 – Sensor MPU6050.

Fonte: retirado do site (ALLDATASHEET, 2023).

5.2 SUBSISTEMA DE LOCALIZAÇÃO

O sensor NEO-6M foi escolhido para o módulo de GPS na sonda projetada devido às suas características técnicas e desempenho. Ele foi selecionado considerando os requisitos do projeto, levando em conta fatores como precisão, sensibilidade, tempo de inicialização rápido, dimensões compactas e facilidade de integração.

Ele oferece uma precisão de posicionamento de até 2,5 metros. Essa precisão é fundamental para aplicações de navegação, permitindo a obtenção de coordenadas geográficas precisas durante o voo da sonda estratosférica.

Além disso, o sensor possui uma alta sensibilidade de recepção, permitindo uma boa recepção de sinais mesmo em condições de baixo sinal, como em áreas urbanas ou cercadas por obstáculos. Isso é importante para garantir uma conectividade confiável e contínua com os satélites de GPS em diferentes condições de voo.

Ele apresenta um tempo de inicialização rápido, permitindo uma rápida aquisição de sinal e posicionamento. Esse tempo de inicialização reduzido é importante para otimizar o tempo de espera antes do lançamento da sonda e garantir um posicionamento preciso assim que a sonda estiver no ar.

Outro ponto relevante são suas dimensões compactas, com um encapsulamento de apenas 16 mm x 12,2 mm x 2,4 mm. Essa característica é essencial para a sonda, pois permite a integração do módulo de GPS em um espaço limitado, sem comprometer a estrutura e o design do sistema.

O sensor possui uma interface serial padrão, tornando sua integração com outros componentes do sistema mais simples e direta. Isso facilita a conexão e comunicação com outros dispositivos de processamento de dados na sonda, permitindo uma operação

eficiente e confiável do módulo de GPS. Especificações principais do sensor NEO-6M:

- Faixa de tensão de alimentação: 3,3 V a 5,0 V;
- Consumo de corrente (modo ativo): 85 mA;
- Consumo de corrente (modo de espera): 25 mA;
- Tempo de inicialização a frio: <35 segundos;
- Tempo de inicialização a quente: <1 segundo;
- Dimensões: 16 mm x 12,2 mm x 2,4 mm;
- Massa: 1,3 g;

A escolha do sensor NEO-6M para o módulo de GPS na sonda baseou-se em suas especificações técnicas favoráveis, que atendem aos requisitos de precisão, sensibilidade, tempo de inicialização rápido, dimensões compactas e facilidade de integração. Essas características garantem um posicionamento preciso e confiável da sonda durante toda a missão.

Tendo discutido o sensor MPU6050, vale destacar que para a coleta de dados de intensidade e direção do vento, acaba existindo positivamente para o projeto, uma redundância na maneira de obter estes dados, uma vez que o módulo GPS NEO-6M através de seu deslocamento e geolocalização também consegue informar os dados de vento, mas com menos precisão. A Figura 13 apresenta o NEO-6M.



Figura 13 – Módulo GPS NEO-6M.

Fonte: retirado do site (ALLDATASHEET, 2023).

5.3 SUBSISTEMA DE COMUNICAÇÃO

O componente RFM22B foi escolhido para o módulo de transmissão na sonda projetada devido às suas características técnicas e desempenho. Ele foi selecionado considerando os requisitos do projeto, levando em conta fatores como protocolo de dados, confiabilidade, dimensões compactas e baixo consumo de energia.

Ele suporta diferentes protocolos de dados, como AX.25, SPI e UART, permitindo uma fácil integração com outros dispositivos do sistema. Isso facilita a troca de informações entre a sonda e a estação receptora, garantindo uma transmissão eficiente e confiável dos dados coletados durante a missão.

Possui um mecanismo de correção de erros embutido, que ajuda a garantir a integridade dos dados durante a transmissão. Essa confiabilidade é fundamental para assegurar que os dados coletados pela sonda sejam transmitidos de forma precisa e sem perdas.

Além disso, apresenta dimensões compactas, com um encapsulamento de apenas 17 mm x 17 mm x 2 mm. Essa característica é importante para a sonda, pois permite a integração do módulo de transmissão em um espaço limitado.

O RFM22B apresenta um baixo consumo de corrente, o que contribui para a eficiência energética do sistema como um todo. Isso permite uma maior vida útil da bateria e minimiza a demanda por energia durante a missão da sonda. Especificações principais do componente RFM22B:

- Protocolo de dados: AX.25, SPI, UART;
- Frequência de operação: 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz;
- Consumo de corrente (modo ativo): 85 mA;
- Consumo de corrente (modo de espera): 2 μ A;
- Dimensões: 17 mm x 17 mm x 2 mm;
- Massa: 0,8 g;

A escolha do componente RFM22B para o módulo de transmissão na sonda foi baseada em suas especificações técnicas favoráveis, como protocolo de dados, confiabilidade, dimensões compactas e baixo consumo de energia. Além de histórico de utilização em aplicações semelhantes como no caso de Silvaa, Lopesa e Barrosa (2019) e Sousa et al. (2022). A Figura 14 apresenta o RFM22B.

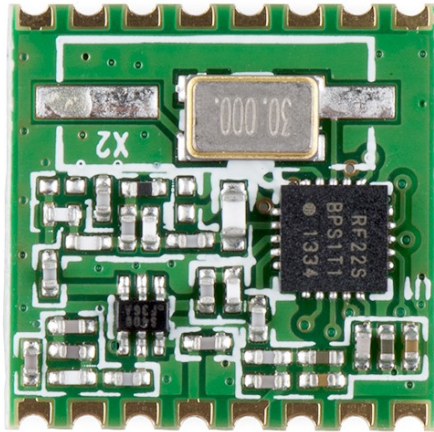


Figura 14 – Módulo transmissor RFM22B.
 Fonte: retirado do site (ALLDATASHEET, 2023).

5.4 SUBSISTEMA DE POTÊNCIA

A bateria Li-ion modelo DLR18650 foi escolhida para o módulo de potência na sonda projetada devido às suas características técnicas e desempenho. Ela foi selecionada considerando os requisitos do projeto, levando em conta fatores como capacidade de energia, tensão nominal, tamanho compacto e segurança.

Possui uma alta capacidade de energia de 2200 mAh, o que permite uma alimentação estável e duradoura para o sistema da sonda durante a missão. Essa capacidade é adequada para fornecer energia suficiente para as operações durante o voo estratosférico.

Sua tensão nominal é de 3,7 V, o que é compatível com a maioria dos componentes e subsistemas da sonda. Essa tensão é adequada para alimentar os diferentes circuitos e sistemas elétricos presentes no projeto.

Apresenta dimensões compactas, com um formato cilíndrico de 18 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento. Essa característica é importante para a sonda, pois permite a integração da bateria em um espaço limitado, sem comprometer a estrutura e o design do sistema.

A bateria DLR18650 é projetada com recursos de segurança, como proteção contra curto-circuito, sobrecarga e descarga excessiva. Essas características garantem um uso seguro da bateria durante a missão da sonda, minimizando riscos e danos ao sistema. Especificações principais da bateria DLR18650:

- Capacidade: 2200 mAh;
- Tensão nominal: 3,7 V;

- Tensão de carga máxima: 4,2 V;
- Tensão de corte de descarga: 2,75 V;
- Tipo de célula: Li-ion;
- Dimensões: 18 mm de diâmetro x 65 mm de comprimento;
- Massa: Aproximadamente 46 g;

A escolha da bateria DLR18650 para o módulo de potência se baseou em suas especificações técnicas favoráveis, que atendem aos requisitos de capacidade de energia, tensão nominal, tamanho compacto e segurança. Essas características garantem uma alimentação confiável e eficiente durante a missão da sonda, mantendo a integridade e o desempenho do sistema elétrico. A Figura 15 apresenta a bateria DLR18650.



Figura 15 – Bateria(Li-ion) DLR18650.
Fonte: retirado do site (ALLDATASHEET, 2023).

O regulador XL6009 é um conversor DC-DC step-up, capaz de elevar a tensão de entrada para uma tensão maior na saída. Ele foi escolhido para o módulo de potência na sonda projetada devido à sua alta eficiência, ampla faixa de tensão de operação e capacidade de fornecer uma tensão estável para alimentar o Arduino selecionado.

O regulador XL6009 foi uma escolha adequada para o módulo de potência da sonda devido à sua versatilidade e eficiência energética. Sua ampla faixa de tensão de operação garante a flexibilidade e adaptabilidade do sistema em diferentes condições ambientais e expansão de novas aplicações.

A capacidade de fornecer uma tensão de saída ajustável foi fundamental para atender aos requisitos específicos de tensão dos diferentes componentes do sistema. Isso permitiu que o regulador XL6009 fosse configurado para fornecer a tensão necessária para cada dispositivo, garantindo seu correto funcionamento e desempenho.

Por fim, a proteção contra sobretensão, sobrecorrente e superaquecimento proporciona uma camada adicional de segurança ao sistema, garantindo que o regulador XL6009 opere de forma confiável e protegida contra possíveis falhas ou danos.

- Tensão de operação de entrada: 3,5 V a 32 V;

- Tensão de operação de saída: Ajustável de 5 V a 35 V;
- Corrente máxima de saída: 4 A;
- Eficiência típica: 94%;
- Frequência de comutação: 400 kHz;
- Dimensões: 0,3 mm x 9,2 mm x 4,6 mm;
- Massa: 5,0 g;

O regulador XL6009 é uma boa escolha para o módulo de potência da sonda, pois proporciona a alimentação adequada ao controlador, e garante versatilidade e proteção para o funcionamento confiável do sistema durante a missão e em futuras expansões de aplicações. A Figura 16 apresenta o regulador XL6009.

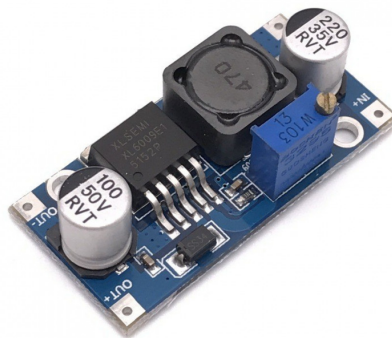


Figura 16 – Regulador XL6009.

Fonte: retirado do site (ALLDATASHEET, 2023).

5.5 SUBSISTEMA DE COMPUTAÇÃO DE BORDO

O Arduino Uno foi escolhido como componente para o módulo de controle na sonda projetada devido às suas características técnicas, flexibilidade e facilidade de programação. Essa escolha foi feita levando em consideração os requisitos do projeto, visando um controle eficiente e confiável da sonda durante a missão.

O Arduino Uno é uma placa microcontroladora de código aberto que permite a programação personalizada para atender às necessidades específicas do projeto. Essa flexibilidade é fundamental para o controle da sonda, pois permite a implementação de

algoritmos e lógicas customizadas para diferentes funções e interações com os demais subsistemas.

Ele utiliza uma linguagem de programação simples e amigável, baseada em C/C++, o que facilita o desenvolvimento e a depuração do código-fonte. Essa facilidade de programação é importante para o projeto da sonda, pois permite uma rápida prototipagem e iteração durante o desenvolvimento do sistema de controle. Especificações principais do Arduino Uno:

- Microcontrolador: ATmega328P;
- Tensão de operação: 5V;
- Corrente máxima por pino de E/S: 20 mA;
- Memória flash: 32 KB (dos quais 0,5 KB são usados pelo bootloader);
- Número de pinos digitais: 14 (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM);
- Número de pinos analógicos: 6;
- Velocidade de clock: 16 MHz;
- Dimensões: 68.6mm x 53.4mm;
- Massa: Aproximadamente 35 g;

A escolha do Arduino Uno para o módulo de controle se baseou em suas especificações técnicas favoráveis, que atendem aos requisitos de flexibilidade, facilidade de programação e compatibilidade com os demais subsistemas da sonda. Essas características permitem um controle eficiente e personalizado da sonda, possibilitando a implementação de funcionalidades específicas e a interação com os demais componentes do sistema de forma integrada. Suas dimensões, embora maiores que as apresentadas pelo Arduino Nano, por exemplo, não impactam drasticamente a alocação ou massa do sistema. Ao considerar sua superioridade de processamento e número de pinos em comparação com os demais, as possibilidades de expansão justificam a escolha deste componente. A Figura 17 apresenta o Arduino Uno.



Figura 17 – Arduino Uno.

Fonte: retirado do site (ALLDATASHEET, 2023).

O cartão Mini SD é uma forma compacta e eficiente de armazenamento de dados, especialmente adequado para projetos com restrições de espaço. No contexto da sonda projetada, o cartão Mini SD foi escolhido como o componente para o módulo de armazenamento.

Ele oferece uma variedade de capacidades de armazenamento, geralmente variando de alguns megabytes a vários gigabytes, o que possibilita a coleta e armazenamento de um grande volume de dados durante as missões da sonda. Com dimensões reduzidas, ele é uma opção ideal para projetos que possuem espaço limitado, como a sonda estratosférica. Seu tamanho compacto permite que seja facilmente integrado ao sistema, ocupando pouco espaço físico.

Além disso, possui um baixo consumo de energia durante a operação, contribuindo para a eficiência energética da sonda. Isso é crucial, pois permite uma maior vida útil da bateria e minimiza a demanda por energia durante a missão. Os cartões Mini SD são projetados para serem duráveis e confiáveis, o que é essencial em ambientes adversos, como as altitudes elevadas da estratosfera. Sua resistência a choques e variações de temperatura garantem a integridade dos dados coletados.

Ele pode ser facilmente removido e inserido em leitores de cartão compatíveis, o que facilita o acesso e a transferência dos dados armazenados para outros dispositivos, como computadores, para análises e processamento mais aprofundados. A Figura 18 apresenta o Mini SD.

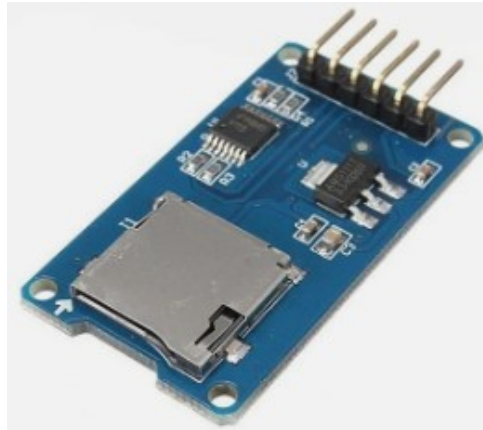


Figura 18 – Cartão Mini SD.

Fonte: retirado do site (ALLDATASHEET, 2023).

5.6 SUBSISTEMA ESTRUTURAL

A opção por uma estrutura CubeSat 1U feita por impressão 3D em ABS foi escolhida devido às suas vantagens em termos de flexibilidade, resistência e peso. A utilização da tecnologia de impressão 3D permite a criação de uma estrutura personalizada, com geometria específica para acomodar os componentes da sonda projetada.

A impressão 3D em ABS oferece flexibilidade no design da estrutura. Foi possível criar um modelo customizado que atendesse às necessidades específicas da sonda, permitindo a incorporação de suportes, encaixes e compartimentos adequados para cada componente.

O ABS é conhecido por sua alta resistência e durabilidade. Essas características são essenciais para suportar as condições adversas durante a ascensão e a operação da sonda em ambiente estratosférico, incluindo variações de temperatura e possíveis impactos, embora estes esforços não sejam extremos comparado ao ambiente espacial por exemplo, é preciso considerar cenários de queda ou situações adversas para o sistema.

Por conta destes esforços menores sofridos pela estrutura, diferentemente dos CubeSats que vão ao espaço, a escolha de materiais permite a opção por um material mais leve como o ABS. Comparado a outros materiais e métodos de fabricação tradicionais, a impressão 3D em ABS permite uma praticidade e possibilita expandir o sistema se necessário, um dos motivos da escolha pela estrutura CubeSat.

Optou-se também por uma estrutura secundária que além de auxiliar na alocação dos componentes, permite um maior suporte em caso de expansão dos módulos para diferentes aplicações no projeto. Claro que isso traria alterações para outros componentes do sistema como Balão e Paraquedas. Especificações da estrutura CubeSat 1U projetada:

- Dimensões: 10 cm x 10 cm x 10 cm;

- Geometria: Design de uma única unidade (1U) com encaixes e compartimentos para os componentes;
- Material: ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno);
- Resistência: Alta resistência ao impacto e rigidez;
- Peso: Leve, contribuindo para o peso total reduzido da sonda, 80 g na estrutura projetada;

A escolha da estrutura CubeSat 1U feita por impressão 3D em ABS foi baseada em sua flexibilidade, resistência e custo acessível. Essa combinação permitiu a criação de uma estrutura personalizada, capaz de proteger e acomodar adequadamente os componentes da sonda, garantindo seu bom desempenho durante a missão. A Figura 19 apresenta um exemplo da estrutura proposta.

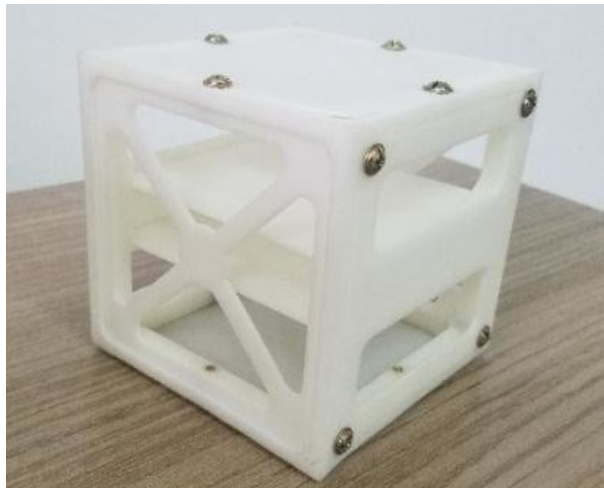


Figura 19 – Estrutura CubeSat em ABS.
Fonte: retirado de (SOUSA et al., 2022).

5.7 SUBSISTEMA TÉRMICO

A escolha pelo revestimento térmico em poliestireno expandido foi feita devido às suas propriedades isolantes e leves, tornando-o adequado para a proteção térmica da sonda projetada.

O poliestireno expandido, possui excelentes propriedades isolantes. Ele é capaz de reduzir as transferências de calor por condução, convecção e radiação, ajudando a manter a temperatura interna da sonda estável. Essa característica é essencial para proteger os componentes contra variações extremas de temperatura durante a ascensão e operação na estratosfera.

Além disso, ele é um material leve, contribuindo para a redução do peso total da sonda. Especificações do revestimento térmico em poliestireno expandido:

- Material: Poliestireno expandido (EPS);
- Massa: 1,0 g;
- Dimensões: 94 mm x 94 mm x 94 mm;

A escolha pelo revestimento térmico em poliestireno expandido foi baseada em suas propriedades isolantes e leves. Ele proporciona um isolamento térmico eficiente, ajudando a manter a temperatura interna da sonda estável, e sua leveza contribui para a eficiência energética da missão. O revestimento térmico em poliestireno expandido oferece uma solução prática e acessível para proteger os componentes da sonda contra as condições ambientais adversas da estratosfera. A Figura 20 apresenta a estrutura de revestimento térmico proposta.

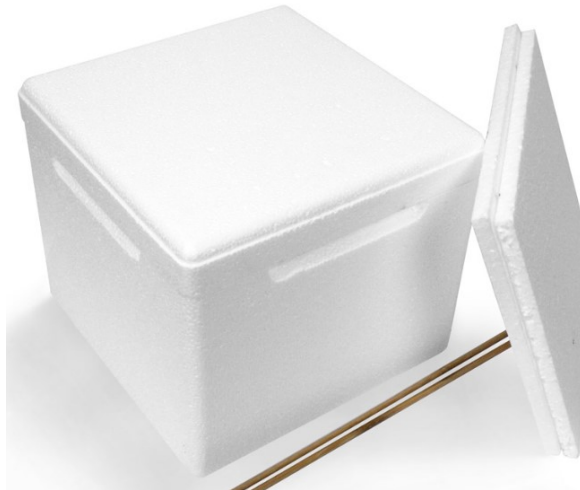


Figura 20 – Revestimento poliestireno expandido.
Fonte: retirado do site (STRATOFLIGHTS, 2023).

5.8 RECUPERAÇÃO E REUTILIZAÇÃO

O balão Weather Balloon 800 foi escolhido para a sonda projetada devido às suas características técnicas que atendem aos requisitos de altitude, capacidade de carga e duração de voo.

Este balão é capaz de atingir altitudes elevadas, alcançando aproximadamente 40 km de altitude. Essa altitude é compatível com os objetivos da sonda, permitindo a coleta de dados meteorológicos relevantes na estratosfera.

O balão possui uma capacidade de carga adequada para acomodar os equipamentos e sensores da sonda. Com uma capacidade de carga máxima de 800 g, ele permite o transporte dos componentes necessários para a coleta de dados de temperatura, vento e se necessário, outras variáveis meteorológicas.

Ele proporciona uma duração de voo prolongada, permitindo que a sonda permaneça em operação por um tempo considerável. Com uma taxa de subida de aproximadamente 5 m/s e um tempo até estouro de aproximadamente 2 horas, o balão fornece uma janela de tempo adequada para a realização das medições desejadas. Especificações principais do balão Weather Balloon 800:

- Altitude máxima: Entre 30 km e 40 km;
- Capacidade de carga máxima: 800 g;
- Duração de voo: Aproximadamente 2 horas até o estouro;
- Quantidade de hélio necessária: 1852 L, conforme cálculo do fabricante para carga paga de 250g e uma taxa de subida de 5m/s com empuxo de 10,6kN;

A escolha pelo balão Weather Balloon 800 foi baseada em suas especificações técnicas, que atendem aos requisitos de altitude, capacidade de carga e duração de voo da sonda projetada. Esse balão fornece uma solução confiável e eficiente para o lançamento e a realização da missão, permitindo a coleta de dados meteorológicos na estratosfera de forma precisa e segura. A Figura 21 apresenta o modelo de balão a ser utilizado.



Figura 21 – Weather balloon 800.
Fonte: retirado do site (STRATOFLIGHTS, 2023).

O paraquedas Parachute 800 foi escolhido para a sonda projetada devido às suas características técnicas que atendem aos requisitos de segurança e eficiência durante a descida da sonda.

Este paraquedas é projetado para operar em altitudes elevadas. Ele é capaz de ser acionado em altitudes superiores a 20 km, o que é adequado para a descida da sonda após atingir a altitude máxima desejada.

Ele possui uma capacidade de carga máxima adequada para a sonda. Com uma capacidade de carga de até 800 g, ele é capaz de suportar o peso da sonda e dos equipamentos embarcados durante a fase de descida.

O Parachute 800 é projetado para fornecer uma desaceleração controlada e segura durante a descida da sonda. Ele oferece uma taxa de descida adequada, permitindo que a sonda pouse suavemente e evitando danos aos componentes e sensores. Especificações principais do paraquedas Parachute 800:

- Altitude de acionamento: Superior a 20 km;
- Capacidade de carga máxima: 800 g;
- Eficiência de frenagem: Adequada para uma descida controlada e suave;

A escolha pelo paraquedas Parachute 800 foi baseada em suas especificações técnicas, que atendem aos requisitos de altitude, capacidade de carga e eficiência de frenagem para a descida segura da sonda. Esse paraquedas proporciona uma solução confiável e eficiente para garantir a integridade da sonda durante a fase de retorno à superfície, permitindo um pouso suave e seguro. A Figura 22 apresenta o modelo de paraquedas a ser utilizado.



Figura 22 – Parachute 800.

Fonte: retirado do site (STRATOFLIGHTS, 2023).

A proposta de sistema é de que a sonda também apresente um refletor de radar. Este componente é projetado para refletir o sinal de radar enviado por um radar em terra ou outro radar no espaço de volta para a fonte original, aumentando a resposta do sinal recebido. A principal finalidade do refletor de radar é tornar a sonda mais visível para os sistemas de radares, permitindo que sua localização e trajetória sejam monitoradas com maior precisão.

Isso é especialmente útil em missões estratosféricas em que a sonda pode operar em altitudes elevadas e ser difícil de ser rastreada diretamente devido à sua pequena dimensão e distância considerável da estação terrestre. Os refletores de radar podem ter diferentes formas e materiais, mas geralmente são construídos com materiais que têm alta capacidade de refletir o sinal de radar, como alumínio ou materiais dielétricos especiais.

Por ser um componente passivo, o refletor de radar não requer nenhuma energia ou controle ativo durante a operação da sonda. Ele é simplesmente projetado para melhorar a resposta do sinal de radar incidente, aumentando a eficiência do rastreamento e a precisão das informações coletadas sobre a sonda estratosférica.

5.9 INTEGRAÇÃO FINAL

Com a definição de todos os componentes do conceito proposto e conhecendo suas especificações, é possível detalhar e prever o esquemático final do sistema, considerando todas suas interfaces e protocolos de comunicação. A Figura 23 apresenta o esquemático proposto e ilustra estas interfaces. A ausência dos componentes específicos nos softwares disponíveis não possibilitou uma disposição com todas ligações feitas. No entanto, a representação desenvolvida tem como objetivo expor as ligações de todos os pinos dos componentes e controlador para que assim, etapas subsequentes de projeto consigam ter a garantia de funcionamento e compatibilidade dos componentes escolhidos.

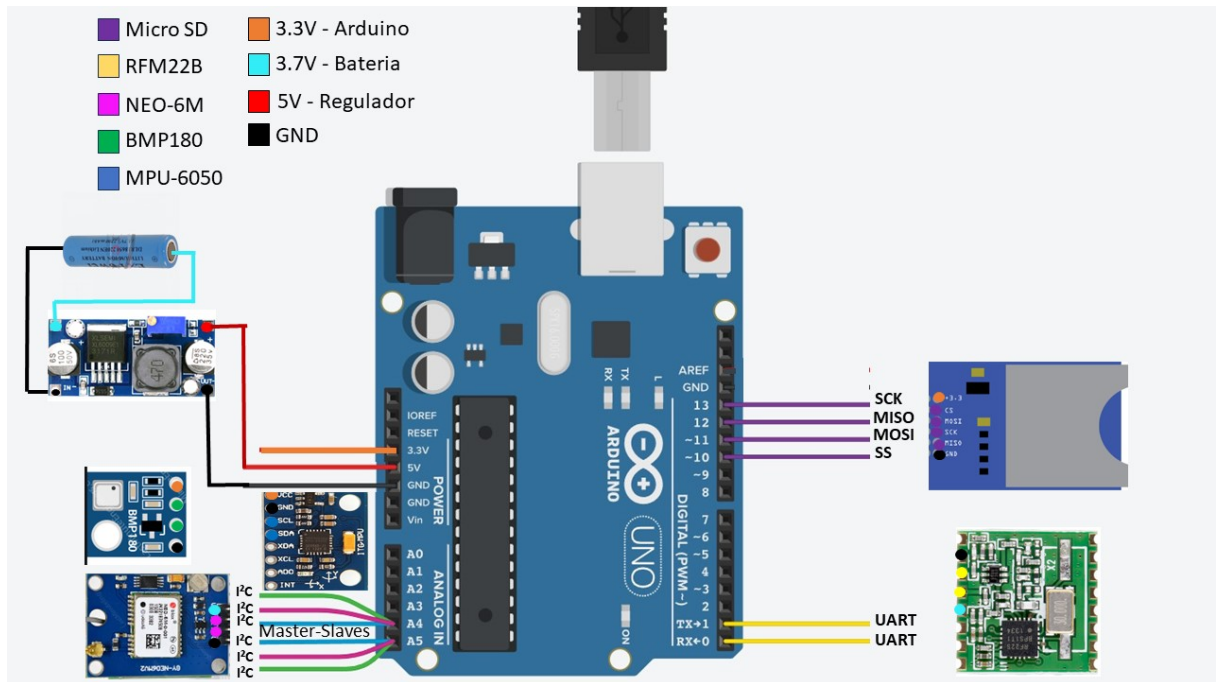


Figura 23 – Esquemático final das interfaces do sistema.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Os módulos de localização e transmissão são alimentados pela bateria, pois o valor de corrente exigido não seria suportado pelo Arduino. Já o Arduino é alimentado pelo conversor que regula a tensão de 3.7 V da bateria em 5V para alimentação. Os sensores por sua vez, são alimentados pelo Arduino com 3.3V e o Mini SD também é alimentado pelo Arduino, porém com 5V.

As interfaces de comunicação foram dispostas de acordo com a disponibilidade de pinos do Arduino. O módulo de transmissão ocupa os pinos seriais de protocolo UART. O Mini SD é ligado aos pinos de SPI (10, 11, 12 e 13). Os sensores e o módulo GPS são ligados ao Arduino por protocolo I²C. Desta maneira, precisam ser dispostos em configuração Master-Slave, uma vez que apenas os pinos A4 e A5 suportam este protocolo de comunicação. Assim, o pino de clock de um dos componentes gerencia o fluxo de dados do pino restante. No caso do sistema proposto, é necessário observar que o Neo-6M é o único dos 3 componentes que não pode ser configurado como Master nesta configuração.

A ausência dos componentes também impactou possíveis estudos em relação a simulação do software do Arduino. No entanto, o conceito proposto mantém-se viável, uma vez que as interfaces e arquitetura dos componentes garante a operacionalidade em aspectos de hardware do sistema. Podendo a completude do estudo e desenvolvimento do software ser abordada em trabalhos futuros.

Para fins de compreensão do escopo da missão e operação do sistema, é importante mencionar onde e como o processamento destes dados se torna o formato final dos dados coletados e, de fato, cumpre o objetivo da missão na comparação de modelos atmosféricos. A sonda proposta realiza apenas a coleta de dados e o Arduino gerencia o

fluxo dos demais módulos e operação do sistema. O formato final do arquivo é compilado apenas na estação terrena com a recepção dos dados.

De maneira que, os dados de deslocamento absoluto do GPS, combinados com os dados inerciais possam ser transformados em amostras de intensidade do vento (ao se saber a massa do sistema) e que a trajetória da sonda permita orientar este vetor no espaço, obtendo assim os valores de intensidade e direção do vento, além da temperatura que não exige qualquer tipo de processamento.

Com isso, o conceito proposto cumpre o objetivo inicial. Resta assim, garantir sua operacionalidade com os budgets envolvidos na operação da sonda. Estes são abordados na seção a seguir.

6 BUDGETS DO CONCEITO PROPOSTO

Com a realização das etapas anteriores e definição dos componentes é possível integrar o sistema final. Para questões de visualização e ferramenta de auxílio para o projeto, foi desenvolvido um modelo 3D do sistema final integrado com a representação de todos os subsistemas e componentes presentes. O modelo foi desenvolvido com a utilização do software "Shapr3D". As Figuras 24, 25 e 26 apresentam respectivamente, as vistas isométrica, lateral e superior do sistema final proposto. Os componentes de revestimento térmico, paraquedas e balão foram desconsiderados nas imagens pelo propósito de visualização dos componentes internos.

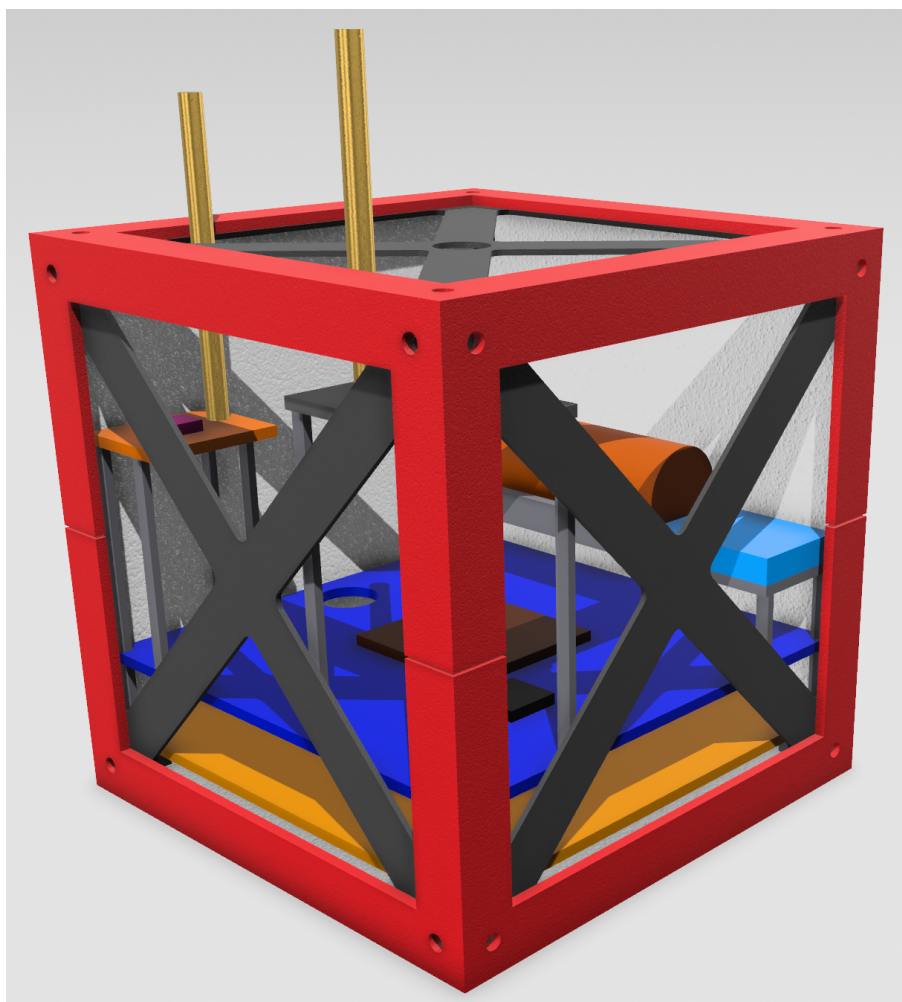


Figura 24 – Vista isométrica sistema final.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

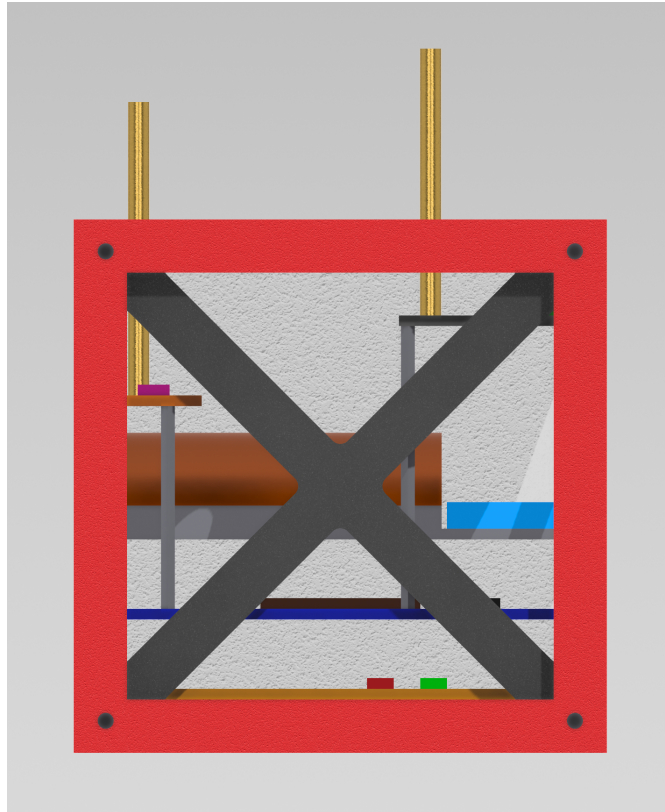


Figura 25 – Vista lateral sistema final.
Fonte: elaborado pelo autor (2023).

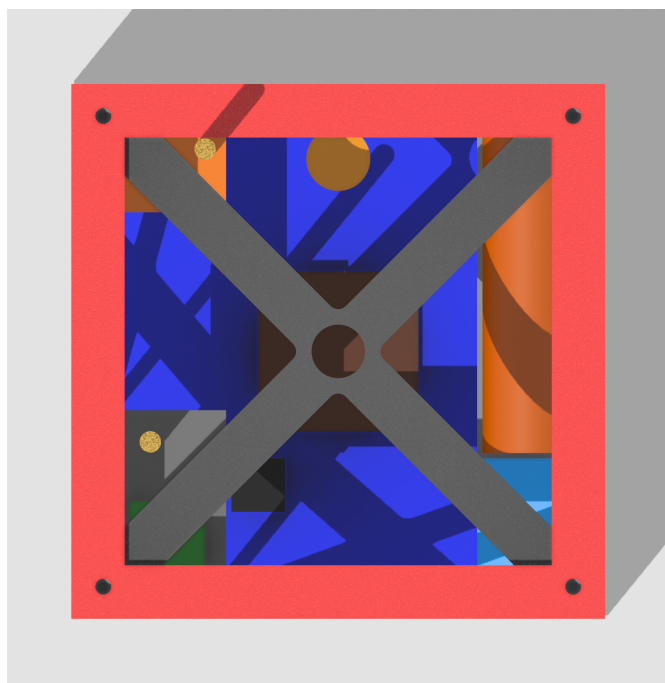


Figura 26 – Vista superior sistema final.
Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Em qualquer projeto é essencial realizar os cálculos dos budgets das principais grandezas, para que seja possível garantir a operacionalidade, integridade e funciona-

mento correto do sistema final. Para realizar os cálculos dos budgets do conceito proposto foi utilizada parte da metodologia proposta por Wertz et al. (1999) no que diz respeito às verificações e balanço de massa, potência e comunicação.

A seguir serão apresentados os principais dados encontrados para os cálculos de massa, potência e comunicação. Vale destacar que para esta etapa do projeto, foram consideradas as principais áreas e grandezas a nível de sistemas. O nível de aprofundamento desta etapa pode ser variado e detalhado de acordo com as etapas de projeto, particularidades do sistema ou aplicação e outros aspectos.

É fundamental destacar que a verificação de todos os subsistemas e consequentemente do conceito final é um processo iterativo, provocando mudanças de componentes e adequações caso necessário. Esta seção apresenta os balanços finais realizados, os quais certificam as capacidades finais da sonda desenvolvida.

6.1 BUDGET DE MASSA

O budget de massa tem como objetivo principal garantir que todas as massas envolvidas no sistema estejam adequadamente dentro dos limites estabelecidos pela operação proposta.

O cálculo deste budget é crucial para assegurar que a sonda é capaz de atingir seus objetivos de desempenho e funcionalidade. Ao considerar todas as massas envolvidas, incluindo a estrutura, os subsistemas e a carga útil, é possível determinar se o sistema é capaz de realizar suas operações de maneira eficiente e segura.

Além disso, o budget de massa contribui para o dimensionamento correto dos componentes de recuperação e reutilização, balão e paraquedas. Esses componentes têm suas limitações essencialmente relacionadas com as massas envolvidas no sistema. Para realizar suas funções de forma eficiente e precisa, o somatório das massas dos subsistemas e componentes deve estar abaixo dos limites operacionais citados anteriormente. Tanto para o balão quanto para o paraquedas este limite é de 800 g.

Os dados de massa do balão são considerados em sua própria característica limitante de massa máxima e por isso não entra no cálculo. Todos os componentes eletrônicos do sistema apresentam suas massas nos seus respectivos datasheets, os valores destas massas estão presentes na seção anterior.

Os únicos subsistemas que exigiram cálculo de massa estimada foram os subsistemas que foram dimensionados: subsistema estrutural e subsistema térmico. O modelo 3D desenvolvido e apresentado anteriormente auxiliou no cálculo das massas estimadas. Com as dimensões dos subsistemas estrutural e térmico foi possível obter os volumes respectivos de $0,0000768 \text{ m}^3$ e $0,0000392 \text{ m}^3$. Considerando os materiais utilizados nestes subsistemas, ABS e poliestireno, é possível definir a massa dos corpos dimensionados ao

multiplicar os volumes encontrados pelas massas específicas de cada material. Os valores utilizados foram de 1040 kg/m^3 para o ABS e 17 kg/m^3 para o poliestireno. Os valores finais calculados são apresentados na Tabela 4.

$$0,0000768 \cdot 1040 = 0,079 \text{kg} \quad (6.1)$$

$$0,0000392 \cdot 17 = 0,0006664 \text{kg} \quad (6.2)$$

Tabela 4 – Budget de massa do sistema.

Componente	Massa (g)
BMP180	1,20
MPU6050	3,00
NEO-6M	1,30
ARDUINO UNO	35,00
RFM22B	0,80
XL6009	5,00
DLR18650	46,00
WEATHER BALLOON 800	N/A
PARACHUTE 800	70,00
POLIESTIRENO	1,00
ESTRUTURA ABS	80,00
SD CARD ARDUINO	5,00
TOTAL	248,30

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Cabos, conectores e fixadores foram desconsiderados nesse budget, uma vez que não foram mencionados anteriormente ou detalhados no projeto. Além do que, estes podem variar dependendo das especificações e quantidades necessárias. Por fim, a soma da massa final estimada do sistema foi de **248,30 g**. O resultado se mostra bastante positivo, podendo ainda certamente alocar as massas ausentes de cablagem e demais elementos, placas adicionais, além do balão.

O resultado do budget de massa realizado mostra que o conceito final proposto, ao considerar seus principais componentes e subsistemas mantém-se dentro do envelope operacional de 800 g de carga paga máxima imposto pelo balão e paraquedas.

6.2 BUDGET DE POTÊNCIA

O cálculo do budget de potência tem como objetivo principal garantir que a demanda de energia elétrica do sistema seja adequadamente suprida e o sistema possua uma autonomia correspondente ao tempo estimado de operação. Para isso, é necessário identificar e quantificar a fonte de energia disponível na forma da bateria, bem como determinar a potência exigida por cada componente, incluindo sistemas de comunicação, carga útil, e localização.

Ao realizar esse budget, é possível avaliar se a capacidade de geração de energia é suficiente para suprir todas as demandas do sistema. Semelhante ao método do budget de massa, o budget de potência certifica que a soma de demanda de potência do sistema é menor do que a energia fornecida pela bateria. No caso da sonda projetada, este limite de alimentação é dado pela bateria Li-ion modelo DLR18650 utilizada, descrita anteriormente, esta apresenta características elétricas de 2200 mAh e 3,7 V, fornecendo assim ao sistema 8,14 Wh de energia. Observando os demais componentes que serão alimentados por este sistema de potência, é possível certificar se a bateria escolhida atende os requisitos.

Os dados utilizados foram previamente apresentados oriundos dos datasheets dos componentes. Para a realização do budget de potência, nenhum cálculo além do somatório de potência exigida pelo sistema se faz necessário. Para a obtenção da potência são utilizados os dados de tensão de operação e corrente de cada componentes. A seguir são apresentados os cálculos realizados. A Tabela 5 expõe os valores obtidos. Para os valores calculados, foram considerados cenários de máxima exigência como estados ativos dos módulos GPS e transmissor. Além disso, foi considerada a tensão de operação máxima em todos os componentes. Ainda que estes operem, em um cenário real, em valores intermediários de suas faixas de tensão. Os dados de consumo do micro SD e do regulador de tensão utilizados foram desconsiderados devido a sua baixa ordem de grandeza.

$$\sum I_{componente} \cdot V_{componente} = W_{sistema} \quad (6.3)$$

$$0,0005A_{BMP180} \cdot 3,6V_{BMP180} = 0,0018W \quad (6.4)$$

$$0,004A_{MPU6050} \cdot 3,4V_{MPU6050} = 0,014W \quad (6.5)$$

$$0,085A_{NEO-6M} \cdot 5,0V_{NEO-6M} = 0,425W \quad (6.6)$$

$$0,020A_{ARDUINOUNO} \cdot 5,0V_{ARDUINOUNO} \cdot 5_{Npinos} = 0,500W \quad (6.7)$$

$$0,085A_{RFM22B} \cdot 3,7V_{RFM22B} = 0,315W \quad (6.8)$$

Tabela 5 – Budget de potência do sistema.

Componente	Potência consumida (W)
BMP180	0,002
MPU6050	0,014
NEO-6M	0,425
ARDUINO UNO	0,500
RFM22B	0,315
TOTAL	1,256

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

A soma da potência final estimada do sistema foi de **1,26 W**. Com a unidade de tempo presente no dado de energia da bateria, é possível encontrar a variável "T", a qual se refere ao tempo de autonomia do sistema com a demanda de potência de seus componentes.

O resultado do budget de potência mostra que o conceito final proposto, ao considerar seus principais componentes eletrônicos mantém-se tranquilamente dentro da capacidade de fornecimento de potência por parte da bateria, ao apresentar autonomia de **6 horas e 27 minutos** como evidenciado na equação a seguir, considerando a energia fornecida pela bateria de 8,14 Wh.

$$E_{bateria} = 2,2Ah_{bateria} \cdot 3,7V_{bateria} = 8,14Wh \quad (6.9)$$

$$W_{sistema} \cdot T = E_{bateria} \quad (6.10)$$

$$1,26W \cdot T = 8,14Wh \quad (6.11)$$

$$T = 6,46h \quad (6.12)$$

O resultado garante a autonomia do sistema ao considerarmos o tempo de operação previsto de aproximadamente 2 horas. O resultado se mostra bastante positivo, podendo ainda certamente comportar mais componentes em possíveis expansões de aplicação, aumentando o número de módulos e componentes.

6.3 BUDGET DE COMUNICAÇÃO

O budget de comunicação tem como objetivo principal avaliar a viabilidade e a eficiência das comunicações entre a sonda e a estação terrestre. É necessário considerar fatores como a distância entre a sonda e a estação terrestre, a potência de transmissão e recepção, além de possíveis interferências.

É preciso definir a potência de transmissão necessária para garantir uma comunicação eficaz, levando em conta as características da sonda. Também é possível avaliar a largura de banda requerida para transmitir os dados coletados pela sonda, bem como a taxa de transferência necessária para a transmissão em tempo real ou o armazenamento em memória para posterior envio.

Muitos aspectos desta etapa de budgets de missão apontados pelos métodos de Wertz et al. (1999) referem-se majoritariamente a aplicações espaciais. Por conta disso, e também pela profundidade e detalhamento deste projeto proposto, foram verificadas apenas algumas grandezas que exercem um papel relevante no sistema. Esta abordagem foi adotada pela natureza da aplicação da missão proposta, a qual em termos de altitude, alcance, ruídos e outros fatores, se distancia um pouco das propostas de verificação para missões espaciais.

Pelas características de transmissão apresentadas anteriormente, e considerando a natureza operacional do sistema proposto sendo apenas de downlink foram definidos: o protocolo de dados UART, a frequência de operação de 433MHz e uma potência de sinal de 20dB. Para que assim, na frequência de operação indicada e na faixa de temperatura de operação do sistema, a Razão Sinal-Ruído (SNR) seja infinitamente maior do que 1, como é necessário para permitir a recepção de sinais. Pela aleatoriedade e comportamento errático do ruído, este aspecto de verificação se apoia também no relato e experiência de resultados positivos do módulo utilizado em aplicação semelhante como nos trabalhos de Silvaa, Lopesa e Barrosa (2019) e Sousa et al. (2022).

O alcance de transmissão do componente RFM22B pode ser afetado por diversas variáveis, e é importante entender as principais razões para a variabilidade na capacidade de distância de transmissão. Para contornar este aspecto são opções aumentar a potência de transmissão, operar em uma frequência mais alta, como 900 MHz ou até mesmo adaptar componentes de longo alcance em 868 MHz ou 915 MHz, para alcançar distâncias maiores. Além disso, a escolha e a qualidade das antenas utilizadas também têm um impacto significativo no alcance de transmissão. O uso de antenas de maior ganho ou direcionais pode aumentar a eficiência da comunicação e o alcance.

Para aumentar a capacidade de alcance, é possível realizar testes empíricos em diferentes configurações de potência de transmissão, usar antenas de maior ganho e garantir que a linha de visão seja a melhor possível.

No entanto, para alcançar distâncias ainda maiores, pode ser necessário considerar

a utilização de outros componentes com frequências mais altas ou tecnologias de comunicação de longo alcance. O conceito proposto utiliza o RFM22B, e tem neste componente um dos maiores pontos de necessidade de operação do sistema, para obtenção de iterações e otimizações futuras.

Tendo definido as características de protocolo de dados, frequência de operação e potência de sinal, é interessante direcionar a análise de budget da comunicação para a grandeza de taxa de dados, uma vez que esta irá definir não só necessidades de transmissão, mas também de armazenamento do sistema.

Para que seja possível definir a taxa de dados do sistema é preciso compreender como os dados coletados serão dispostos após a recepção por parte da estação terrena. Esta que terá como equipamentos de destaque a antena para recepção e por meio de métodos já existentes ou por meio de SDR (Software Defined Radio), uma maneira de receber os dados e transformá-los em um arquivo de formato de texto. A Figura 27 representa este arquivo e as informações contidas no mesmo.

```
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
18:25:32,29.8628956789123,77.9001666666667,42000.50,0.342,0.154,0.233,0.342,0.154,0.233,+12.25
18:25:32,29.8628956789123,77.9001666666667,42000.50,0.342,0.154,0.233,0.342,0.154,0.233,+12.25
18:25:32,29.8628956789123,77.9001666666667,42000.50,0.342,0.154,0.233,0.342,0.154,0.233,+12.25
18:25:32,29.8628956789123,77.9001666666667,42000.50,0.342,0.154,0.233,0.342,0.154,0.233,+12.25
18:25:32,29.8628956789123,77.9001666666667,42000.50,0.342,0.154,0.233,0.342,0.154,0.233,+12.25
18:25:32,29.8628956789123,77.9001666666667,42000.50,0.342,0.154,0.233,0.342,0.154,0.233,+12.25
18:25:32,29.8628956789123,77.9001666666667,42000.50,0.342,0.154,0.233,0.342,0.154,0.233,+12.25
18:25:32,29.8628956789123,77.9001666666667,42000.50,0.342,0.154,0.233,0.342,0.154,0.233,+12.25
Time | Lat. | Long. | Alt. | aX | aY | aZ | ωX | ωY | ωZ | Temp.
```

Figura 27 – Exemplo de formato de dados coletados.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Ao converter estes dados para código binário, é possível encontrar o número de bits por amostra. Neste caso, obtém-se 94 bits para este dado coletado. Ou seja, uma coleta de dados representa aproximadamente 12 bytes de informação. Considerando o intervalo de coleta e transmissão de dados proposto de 30 segundos, é correto afirmar que o sistema coletará e transmitirá 24 bytes de dados por minuto.

No entanto, é necessário certificar que o espaço de armazenamento e a capacidade de transmissão do sistema estão aptos no momento de maior número de coletas, ou seja, ao final da operação. Os dados não serão sobrescrevidos, a quantidade de dados será maior a cada leitura, ao acumular-se com as amostras anteriores.

Com isso, é possível estimar a taxa de dados de armazenamento e transmissão ao final do tempo de operação de 2 horas. Ao multiplicar 120 minutos por 24 bytes, dado referente à duas coletas por minuto, chega-se a um total de 2880 bytes de informação ao

final da missão ou 23040 bits na leitura final. Ao multiplicar este valor pelo número de amostras por segundo, 1/30 no caso do sistema proposto, é encontrado o valor da taxa de dados do sistema, a qual é de **768 bps**, como evidenciado a seguir.

$$bits \cdot taxa_{transmisso} = taxa_{dados} \quad (6.13)$$

$$23040 \cdot 0,033 = 768bps \quad (6.14)$$

Este valor indica que o espaço de armazenamento do cartão SD é mais do que suficiente para armazenar os dados coletados e de que a frequência de transmissão proposta nas definições anteriores não apresentará qualquer problema com relação ao volume de dados.

7 ANÁLISE DE RISCOS

Para a realização da análise de risco da sonda projetada, foram seguidas as etapas descritas por Dezfuli et al. (2011). Como parte do desenvolvimento do projeto, a análise de falhas possibilita identificar possíveis problemas que poderiam ocorrer durante a operação da sonda.

A análise de riscos representa um campo de estudo por si só, com ampla vastidão de aplicações e métodos. Visando expor parte do processo realizado neste tipo de análise e também para que as etapas de projeto propostas por Kapurch (2010) tenham seu escopo completamente cobertos, a abordagem da análise de risco será realizada parcialmente nesta seção, com o intuito de exemplificar apenas alguns dos principais processos. A seguir, serão apresentadas as etapas propostas pela referência indicada e os resultados destas análises.

A primeira etapa desta análise consiste em identificar possíveis falhas que poderiam ocorrer na sonda, considerando diferentes aspectos do sistema, como comunicação, energia, coleta de dados, entre outros. Na sequência, deve ser realizada uma classificação das consequências destas falhas. Vale destacar que esta classificação pode considerar aspectos de desempenho, segurança, cronograma, custo, entre outros. Para este projeto será considerada apenas a análise de desempenho.

Desta maneira, foram levantadas possíveis falhas do sistema proposto e estas tiveram suas consequências avaliadas. As consequências foram classificadas em uma escala de 1 a 5, com base na gravidade e no impacto que cada falha poderia causar. Essa classificação permite priorizar as falhas com consequências mais significativas e, no caso específico da abordagem simplificada utilizada, definir qual das falhas será utilizada para o desenvolvimento da árvore de falhas ou FTA que será discutida futuramente. A Tabela 6 apresenta algumas das possíveis falhas identificadas para o sistema proposto com suas respectivas consequências e classificações.

Tabela 6 – Potenciais falhas e consequências identificadas no sistema.

Falha	Consequência	Classificação
Estouro precoce do balão	O sistema será capaz de coletar, transmitir todos os dados e ser localizado. Porém, a coleta não será realizada na altitude de interesse.	2
Mau funcionamento MPU6050	O sistema não realizará coleta de dados dos acelerômetros (X, Y, Z). Porém, os dados de vento podem ser obtidos através dos valores de deslocamento do módulo GPS.	2
Mau funcionamento BMP180	O sistema não realizará coleta de dados de temperatura. Porém, todas outras funções estarão operacionais.	3
Mau funcionamento NEO-6M	O sistema será capaz de coletar e transmitir os dados de vento e temperatura. Porém, sem dados de localização, não poderá ser recuperado normalmente.	4
Mau funcionamento RFM22B	O sistema será capaz de coletar todos os dados de interesse. Porém, sem transmissão ele não fornece estes dados e nem poderá ser recuperado normalmente.	5
Mau funcionamento LR18650	Sem fornecimento de energia, todas as funções eletrônicas do sistema ficam inutilizadas. Sem dados, sem transmissão, sem localização e sem recuperação.	5

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O próximo aspecto a ser avaliado é a probabilidade de ocorrência de cada falha. Com a utilização da mesma escala de 1 a 5, porém agora para classificar a probabilidade destas falhas, considerando fatores como histórico de falhas semelhantes, qualidade dos componentes utilizados e mitigação de riscos implementada. As definições e estimativas de probabilidade das falhas é uma etapa bastante delicada, uma vez que outras análises acabam por integrar o processo como por exemplo FMEA, muitas vezes significando a integração de times diferentes, como times de software e hardware.

Com as classificações das consequências das falhas e de suas probabilidades, é possível calcular o risco, multiplicando a consequência pela probabilidade das falhas identificadas. Esse cálculo permite obter uma pontuação de risco para cada falha. A Figura 28 apresenta a matriz de risco utilizada para cruzar os resultados de consequências e probabilidades das falhas.

L I K E L I H O O D	5	7	16	20	23	25
	4	6	13	18	22	24
	3	4	10	15	19	21
	2	2	8	11	14	17
	1	1	3	5	9	12
		1	2	3	4	5
		CONSEQUENCE				

Figura 28 – Matriz de risco.

Fonte: retirado de (DEZFULI et al., 2011).

Para o desenvolvimento deste projeto e o intuito desta seção, será desconsiderada a análise de probabilidade e conseqüentemente, não será possível obter um valor final para o risco. Ao invés disso, a falha de maior conseqüência identificada anteriormente irá ser utilizada para o desenvolvimento de uma árvore de falhas para exemplificar a aplicação desta ferramenta da análise.

Com base nas etapas anteriores, foi identificada a falha mais crítica para a operação da sonda projetada. Desenvolveu-se uma árvore de falhas para visualizar as possíveis causas e efeitos dessa falha crítica. Isso permite compreender as interações entre os diferentes eventos e falhas que poderiam levar à falha crítica do sistema. A árvore de falhas desenvolvida apresenta apenas uma camada de aprofundamento. O nível de detalhes pode aumentar o quanto for necessário dependendo do objetivo da análise. No caso da árvore apresentada a seguir, o objetivo é apenas ilustrar como ocorre a utilização desta ferramenta de análise. A Figura 29 apresenta a árvore de falhas desenvolvida.

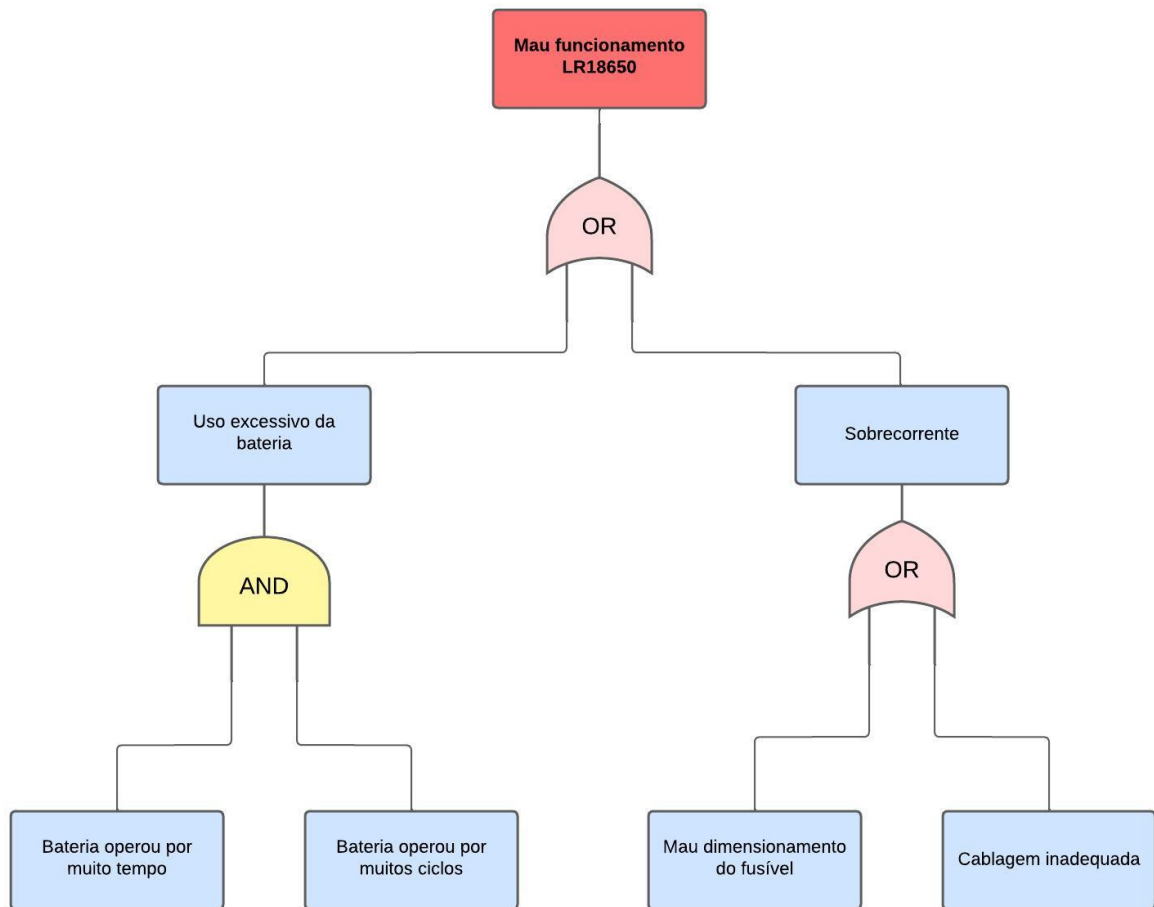


Figura 29 – Árvore de falhas desenvolvida.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

De maneira geral, a análise de risco permite identificar e priorizar as principais ameaças à operação da sonda, permitindo implementar medidas de mitigação adequadas e garantir um projeto mais robusto e seguro. Na abordagem para análise de risco deste projeto, o levantamento e classificação das consequências das falhas e o desenvolvimento da árvore de falhas do sistema possibilitam exemplificar o papel e a importância deste tipo de análise em um projeto. Desta maneira, entende-se satisfeita as orientações da metodologia proposta por Dezfuli et al. (2011).

8 ANÁLISE DE CUSTOS

A seção de orçamento é uma parte essencial de qualquer projeto, pois permite avaliar a viabilidade financeira e estimar os recursos necessários para a sua implementação. Neste contexto, é apresentado a seguir um levantamento dos custos estimados para os principais componentes do sistema da sonda estratosférica desenvolvida neste trabalho.

Para calcular o custo da impressão 3D em ABS, foram considerados os seguintes fatores: volume do cubo, espessura das paredes do cubo, densidade típica do ABS e custo médio do ABS por quilograma (96 R\$). O valor do gás hélio necessário de 1852 L ou 1,85 metros cúbicos foi estimado em 250,00 R\$ pela média de 135,00 R\$ por metro cúbico. É importante mencionar no caso do Hélio que os valores variam muito devido aos cenários mundiais recentes de pandemia e conflitos causando grandes alterações no seu custo.

Tabela 7 – Custo dos componentes do sistema.

Componente	Preço (R\$)
BMP180	10,00
MPU6050	20,00
NEO-6M	35,00
ARDUINO UNO	55,00
RFM22B	20,00
XL6009	12,00
DLR18650	8,00
WEATHER BALLOON 800	200,00
PARACHUTE 800	125,00
POLIESTIRENO	5,00
IMPRESSÃO 3D ESTRUTURA ABS	8,00
SD CARD ARDUINO	8,00
HÉLIO	250,00
TOTAL	756,00

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Os valores apresentados na Tabela 7 são estimativas obtidas com base em pesquisa de preços em lojas e sites. Para realizar o orçamento, foram consultados fornecedores de componentes eletrônicos e equipamentos aeroespaciais. Os valores apresentados são baseados nas médias de preços encontradas nessas fontes de referência. No entanto, é importante ressaltar que os preços podem variar dependendo do fornecedor.

Portanto, é recomendado realizar uma pesquisa atualizada antes de efetuar o projeto físico e conseqüentemente as compras. Para obter informações mais precisas sobre os preços dos componentes no interesse em compra, pode ser interessante verificar atua-

lizações junto a fornecedores especializados.

Vale ressaltar que cabos, conectores e fixadores foram desconsiderados nesse orçamento, uma vez que não foram mencionados anteriormente ou detalhados no projeto. Além do que estes podem variar dependendo das especificações e quantidades necessárias. Por fim, a soma do valor final orçado para os componentes utilizados no projeto foi de **R\$ 756,00**.

Este valor está próximo aos encontrados no mercado e tem seu principal valor associado especialmente ao gás Hélio, balão e paraquedas. Além destes, o módulo Arduino Uno escolhido, também apresenta um valor considerável, mas possibilita expandir o projeto caso haja interesse de novas aplicações. Nesse sentido, a filosofia de estrutura CubeSat também proporciona expansões, apenas exigindo adequações como o balão e paraquedas. A estrutura também foi um dos pontos de maior custo devido a sua impressão em ABS. Pode-se dizer que o custo do sistema está associado à sua capacidade de possíveis novas aplicações e isso é válido, especialmente considerando o objetivo de reutilizá-lo.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados e discutidos brevemente os resultados obtidos e os principais pontos provenientes a partir do trabalho desenvolvido. Foi realizada a modelagem do sistema de sonda utilizando a abordagem MBSE, empregando a metodologia Arcadia. Resultando em um modelo estruturado e modular, que permitiu por meio dos diversos diagramas desenvolvidos uma visão objetiva de todas as análises realizadas ao longo do projeto.

Com o sistema modelado, o processo de definição de componentes foi bastante fluído. Observando as necessidades de operação, aliadas com as referências utilizadas e os próprios dados dos componentes, o sistema pode pela primeira vez ser definido.

No processo de cálculos de budgets foi possível identificar alguns desencontros nos resultados e objetivos o que gerou por algumas vezes processos de iteração e troca de componentes na arquitetura física do sistema. Inicialmente pelo balanço de massa, que apresentava componentes de paraquedas e balão superdimensionados. Em outras ocasiões o mesmo ocorreu com o balanço de potência. O processo final apresentado na seção de budgets aponta os resultados finais que procuraram corrigir estes aspectos. Ainda assim, um ponto de melhoria é realizar mais iterações, visto que alguns aspectos do sistema ainda evidenciam superdimensionamento.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o projeto da sonda estratosférica reutilizável utilizando ferramentas MBSE foi bem-sucedido. A utilização da abordagem MBSE e da metodologia Arcadia proporcionou uma visão integrada e abrangente do sistema, facilitando a análise, o planejamento e a tomada de decisões durante o desenvolvimento. Especialmente ao considerar os momentos de reiteração, podendo facilmente mapear e rastrear os impactos de cada mudança.

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam os benefícios do uso de MBSE e da metodologia Arcadia no projeto de sistemas complexos. As análises realizadas permitiram a compreensão das necessidades de missão, as melhores opções de arquitetura e por consequência, a obtenção de um sistema de coleta dos dados de interesse para o estudo de modelos climáticos. Sendo assim os objetivos propostos foram atingidos.

10 CONCLUSÃO

A utilização do MBSE e da metodologia Arcadia mostrou-se eficiente na modelagem e no desenvolvimento do sistema proposto. Essa abordagem permitiu uma visão integrada e holística do projeto, facilitando a identificação de requisitos, a definição de componentes e a análise das interações entre eles. Além disso, a utilização do MBSE contribuiu para a rastreabilidade de erros, além de evidenciar os impactos de mudanças pelos processos iterativos.

A discussão inicial dos modelos climáticos e dos eventos ondulatórios na atmosfera com o stakeholder Valentin proporcionou pontos de atenção valiosos para o planejamento das missões da sonda. Compreendendo os desafios impostos pelas necessidades de coleta de dados em altas altitudes. Essas informações foram fundamentais para a definição de estratégias de operação e para garantir o sucesso no projeto de proposta de solução.

Os três grandes blocos de desenvolvimento do projeto proporcionaram grande aprendizado acerca não só do tema abordado, mas também acerca da metodologia utilizada. O uso do Capella e a utilização do método Arcadia ditaram o ritmo e estruturação do trabalho, uma vez que, a partir da etapa de projeto com MBSE concluída, bastou definir o sistema e iterar. As etapas de definição de componentes e de verificação de budgets puderam certificar ao sistema sua capacidade de coleta e transmissão de dados, bem como o bom funcionamento dos sistemas embarcados em condição operacional. Os resultados obtidos mostraram que o conceito proposto é capaz de operar de forma eficiente e coletar informações valiosas para estudos climáticos cumprindo assim o objetivo principal do trabalho.

A metodologia Arcadia mostrou-se muito positiva, pela fluidez e clareza com que os modelos conseguem transmitir informações, usualmente textuais, de maneira dinâmica, clara e sistemática. Desta maneira, o objetivo de evidenciar os benefícios desta ferramenta foi cumprido.

O processo de validação acabou por ser o maior ponto de melhoria, uma vez que devido a questões extraordinárias não foi possível validar o conceito de sistema proposto com o principal stakeholder envolvido. No entanto, o processo de verificação dos budgets, após algumas iterações, aponta resultados promissores, que certamente podem servir de ponto de partida para diversas possibilidades de aprimoramentos ou abordagens do projeto. Iterar o projeto com a intenção de direcionar este conceito inicial proposto a objetivos mais específicos com filosofias de projeto bem definidas por custo, dimensões ou expansão de aplicação certamente será um próximo passo.

10.1 LIMITAÇÕES

Ao longo da realização deste trabalho alguns fatores puderam ser identificados e apontados como limitações do projeto realizado. O principal aspecto que impactou o projeto foi o número baixo de iterações com os stakeholders e orientador. Isso ocorreu exclusivamente por conta da má gestão do tempo por parte do autor. Disponibilidade por parte dos demais envolvidos nunca foi um problema, e sim a falta de constância no desenvolvimento do projeto ao longo do semestre.

Outro ponto a ser destacado como dificuldade encontrada foi o pouco conhecimento com relação a área de eletrônica e componentes de circuitos. Este ponto teve um impacto menor do que o anterior, visto que por meio de estudo e pesquisa foi possível contorná-lo parcialmente. O único aspecto prejudicado por esta questão foi a falta de agilidade em tomar as decisões de projeto e justificá-las com relação a escolha de componentes por exemplo. Por conta disso, a revisão bibliográfica realizada teve um papel muito importante em auxiliar nas tomadas de decisão com relação a esta área.

Por fim, vale destacar o impacto no cronograma que a falta de domínio do método Arcadia teve. O trabalho foi iniciado com os processos erroneamente apressados. Devido ao primeiro contato com o método Arcadia e o software Capella ter sido neste projeto, ao ser identificada está problemática ao longo do semestre foi necessário direcionar um período considerável do cronograma para familiarização e estudo não somente do programa utilizado mas do método Arcadia como um todo.

De maneira geral, a união dos aspectos limitadores apresentados anteriormente acabou por resultar em um trabalho bastante direcionado ao desenvolvimento de MBSE na plataforma Capella em todas as etapas de desenvolvimento do método Arcadia e com uma definição de componentes físicos apoiada especialmente na proposta de solução ao stakeholder e histórico de outras utilizações em projetos semelhantes e não tanto por domínio de novas soluções ou combinações no âmbito de eletrônica embarcada.

10.2 TRABALHOS FUTUROS

Com as considerações previamente apontadas acerca das conclusões e limitações algumas sugestões de tema para trabalhos futuros relacionados a este projeto são apresentadas a seguir.

- Produzir fisicamente o projeto proposto;
- Refinar o projeto em termos de escolha de componentes e estrutura, ponderando sua robustez operacional;

- Explorar aplicações do método Arcadia Capella com relação a outras aplicações aeroespaciais;
- Aprimorar o projeto considerando mais iterações com os stakeholders e feedbacks de ciclos de voo e coleta de dados;
- Propor um sistema que priorize o baixo custo;
- Explorar possibilidades referentes ao software do sistema embarcado, podendo realizar os cálculos já em voo;
- Tomar o projeto MBSE como estudo mais detalhado para análise de falhas integrando plataformas como Safety Architecture por exemplo;
- Expandir a aplicação do projeto utilizando carga útil de diferentes aplicações, como coleta de outros parâmetros atmosféricos;
- Incorporar no projeto um sistema de câmeras para estudo de fenômenos ondulatórios, podendo enfatizar controle de estabilidade;
- Utilizar o estudo do trabalho desenvolvido para agregar novas propostas de diferentes temas no setor aeroespacial.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, M. L. et al. An in situ atmospheric probe for real time weather monitoring. **Additional Papers and Presentations**, International Microelectronics Assembly and Packaging Society, v. 2015, n. DPC, p. 000328–000347, 2015.
- AHRENS, C. D. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. [S.I.]: Cengage Learning Canada Inc, 2015.
- ALLDATASHEET. **alldatasheet**. 2023. Url<https://www.alldatasheet.com/>.
- BORKY, J. M.; BRADLEY, T. H. **Effective model-based systems engineering**. [S.I.]: Springer, 2018.
- DELMONDES, R. d. C. Proposta de uma metodologia para o desenvolvimento de um sub-sistema de telemetria e comando para plataformas estratosféricas. 2019.
- DEZFULI, H. et al. **NASA risk management handbook**. [S.I.], 2011.
- FORSBERG, K.; MOOZ, H.; COTTERMAN, H. **Visualizing project management: models and frameworks for mastering complex systems**. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2005.
- GPESC. **gpesc**. 2023. Url<https://www.youtube.com/@gpesc>.
- KAPURCH, S. J. **NASA systems engineering handbook**. [S.I.]: Diane Publishing, 2010.
- KURMASHEVA, T. et al. A stratospheric and satellite cubesat format probe for detecting relativistic runaway electron avalanches. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.I.], 2020. v. 1690, n. 1, p. 012074.
- PICANÇO, G. A. da S. et al. Desenvolvimento de uma sonda atmosférica sem fio para estudos ambientais de baixo custo. **Ciência e Natura**, Universidade Federal de Santa Maria, v. 38, p. 118–121, 2016.
- SILVAA, L. C. de O.; LOPESA, M. V.; BARROSA, A. K. Projeto de uma sonda estratosférica didática para o estudo de engenharia aeroespacial. 2019.
- SÓBESTER, A. **Stratospheric Flight: Aeronautics at the Limit**. [S.I.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- SOLER, M. **Fundamentals of Aerospace Engineering: An introductory course to aeronautical engineering**. [S.I.]: Manuel Soler, 2014.
- SOUSA, B. F. R. d. et al. Projeto in situ: Conceito de balão e sonda estratosférica. **UFSM**, 2019.
- SOUSA, P. A. d. et al. Lançamento de uma sonda atmosférica de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 44, 2022.
- STRATOFLIGHTS. **stratoflights**. 2023. Url<https://www.stratoflights.com/en/>.

VOIRIN, J.-L. **Model-based system and architecture engineering with the arcadia method.** [S.l.]: Elsevier, 2017.

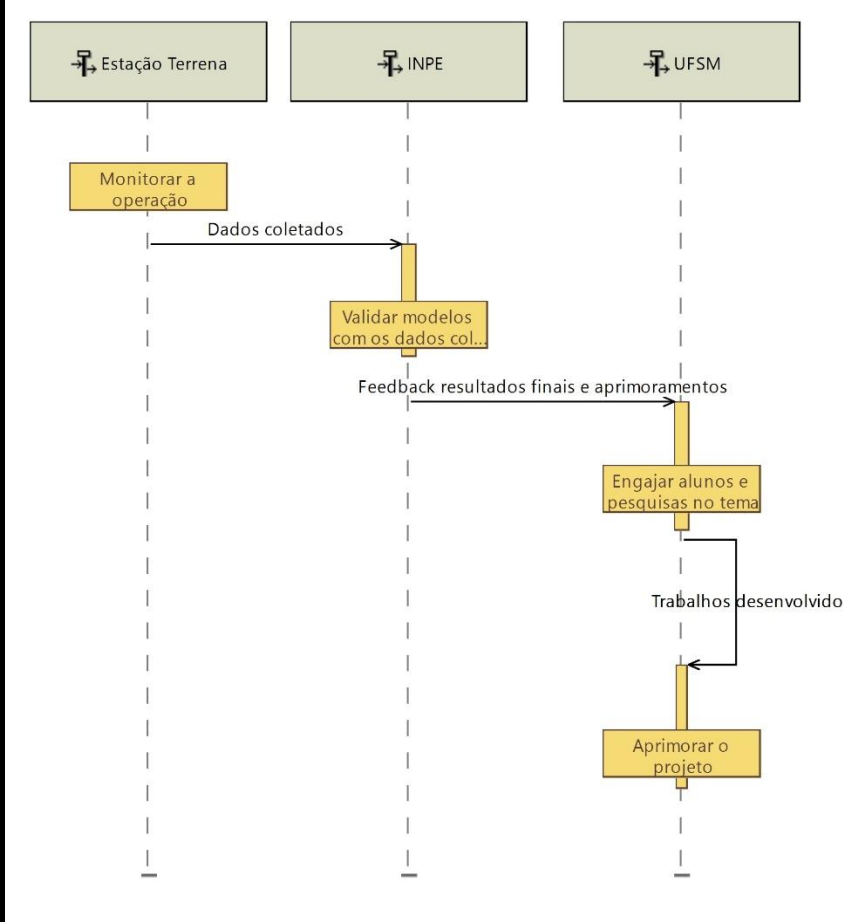
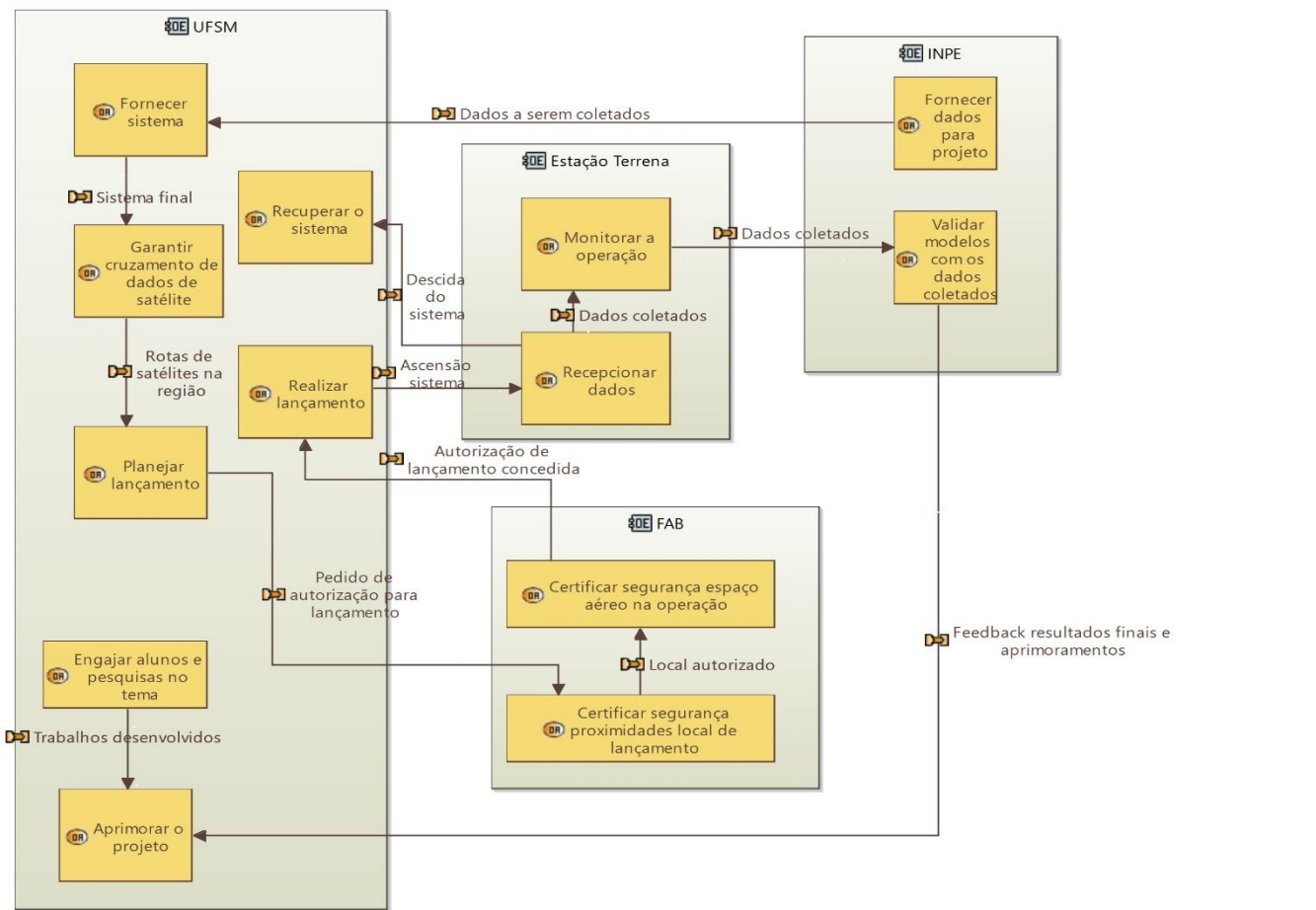
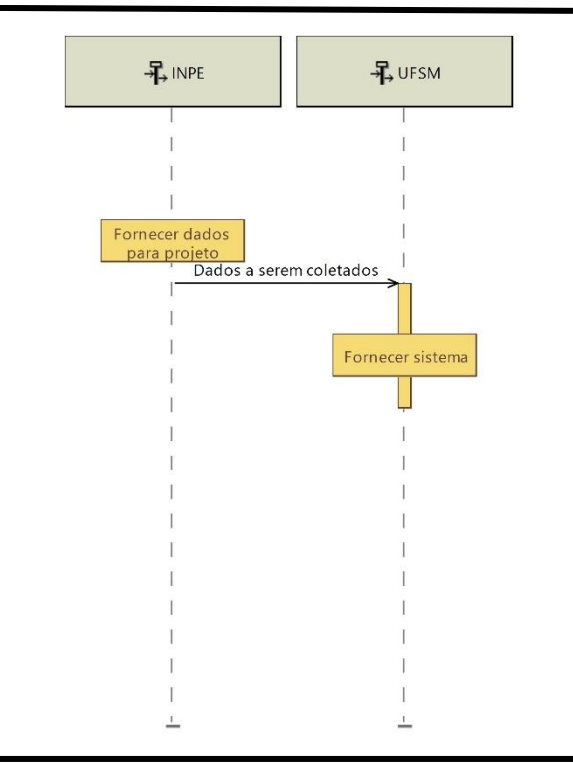
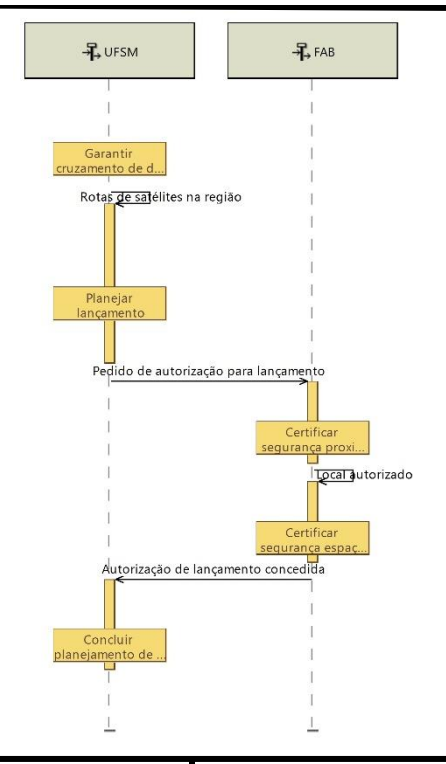
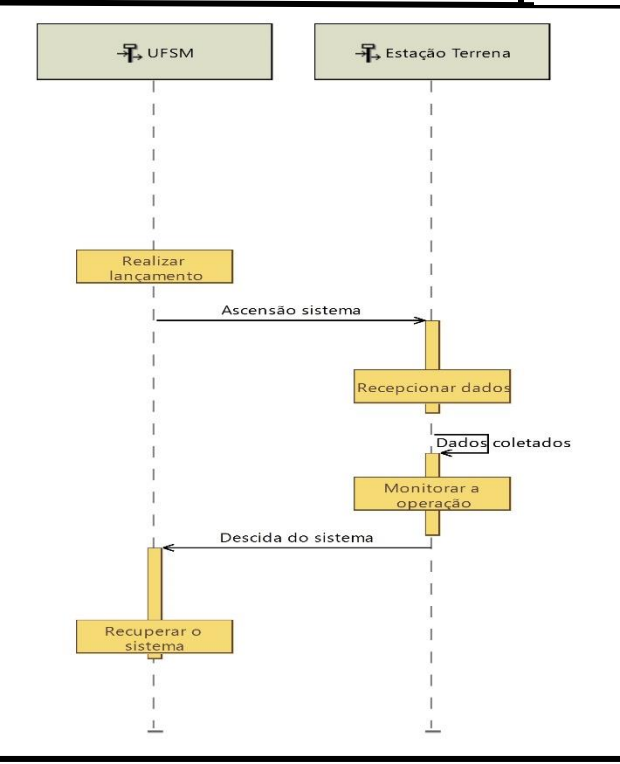
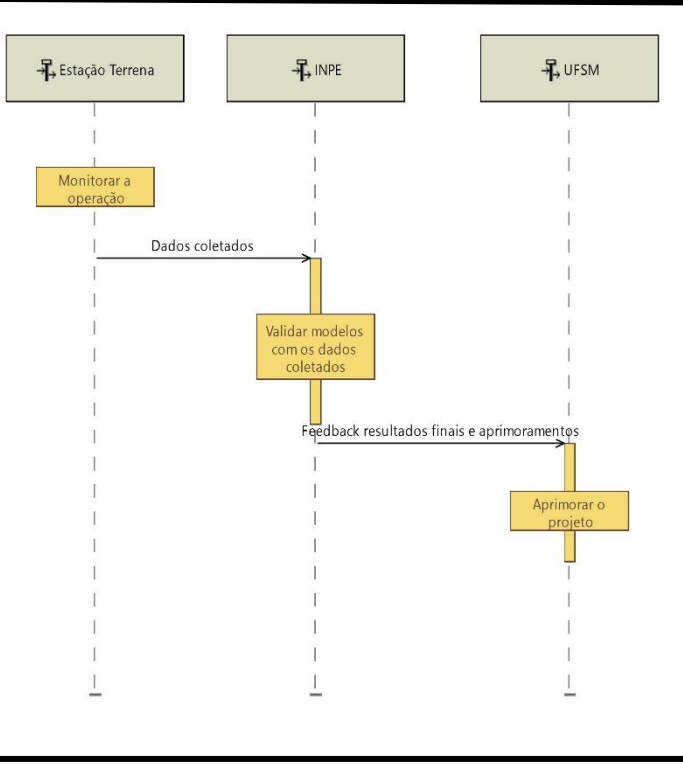
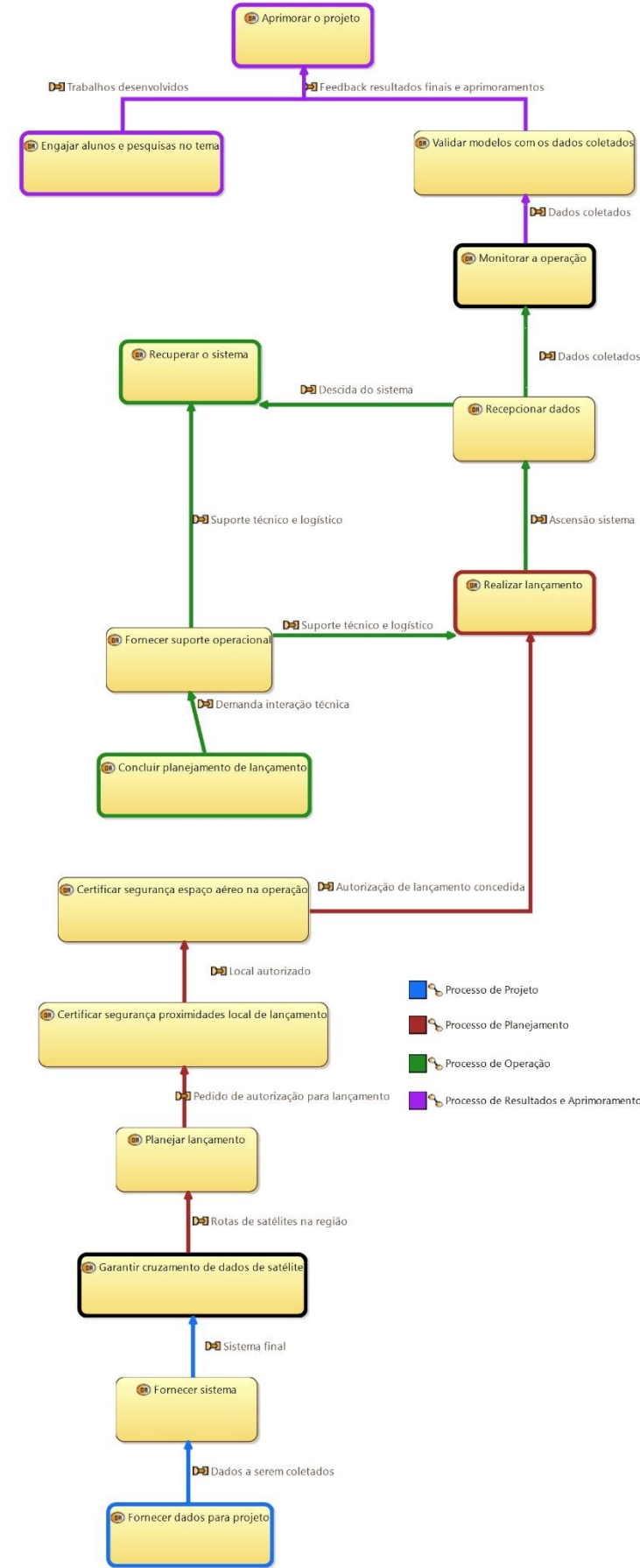
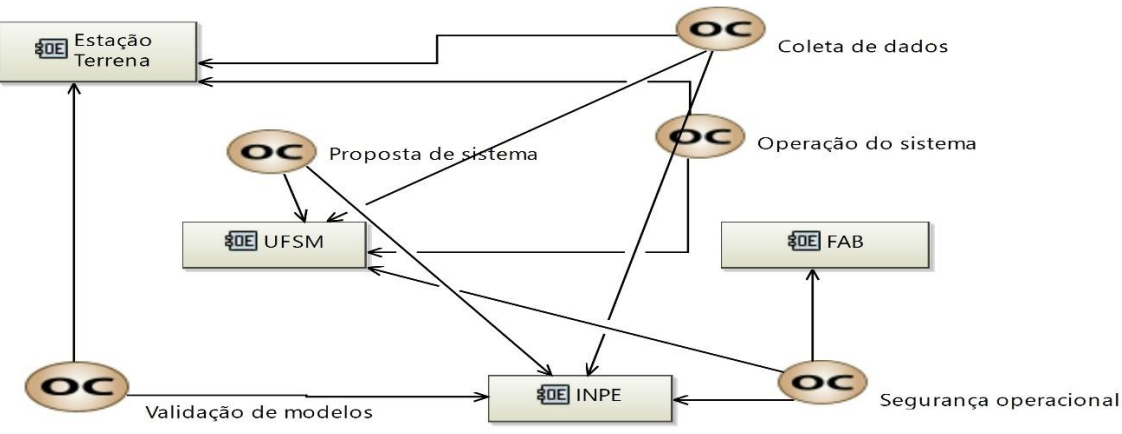
WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science: an introductory survey.** [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 92.

WECK, O. L. D.; ROOS, D.; MAGEE, C. L. **Engineering systems: Meeting human needs in a complex technological world.** [S.l.]: Mit Press, 2011.

WERTZ, J. R. et al. **Space mission analysis and design.** [S.l.]: Springer, 1999. v. 8.

YEE, J.-H. et al. Timed instruments. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, Citeseer, v. 24, n. 2, p. 156–164, 2003.

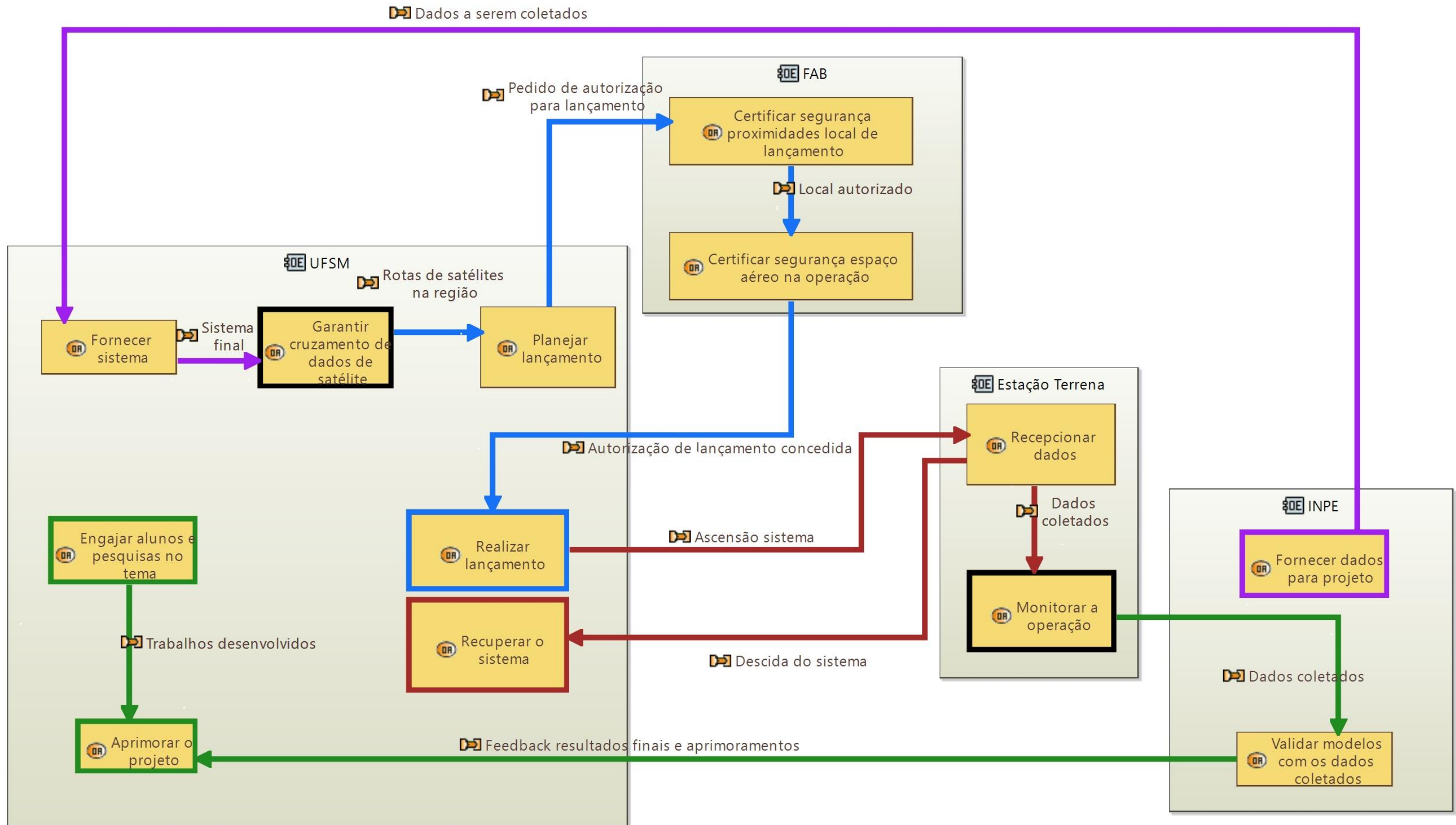
APÊNDICE A – MODELOS DESENVOLVIDOS NA ANÁLISE OPERACIONAL



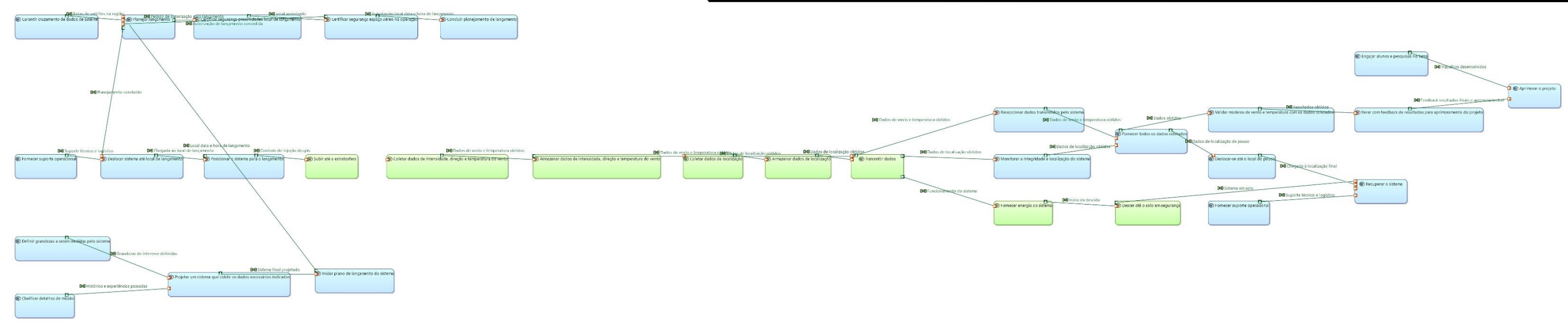
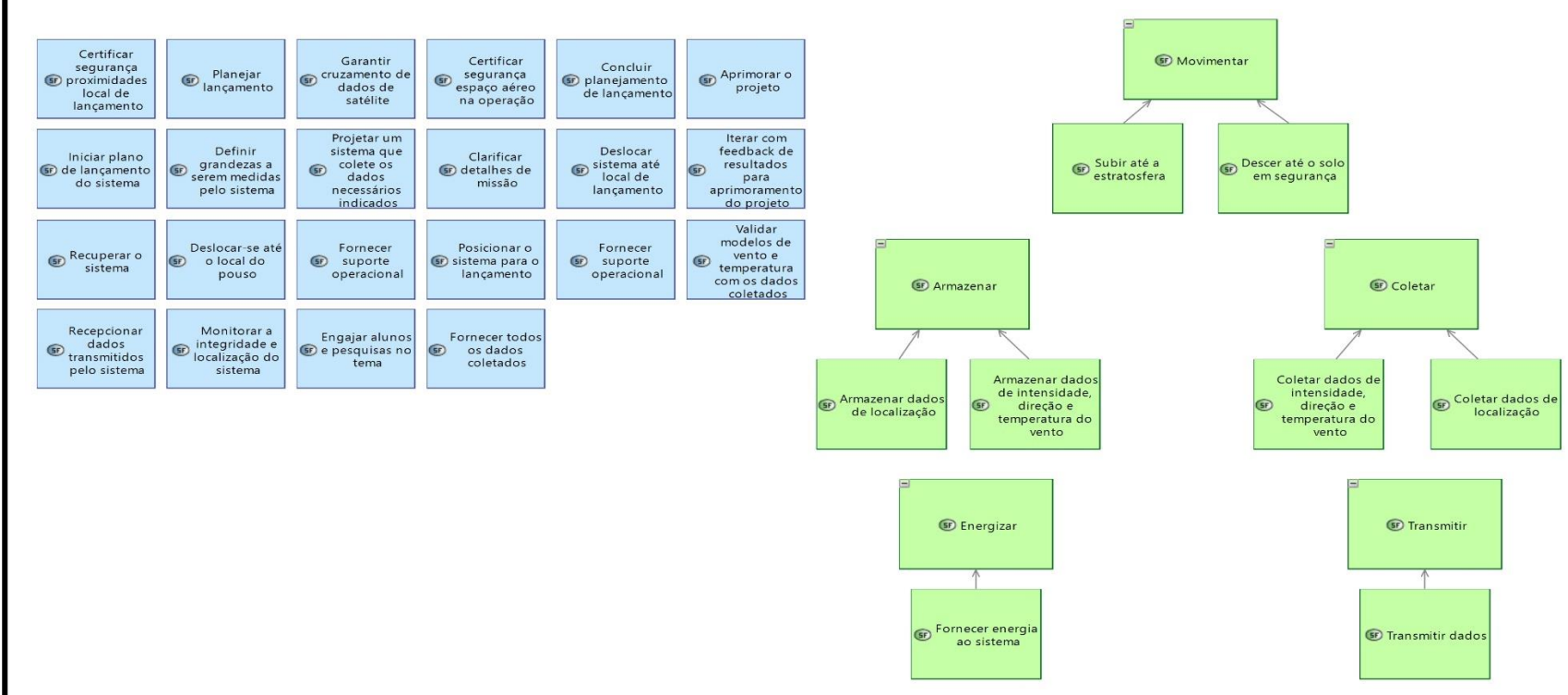
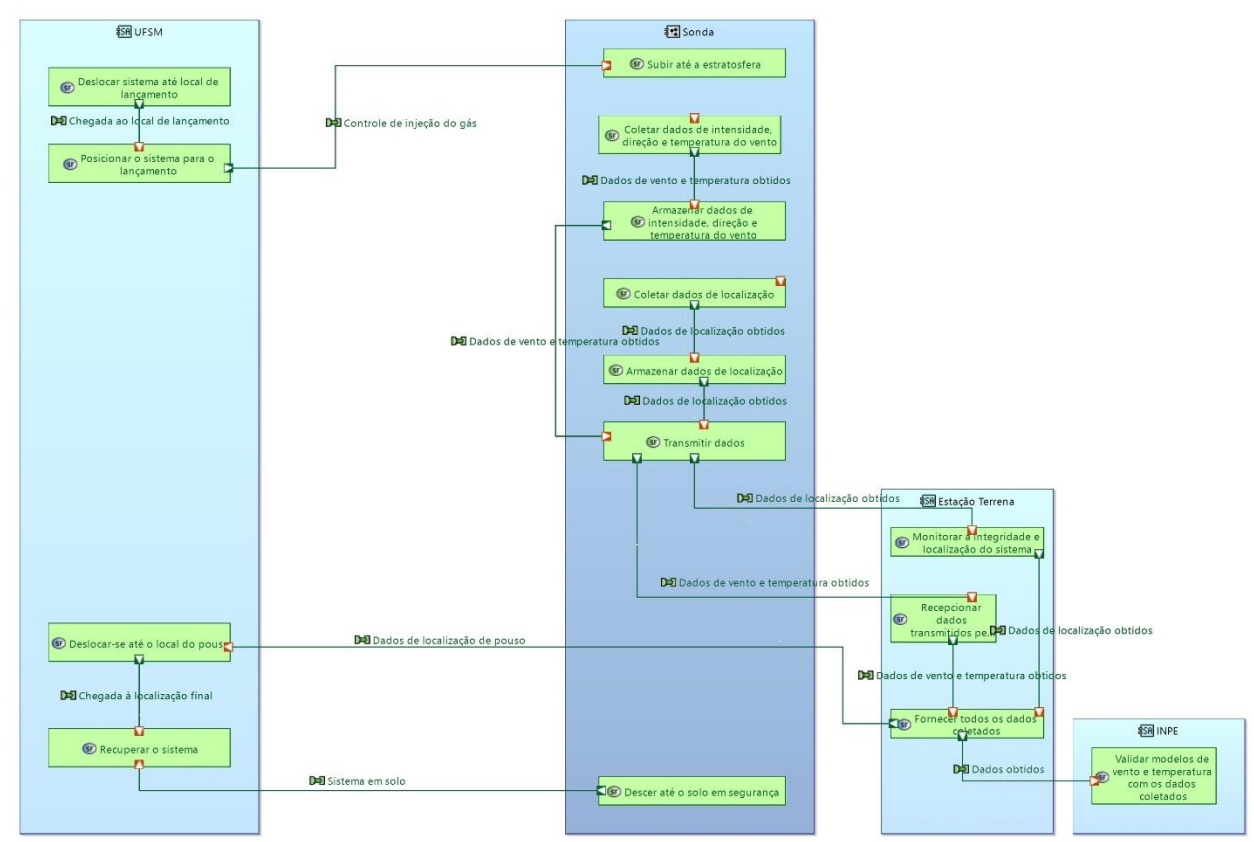
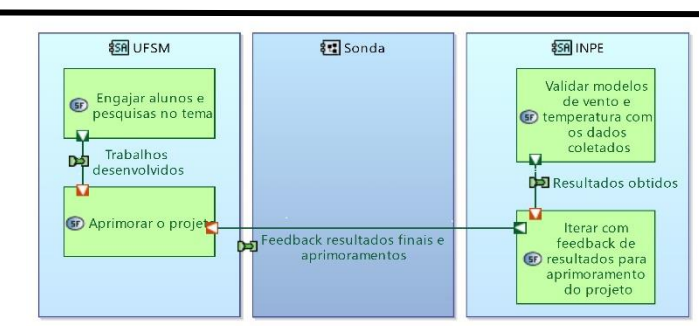
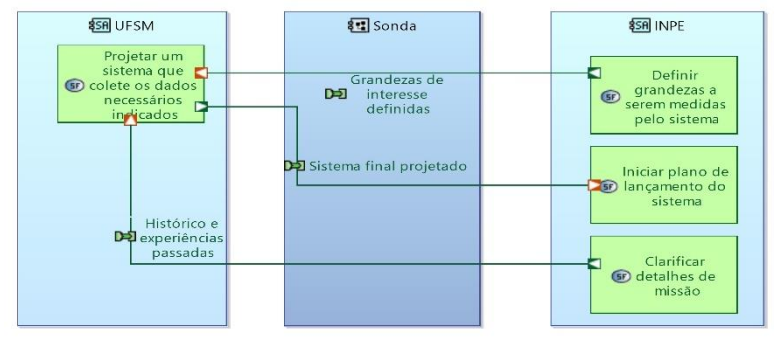
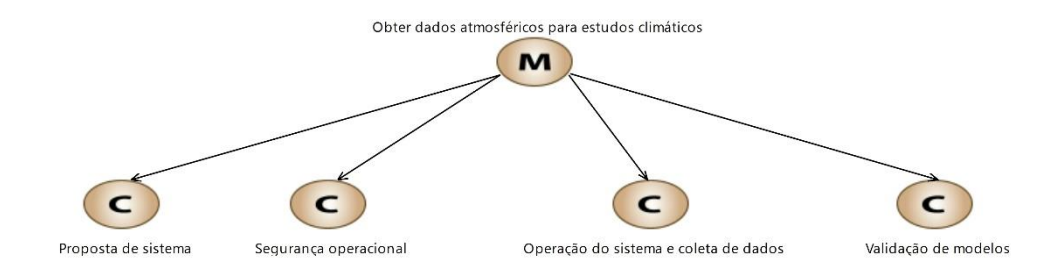
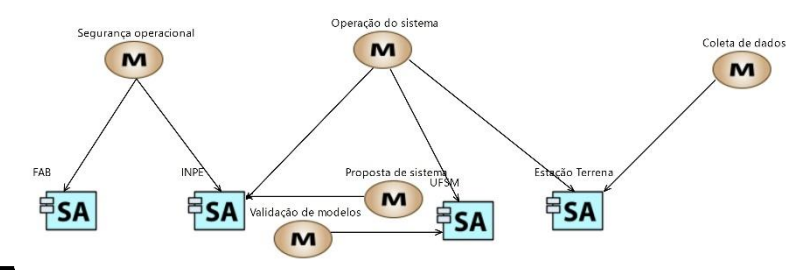
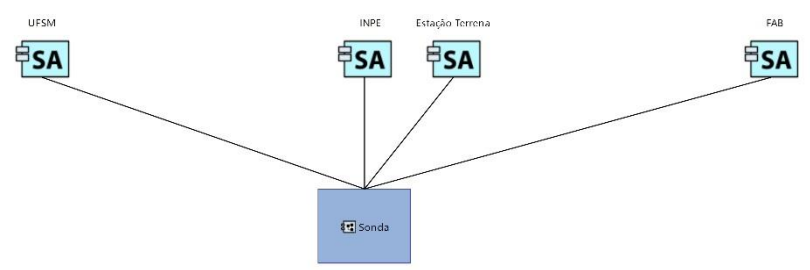
- Processo de Projeto
- Processo de Planejamento
- Processo de Operação
- Processo de Resultados e Aprimoramentos

APÊNDICE B – ARQUITETURA OPERACIONAL FINAL

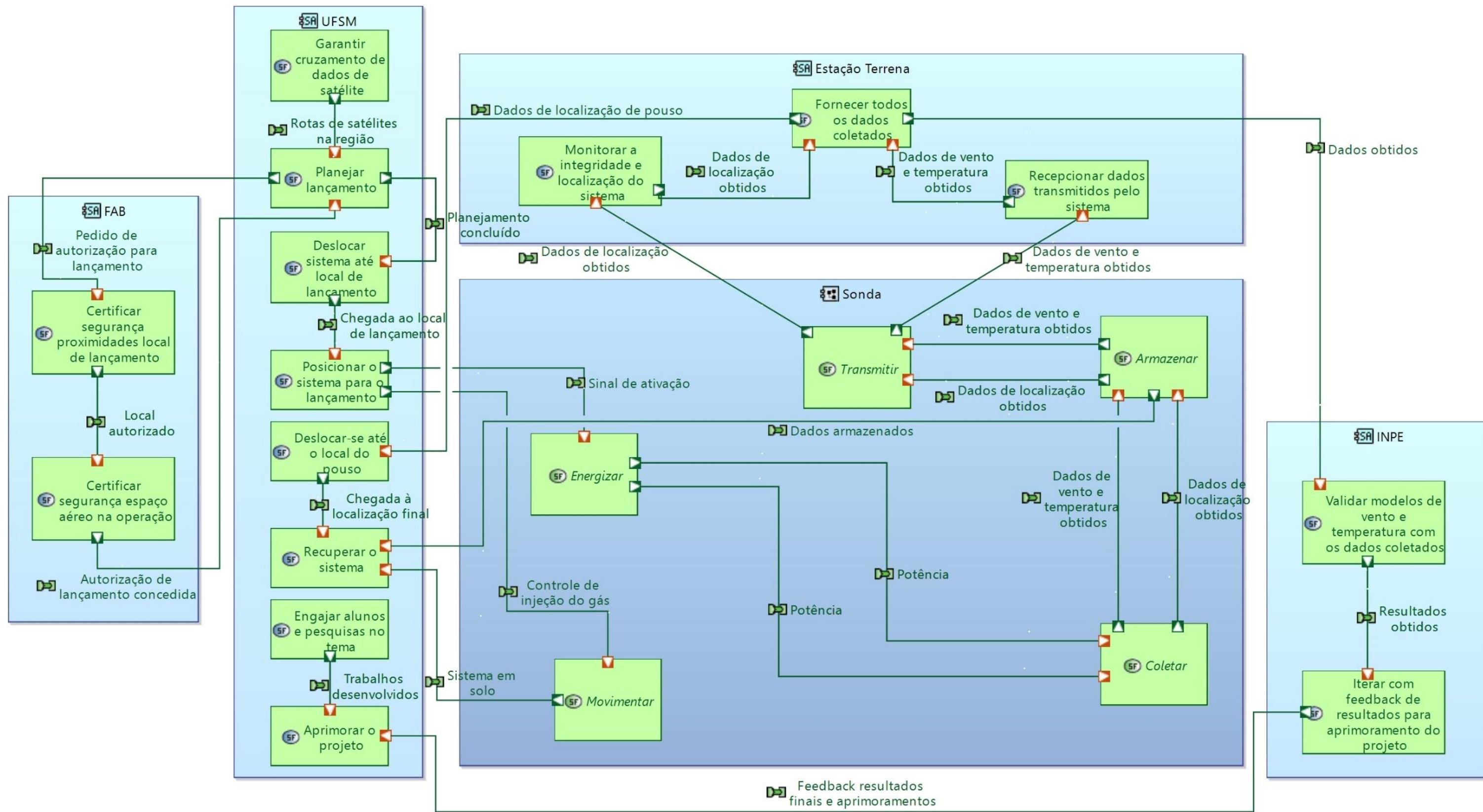
- Processo de Projeto
- Processo de Planejamento
- Processo de Operação
- Processo de Resultados e Aprimoramentos



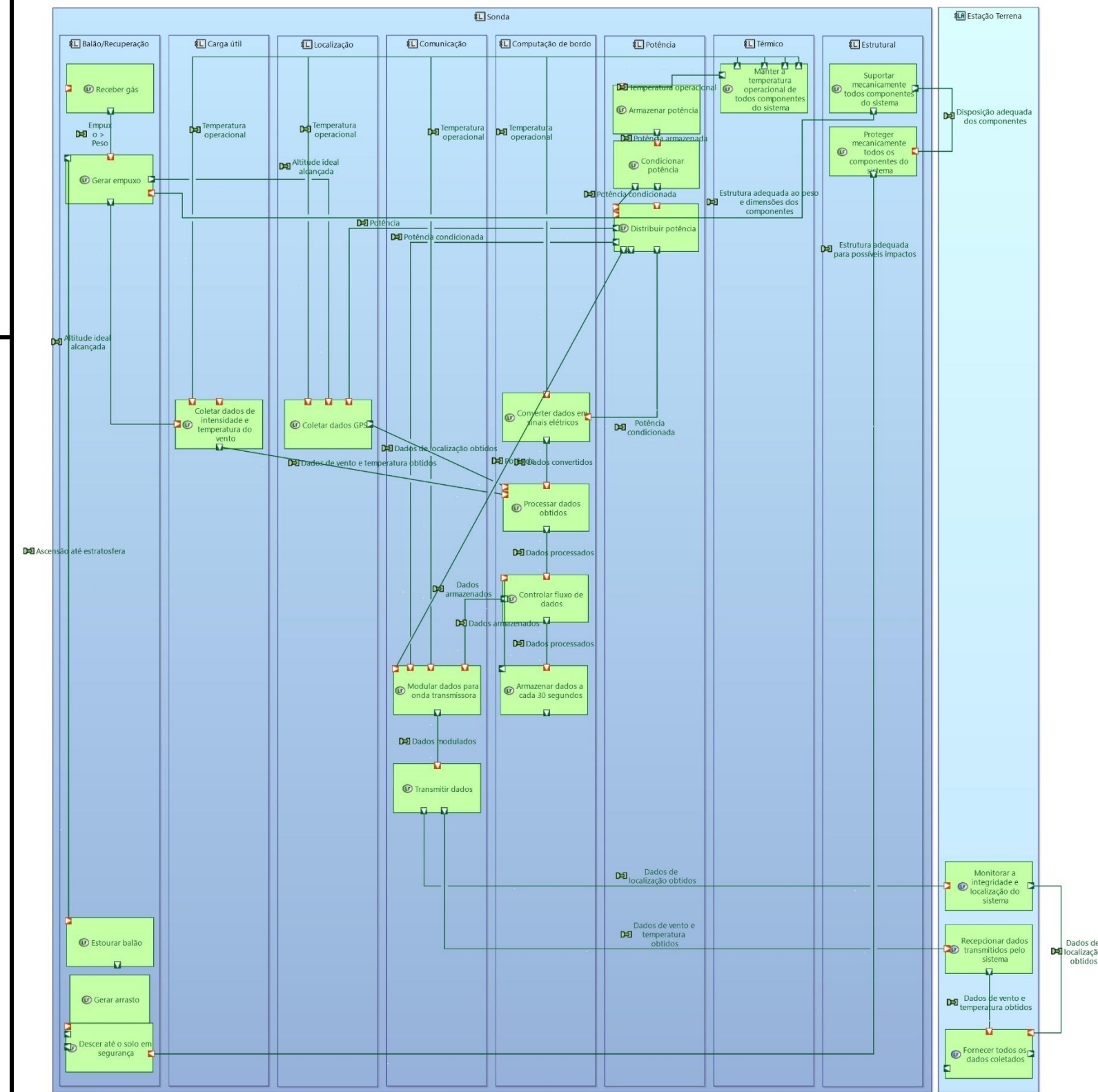
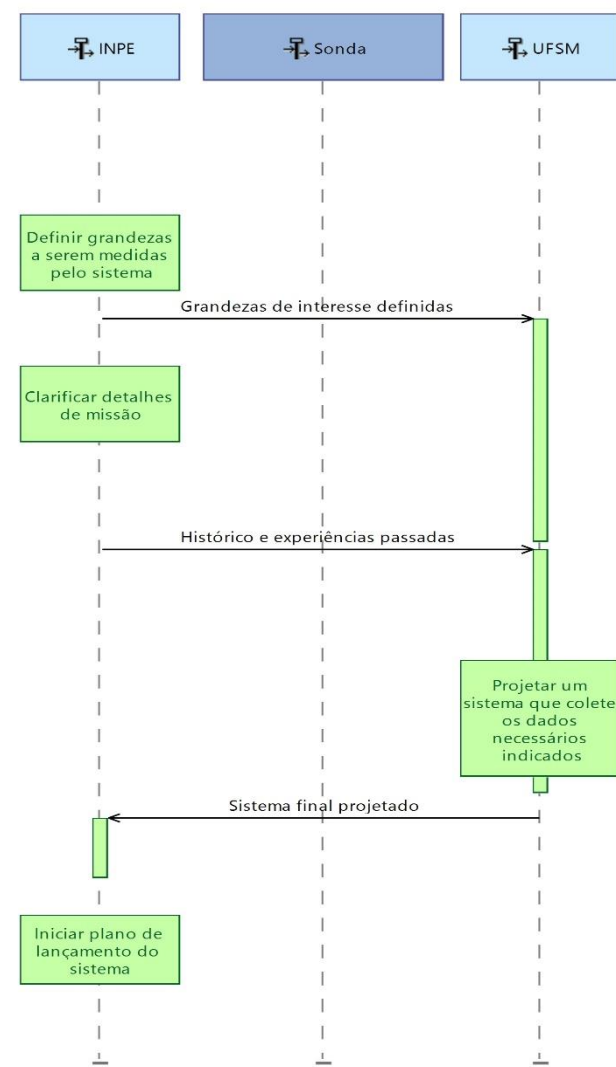
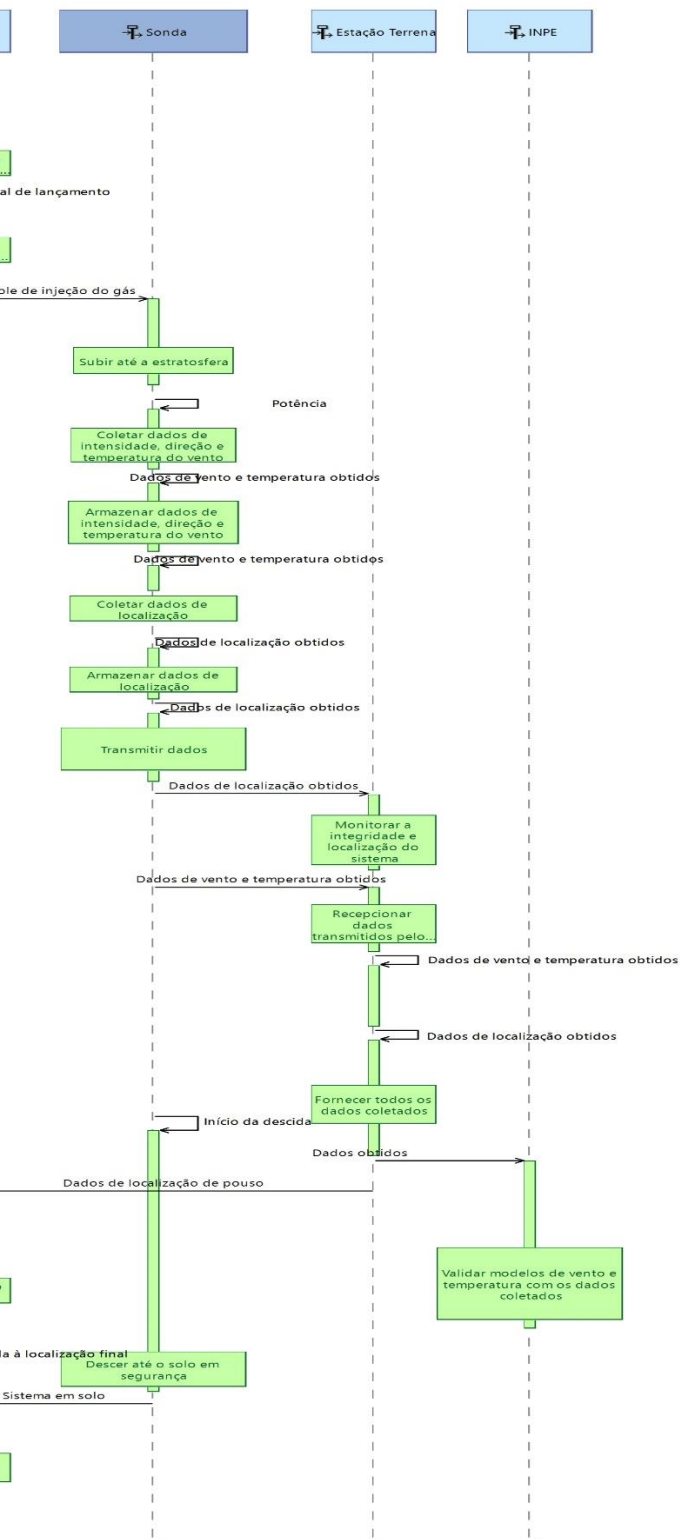
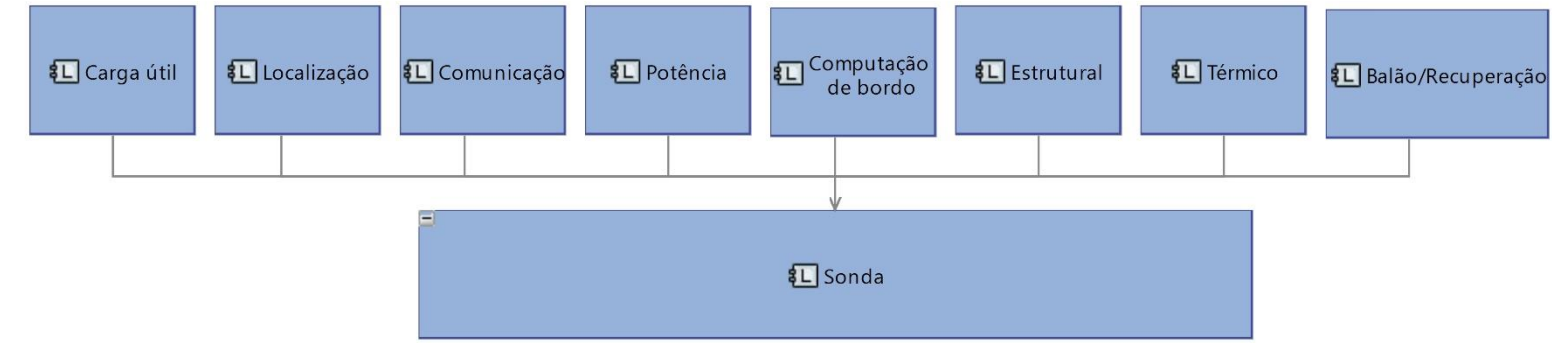
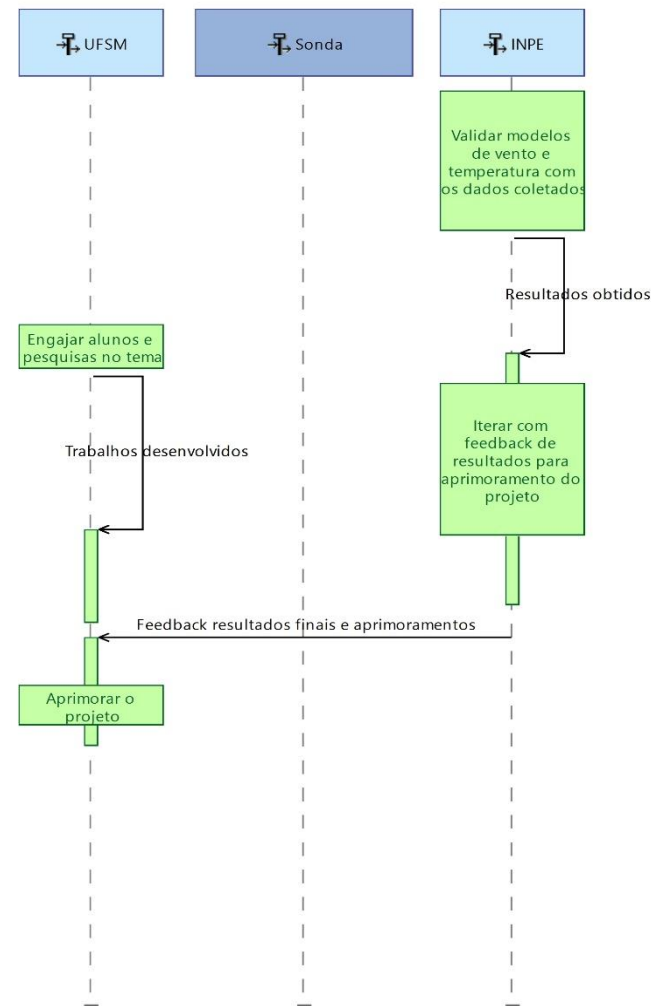
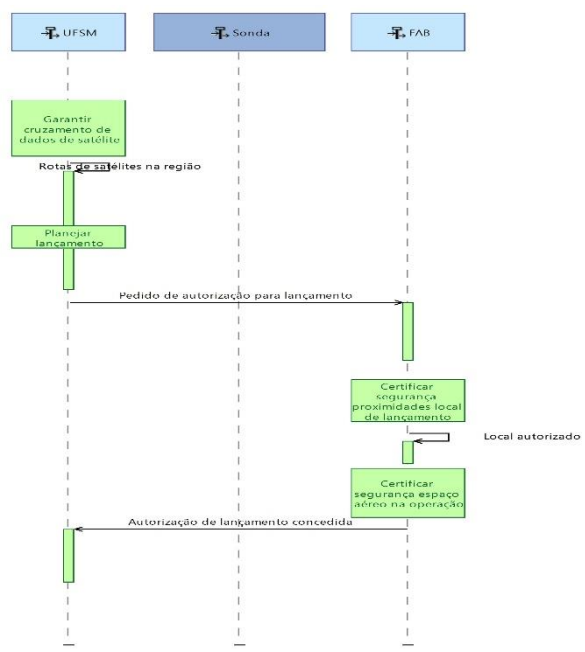
APÊNDICE C – MODELOS DESENVOLVIDOS NA ANÁLISE FUNCIONAL



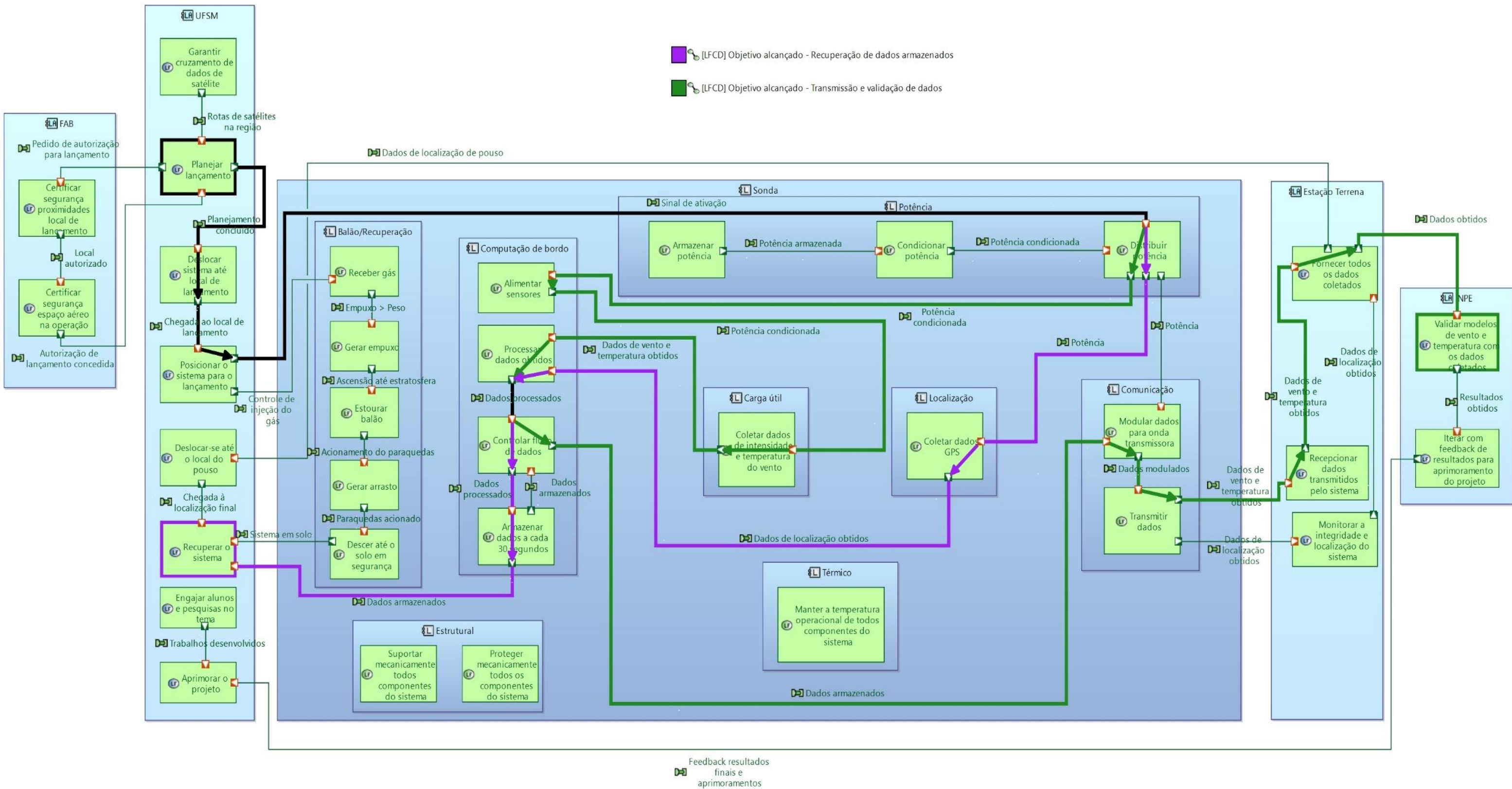
APÊNDICE D – ARQUITETURA FUNCIONAL FINAL



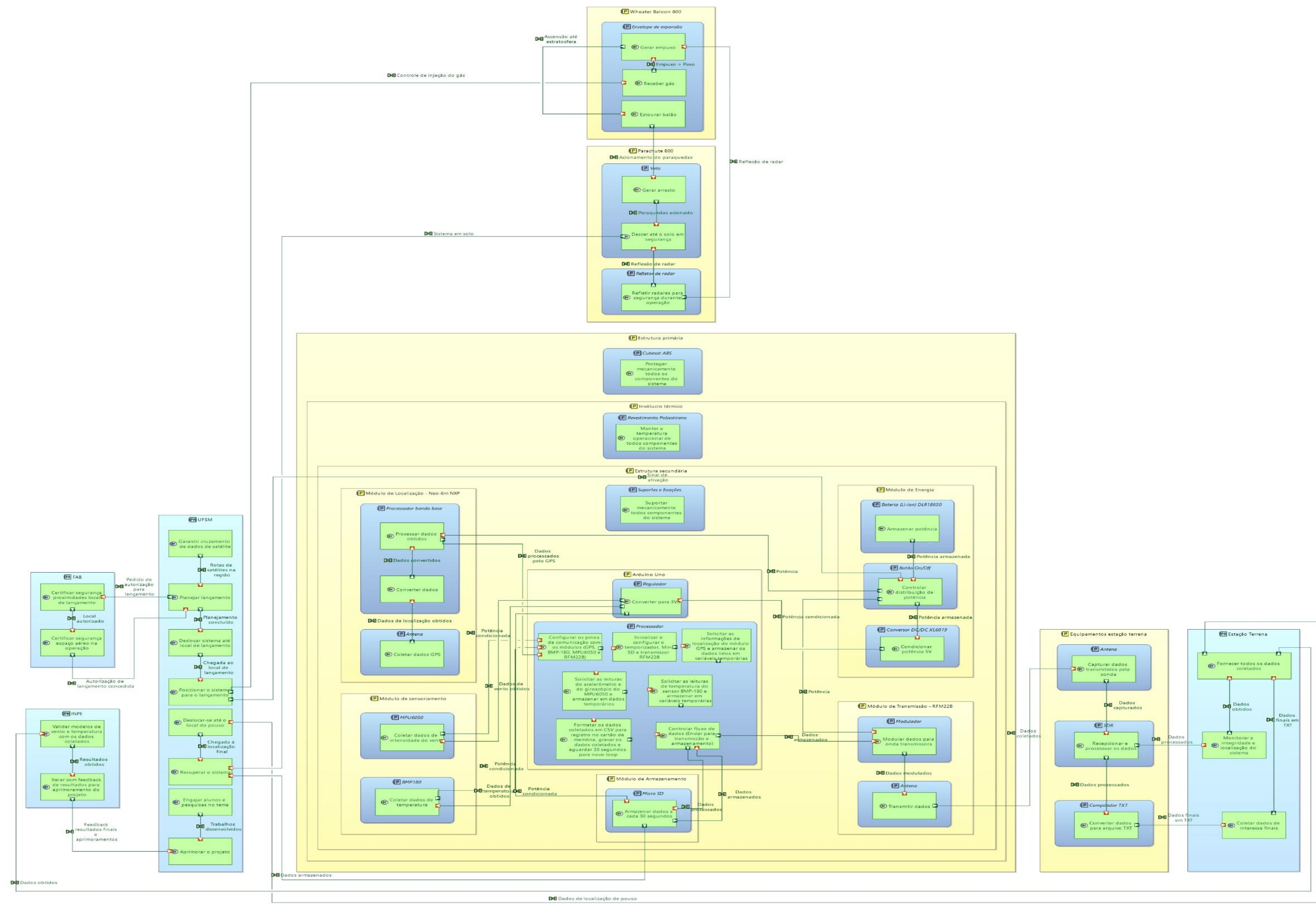
APÊNDICE E – MODELOS DESENVOLVIDOS NA ANÁLISE LÓGICA



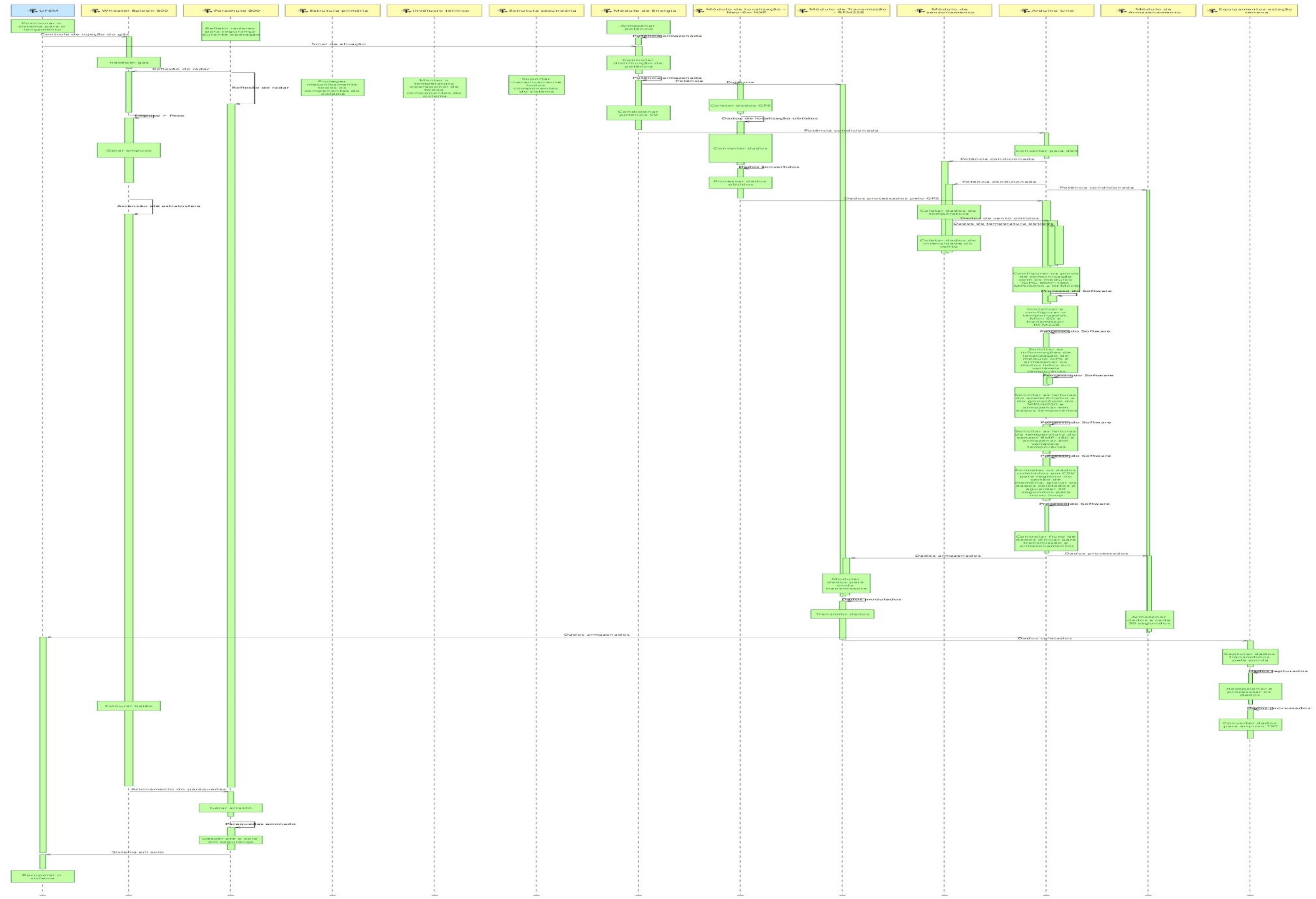
APÊNDICE F – ARQUITETURA LÓGICA FINAL



APÊNDICE G – ARQUITETURA FÍSICA FINAL



APÊNDICE H – CENÁRIO OPERACIONAL DO SISTEMA FINAL



NUP: 23081.108229/2023-39

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
7	Trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.32)	PFC - Gabriel Cancian Demin.pdf

Assinaturas

11/08/2023 14:22:35

EDUARDO ESCOBAR BÜRGER (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR (Ativo))
07.35.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEM



Código Verificador: 3128107

Código CRC: a5913a66

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

