



ENGENHARIA DE SISTEMAS DO PROJETO NANOSATC-BR3

Giulia Ribeiro Herdies

Relatório de Iniciação Científica do programa
PIBIC, orientada pelo PhD Nelson Jorge Schuch
e coorientada pelo Dr. Eduardo Escobar Bürger

UFSM
Santa Maria
2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ENGENHARIA DE SISTEMAS DO PROJETO NANOSATC-BR3

Giulia Ribeiro Herdies

Relatório de Iniciação Científica do programa
PIBIC, orientada pelo PhD Nelson Jorge Schuch
e coorientada pelo Prof. Dr. Eduardo Escobar
Bürger

UFSM
Santa Maria
2021

RESUMO

O trabalho consiste na utilização da Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) nas fases iniciais de projeto conceitual do CubeSat NANOSATC-BR3. O projeto faz parte do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats, que tem como um dos principais objetivos desenvolver capacitação de recursos humanos para o setor espacial Brasileiro. Atualmente, o Programa possui dois nanossatélites em operação, o NANOSATC-BR1 e NANOSATC-BR2, e um em sua fase conceitual e escopo deste trabalho, o NANOSATC-BR3. A fase conceitual da missão em andamento abrange as necessidades e requisitos das partes interessadas (stakeholders needs and requirements), os quais devem ser elicitados e analisados, para que seja fornecida uma solução de conceito viável e dentro das restrições de Projeto. Para desenvolver o conceito desta missão, a ideia proposta é utilizar um software de MBSE com um método de Engenharia de Sistemas embutido na ferramenta. As principais entradas deste trabalho, as necessidades de algumas partes interessadas (stakeholders), foram inicialmente recolhidas através de entrevistas. Essa informação foi decomposta nos aspectos operacional, e funcional na ferramenta. A utilização do MBSE é vital para o desenvolvimento da fase conceitual, pois permite um entendimento global da missão por todos os envolvidos. Além disso, as necessidades e requisitos de missão serão mais facilmente validados com os stakeholders em comparação com o uso exclusivo de documentos. A Engenharia de Sistemas e o MBSE possuem a característica de serem iterativos, ou seja, os processos podem se repetir no mesmo nível sistêmico para o avanço da missão. O presente trabalho apresenta a primeira iteração da fase, e forma-se o conjunto de necessidades de stakeholders para a posterior definição de missão, com as entregas e informações necessárias para a realização da primeira revisão de projeto do NANOSATC-BR3. O Programa e os Projetos contam com o apoio da Agência Espacial

Brasileira (AEB), Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Palavras Chaves: Engenharia de Sistemas. Nanossatélite. CubeSat. Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE).

ABSTRACT

The present work consists of the use of Model Based Systems Engineering (MBSE) in the initial phases of the conceptual design of CubeSat NANOSATC-BR3. The project is part of the NANOSATC-BR Program, Development of CubeSats, which has as one of its main objectives to develop building capacity for the Brazilian space sector. Currently, the Program has two nanosatellites in operation, the NANOSATC-BR1 and NANOSATC-BR2, and one in its conceptual phase and scope of this work, the NANOSATC-BR3. The conceptual phase of the ongoing mission covers the needs and requirements of stakeholders (stakeholders needs and requirements), which must be elicited and analyzed in order to provide a viable concept solution and within the Project constraints. To develop the concept of this mission, the proposed idea is to use an MBSE software with a Systems Engineering method built into the tool. The main inputs of this work, the needs of some interested parties (stakeholders), were initially collected through interviews. This information was broken down into operational and functional aspects in the tool. Using the MBSE is vital for the development of the conceptual phase, as it allows for a global understanding of the mission by all involved. In addition, mission needs and requirements will be more easily validated with stakeholders compared to the exclusive use of documents. Systems Engineering and MBSE have the characteristic of being iterative, that is, the processes can be repeated at the same systemic level to advance the mission. This work presents the first iteration of the phase, and formed a set of stakeholder needs for the subsequent definition of the mission, with the deliverables and information necessary to carry out the first review of the NANOSATC-BR3 project. The Program and Projects are supported by the Brazilian Space Agency (AEB), Ministry of Science and Technology and Innovation (MCTI) and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq).

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1: Comparação de modelos de ciclo de vida.	14
Figura 2: Modelo ciclo de vida da NASA em forma de modelo em “V”.	15
Figura 3: Diagrama de fluxo.	16
Figura 4: Fases do Modelo Arcadia.	18
Figura 5: Protótipo de Nanosatellite.	20
Figura 6: Tipos de Nanossatélite lançados durante os anos 1998 - 2025.	21
Figura 7: Subsistemas básicos de um CubeSat 2U.	22
Figura 8: Quantidade de nanossatélites por tipo de organização.	23
Figura 9: Interface qualificada P-POD [a] e PSC [b].	24
Figura 10: NanosatC-BR 1 [a] e o NanosatC-BR 2 [b].	25
Figura 11: Representação do resumo da metodologia.	31
Figura 12: Segunda entrevista realizada.	34
Figura 13: Capacidades Operacionais (OCB) para o NCBR3.	37
Figura 14: Interação de Atividades Operacionais (OAIB) para o NCBR3.	39
Figura 15: Arquitetura Operacional (OAB) para o NCBR3.	41
Figura 16: Arquitetura de Sistema (SAB) para o NCBR3.	46
Figura 17: Capa da apresentação “Using Capella on a Brazilian Nanosat Project”.	50
Figura 18: Exemplo do questionário.	55

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1: Resumo da revisão bibliográfica e suas principais contribuições.	28
Tabela 2: Stakeholders e suas capacidades operacionais desejadas.	35
Tabela 3: Necessidades dos Stakeholders.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCS – Subsistema de Determinação e Controle de Atitude

AIT – Montagem, Integração e Teste (em inglês: *Assembly, Integration and Test*)

AMAS – Anomalia Magnética da América do Sul

ARCML – ARCADIA *Modeling Language*

CI – Circuitos Integrados

CRS – Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

COENE – Coordenação Espacial do Nordeste

COESU – Coordenação Espacial do Sul

COTS – *Commercial off-the-shelf* (em português: pronto para uso)

EDC – *Environmental Data Collector*

EM – Modelo de Engenharia

ESA – Agência Espacial Europeia

EPS – Subsistema de Potência

FM – Modelo de Voo

FPGAs – *Field-Programmable Gate Array* (em português: Matriz de Portas Programáveis)

IARU – *The International Amateur Radio Union*

INCOSE – Conselho Internacional de Engenharia de Sistemas

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LABRE – Amadores Brasileiros de Rádio Emissão

LV – Veículos de lançamento

MBSE – Sistemas Baseada em Modelos

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

MR – *Mission Review*

NASA – Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço

NCBR1 – NanosatC-BR1

NCBR2 – NanosatC-BR2

NCBR3 – NanosatC-BR3

OAB – Arquitetura Operacional (em inglês: *Operational Architecture*)

OCB – Capacidades Operacionais (em inglês: *Operational Capabilities*)

OAIB – Atividades Operacionais (em inglês: *Operational Activity Interaction*)

OBDH ou OBC – Comando e Manipulação de Dados

OPM – *Object Process Methodology*

POD – *Picosatellite Orbital Deployer*

PSC – *Planetary Systems Corporation Deployer*

P-POD – *Poly Picosatellite Orbital Deployer*

SAB – Arquitetura de Sistema (em inglês:)

SE – Engenharia de Sistemas

SICINPE – Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação

STR – Subsistema de Estrutura

SysML – *System Markup Language*

TECAMB – Micro e Nanotecnologia de Cerâmicas e Compósitos

TT&C ou Comm – Subsistema de Comunicação

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Engenharia de Sistemas	14
2.1.1 Fase inicial NASA	17
2.2 Engenharia de sistemas Baseada em Modelos	18
2.3 Nanossatélites	21
2.3.1 Programa NanosatC-BR	25
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
METODOLOGIA	31
MBSE APLICADO AO NANOSAT-BR3	33
5.1 Definição de Stakeholders	33
5.2 Modelagem da Camada Operacional	35
5.3 Necessidades dos Stakeholders	39
5.4 Modelagem do Conceito de Missão (Segunda Camada)	41
DISCUSSÃO DE RESULTADOS	44
CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS	47
APÊNDICE	50
APÊNDICE A - Lista de Perguntas Feita aos Stakeholders.	50

1. INTRODUÇÃO

Após a execução dos dois primeiros nanossatélites, NANOSATC-BR1 (NCBR1) e NANOSATC-BR2 (NCBR2), o programa “NanosatC-BR, Desenvolvimento de CubeSats”, parte para o terceiro, nomeado como NANOSATC-BR3 (NCBR3).

O primeiro projeto deste programa, o Projeto NCBR1, tinha como objetivos coletar dados do campo magnético da Terra com um magnetômetro e validar a capacidade de sobrevivência no espaço ambiente de dois circuitos integrados desenvolvidos no Brasil (INPE,2011). O nanossatélite, um CubeSat 1U, está em órbita desde 2014, e além de ter validado os circuitos integrados, continua transmitindo dados.

Já o segundo projeto, Projeto NCBR2, lançado no primeiro semestre de 2021, é formado por um CubeSat 2U. O objetivo da missão é monitorar no geoespaço a intensidade do campo geomagnético e a precipitação de partículas energéticas ionizantes, e qualificar no espaço suas cargas úteis tecnológicas (INPE, 2021).

Visando um dos principais objetivos do programa, a capacitação de recursos humanos para a realização de pesquisa e desenvolvimento com instrumentação espacial, o Projeto NCBR3 encontra-se no início de sua fase conceitual. Atualmente estão sendo analisados e identificados os objetivos da missão, considerando que este CubeSat fará a utilização da plataforma do Modelo de Engenharia do nanossatélite NANOSATC-BR1, CubeSat 1U que se encontra no Laboratório de Integração e Testes de Nanossatélites LITN/COESU/INPE, e desenvolvê-la para que se torne Modelo de Voo (FM).

1.1 Objetivos

O trabalho tem como objetivo a implementação da Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) no NCBR3. Com o uso de ferramentas e metodologia de MBSE, o trabalho propõe contribuir com o desenvolvimento dos entregáveis da fase inicial do CubeSat, que é o Estudo de Conceito - Pré-fase A segundo a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). O propósito desta fase é produzir um amplo espectro de ideias e alternativas para a missão, realizando uma análise de diversos conceitos de missão que contribuem com o programa. Outro objetivo é obter as principais informações para a realização da primeira revisão de projeto, a Revisão de Definição de Missão (MDR), que será realizada no segundo semestre de 2021.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Esta etapa destina-se a estabelecer as bases conceituais acerca do trabalho a ser realizado, e contará como fonte principal os livros tradicionais sobre engenharia de sistemas, engenharia de sistemas baseada em modelos e nanossatélites.

2.1 Engenharia de Sistemas

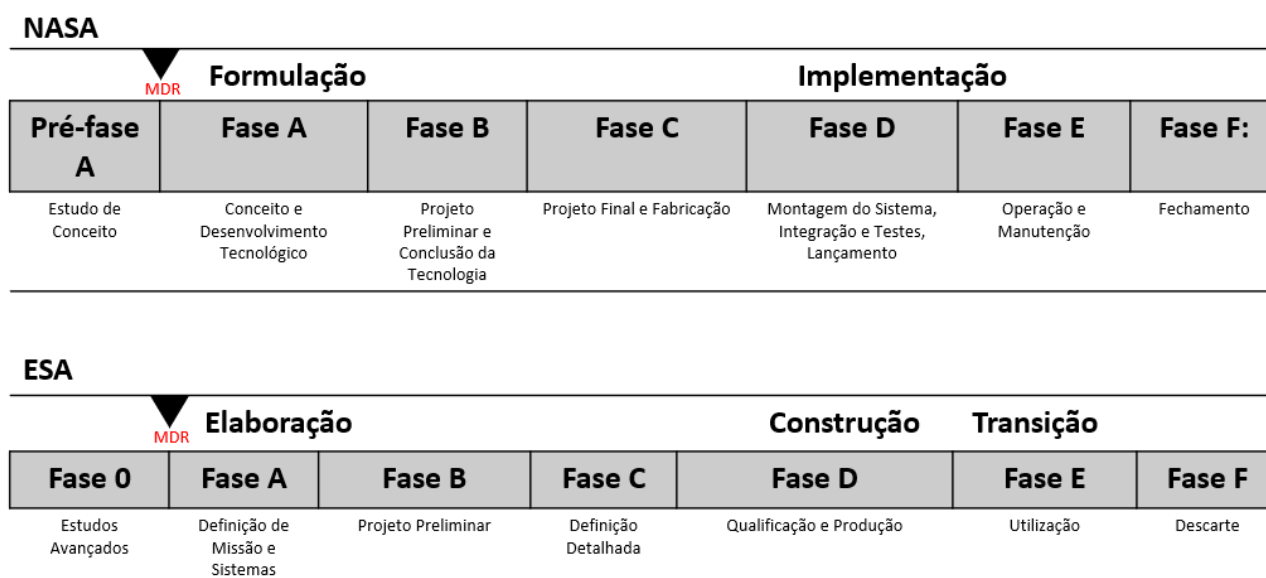
Engenharia de Sistemas (SE), com base no Conselho Internacional de Engenharia de Sistemas (INCOSE), é uma abordagem interdisciplinar, e um meio que visa uma realização de sistema de sucesso (INCOSE, 2006), capaz de ser representada por três definições, sendo elas, uma profissão, um processo, e uma perspectiva. Esta abordagem pode-se referir a um conjunto de elementos que interagem para alcançar um propósito declarado, também conhecido como uma missão, que contribui para a aprendizagem e melhoria contínua em um projeto.

A soma das diversas atividades e fases que compõem o processo escolhido é chamado de ciclo de vida de um sistema, definido como, a evolução de um sistema, produto, serviço, projeto ou outra entidade feita pelo homem, desde a concepção até o descarte (ISO/IEC/IEEE 2015). Genericamente, o ciclo de vida é composto de uma definição de conceito, definição de sistema, realização de sistema, produção, suporte e utilização do sistema, e retirada do sistema (SEBoK). No entanto, este modelo pode ser adaptado conforme a necessidade de cada tipo de produto, organização, entre outros. Sendo assim, existem diversos moldes de ciclo de vida como, por exemplo, o *NASA Program/Project Life Cycle*, o da *ESA's Project Life Cycle* e o do INCOSE.

Ao considerar que este trabalho faz parte de um projeto no setor espacial, vale ressaltar que os ciclos de vida mais relevantes e utilizados para projetos desta área são os modelos

criados pela Agência Espacial Europeia (ESA) e pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA). Mesmo sendo modelos de ciclo de vida diferentes, ambos possuem muitas semelhanças conforme apresenta a figura 1.

Figura 1: Comparação de modelos de ciclo de vida.



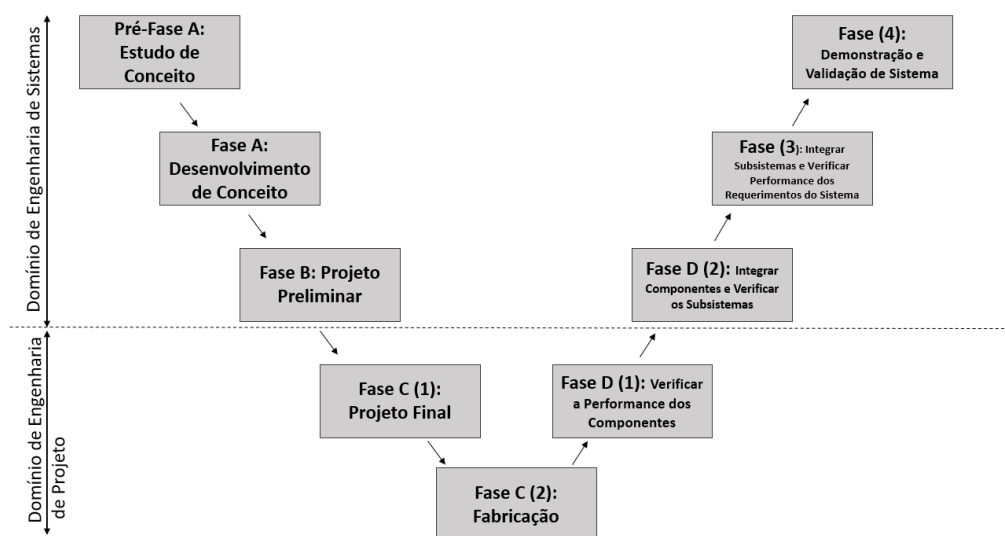
Fonte: Produzida pela autora.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi selecionado o ciclo de vida da NASA. Conforme o NASA System Engineering Handbook (2016), o objetivo da pré-fase A, também conhecida como estudo de conceito, é produzir um amplo espectro de ideias e alternativas para a missão. Como determinar a viabilidade do sistema desejado, desenvolver conceitos de missão, custo, viabilidade, entre outros. Já a fase A, possui o intuito de definir o conceito de missão. Durante a fase B, ocorre o detalhamento do projeto para estabelecer uma linha de base inicial capaz de atender às necessidades da missão. Na fase C, finaliza-se o detalhamento do

produto do sistema. A etapa seguinte, fase D, é a fase em que inicia a produção do sistema e seus respectivos testes. Para que na fase E o sistema possa exercer de forma que satisfaça os desejos do usuário. Por fim, a fase F, que implementa o plano de descomissionamento e descarte de sistemas desenvolvido na Fase E, e realiza a análises dos dados devolvidos e de quaisquer amostras devolvidas.

Os processos de ciclo de vida são divididos em diversos modelos, alguns deles sendo o modelo sequencial, *waterfall*, espiral, em “V”, entre outros. Em projetos do setor espacial, por serem mais complexos, normalmente se faz o uso do modelo em “V”. Este modelo baseia-se em requisitos, e é caracterizado por envolver uma correlação entre as atividades das fases do lado direito e esquerdo do “V” (FORSBERG, 1998). A figura 2 Apresenta o ciclo de vida da NASA no modelo de processo de ciclo de vida em “V” .

Figura 2: Modelo ciclo de vida da NASA em forma de modelo em “V”.

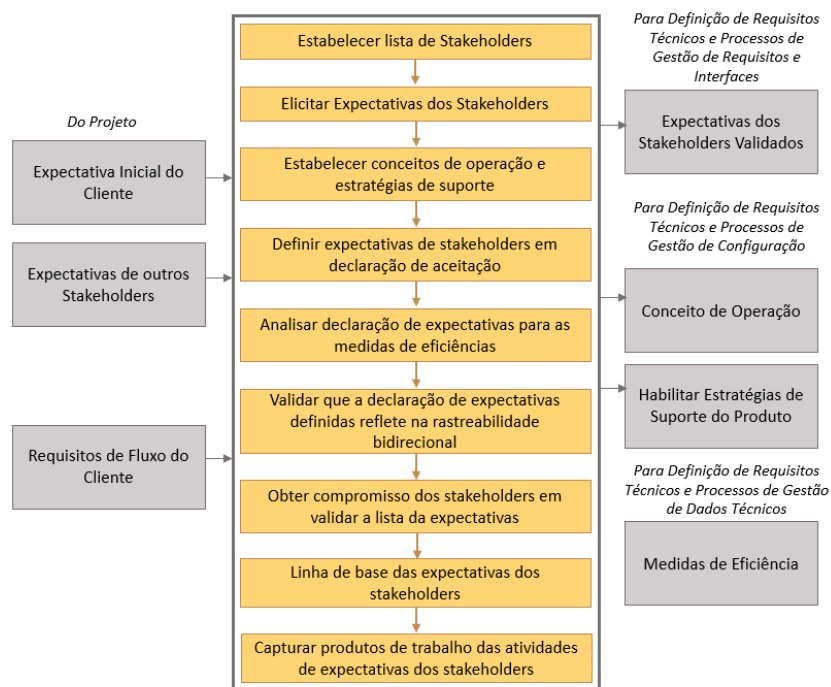


Fonte: Produzido pela autora.

2.1.1 Fase inicial NASA

Neste trabalho, a etapa enfatizada tratando-se do CubeSat NCBR-3, com base no ciclo de vida da NASA, é a Pré-fase A. A ideia deste estágio, como previamente mencionado, é realizar um estudo avançado, juntamente com interações dos *stakeholders*, para a equipe identificar conceitos de missão promissores (NASA, 2020). Sendo assim, durante esta fase, definir um grupo de partes interessadas é importante para ajudar a garantir que os objetivos da missão e os conceitos de operação atendam às necessidades e expectativas propostas. A Figura 3 demonstra o funcionamento da pré-fase A com suas entradas e saídas.

Figura 3: Diagrama de fluxo.



O Diagrama identifica entradas, saídas e atividades típicas a serem consideradas na definição das expectativas das partes interessadas. Fonte: Adaptado da NASA (2020).

2.2 Engenharia de sistemas Baseada em Modelos

Normalmente utilizadas para lidar com sistemas complexos, a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) é uma aplicação formalizada de modelagem de engenharia de sistemas que enfatiza a aplicação de princípios de modelos arquitetônicos e técnicas vantajosas para atividades de SE em todo o ciclo de vida de desenvolvimento de sistemas (MBSE Works™, 2020).

O MBSE reúne três conceitos diferentes, sendo eles, engenharia de sistemas, modelo e pensamento sistêmico. Define-se modelo, uma versão simplificada de algo, como uma representação gráfica, matemática ou física que abstrai a realidade para eliminar alguma complexidade. Já o pensamento sistêmico, é uma maneira de analisar um sistema como parte de um sistema maior, não como uma entidade auto suficiente (SHEVCHENKO, 2020). Os conjuntos de modelos, introduzidos pelo MBSE, ajudam a definir, projetar, analisar e documentar o sistema em desenvolvimento. Fornece uma forma eficiente de criar um protótipo, explicar e comunicar aspecto do sistema virtualmente, reduzindo as possíveis ambiguidades linguísticas e a dependência de documentos tradicionais (LEFFINGWELL, 2020).

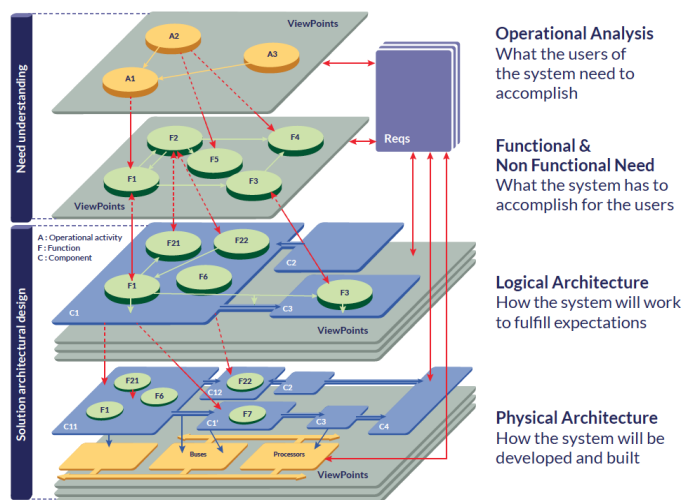
De acordo com Delligatti (2014), a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos depende dos três pilares do MBSE, que são: linguagem, ferramenta e método. A linguagem de modelagem, é definida como um conjunto de regras que padroniza os conceitos de notações gráficas, sintaxe e semântica (Bürger, 2018). Tal qual, as ferramentas de modelagem, são referentes a uma um software que garante a construção do modelo de sistema de forma consistente seguindo o modelo proposto. Bem como, a metodologia de modelagem, definida por Estefan (2008) como a coleção de processos, métodos e ferramentas relacionados usados

para apoiar a disciplina de engenharia de sistemas em um contexto "baseado em modelo" ou "conduzido por modelo".

Na prática, o MBSE é usado em conjunto com um modelo de relacionamento de sistemas em softwares, como o *No Magic*, *Capella*, e *IBM Rational Rhapsody Architect*. Os modelos são criados a partir de uma linguagem, por exemplo o *System Markup Language* (SysML), *ARCADIA Modeling Language*, *Unified Modeling Language* (UML), e *Object Process Methodology* (OPM).

O software *Capella*, especificamente, chama a atenção pois impõe uma abordagem estruturada em diferentes perspectivas de engenharia, estabelecendo uma separação clara entre o contexto do sistema e a modelagem de necessidade e modelagem de solução. O software é composto pelo método *Arcadia*, que é dividido em camadas, sendo elas a análise de necessidades operacionais, funcionais / não funcionais, arquitetura lógica e arquitetura física, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Fases do Modelo Arcadia.



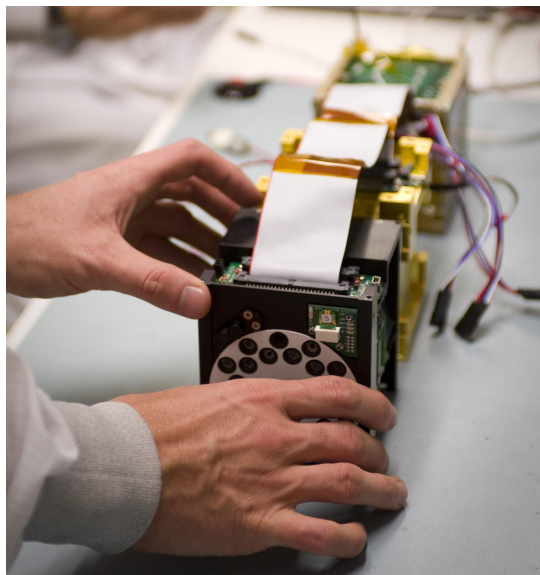
Fonte: Capella MBSE Tool - Arcadia, Eclipse.org, disponível em:
<<https://www.eclipse.org/capella/arcadia.html>>, acesso em: 21 Aug. 2021.

As duas primeiras camadas descrevem as expectativas do usuário final, as condições de uso e as condições realistas de integração, verificação e validação. A arquitetura lógica demonstra como o sistema irá funcionar. Esta camada inclui consistência funcional, interfaces, desempenhos, tempo real, segurança, proteção, integração, reutilização, custo, risco, cronograma e a facilidade de adaptação. Este modelo finaliza com a arquitetura física que, em conjunto com todas as etapas anteriores, solidifica como o sistema será desenvolvido e montado (Capella MBSE Tool - Arcadia, Eclipse.org, disponível em: <<https://www.eclipse.org/capella/arcadia.html>>, acesso em: 21 Aug. 2021.).

2.3 Nanossatélites

Nanossatélites (Figura 5), como o próprio nome sugere, são uma categoria de pequenos satélites com massa entre 1 e 10 kg (BOTELHO, 2020).

Figura 5: Protótipo de Nanosatellite.

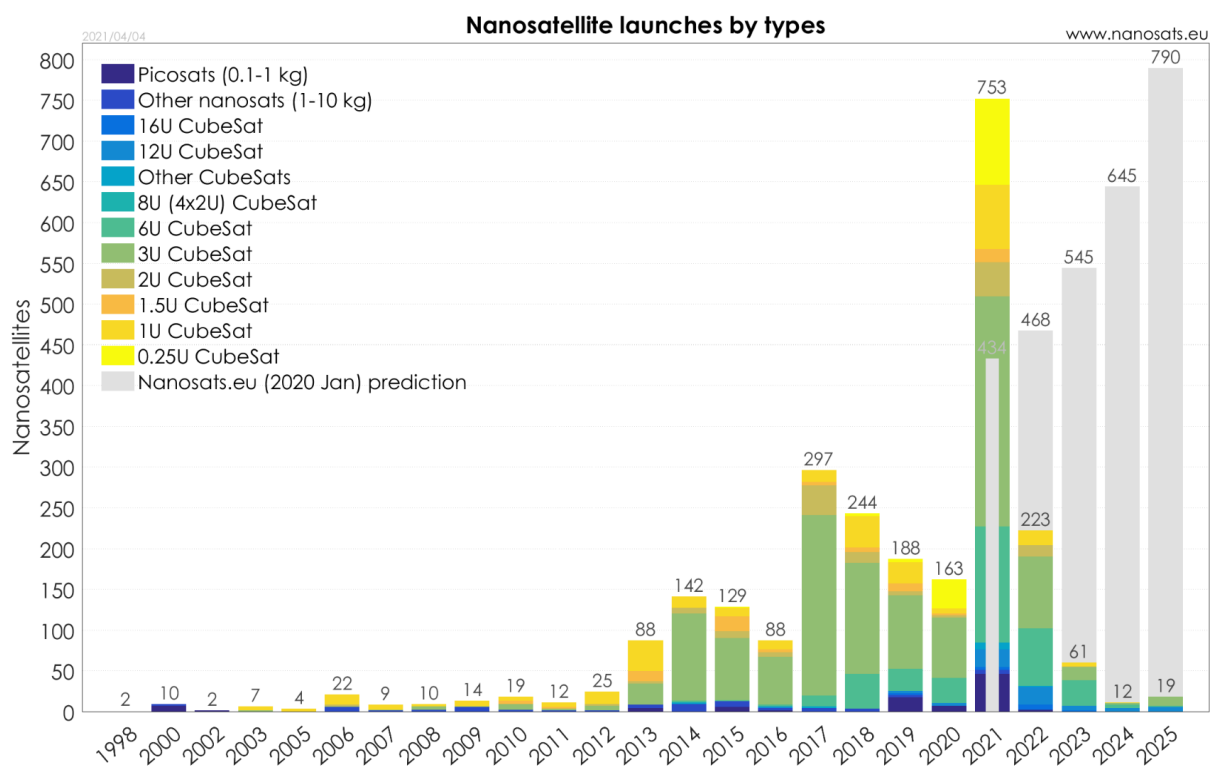


Fonte: NASA / Dominic Hart

Os avanços da tecnologia e a miniaturização de componentes eletrônicos, permitiu o desenvolvimento dos nanossatélites, que mostraram-se ideais para diversas aplicações, principalmente para missões de menor complexidade e de menor duração, quando comparadas à missões espaciais de grande porte. Outro benefício encontrado na aplicação é que os nanossatélites são mais acessíveis para empresas de todos os tipos e tamanhos, permitindo o lançamento e a reposição contínua dos sistemas no espaço. Assim como seu lançamento, que muitas vezes é realizado por meio de lançamento de carona (*ride shares*), que, conseqüentemente, diminui mais os custos do projeto.

Dentre a categoria de nanossatélites existem diversas classes, como os CubeSats, TubeSats, ThinSat, PocketCube, entre outros. Os mais utilizados e conhecidos são da classe padronizada dos CubeSats, como é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Tipos de Nanossatélite lançados durante os anos 1998 - 2025.



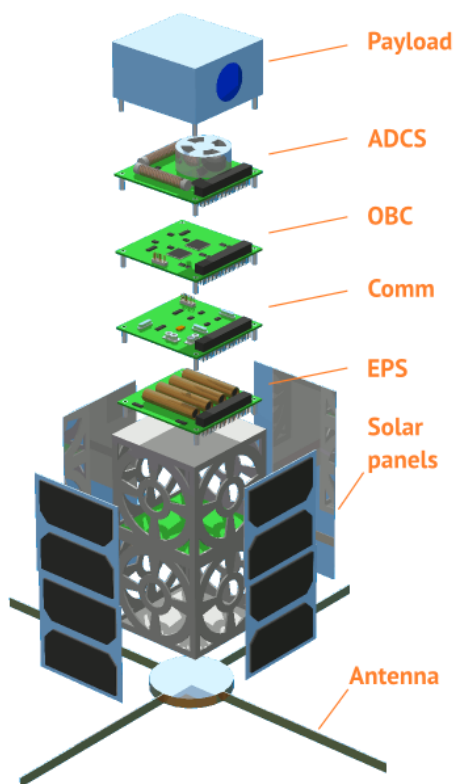
Fonte: KULU (2021)

Os CubeSats são satélites que possuem uma arquitetura baseada em módulos, “unidades”, com dimensões 10cm x 10cm x 10 cm, ou seja, um cubo de aresta 10 cm, também denominado 1U, com até 2kg (JOHNSTONE, 2020). Esta unidade modular pode ser multiplicada formando CubeSats 2U (com 2 cubos), 3U (com 3 cubos), assim em diante.

CubeSats, assim como satélites de outras classes, também são divididos em plataforma e carga útil. Os subsistemas básicos que compõe a plataforma de um CubeSat (Figura 7), são:

- Subsistema de Estrutura (STR);
- Subsistema de Comunicação (TT&C ou Comm, que inclui as antenas);
- Subsistema de Potência (EPS, que inclui os painéis solares);
- Subsistema de Determinação e Controle de atitude (ADCS);
- Comando e Manipulação de Dados (OBDH ou OBC);

Figura 7: Subsistemas básicos de um CubeSat 2U.

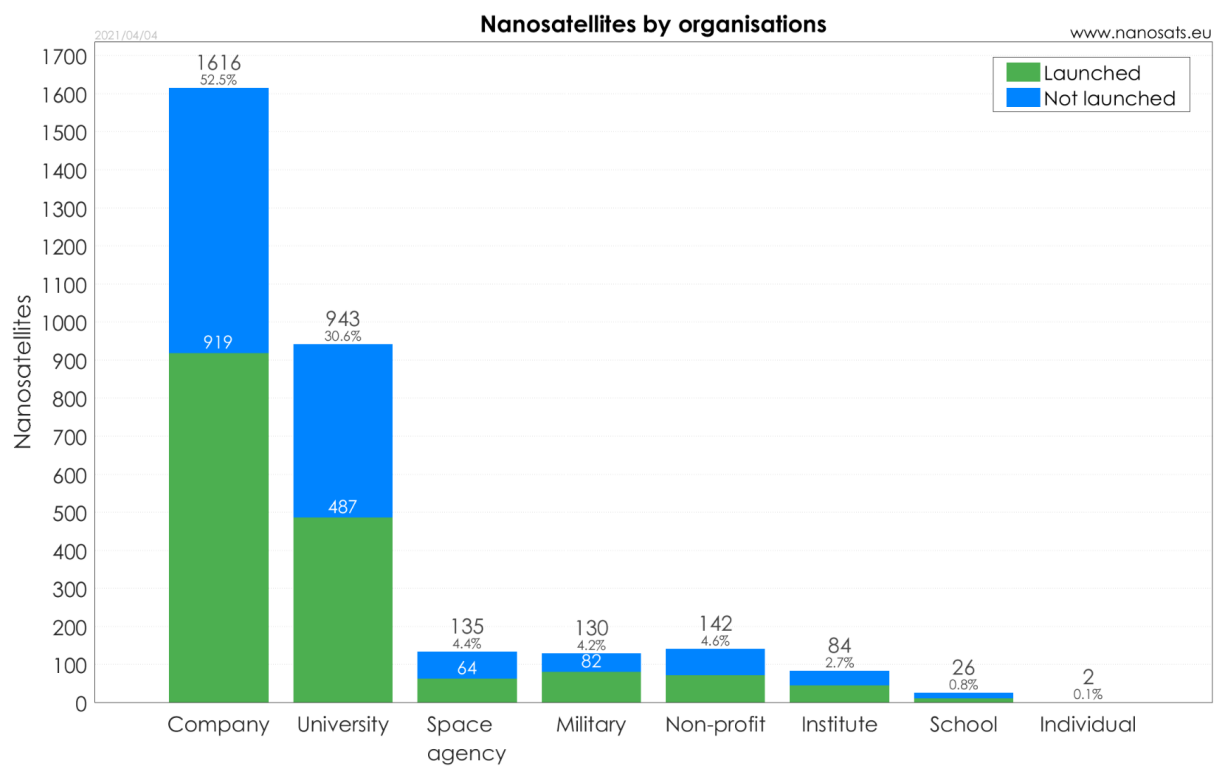


Fonte: SpaceBillboard.com, SpaceBillboard.com, disponível em: <<http://spacebillboard.com/>>, acesso em: 21 Aug. 2021.

Esta classe, criada em 1999, tinha o intuito de padronizar, reduzir o custo e o tempo de desenvolvimento, aumentar a acessibilidade ao espaço e manter lançamentos frequentes (JOHNSTONE, 2020). Este padrão específico para CubeSats torna possível que empresas possam produzir componentes em massa e oferecer componentes prontos para uso, conhecidos como COTS (*commercial off-the-shelf*), deixando-o ainda mais acessível (NASA, 2017).

Atualmente, os nanossatélites são utilizados em diferentes organizações, como pode-se observar na Figura 8.

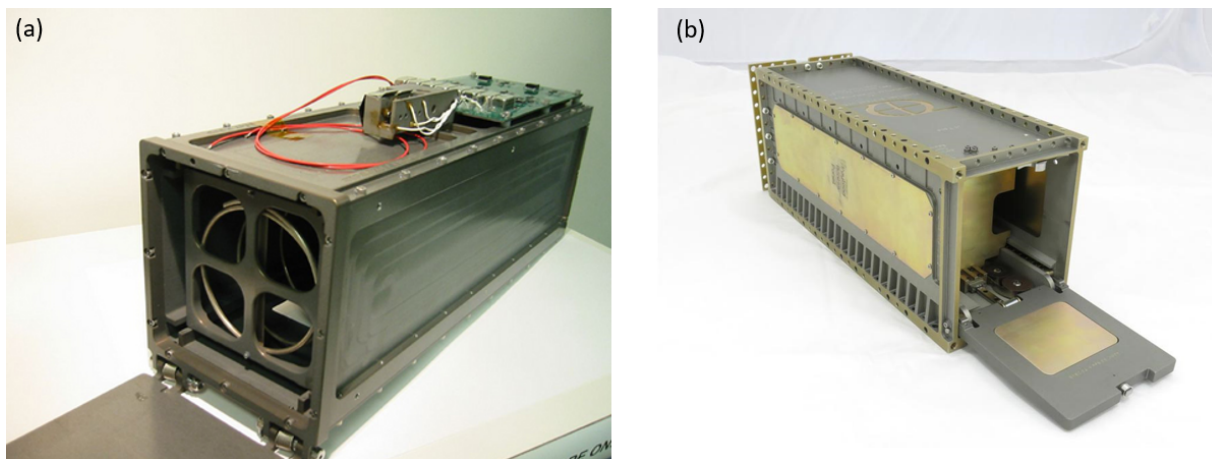
Figura 8: Quantidade de nanossatélites por tipo de organização.



Fonte: KULU (2021)

Conforme citado anteriormente, uma das vantagens em utilizar CubeSats é o modo como seu lançamento é realizado. Normalmente, é feito por *rideshare*, carga secundária ou terciária em veículos de lançamento (LV). Segundo as especificações de projeto dos CubeSats, a interface entre os CubeSats e o LV, é o dispensador conhecido como POD - Picosatellite Orbital Deployer (JOHNSTONE, 2020). Existem diferentes tipos de dispositivos ejetores desenvolvidos por empresas ou instituições. Na Figura 9, são exibidos dois exemplos desses sistemas, o *Poly Picosatellite Orbital Deployer* (P-POD), e o *Planetary Systems Corporation Deployer* (PSC). Essas interfaces são sistemas qualificados para voo no espaço, o que permite que os nanossatélites em seu interior utilizem componentes COTS (de prateleira, não qualificados), o que por consequência reduz o custo dos satélites.

Figura 9: Interface qualificada P-POD [a] e PSC [b].



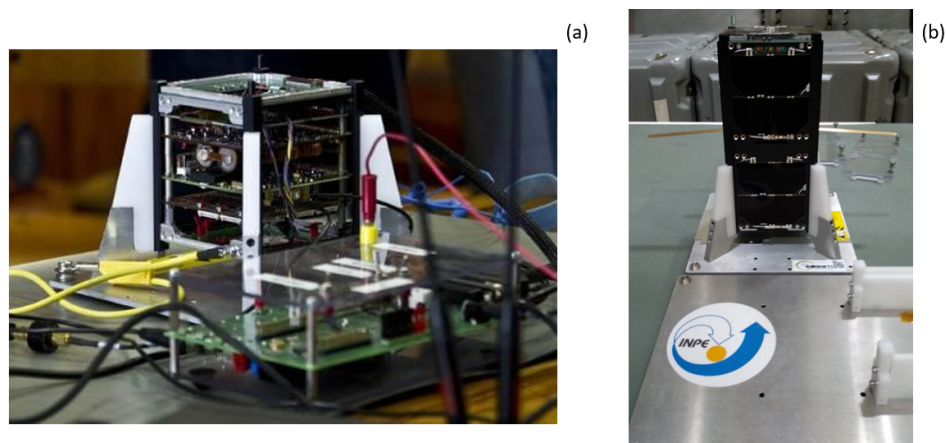
Fonte: JOHNSTONE (2020)

2.3.1 Programa NanosatC-BR

Com o intuito de gerar capacitação de recursos humanos para a área espacial, o Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS (atualmente Coordenação Espacial do Sul - COESU/INPE), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE / MCTI), em 2008, deu início ao programa “NanosatC-BR, Desenvolvimento de CubeSats” (SCHUCH, 2019). Em conjunto com a participação de alunos de graduação da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM e alunos de pós-graduação do INPE, o programa possui como missão científica o estudo de distúrbios na magnetosfera, especialmente na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, e do setor brasileiro do Eletrojato Equatorial Ionosférico. A missão tecnológica proposta para o programa é de gerar capacitação das instituições nacionais que participam da Missão, promovendo o desenvolvimento das áreas de ciências, engenharias e tecnologias espaciais. Essa missão inclui também a qualificação no espaço de circuitos eletrônicos miniaturizados e Circuitos Integrados no âmbito do Projeto CITAR- FINEP.

Atualmente, o programa conta com dois CubeSats no espaço, sendo eles o NanosatC-BR1 e o NanosatC-BR2, identificados na Figura 10.

Figura 10: NanosatC-BR 1 [a] e o NanosatC-BR 2 [b].



Fonte: INPE

O primeiro nanossatélite, um CubeSat 1U, foi lançado em 2014. Este tem a missão de coletar dados do Campo Magnético Terrestre principalmente na região da Anomalia Magnética da América do Sul – AMAS e do setor Brasileiro do Eletrojato Equatorial Ionosférico. Assim como, testar, em voo, Circuitos Integrados (CIs) projetados no Brasil.

Já o segundo CubeSat, lançado em 2021, é do tipo 2U, e seu objetivo é de monitorar no geoespaço a intensidade do campo geomagnético e a precipitação de partículas energéticas ionizantes, como qualificar no espaço suas cargas úteis tecnológicas.

Além das missões citadas, devido ao envolvimento de vários alunos de graduação e pós-graduação, a missão de ambos nanossatélites também tem forte viés educacional.

O programa conta também com o NanosatC-BR3, o terceiro CubeSat a ser desenvolvido, que se encontra em fase inicial de concepção, e foco principal deste trabalho. O objetivo principal desta missão a ser formada é de estudar radiação espacial, realizar validação tecnológica, e de gerar capacitação de recursos humanos. Porém, utilizando e adaptando o modelo de engenharia (EM) do NCBR1 para um modelo de voo (FM).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo consiste na revisão de trabalhos relacionados ao uso de MBSE em projetos de pequenos satélites. Estes trabalhos foram encontrados por meio de recomendação dos orientadores e de pesquisa nas bases de dados do *Google Scholar* e *Research Gate*, os quais abrangem vários bancos de dados, periódicos e canais de engenharia. As palavras chaves de pesquisas usadas foram: “MBSE”, “CubeSat”, “model-based systems engineering”, “conceptual design” e “concept design”.

A execução da engenharia de sistemas baseada em modelos de pequenos satélites em uma missão de CubeSat padrão, de acordo com Spangelo (2012), fornece uma descrição mais ampla de uma maneira que ela possa interagir com uma diversidade de ferramentas de análise. Além disso, tem o potencial de melhorar significativamente o design e operação da missão do CubeSat.

Ao usar MBSE em sua pesquisa, Kaslow (2017) considera a interação em todos os níveis da hierarquia da missão de CubeSat em andamento com modelagem como algo vantajoso. Assim como a rastreabilidade dos requisitos funcionais da missão dos CubeSats, deixando-as clara para a funcionalidade necessária para satisfazer esses requisitos. O autor também exalta a generalização executável devido ao MBSE, sendo, em geral, o suficiente para ser facilmente incorporada em muitas metodologias de engenharia de sistemas e independente de ferramentas específicas.

Já Bürger (2018), escreve que modelos gerados pelo MBSE para identificar as informações necessárias para planejar a etapa de montar, integrar e testar (AIT) de satélites podem aumentar o senso de colaboração dentro de uma organização. Um de seus benefícios é a capacidade de se inter-relacionar, que por consequência amplifica a visão do projeto e

diminui ambiguidades e possíveis erros. Realizando os modelos desde o início do projeto fornece o primeiro passo em direção a um AIT baseado em modelo completo (Bürger, 2018).

Conforme o estudo realizado por Aquino (2018), referente ao uso da metodologia do MBSE no CubeSat AESP14 , foi observado que implementar o MBSE na composição agrega significativamente no entendimento do sistema. Segundo a autora, as interações e os processos ficam visualmente mais intuitivos do que descritos textualmente. A autora ressalta também a questão de padronização dos desenhos entre desenvolvedores.

Em estudos anteriores do projeto de desenvolvimento do CubeSat NANOSATC-BR3, realizado por Slongo (2019), ter uma ferramenta visual, como os cenários modelados pelo MBSE, resulta em uma comunicação mais coerente entre os envolvidos. Isto gera uma confiabilidade maior no sistema. A rastreabilidade das funções do sistema adicionadas pela modelagem também é exaltada pelo autor, a qual fornece consistência à fase do projeto, o que aumenta a possibilidade de sucesso da missão (Slongo, 2019).

A Tabela 1 exibe de forma resumida as principais contribuições de cada referência bibliográfica analisada neste trabalho.

Tabela 1: Principais contribuições de cada referência bibliográfica.

Autor	Principais Contribuições
Spangelo (2012)	Avaliou o uso de MBSE em uma missão de CubeSat como um todo.
Kaslow (2017)	Apresenta as principais vantagens do uso de MBSE para o andamento de uma missão de CubeSat.

Bürger (2018)	Por meio do MBSE, identificou as informações necessárias para planejar o AIT de satélites desde o início do desenvolvimento do Projeto.
Aquino (2018)	Análise crítica sobre a utilização da metodologia do MBSE em CubeSats.
Slongo (2019)	Apresenta uma versão inicial da primeira fase do projeto conceitual do NCBR3 CubeSat usando MBSE.

Fonte: Produção da autora.

A revisão bibliográfica do trabalho permitiu realizar uma análise sobre as contribuições de outros pesquisadores que trabalham com a metodologia MBSE em sistemas espaciais com missões de CubeSats.

Atualmente, existe a demanda de se realizar a definição de missão do NCBR3, e isso será feito com o uso da metodologia MBSE. No decorrer da revisão, o único trabalho que demonstrou o uso do MBSE nas fases de conceito foi o trabalho de Slongo (2019), referente ao Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats. Isso reforça a importância do trabalho proposto, dando continuidade às contribuições de Slongo (2019).

4. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho segue o desenvolvimento da fase de Estudo de Conceito, a Pré-fase A da NASA (ver Figura 3). O modelo de ciclo de vida da NASA foi escolhido para o Projeto devido ao seu formato didático, por ter bibliografia disponível gratuitamente, e também por já ser utilizado pela indústria espacial internacional. A Pré-fase A inclui uma forte interação com diversos possíveis stakeholders da missão NCBR3, sendo eles cientistas, tecnologistas e professores. Isso ocorre pois o objetivo dessa fase é capturar um amplo espectro de ideias e alternativas para a missão, que posteriormente serão analisadas e selecionadas para comporem a missão do próximo nanossatélite. (NASA, 2019).

Seguindo as atividades definidas pela NASA para a fase em questão, entrevistas com os stakeholders foram estruturadas e realizadas de forma totalmente online com o objetivo de elicitação de necessidades (*Stakeholders Needs*). As informações capturadas foram analisadas e implementadas no software de modelagem de sistemas. Isso permite que as necessidades sejam mais facilmente validadas com os stakeholders, quando compara-se ao uso exclusivo de documentos. Além disso, o modelo expõe novas correlações evidenciadas visualmente, o que não é possível nos métodos tradicionais em linguagem puramente escrita.

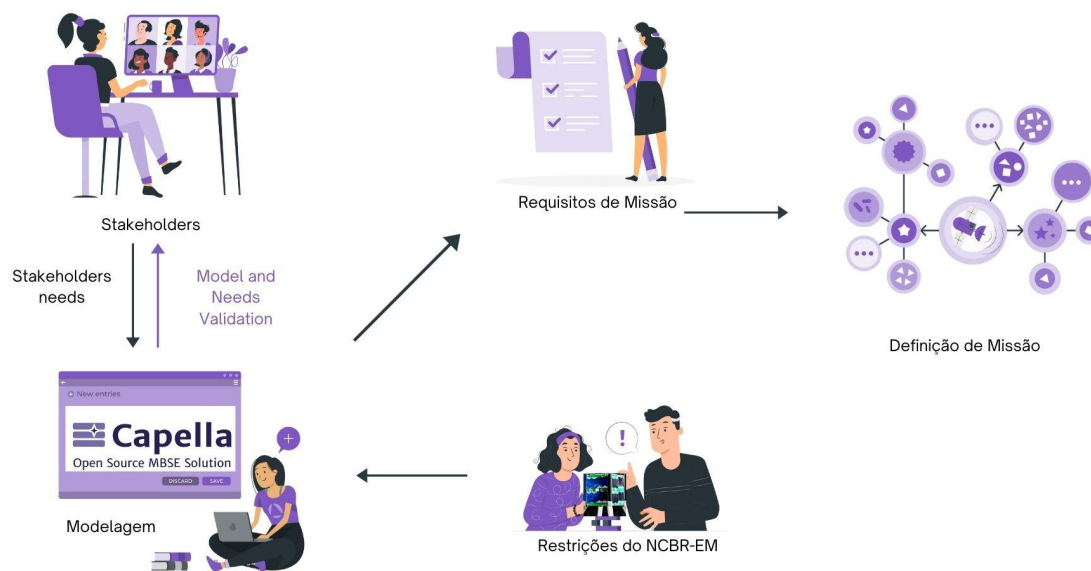
O software utilizado foi o Capella, que faz parte do projeto Eclipse Capella, pois o mesmo une os três pilares da modelagem, conforme descrito no Capítulo 2.2, possui ferramentas intuitivas, e é um projeto *open-source*, isto significa que é gratuito e possibilita o desenvolvimento de adicionais personalizados (*plugins* desenvolvidos pela comunidade de usuários). A linguagem *ARCADIA Modeling Language* (ARCML) e o método de modelagem, o Arcadia, foram escolhidos por, além de já serem incorporados ao software, serem mais intuitivos em comparação com outras linguagens e métodos utilizados (Bürger, 2018).

Após a validação do modelo (*Model Validation*) e analisar as restrições contidas no uso do EM do NCBR1, é possível a definição dos requisitos de missão. Por fim, forma-se a

definição de missão com todas as informações necessárias para a realização da primeira revisão de projeto do NANOSATC-BR3.

A metodologia usada no trabalho está representada na Figura 11.

Figura 11: Representação do resumo da metodologia.



Fonte: Produção da autora.

5. MBSE APLICADO AO NANOSAT-BR3

O Projeto NANOSATC-BR3 visa dar continuidade às missões de seus antecessores de forma incremental, ou seja, aumentando-se gradualmente o nível de complexidade de cada vertente das missões anteriores: educacional, científica e tecnológica. Dessa forma, a primeira parte deste capítulo apresenta a etapa de definição de stakeholders, que foram estipulados inicialmente pela gerência do Programa com esse propósito de continuidade. Como este é o primeiro *looping* da iteração da fase, outros stakeholders relacionados a outras fases do ciclo de vida (que não a fase de operação) serão futuramente identificados e analisados. O conjunto atual de stakeholders pode ser visto como um potencial grupo de stakeholders primários da missão.

A segunda parte do capítulo aborda a modelagem da camada operacional, que segundo Roques (2017), tem como principal objetivo entregar respostas razoáveis para perguntas predefinidas, que implica que, as questões são utilizadas como critérios de avaliação das visualizações do modelo, atuando como um controle de completude. Por isso, antes de cada vista do modelo, foram estipuladas as “perguntas pré-definidas”, as quais a modelagem pretende auxiliar na resposta.

A terceira parte apresenta as necessidades dos stakeholders levantadas por meio das entrevistas e modelagem da primeira camada (layer) do método ARCADIA.

A última parte do capítulo propõe um conceito preliminar de alto nível de sistema para o projeto, no qual é apresentado o que o sistema deve cumprir para atender aos stakeholders, também conhecido como *Functional & Non Functional Need*, a segunda fase do método Arcadia de modelagem.

5.1 Definição de Stakeholders

Por meio de videoconferência com a plataforma *Google Meets*, e com a instrução do co-orientador Dr. Eduardo Bürger, foram feitas diversas entrevistas com diferentes stakeholders utilizando um questionário desenvolvido para capturar com abrangência todas as especificidades da necessidade de cada stakeholder. O modelo básico do questionário é exposto no Apêndice A. Um dos principais objetivos do questionário, que também é uma dificuldade encontrada nas entrevistas, é manter o foco no problema, evitando-se soluções pré-concebidas.

Os primeiros stakeholders a serem entrevistados foram os tecnologistas José Marcelo Duarte e Manoel Jozeane Mafra do Centro Regional do Nordeste do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (COENE/INPE), referente a uma das possíveis cargas úteis. A carga útil em questão é a *Environmental Data Collector* (EDC), que, com base no guia de usuário oferecido pelos entrevistados previamente, decodifica sinais dos Terminais de Transmissão de Plataforma (PTTs) do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais e dos Sistema Argos-2 (Duarte, 2020). O mesmo documento define sua massa, suas dimensões, a frequência e sua tensão. Além disso, o documento também inclui o funcionamento da carga útil.

A segunda entrevista realizada de maneira similar à primeira, como pode ser observada na Figura 12, teve a participação dos stakeholders, Dr. Daniel Alessandro Nono, pesquisador do INPE (TECAMB e CITAR), e a Dra. Fernanda Gusmão de Lima Kastensmidt, professora associada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Figura 12: Segunda entrevista realizada.



Entrevista realizada no dia 22 de Julho de 2021 que teve participação dos stakeholders Dr. Daniel Alessandro Nono (superior dir.), pesquisador do INPE (TECAMB e CITAR) e a Dra. Fernanda Gusmão de Lima Kastensmidt (superior esq.), professora associada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a aluna Giulia Herdies (inferior esq.) e o co-orientador Dr. Eduardo Bürger (inferior dir.).

Fonte: Produção da autora.

Durante a entrevista foi identificada a necessidade de validar no espaço um material inovador projetado para proteção à radiação espacial e blindagem física contra detritos espaciais, desenvolvido pela equipe do Dr. Nono. A proposta de conceito sugerida pela Dra. Kastensmidt, é de desenvolver um método de validação no espaço. O método consiste em adicionar o material de blindagem de radiação solar em um dos dois *Field-Programmable Gate Array* (FPGAs) disponibilizados pela professora. Durante a missão ambos FPGAs realizarão a mesma operação programada por software a fim de analisar a eficiência e eficácia do material em relação à radiação solar e pequenos detritos. Os FPGAs propostos foram

escolhidos por ser bem conhecido o efeito da radiação sobre eles. Sendo assim, além de validar o material, estaríamos validando o próprio método sugerido no espaço.

Foi realizada também uma entrevista com o radioamador e coordenador da Liga de Amadores Brasileiros de Rádio Emissão (LABRE), Dr. Edson Pereira. Nessa reunião, foi identificada a necessidade de fomentar entusiastas do radioamadorismo, a educação em engenharia espacial e telecomunicações. Com esse objetivo, foi discutida a possibilidade de um software embarcado no NCB3 com o propósito educacional para incentivar entusiastas ao radioamadorismo e radioamadores a treinar, intercomunicar e realizar investigações técnicas.

Por fim, foram realizadas outras entrevistas, mas nenhuma necessidade específica foi capturada, portanto não estão inclusas no trabalho. Esta atividade, assim como todo o processo de análise de stakeholders é iterativo, sendo assim, outras eliciações ocorrerão de forma subsequente.

Em suma, a Tabela 2 apresenta os principais stakeholders, as instituições participantes, e as capacidades operacionais a serem adquiridas desenvolvidas por cada um.

Tabela 2: Stakeholders e suas capacidades operacionais desejadas.

Stakeholder	Capacidades operacionais
COENE/INPE/UFRN	Validar o transceptor desenvolvido pelas instituições.
Entusiastas do Radioamadorismo	Ter um meio educacional de comunicação de satélite para radioamadores e pessoas interessadas em radioamadorismo.
UFRGS	Validar o método (hardware e software) para caracterizar materiais no espaço.

Cientistas do INPE (TECAMB e CITAR)	Validar o material inovador desenvolvido, de proteção à radiação e detritos.
--	--

Fonte: Produzida pela autora.

5.2 Modelagem da Camada Operacional

A primeira fase (ou *layer* em inglês) descrita pelo método Arcadia, revisado no Capítulo 2.2, é a Análise Operacional (do inglês *Operational Analysis*). O objetivo dessa fase é a definição das necessidades dos stakeholders e o ambiente. Através das diferentes vistas do modelo (do inglês *model-view*), o modelador pode identificar as entidades, atores, atividades, conceitos e papéis de atuação, e definir o que os usuários do sistema pretendem realizar. Nessa fase do modelo ainda não existe um sistema e nem uma missão, existem capacidades operacionais (elementos ovais de cor marrom) desejadas pelos stakeholders, que são posteriormente (em outras vistas de modelo) desdobradas em atividades operacionais (elementos amarelos).

A fase serve para identificar as possibilidades de criar uma missão atendendo a diversas capacidades operacionais de diferentes stakeholders. Dentre as várias vistas de modelo disponíveis na fase pelo método Arcadia, as seguintes foram utilizadas no trabalho:

- Diagrama “*Operational Capabilities*” (OCB);
- Diagrama “*Operational Activity Interaction*” (OAIB);
- Diagrama “*Operational Architecture*” (OAB);

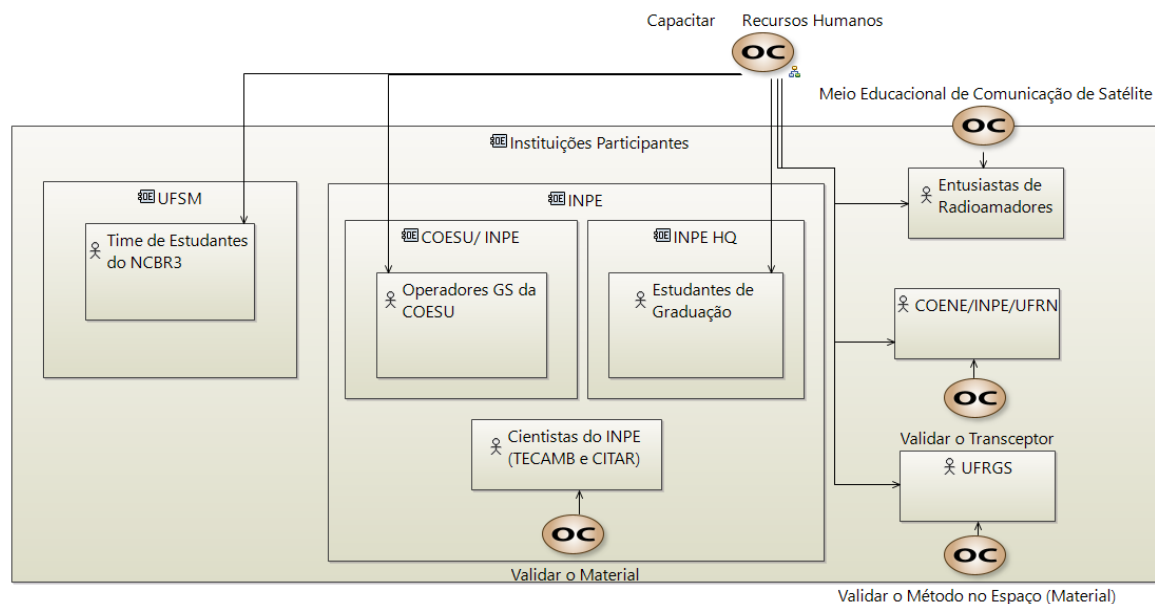
A partir das diversas anotações capturadas nas diferentes entrevistas, juntamente com a Tabela 2, todo o material foi sintetizado na vista do modelo conhecido como *Operational Capabilities* ou Capacidades Operacionais em português (OCB), representado na Figura 13.

A OCB tem o papel de situar o projeto para as capacidades operacionais que os stakeholders visam ter, para que desta forma, todos os elementos de níveis inferiores sejam rastreáveis pelas necessidades mais primárias. Na Figura 13 os stakeholders são identificados como atores operacionais, as instituições são visualizadas como entidades operacionais e as necessidades dos stakeholders são as capacidades operacionais.

Perguntas pré-definidas:

1. Quais as entidades (instituições) e stakeholders envolvidos?
2. Quais as principais capacidades e suas relações entre as entidades e stakeholders?
3. Qual o potencial educacional, científico e tecnológico de uma possível missão?

Figura 13: Capacidades Operacionais (OCB) para o NCBR3.



Fonte: Produção da autora.

No caso da Figura 13, ela salienta a forte vertente educacional do conjunto de capacidades operacionais identificadas, visto que essa capacidade é vinculada a 6 grupos de stakeholder diferentes e 5 instituições. A capacitação de recursos humanos é um dos mais importantes objetivos do Programa NanosatC-Br, Desenvolvimento de CubeSats.

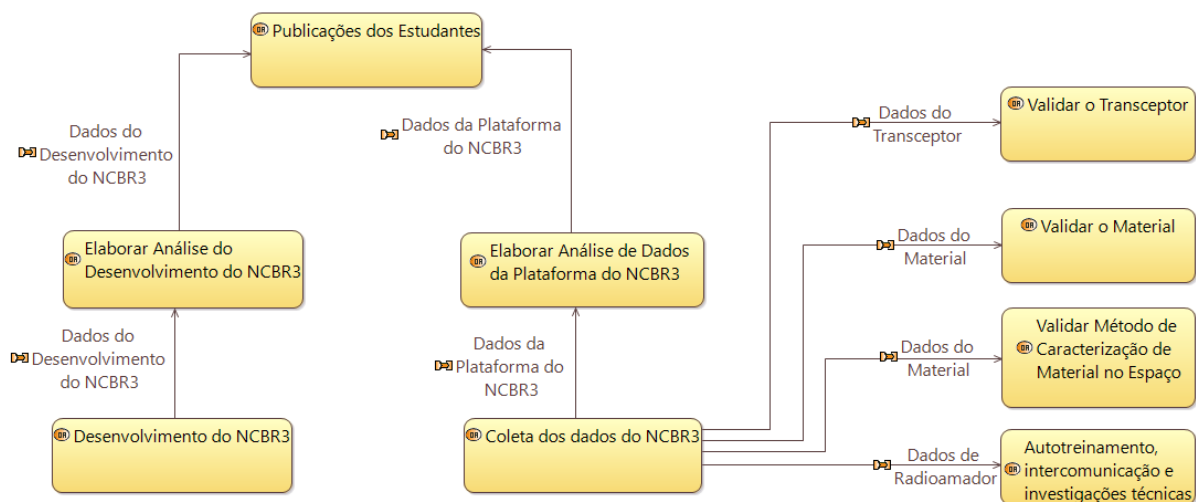
Seguindo a sequência sugerida pelo método ARCADIA, foi modelada a Interação de Atividades Operacionais, do inglês “*Operational Activity Interaction*”(OAIB), apresentada na Figura 14.

A OAIB tem o papel de situar o projeto para as atividades operacionais, assim como as interações que conectam elas. A vista de modelo apresentada na Figura 14 é dividida em dados de desenvolvimento e dados em voo. Tendo em vista que um dos objetivos principais do Programa NanosatC-Br, Desenvolvimento de CubeSats é a capacitação de recursos humanos, a parte relacionada às atividades com dados de desenvolvimento possui este foco, sendo mensurado por meio de publicações de estudantes. Já a segunda parte, que por mais que dê ênfase à capacitação de recursos humanos, também possui o intuito de atender as necessidades dos stakeholders, mensurando assim por meio da validação dos experimentos.

Perguntas pré-definidas:

1. Quais as principais atividades operacionais ?
2. Quais são os fluxos que relaciona as atividades operacionais?

Figura 14: Interação de Atividades Operacionais (OAIB) para o NCBR3.



Fonte: Produção da Autora.

A vista de modelo permitiu a compreensão das diferentes atividades operacionais que levam à capacitação de recursos humanos, assim como a relação entre essas atividades. Ambas as fases de desenvolvimento do satélite quanto à operação centralizam em uma atividade que pode ser quantificada posteriormente, que é o número de publicações geradas. A vista de modelo também permite compreender que as atividades operacionais de "Desenvolvimento do NCBR3" e "Elaborar análise do desenvolvimento do NCBR3" são realizadas em fases do ciclo de vida anteriores à operação, e todas as outras fazem parte da Fase E (NASA).

Para finalizar a primeira fase do método ARCADIA, foi modelada a Arquitetura Operacional, ou *Operational Architecture* (OAB) para o NCBR3, apresentada na Figura 14, que representa um caminho de validação importante no fluxo de dados através do projeto.

Através da vista de modelo OAB ambas entidades operacionais e atores identificadas na OCB, bem como as atividades criadas na OAIB podem ser administradas. Nesta etapa também é possível, conforme Bürger (2018), identificar as atividades operacionais que serão ou não realizadas pelo sistema em desenvolvimento.

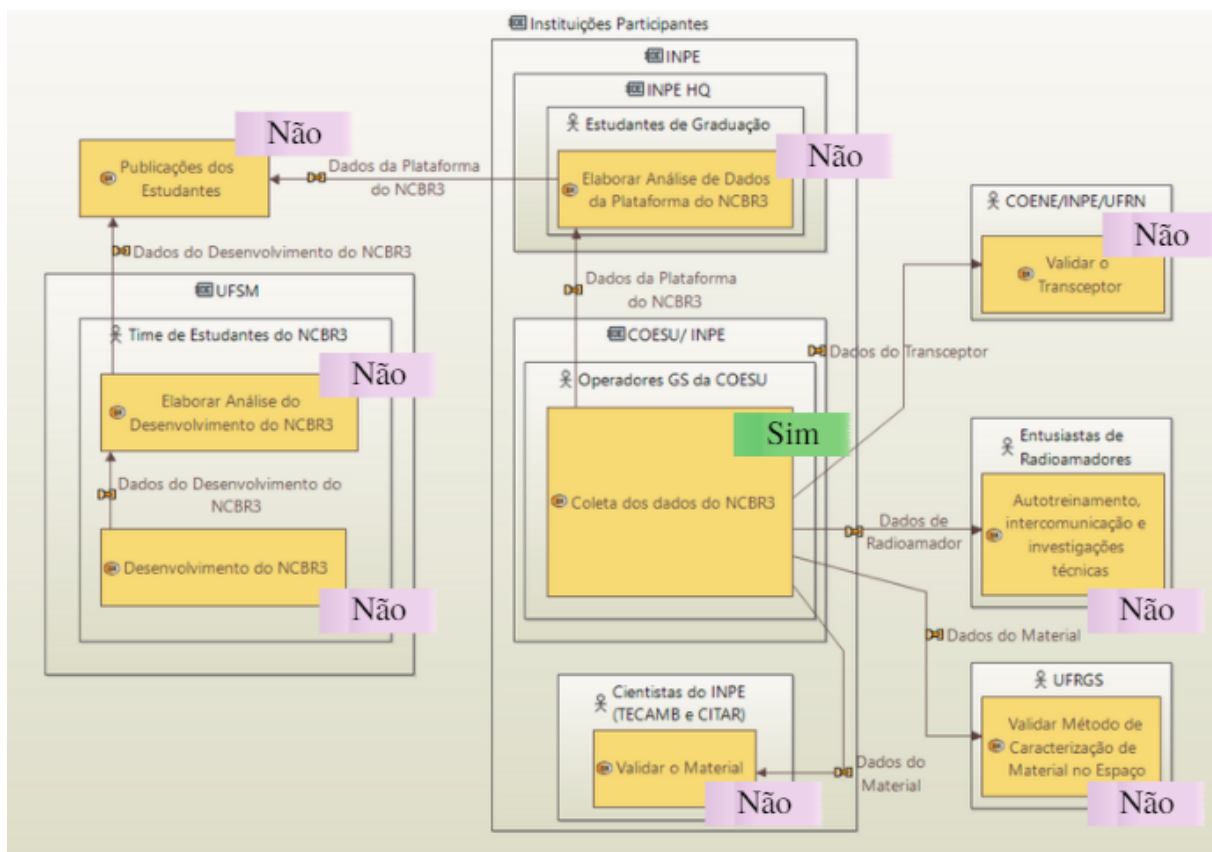
Na vista de modelo apresentada na Figura 14, as capacidades e as atividades operacionais que devem ser fornecidas são alocadas em seus respectivos stakeholders. Pode ser analisado no modelo que o time de estudantes do NCBR3 será responsável pelos dados de desenvolvimento, e os estudantes de graduação dos dados de plataforma, fazendo que ambos desenvolvam a capacitação de recursos humanos. Os operadores da estação da COESU são responsáveis pela coleta de dados do NCBR3, que serão eventualmente filtrados e fornecidos para os respectivos stakeholders, que, por sua vez, são responsáveis pela análise e validação com base nos dados de seus experimentos.

As atividades operacionais que serão realizadas pelo CubeSat estão evidenciadas com o *post-it* verde escrito “SIM”, que é a “*Coleta dos dados do NCBR3*”, e as que não serão realizadas com o *post-it* rosa escrito “NÃO”.

Perguntas pré-definidas:

1. Quais as atividades operacionais vão fazer parte do sistema?
2. Qual a relação entre as atividades operacionais e os stakeholders?

Figura 15: Arquitetura Operacional (OAB) para o NCBR3.



Fonte: Autora.

A vista de modelo OAB (figura 14) permite identificar a atividade a ser realizada por cada stakeholder e a instituição, também expõe a quantidade de interfaces operacionais que partem dos operadores da Estação Terrena (GS) para diversas instituições. Isso evidencia a necessidade de desenvolvimento de um sistema de comunicação eficiente, de forma que haja a transmissão de dados de missão de forma rápida, segura e eficiente.

5.3 Necessidades dos Stakeholders

Após a realização de todas as entrevistas e modelagem da primeira camada (layer) do método ARCADIA, a partir da análise dos *model-views* desenvolvidos conseguimos transcrever textualmente as necessidades operacionais de cada stakeholder. A Tabela 3 reúne essas necessidades.

Tabela 3: Necessidades dos Stakeholders.

ID da Necessidade	Necessidade	Stakeholder
STK_001	O stakeholder deve ser capaz de validar o tranceptor Environmental Data Collector - EDC.	COENE/INPE/ UFRN
STK_001.01	O stakeholder deve receber os dados em uma faixa de frequência diferente dos demais aparelhos presentes no nanossatélite, sendo ela de 401 MHz.	COENE/INPE/ UFRN
STK_001.02	O stakeholder deve receber os dados pelo menos duas vezes por dia.	COENE/INPE/ UFRN
STK_0010.03	O stakeholder deve receber os dados pela estação de solo localizada na cidade de Natal/ Brasil.	COENE/INPE/ UFRN
STK_001.04	O stakeholder não deve receber os dados através da faixa de frequência utilizada na aplicação de radioamador.	COENE/INPE/ UFRN



STK_001.05	O stakeholder deve receber os dados na órbita da faixa LEO, ou mais próxima do equador.	COENE/INPE/ UFRN
STK_002	O stakeholder deve ser capaz de validar o material de de blindagem de radiação solar no espaço.	Cientistas do INPE (TECAMB e CITAR)
STK_002.01	O stakeholder deve ser capaz de expor o material em radiação direta.	Cientistas do INPE (TECAMB e CITAR)
STK_002.02	O stakeholder deve ser capaz de validar a capacidade do material de proteção física contra micrometeoritos.	Cientistas do INPE (TECAMB e CITAR)
STK_002.03	O stakeholder deve ser capaz de receber pelo menos 6 meses consecutivos de voo de dados do experimento.	Cientistas do INPE (TECAMB e CITAR)
STK_002.04	O stakeholder deve ter sua carga útil integrada sem ser riscada.	Cientistas do INPE (TECAMB e CITAR)
STK_002.05	O stakeholder deve ter sua carga útil integrada sem ser perfurada.	Cientistas do INPE (TECAMB e CITAR)



STK_003	O stakeholder deve ser capaz de validar o método utilizado para validar o material de blindagem no espaço.	UFRGS
STK_003.01	O stakeholder deve ser capaz de receber dados com o uso do material de blindagem de espessura 1.	UFRGS
STK_003.02	O stakeholder deve ser capaz de receber dados sem o uso do material de blindagem de espessura 1.	UFRGS
STK_003.03	O stakeholder deve ser capaz de receber dados com o uso do material de blindagem de espessura 2.	UFRGS
STK_003.04	O stakeholder deve ser capaz de receber dados sem o uso do material de blindagem de espessura 2.	UFRGS
STK_004	O stakeholder deve ser capaz de adquirir dados com o intuito de educar e incentivar aspirante a radioamadorismo em relação a comunicação de satélite.	Entusiastas de Radioamadores
STK_004.01	O stakeholder deve receber dados na faixa de frequência de radioamador.	Entusiastas de Radioamadores

Fonte: Produção da autora.

5.4 Modelagem do Conceito de Missão (Segunda Camada)

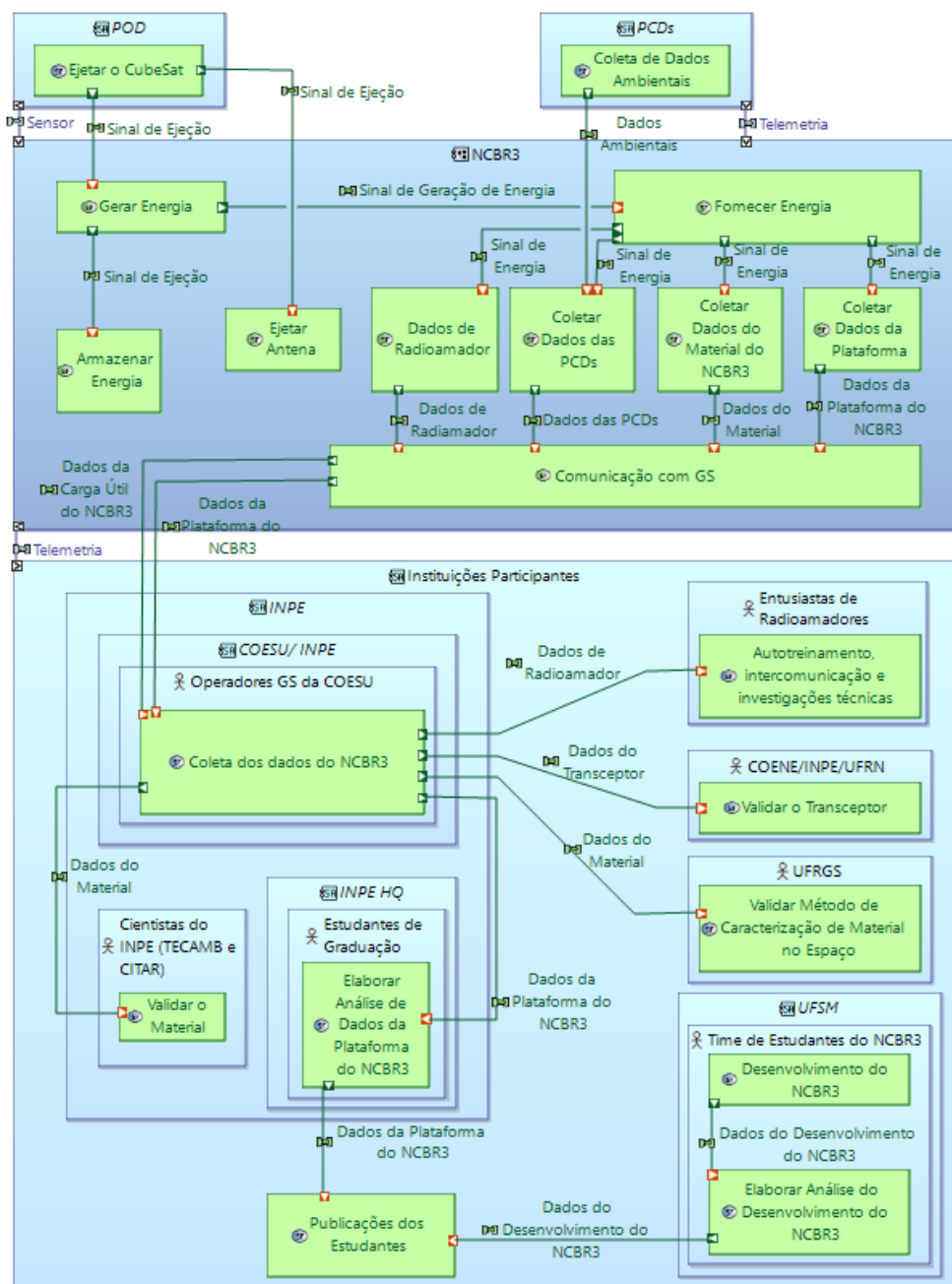
Mesmo sem a validação, é possível progredir para o início da segunda camada do modelo, chamada de Sistema de Análise pelo software, pode-se modelar a Arquitetura de Sistema (SAB), Figura 15. Esse cenário exhibe o sistema de modelagem de análise mais completo apresentado até agora. O sistema a ser desenvolvido, em concordância com o cenário OAB, está representado por azul escuro. Os stakeholders, e outros sistemas externos são retratados por azul claro. Por fim, os elementos em verde simbolizam as funções de alto nível e as interfaces entre elas indicam sua relação (adaptado de Slongo, 2019).

O modelo inicia com a ejeção do CubeSat por meio de um POD, o subsistema de energia é ligado e depois alguns minutos as antenas são ejetadas, semelhante ao modelo de Slongo (2019). A energia é armazenada e fornecida para a plataforma e cargas úteis, iniciando a coleta de dados por ela. A carga útil referente ao transceptor coleta dados via telemetria das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) ou Estações Ambientais Automáticas. Os dados do NCBR3 são enviados para a Estação Terrena (GS) que será coletada e filtrada pelos operadores da mesma. A partir dos operadores da GS e por meio de um sistema de comunicação a ser desenvolvido, serão enviados os dados para os respectivos stakeholders, conforme apresentado anteriormente.

Perguntas pré-definidas:

1. Quais as principais funções do sistema a ser desenvolvido?
2. Quais as relações entre os sistema a ser desenvolvido e as entidades e stakeholders?

Figura 16: Arquitetura de Sistema (SAB) para o NCBR3.



Fonte: Produção da autora.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Esse capítulo apresenta a discussão de resultados proveniente do presente trabalho, com foco nos objetivos e contribuições.

O principal objetivo do trabalho é a implementação da Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos da Missão do terceiro nanossatélite do Programa “NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats”, o NANOSATC-BR3 (NCBR3), assim como estudo de Engenharia de Sistemas, e ambas foram concluídas com sucesso.

O processo de aprendizagem foi desenvolvido a partir de bibliografia específica, exibido no Capítulo 2, através de livros sobre a engenharia de sistemas de pequenos satélites, artigos científicos, e websites técnicos sobre a engenharia de sistemas e o uso de MBSE em nanossatélites. Por este ser o primeiro contato da modeladora com engenharia de sistemas, esta etapa foi fundamental para o trabalho, trazendo conceitos importantes para o desenvolvimento do Projeto NCBR3.

Ao comparar os resultados produzidos e a revisão bibliográfica, nota-se que a maioria dos trabalhos analisados, indicados no Capítulo 3, faz o uso da linguagem SysML, diferente da linguagem ARCML utilizada no trabalho. Por ser uma linguagem acoplada ao sistema de modelagem Arcadia e o Capella tornando muito mais intuitivo do que o SysML, que conforme Aquino (2018), é necessário aprender tanto a linguagem, quanto o programa.

No decorrer do processo de análise e definição de stakeholders, relatado no Capítulo 5, ficou evidente que o processo seria mais demorado que o esperado. Considerando que realizou-se mais entrevistas do que era planejado, o que é muito bom para o projeto, porém, causou um atraso no cronograma previsto.

Através das entrevistas, foi possível adquirir informações para o processo de modelagem da camada operacional, que dá início à aplicação da Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos na missão do NCBR3. Da mesma maneira, as entrevistas trouxeram

outros olhares para o projeto que antes não estavam sendo cogitadas, como as regras para o uso da frequência de radiofrequência descrita pela *The International Amateur Radio Union* (IARU), comentada pelo stakeholder Eng. Edson Pereira.

A elaboração da modelagem contou com a ajuda de tutoriais desenvolvidos por alunos da UFSM, através deles foi possível um rápido aprendizado da ferramenta MBSE. Através da modelagem, obtivemos um conceito de sistema, no qual cada elemento criado pode ser rastreado até as necessidades iniciais dos stakeholders.

No decorrer do projeto, foram encontradas algumas dificuldades como o agendamento de reuniões, que causou alguns atrasos no cronograma como relatado previamente. O processo também contou com a dificuldade em fazer alguns stakeholders compreenderem a necessidade de se fazer o detalhamento do problema antes de propor soluções (um dos princípios da SE). Além disso, houve as dificuldades já previstas, como aprendizado de conceitos da engenharia de sistemas, diferenças de nomenclaturas entre a Engenharia de Sistemas tradicional e os elementos do software capella.

Todas as etapas previstas para o Projeto de Pesquisa foram concluídas com sucesso, com exceção da validação final das necessidades de stakeholders, obtenção dos requisitos de missão do NANOSATC-BR3, análise do modelo EM do NCBR1 e apoio à revisão MDR. Estas quatro atividades não foram realizadas por motivos externos ao Projeto de Pesquisa, relacionados à missão do nanossatélite, incluindo dificuldades logísticas frente às restrições impostas pela pandemia. Estas atividades serão realizadas nos projetos futuros da Bolsista.

7. CONCLUSÕES

O projeto de iniciação científica foi satisfatório em cumprir seu principal objetivo, a implementação da Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE – Model Based Systems Engineering) da Missão do terceiro nanossatélite do Programa “NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats”, o NANOSATC-BR3 (NCBR3), e de dar continuidade às missões de seus antecessores de forma incremental.

O trabalho teve uma extensa etapa destinada a estabelecer as bases conceituais, que teve como fonte principal os livros tradicionais sobre engenharia de sistemas, engenharia de sistemas baseada em modelos e nanossatélites. Assim como, uma revisão bibliográfica variada e realização de cursos e exercícios para aprendizagem com o software de modelagem.

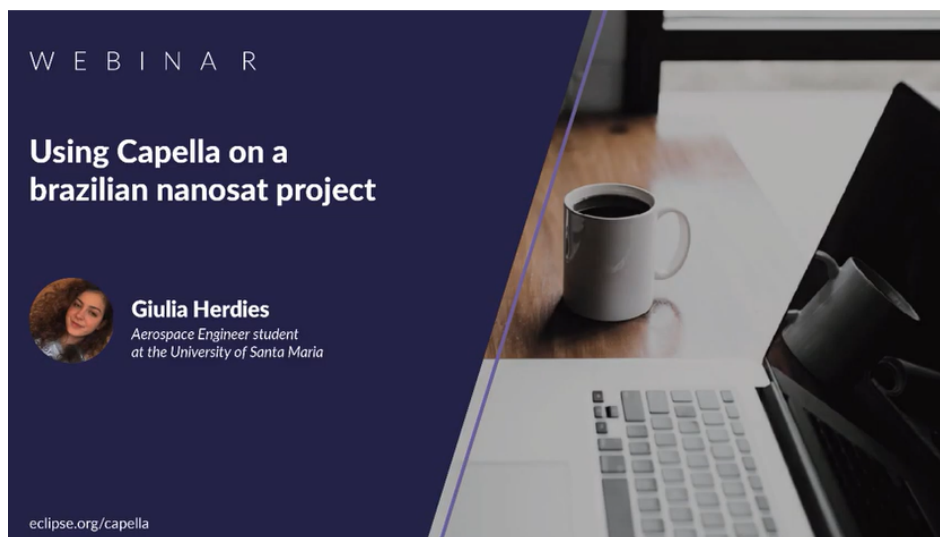
O Projeto NCBR3 encontra-se em sua fase inicial, que segundo a NASA é conhecida como o Estudo de Conceito ou Pré-fase A. Para esta fase, reuniu-se diversos stakeholders de múltiplas áreas de conhecimento com o intuito de realizar um estudo da radiação espacial e seu efeito em sistemas e componentes espaciais, concluindo parte da definição dos stakeholders. Os modelos criados no Projeto com o software Capella, resultantes da análise de stakeholders, possibilitam o fácil entendimento das opções de missões para o Projeto, e também permitiram o desenvolvimento de um conjunto de necessidades de stakeholders.

Em futuros trabalhos serão discutidas e finalizadas as etapas não concluídas, discutidas no Capítulo 6, e será dada a continuidade no desenvolvimento do Projeto da missão do NANOSATC-BR3.

7.1 Publicações e Apresentações

Durante o segundo semestre de 2020 e primeiro semestre de 2021, período no qual o presente trabalho foi desenvolvido, a autora fez parte da *Capella Webinar* (Figura 17) organizada pela Obeo no dia 10 de Junho de 2021, com o tema “*Using Capella on a Brazilian Nanosat Project*”. O evento internacional contou com a presença online de mais de 50 ouvintes, que realizaram diversas perguntas para a autora e Coorientador. Após a apresentação, a autora recebeu importantes convites de instituições estrangeiras, evidenciando a qualidade do trabalho apresentado e sua importância na área de Engenharia de Sistemas baseada em modelos.

Figura 17: Capa da apresentação “*Using Capella on a Brazilian Nanosat Project*”.



Fonte: <https://news.obeosoft.com/en/post/using-capella-on-a-brazilian-nanosat-project>.

A autora também terá participação no “Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação” (SICINPE), no dia 24 de agosto de 2021.

REFERÊNCIAS

- ALÉN SPACE. A Basic Guide to Nanosatellites | Alén Space. Alén Space. Disponível em: <<https://alen.space/basic-guide-nanosatellites/>>. Acesso em: 5 Jul. 2021.
- AQUINO, É. R.; LOUREIRO, G. MBSE para engenharia de sistema de Cubesats. São José dos Campos: INPE, 2018. 26 p. Bolsa PIBIC/INPE/CNPq. IBI: <8JMKD3MGP3W34R/42HRR3S>. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/42HRR3S>>.
- Capella MBSE Tool - Arcadia. Eclipse.org. Disponível em: <<https://www.eclipse.org/capella/arcadia.html>>. Acesso em: 21 Aug. 2021.
- ESCOBAR BÜRGER, E. A conceptual MBSE framework for satellite AIT planning. 2018. 193 p. IBI: <8JMKD3MGP3W34R/3S3JPME>. (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/10.18.19.41-TDI). Tese (Doutorado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018. Disponível em: <<http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34R/3S3JPME>>.
- KULU E. Nanosats Database, 2021. Disponível em: www.nanosats.eu
- HOWELL, E. “CubeSats: Tiny Payloads, Huge Benefits for Space Research.” Disponível em: <<https://www.space.com/34324-CubeSats.html>>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- INCOSE, “SYSTEMS ENGINEERING HANDBOOK A GUIDE FOR SYSTEM LIFE CYCLE PROCESSES AND ACTIVITIES”. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.las.inpe.br/~perondi/21.06.2010/SEHandbookv3.pdf>>.

IARU, The International Amateur Radio Union, “AMATEUR RADIO SATELLITES”, Rev 15.5, 2006

ISO/IEC/IEEE. 2011. Systems and software engineering - Requirements engineering. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Commission/ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), (IEC), ISO/IEC/IEEE 29148.

ISO/IEC/IEEE. 2015. Systems and Software Engineering -- System Life Cycle Processes. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardisation / International Electrotechnical Commissions / Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISO/IEC/IEEE 15288:2015.

JANSON, S. W. I-1. “Nanosatellites”, p. 1–30, 13 mar. 2020.

JOHNSTONE A. “CubeSat Design Specification Rev. 14 The CubeSat Program, Cal Poly SLO CubeSat Design Specification (1U -12U) REV 14 CP-CDS-R14”. [s.l.]: , [s.d.]. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/5f24997b6deea10cc52bb016/1596234122437/CDS+REV14+2020-07-31+DRAFT.pdf>.

KASLOW, D. et al., “A Model-Based Systems Engineering (MBSE) approach for defining the behaviors of CubeSats.” ResearchGate, 2017.

LEFFINGWELL, D. Model-Based Systems Engineering - Scaled Agile Framework. Disponível em: <https://www.scaledagileframework.com/model-based-systems-engineering/>. Acesso em: 16 nov. 2020.

MBSE Works™, “MBSE Works™: What is MBSE? - What You Need to Know.” Disponível em: <<https://mbseworks.com/>>, acesso em: 16 Nov. 2020.

NASA, “Model Based Systems Engineering (MBSE).” Disponível em: <<https://www.nasa.gov/consortium/ModelBasedSystems>>. Acesso em: 16 nov. 2020.

NASA, “NASA - O/OREOS Nanosatellite.” Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/oreos/main/Oreos_1.html>. Acesso em: 29 mar. 2021.

ROQUES, P. Systems architecture modeling with the Arcadia method: a practical guide to Capella. Amsterdam: Elsevier, 2017. 292p. ISBN 9780081017920.

SCHUCH, Nelson J. et al. “THE NANOSATC-BR, CubeSat DEVELOPMENT PROGRAM - A JOINT CubeSat PROGRAM DEVELOPED BY UFSM AND INPE/MCTIC - SPACE GEOPHYSICS MISSION PAYLOADS AND FIRST RESULTS”. Brazilian Journal of Geophysics, [S.l.], v. 37, n. 1, p. 95-103, mar. 2019. ISSN 1809-4511. Available at: <<https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/1992>>. Date accessed: 06 July 2021. doi:<http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v37i1.1992>.

SEBoK., Generic Life Cycle Model - Sebokwiki.org. Disponível em: <https://www.sebokwiki.org/wiki/Generic_Life_Cycle_Model>. Acesso em: 17 Jun. 2021.

SHEVCHENKO N., “An Introduction to Model-Based Systems Engineering (MBSE).” Disponível em: <https://insights.sei.cmu.edu/sei_blog/2020/12/an-introduction-to-model-based-systems-engineering-mbse.html>. Acesso em: 24 mar. 2021.

SLONGO, A. “NANOSATC-BR3 CONCEPT DESIGN USING MODEL-BASED SYSTEMS ENGINEERING (MBSE)”, 2019

SPANGELO, S. C. et al., "Applying Model Based Systems Engineering (MBSE) to a standard CubeSat," 2012 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2012, pp. 1-20, doi: 10.1109/AERO.2012.6187339.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, “Status de Engenharia e Tecnologias Espaciais, Projeto NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats, Parte I.”, 2011.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, “Programa NanoSatC-BR, Desenvolvimento de CubeSats INPE/NanosatC-BR” Inpe.br. Disponível em: <http://www.inpe.br/sul/nanosat/missao/nanosatc_br2.php>. Acesso em: 8 Aug. 2021.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Lista de Perguntas Feita aos Stakeholders.

A Figura A.1 apresenta um exemplo do questionário que balizou a entrevista com os stakeholders, José Marcelo Duarte e Manoel Jozeane Mafra do Centro Regional do Nordeste do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (COENE/INPE).

Figura 18: Exemplo do questionário.



Perguntas aos Stakeholders

1. Qual a sua expectativa para esta missão?
2. Quais são os objetivos?
3. Qual o orçamento máximo?
4. Existem ensaios similares conhecidos ou outras edições desta aplicação específica?
5. Existe uma restrição de tempo?
6. O que pode afetar a qualidade destas medidas?
7. Existe alguma especificidade para o formato dos dados?
8. Os dados precisam passar por algum tipo de processamento?
9. Qual a frequência?
10. Quantidade de massa de dados?
11. Qual o intervalo de tempo para o recebimento de dados? (uma vez por dia, duas vezes ?
12. Qual o consumo de energia?
13. Quanto tempo seria necessário ficar ligado? Existem parâmetros para validar EDC?
14. Pode ligar e desligar? Se puder desligar por quanto tempo pode permanecer desta forma ?
15. Sob quais condições ela deveria ser ligada e/ou desligada?
16. Alguma restrição de órbita?
17. Qual a estação de solo responsável ?

Fonte: Produzido pela autora.