X Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais
7 a 9 de agosto de 2019

MBSE e SysML APLICADAS AO DESENVOLVIMENTO DE EGSE PARA A MONTAGEM, INTEGRAÇÃO E TESTES DE SATÉLITES - UM CASO PRÁTICO

COICEV, M. [1], LOUREIRO, G.[2]

[1]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Aluno de Mestrado do curso de Eng. e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

[2]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Professor Doutor do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais.

marcelo.coicev@lit.inpe.br

Resumo. *O objetivo deste artigo é apresentar uma proposta de utilização de MBSE e SysML aplicados a um estudo de caso de análise de um componente de um Equipamento de Suporte Elétrico de Solo (EGSE) típico utilizado na Montagem, Integração e Testes (AIT) de satélites.*
A abordagem visa descrever o fluxo de processos utilizado nas análises, fornecendo um pano de fundo metodológico para a aplicação da notação SysML de forma prática para desenvolvimento de EGSE's.

Palavras-chave: Engenharia de Sistemas; Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos; MBSE; SysML; Equipamento de Suporte Elétrico de Solo; EGSE.

1. Introdução

Embora o SysML tenha se tornado nos últimos anos o padrão de fato para MBSE, uma base metodológica de apoio ainda se mostra necessária, já que SysML é apenas uma linguagem gráfica e define um conjunto de diagramas, elementos de modelagem, uma sintaxe e semântica. Como qualquer idioma (formal ou informal), ela pode ser usada de muitas maneiras diferentes, inclusive muitos caminhos inadequados. Mais notavelmente, é possível usar indevidamente a linguagem para criação de modelos não representativos ou mesmo incorretos.

O fluxo dos processos de análise utilizados neste artigo procuram implementar, dentro do possível, a sequência apresentada no Guia de Desenvolvimento Integrado de GSE proposto

por Vintecinque (2017), respeitando-se as limitações impostas pela linguagem de notação SysML e da ferramenta de modelagem utilizada (*Cameo Systems Modeller*).

O valor adicionado da metodologia com a abordagem MBSE consiste em:

- Selecionar um subconjunto de adequado de diagramas SysML e artefatos a serem gerados de forma conveniente e pragmática;
- Definir uma semântica para garantir diagramas com significado e regras para verificar o modelo quanto à sua consistência;
- Definir uma sequência de diagramas óbvia que garanta a eficiência da modelagem em relação aos processos organizacionais, e seja bem entendida por todos os envolvidos ao longo do ciclo de vida;

2. Metodologia - Abordagem MBSE para o Guia de Desenvolvimento Integrado de GSE

O fluxo dos processos que será utilizado procura seguir as grandes fases de processos do Framework de Visão Total propostas por Loureiro (2010), conforme mostrado a seguir, bem como os diagramas da SysML que serão utilizados:

Tabela 1 - Fases do processos de análise e Abordagem de Modelagem

Fase	Subfase	Diagramas SysML	Abordagem de Modelagem
1. Análise de Missão	1.1 - Contexto / Conceito de operações	Diagrama de Definição de Blocos (BDD)	Definições de Tipos (Catálogo de Partes)
		Diagrama de Blocos Interno (IBD)	Descrição de Estruturas (blocos), componentes internos, relacionamentos e interfaces entre Estruturas.
	1.2 - Ciclo de Vida / Cenários do Ciclo de Vida	Diagrama de Atividades	Definição do Faseamento dos processos e subprocessos.
2. Análise de *stakeholders*	2.1 - Identificação de *stakeholders*	Diagrama de Definição de Blocos (BDD)	Atores (usados em Diagramas de Casos de Uso) São criados como "tipos" em um BDD
	2.2 - Preocupações de *stakeholders*	Diagramas de Caso de Uso	Descrição das preocupações dos *stakeholders* em diagramas de Casos de Uso, com o Sistema ou Organização de Interesse em diversos cenários
	2.3 - Requisitos de *stakeholders*	Diagramas de Requisitos	Requisitos de *stakeholders* e suas dependências são representados em Diagramas de Requisitos.
		Tabela de Requisitos	Caso não hajam dependências entre requisitos, pode ser usada apenas tabelas de Requisitos da SysML
	2.4 - Medidas de Efetividade (MoE)	Diagrama Paramétrico	MoE's são representadas como parâmetros em diagramas paramétricos, podendo ser diagramas "executáveis"

Fase	Subfase	Diagramas SysML	Abordagem de Modelagem
3. Análise de Requisitos	---	Diagramas de Requisitos	Requisitos de sistema e suas dependências são representados em diagramas de requisitos ou tabelas de requisitos da SysML
4. Análise Funcional	4.1- Identificação de fronteiras, interfaces e análise de ambiente	Diagrama de Blocos Interno (IBD)	Cenários e circunstâncias para produto e organização de interesse são descritos como blocos e suas interfaces com o ambiente
	4.2 - Definição de funções	Tabela Genérica	Tabelas com a lista de fluxos e eventos, MoEs e funções identificados (as)
	4.3 - Análise de escopo funcional	Diagrama de Blocos Interno (IBD)	Cenários e circunstâncias para produto e organização de interesse são descritos como blocos e suas interfaces com o ambiente
	4.4 - Interfaces funcionais	ASD (*1)	Geração de Gráfico N^2 a partir das interfaces definidas na análise de escopo funcional
	4.5 - Definição de estados e modos	Tabela genérica	Tabelas com a lista de funções, modos e estados identificados
	4.6 - Análise de comportamento funcional	Diagrama de máquina de estados	Refinamento dos estados e modos identificados para as funções
	4.7 - Estabelecimento da arquitetura funcional	Diagrama de casos de uso	Estabelecimento dos fluxos de controle, de dados e de material entre as funções e elementos funcionais do sistema. (*2)
5. Análise de Implementa-ção	5.1 - Estabelecimento de arquiteturas físicas	Diagrama de definição de blocos (BDD e interno IBD)	Utilização dos dois tipos de diagramas de blocos para propostas de arquiteturas físicas
	5.2 - Alocação de Funções	Matriz de Alocação	Através de relacionamentos do tipo "*Allocate*" e geração automática pela ferramenta de modelagem
	5.3 - Análises de *Trade-Off*	ASD	ASD

NOTAS *:

1. A representação de Interfaces funcionais via diagramas N^2 depende dos recursos disponibilizados pela ferramenta de modelagem e não da SysML em si, uma vez que esta não provê tais diagramas.
2. O Guia propõe o estabelecimento da arquitetura funcional via Diagramas de Fluxo de Dados (DFD's), que não fazem parte da SysML. A utilização do Diagrama de Casos de Uso em seu lugar implica em limitações de implementação que precisam ser melhor avaliadas ao longo da aplicação do guia.

3. Estudo de caso - análise do UMB SCOE

Conforme proposto por Vintecinque (2017) o UMB SCOE é um elemento do EGSE proposto para futuras missões do satélites da plataforma PMM, que permite a utilização tanto durante as fases de AIT quanto durante as fases de lançamento do Satélite, e visa

reduzir a quantidade e volume de equipamento a ser transportado para a base de lançamento. Nesse sentido, a missão do UMB SCOE pode ser declarada como sendo:

"Ser o único elemento de EGSE conectado ao satélite que permita operar, alimentar e monitorar seus sinais vitais durante as fases de AIT e lançamento" Vintecinque (2017)

Daqui por diante será apresentada a abordagem de MBSE e SysML na análise e modelagem dos processos de ciclo de vida para a obtenção do UMB SCOE.

3.1 Análise de missão

Partindo da declaração de missão, são analisados os possíveis conceitos de operação, conforme exemplificado na Figura 1, para uma das situações.

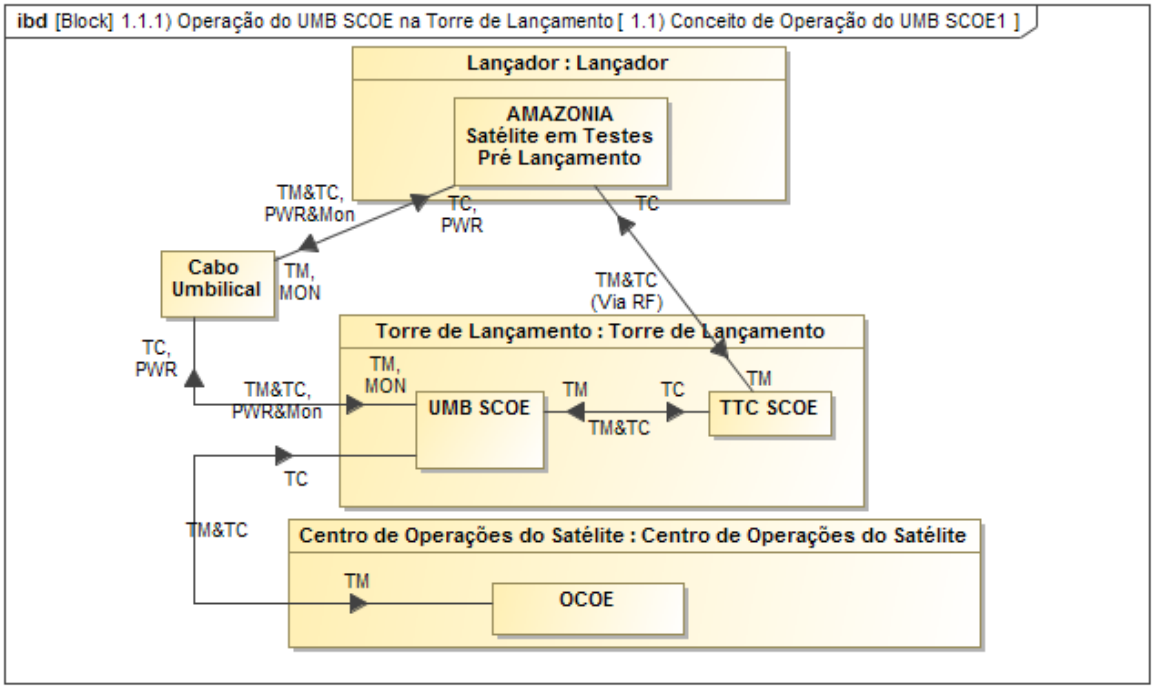

Figura 1. Exemplo de conceito de operação do UMB SCOE para enlace de telemetria e telecomando na torre de lançamento (*Internal Block Diagram*).

Os elementos e suas interações são descritos textualmente através dos campos adequados do modelo. Fluxos de energia, material ou informação, sob um ponto de vista ainda inicial são representados por elementos estereotipados como "*Information Item*", denotando as direções dos fluxos. Não importa no momento o conceito físico das interfaces.

3.2 Ciclo de Vida do UMB SCOE

Esta análise apenas declara e estabelece a sequência dos processos de ciclo de vida esperados, conforme exemplificado na Figura 2.

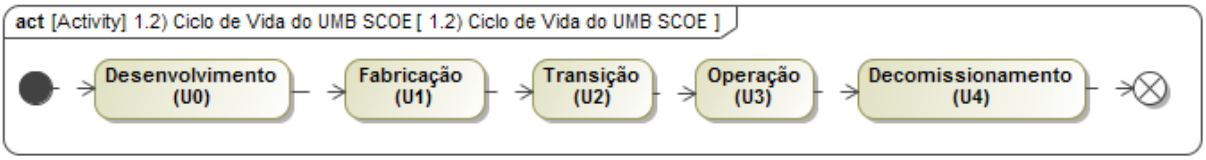

Figura 2. Exemplo de ciclo de vida do UMB SCOE (*Activity Diagram*).

3.3 Cenários do ciclo de vida do UMB SCOE

Os cenários do ciclo vida do UMB SCO são mostrados na Figura 3. Foi utilizado o diagrama de atividades, sendo que as entradas ou controles do antigo IDEF0 são substituídas por elementos do tipo "*Accept Event Action*" ou do tipo "*Time Event*" da SysML.

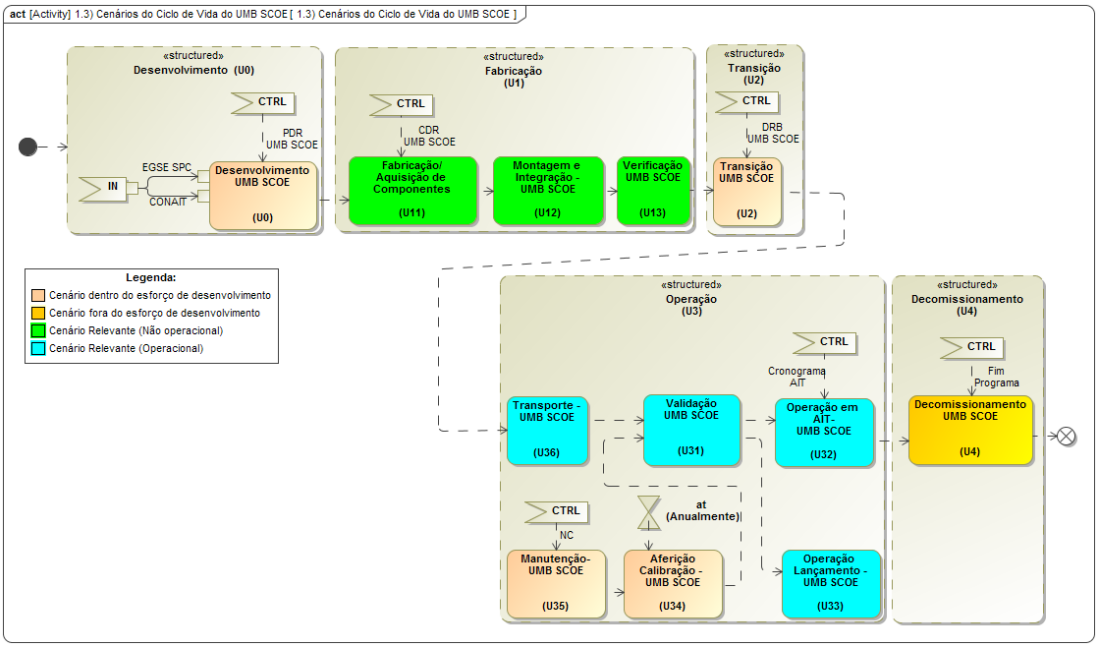

Figura 3. Exemplo dos Cenários do Ciclo de Vida do UMB SCOE (*Activity Diagram*).

Os cenários relevantes dentro do esforço de desenvolvimento serão analisados pela organização desenvolvedora do UMB SCOE.

3.4 Análise de *stakeholders*

3.4.1 Identificação de *stakeholders* do UMB SCOE

Para a Identificação de *stakeholders* de produto e de processo, serão utilizados diagramas de definição de blocos (BDD) com o uso de Atores estereotipados da SysML, conforme ilustra a Figura 4.

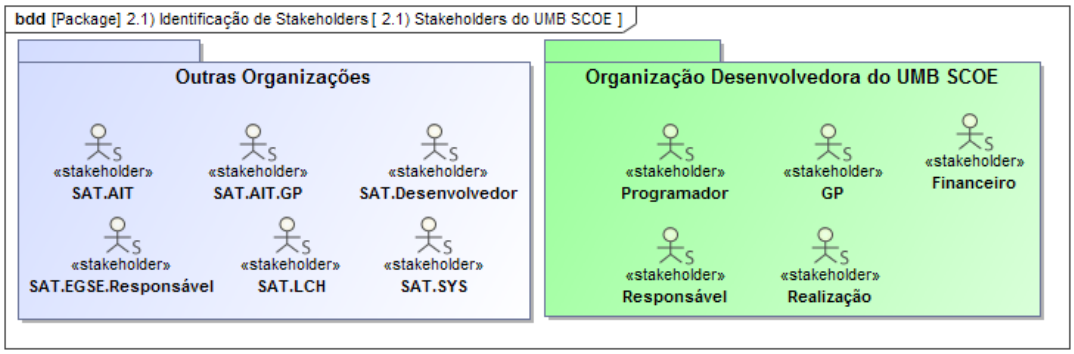

Figura 4. Exemplo de identificação de *stakeholders* do UMB SCOE (*Block Definition Diagram*).

3.4.2 Preocupações dos *stakeholders* do UMB SCOE

Preocupações de *stakeholders* de produto e processo levantados anteriormente são analisados com o Sistema ou Organização de Interesse em diversos cenários. O resultado é descrito através de diagramas de Casos de Uso estereotipados como "*Concern*". A Figura 5 ilustra um exemplo de como isso será feito.

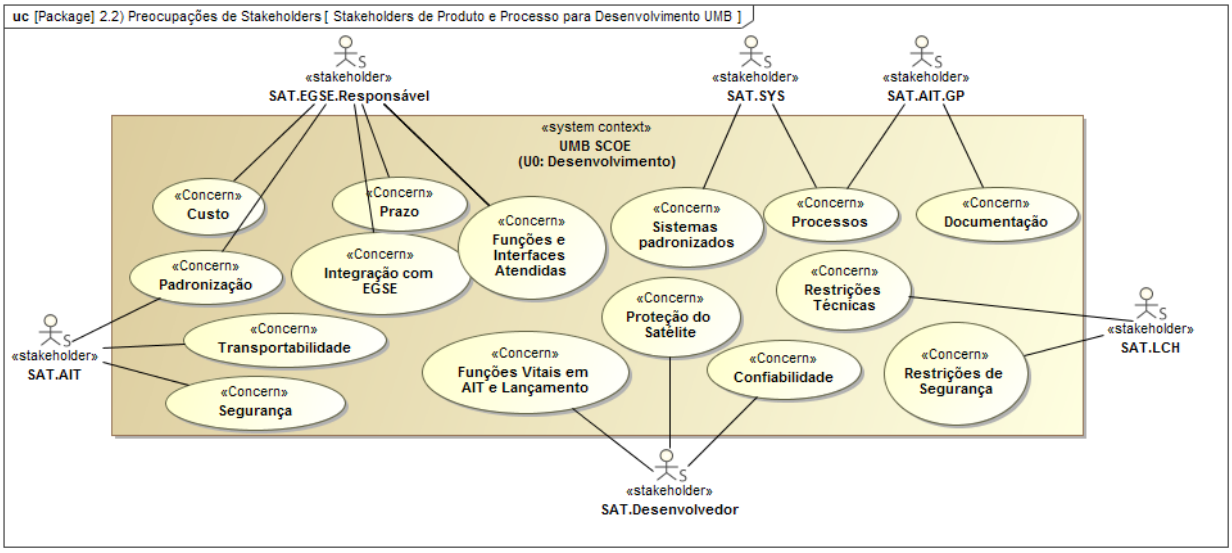

Figura 5. Exemplo de Preocupações de Stakeholders do UMB SCOE No cenário UMB SCOE em desenvolvimento (*Use Case Diagram*).

3.4.3 Requisitos de *stakeholders* do UMB SCOE

Os requisitos de *stakeholders* derivados das preocupações levantadas anteriormente são analisados e o resultado é descrito através de diagramas de requisitos ou tabela de requisitos, conforme exemplificado na Figura 6. As relações de dependência ou rastreabilidade entre os requisitos e as preocupações de *stakeholders* podem ser tornadas explícitas neste tipo de diagrama. Atributos adicionais podem ser acrescentados aos requisitos através de *Tagged Values* previstos na notação SysML.

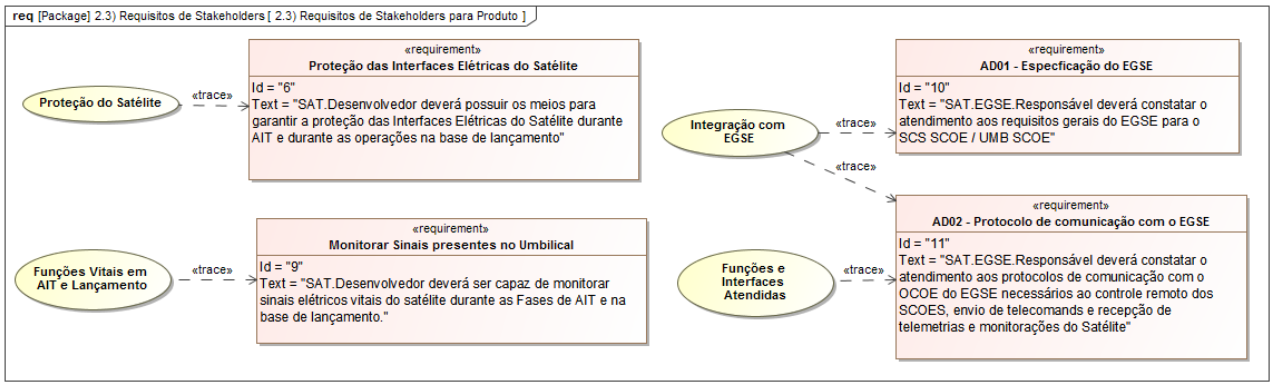

Figura 6. Exemplo de Requisitos de Stakeholders do UMB SCOE para Produto (*Requirements Diagram*).

3.4.4 Medidas de efetividade /performance do UMB SCOE

Pretende-se fazer uso dos diagramas paramétricos de SysML para a caracterização das Medidas de Efetividade (MoE) ou de Performance (MoP). Em Engenharia de Sistemas, deseja-se que as medidas de efetividade possam ser expressadas em forma de parâmetros numéricos que possam ser estimados ou mesmo simulados em ferramentas de apoio, integradas à ferramenta de modelagem. Porém essa questão ainda se encontra em aberto nesse momento do estudo, visto que existem inúmeras abordagens e não se definiu ainda qual a mais adequada ao desenvolvimento de EGSEs.

3.5 Análise de requisitos do UMB SCOE

A partir dos requisitos de *stakeholders* e MoEs/MoP definidas anteriormente, bem como os pressupostos que surgiram durante a análise das mesmas, são derivados os requisitos técnicos (seja de produto como de organização) mas, agora, do ponto de vista do UMB SCOE. De forma semelhante, a análise dos requisitos é descrita através de diagramas de Requisitos ou Tabela de Requisitos, conforme exemplificado na Figura 7.

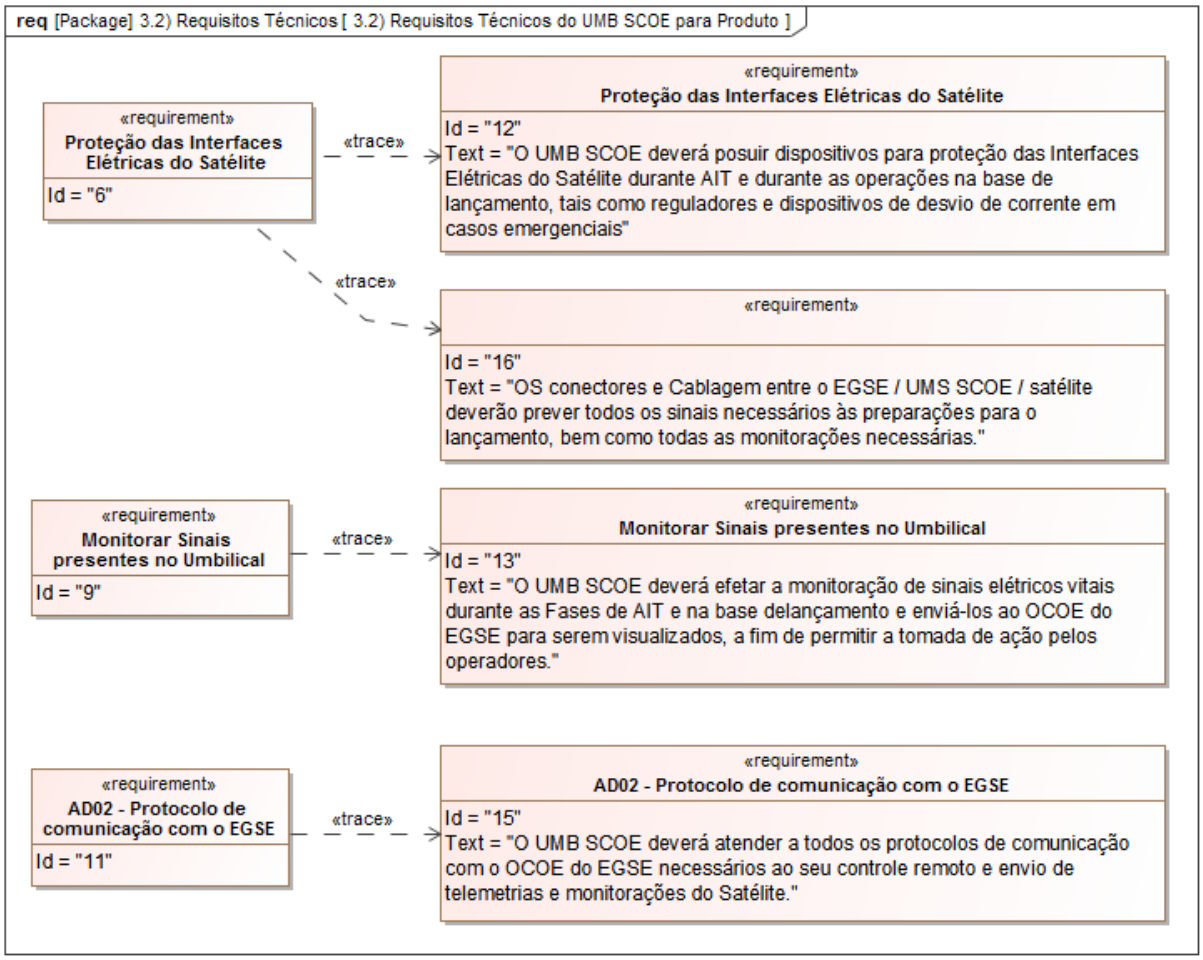

Figura 7. Exemplo de Requisitos Técnicos do UMB SCOE para Produto (*Requirements Diagram*).

3.6 Análise funcional do UMB SCOE

3.6.1 Identificação de fronteiras, interfaces e modelagem de ambiente UMB SCOE

Para identificar as fronteiras dos sistema são escolhidos os cenários relevantes dentro do ciclo de vida do produto e organização de interesse (Vintecinque, 2018).

Cenários e circunstâncias para produto e organização de interesse serão, então, descritos como blocos e suas interfaces com o ambiente pelo uso de diagrama de blocos interno (IBD), conforme ilustra a Figura 8.

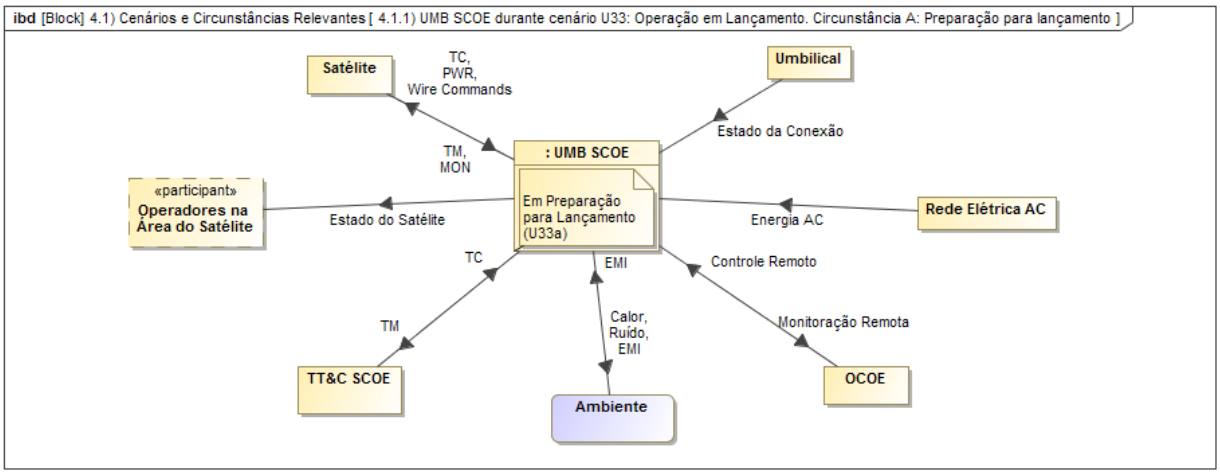

Figura 8. Exemplo de Modelagem do Ambiente do UMB SCOE durante cenário U33: Operação em Lançamento e suas circunstâncias (*Requirements Diagram*).

A partir da análise das circunstâncias é possível identificar os eventos e as respostas esperadas do sistema, bem como as medidas de efetividade associadas.

3.6.2 Definição de funções do UMB SCOE

Para cada cenário e circunstância identificados, são levantados todos os fluxos de energia, material e informação, e a partir deles são identificadas as funções externas do sistema, que podem ser mantidas em uma tabela genérica da SysML, exemplificada abaixo:

Tabela 2 - Exemplo de lista de definição de funções identificadas para o UMB SCOE (*generic table*)

#	Name	Documentation
1	F1: Prover Interface com o umbilical do satélite e o EGSE	UMB SCOE deve ser interface do EGSE com o conector umbilical do satélite durante AIT e lançamento
2	F2: Proteger o Satélite	Minimizar a propagação de falha e reduzir a gravidade dos efeitos de falha no satélite e nos outros elementos do EGSE
3	F3: Monitorar Sinais	Monitorar sinais vitais do satélite presentes no conector umbilical e sinais importantes ao estado do satélite incluindo sinais do EGSE.
4	F4: Comandar	Gerar pulso de comando ligar/desligar para o satélite via cabo umbilical, ou via dispositivos de simulação (ex.: simulação de separação)

3.6.3 Análise de escopo das do UMB SCOE

A análise do escopo de cada função ajuda a identificar as entradas e saídas e os limites de escopo das funções identificadas previamente, conforme mostra a Figura 9.

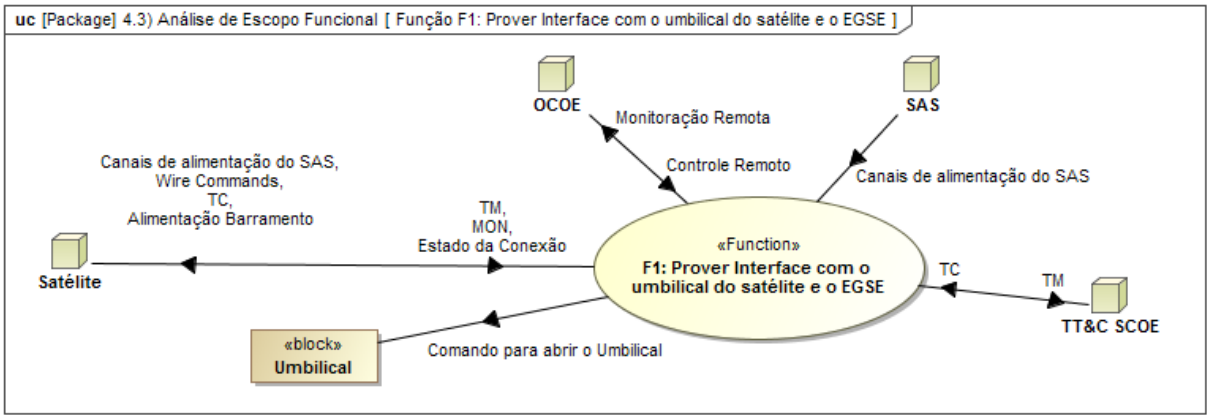

Figura 9. Exemplo de Análise de Escopo da Função F1, para o UMB SCOE (*Use Case Diagram*).

3.6.4 Identificação das interfaces funcionais do UMB SCOE

A partir da análise das entradas e saídas de cada função é possível estabelecer as interfaces entre as funções. Pretende-se chegar a uma solução em SysML semelhante ao gráfico N^2, que não faz parte desse padrão. É possível atingir-se este objetivo através do uso de diagramas de blocos interno (IBD), ou tabelas de inter-relação, porém nesse momento ainda não está definida a solução para a representação destas interfaces. O objetivo final é que não seja apenas uma solução "visual", mas que agregue valor à modelagem em termos de informação reutilizável.

3.6.5 Definição de Estados e Modos do UMB SCOE

A partir da identificação das funções, é possível identificar estados e modos de cada função externa ao UMB SCOE. A representação pode ser feita através de tabela genérica da SysML, conforme foi feito para o caso da identificação das funções efetuada anteriormente.

3.6.6 Análise de Comportamento Funcional do UMB SCOE

Após a identificação dos estados e modos de funcionamento, os mesmos são então refinados utilizando-se diagramas de máquinas de estados da SysML para cada função externa ao UMB SCOE. A

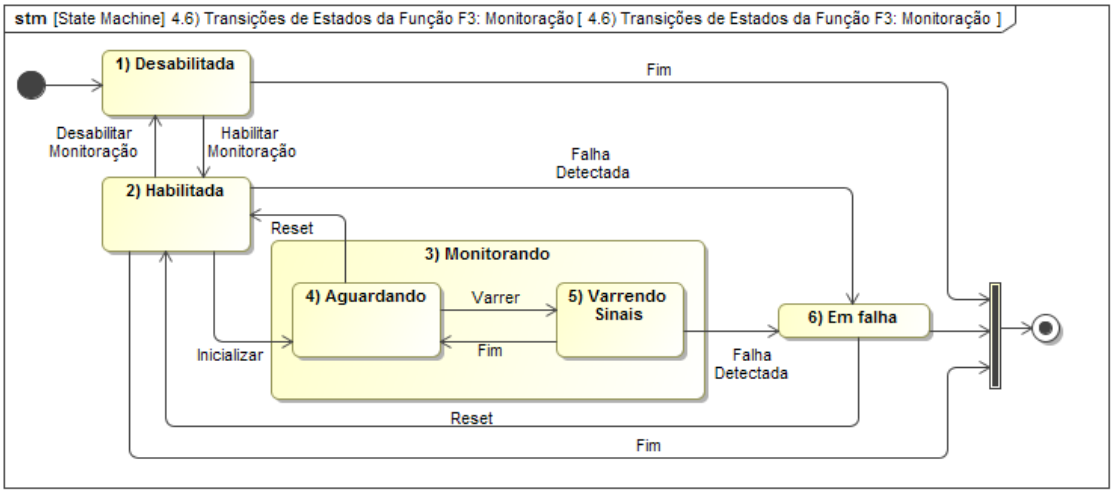

Figura 10. Exemplo de Análise de Estados das Funções do UMB SCOE (*State Machine Diagram*).

3.6.7 Estabelecimento da Arquitetura Funcional do UMB SCOE

Durante a análise de comportamento funcional, é possível identificar as possíveis falhas em cada um dos fluxos e com isso identificar funções preventivas e protetivas para as falhas. (Vintecinque, 2017). Após isto, será possível mapear como as funções interagem, e efetuar um particionamento funcional que fornecerá uma arquitetura funcional genérica "alocável", permitindo tomar decisões de arquitetura para produto e organização de interesse. No guia proposto por Vintecinque (2017) é utilizado diagrama DFD. Com a SysML, será utilizado o diagrama de casos de uso, com algumas restrições, utilização de estereótipos e pequenas diferenças de implementação, conforme ilustra a Figura 11.

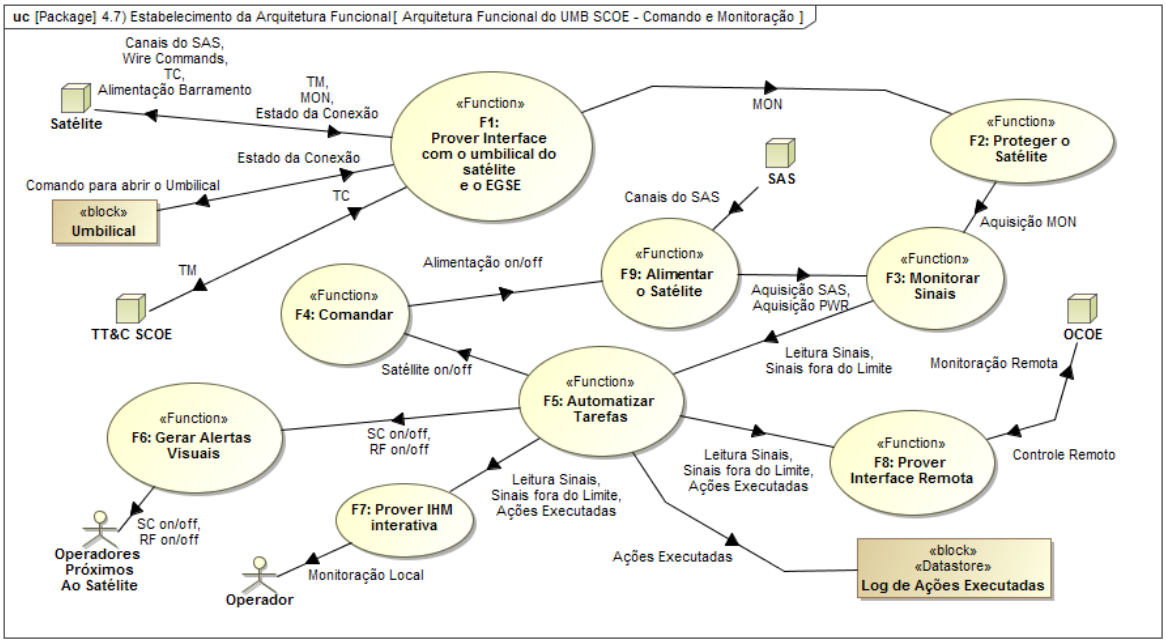

Figura 11. Exemplo de Arquitetura Funcional do UMB SCOE - Comando e Monitoração (*Use Case Diagram*).

3.8 Análise de Implementação

3.8.1 Estabelecimento da Arquitetura Física do UMB SCOE

Nessa etapa, a partir da arquitetura funcional, por meio dos dois tipos de diagramas de blocos da SysML (BDD e IBD), pode-se propor uma arquitetura genérica viável que procure satisfazer a tudo o que já foi levantado anteriormente. A Figura 12 representa essa etapa. No caso de uso do Guia de Vintecinque (2017) não chegou-se a propor a arquitetura física para o UMB SCOE, o que será feito a partir de agora.

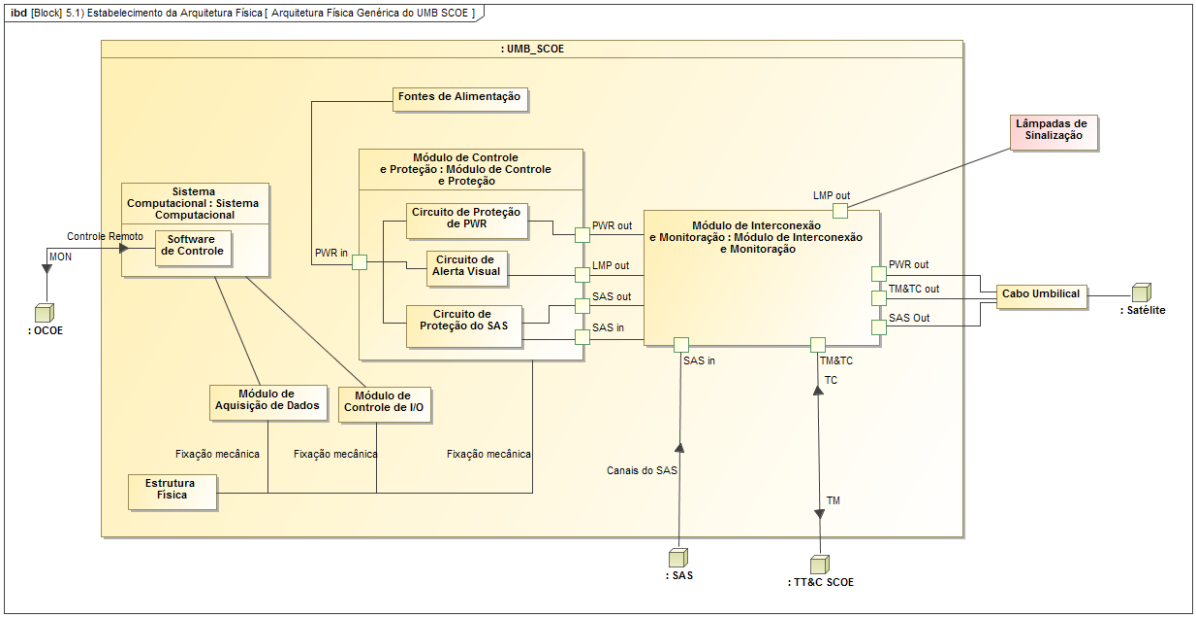

Figura 12. Exemplo de Arquitetura Física Genérica do UMB SCOE (*Use Case Diagram*).

3.8.2 Alocação de Funções da Arquitetura Física do UMB SCOE

A alocação de funções pode ser feita através de ligações do tipo "*allocate*" em SysML, em em diagramas de definição de blocos, que não precisam necessariamente ser documentados (podem ser provisórios). A partir dos relacionamentos feitos entre as funções e os blocos da arquitetura física, pode-se gerar a matriz de alocação diretamente da ferramenta de modelagem, conforme ilustrado pela Figura 13.

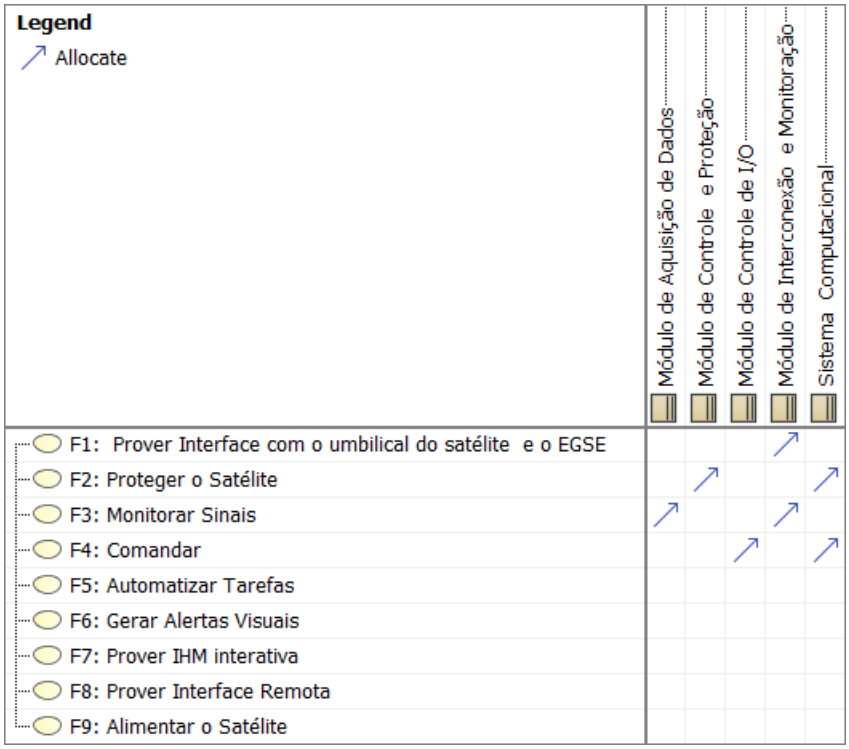

Figura 13. Exemplo de Alocação de Funções do UMB SCOE - (*Allocation Matrix*).

3.8.3) Análises de Trade-Off

Este tipo de análise ainda encontra-se em aberto no estudo em andamento. A princípio as análises de *Trade-Off* para "produto", podem ser feitas pela utilização de vários diagramas de definição de blocos com diferentes soluções práticas para a mesma arquitetura física (por exemplo, com estimativas e simulações para diversos fornecedores / soluções de aquisição de dados, sistemas de proteção, etc). O mais indicado nesse caso seria aproveitar as características dos diagramas paramétricos da SysML, bem como as integrações de ferramentas e simulação externas, a fim de se simular diversos cenários de custos, facilidade de implementação, disponibilidade de material, etc, porém isto está fora do esforço do estudo em andamento.

4. Conclusão

A utilização de MBSE, por meio da linguagem notacional SysML, apoiada pelo uso de ferramentas de modelagem adequadas permitem cobrir praticamente todo o ciclo de vida de engenharia de sistemas do produto e organizações, obviamente respeitando-se as devidas limitações da própria linguagem e da maturidade de sua utilização e implementações metodológicas que a utilizam.

Ainda Existem dificuldades na aplicação da notação de forma fluida, com relação às abordagens não MBSE utilizadas em frameworks de trabalho anteriores, mas as futuras versões da notação em si, como por exemplo a SysML V2, bem como a sua adoção pelos fornecedores de ferramentas de modelagem podem simplificar e adequar melhor a sua utilização de forma mais ampla.

Referências

Cameo Systems Modeler 19.0 LTR SP2 User Manual, 2019. 573 p. No Magic, Inc., a Dassault Systèmes company

Loureiro, G. A system engineering and concurrent engineering framework for the integrated development of complex products, 1999. 530 p. Thesis (PhD in Systems Engineering) - Loughborough University. Loughborough.

Venticinque, Guilherme. Engenharia de sistemas aplicada ao desenvolvimento do equipamento de suporte em terra - GSE, 2017. 400 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Crochet, Brad. A case study in the application of model-based systems engineering to laboratory research science, 2017. 72p. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, Te University of Southern Mississippi - Te Aquila Digital Community