



INICIATIVAS DE ADESÃO À MBSE NA ÁREA ESPACIAL

Ma. Ana Claudia de Paula Silva¹, Dr. Geilson Loureiro²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – S.J.Campos, SP – Brasil
Aluna de Doutorado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE

ana.claudia@inpe.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – S.J.Campos, SP – Brasil
Laboratório de Integração e Testes - LIT

Resumo. *A Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) é uma tendência mundial para projetar sistemas complexos. Este trabalho é uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de buscar parâmetros para entender os desafios para a transição da abordagem de Engenharia de Sistemas tradicional, baseada em documentos, para a MBSE na área espacial. Foram identificadas e discutidas iniciativas de adesão à MBSE em duas das principais agências espaciais, NASA e ESA, e em duas das principais indústrias envolvidas no ramo espacial, Thales Alenia Space e Airbus Defense and Space, além de iniciativas no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). A experiência desses grandes atores da área espacial mostra que essa não é uma transição fácil e rápida, porém os promissores benefícios da MBSE têm impulsionado muitas pesquisas e desenvolvimentos nessa área.*

Palavras-chave: Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos; Engenharia de Sistemas Espaciais; MBSE

1. Introdução

A Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos, ou *Model Based Systems Engineering* (MBSE), é uma tendência mundial para projetar sistemas complexos. Nessa abordagem, modelos são a principal fonte de informação e o principal meio de troca de informação entre os envolvidos no processo de engenharia, substituindo nessas funções os documentos utilizados na abordagem tradicional de engenharia de sistemas. Modelos são construídos para representar requisitos, estrutura e comportamento dos sistemas [Friedenthal et al. 2015].

Modelos podem ser criados em várias linguagens, sob a escolha da equipe. Uma das linguagens mais utilizadas atualmente é a SysML.

SysML é uma linguagem de modelagem gráfica de uso geral que pode ser base para diferentes métodos da MBSE [INCOSE 2015]. SysML suporta a especificação, análise, *design*, verificação e validação de sistemas [IBM 2012].

A MBSE traz benefícios como: melhoria na comunicação, redução no risco de desenvolvimento, qualidade aprimorada, aumento da produtividade e melhoria na transferência de conhecimento [Friedenthal et al. 2015].



A Engenharia de Sistemas de produtos espaciais é uma tarefa desafiadora. Considerando os potenciais benefícios da MBSE, produtos espaciais, por serem produtos complexos e com altos custos envolvidos em seu desenvolvimento, são bons candidatos para aplicação dessa abordagem.

Com base em pesquisas bibliográficas, neste trabalho, são apresentadas iniciativas de transição para MBSE em duas das principais agências espaciais, NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e ESA (*European Space Agency*), e em duas das principais indústrias envolvidas no ramo espacial, Thales Alenia Space e Airbus Defense and Space, além de iniciativas no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) a respeito da MBSE.

O objetivo desta pesquisa é buscar parâmetros para entender os desafios para a transição da abordagem de Engenharia de Sistemas tradicional, baseada em documentos, para a abordagem de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos na área espacial.

2. Metodologia

Esta é uma pesquisa bibliográfica. Por meio de pesquisa em artigos científicos de revistas e congressos e em publicações em sites e blogs oficiais das agências e indústrias abordadas neste artigo, foi realizado um estudo para identificação de iniciativas de transição da abordagem tradicional de Engenharia de Sistemas para a MBSE. As informações coletadas foram, então, comparadas e discutidas.

3. Resultados e Discussão

3.1. MBSE na NASA

A Figura 1 apresenta em uma linha do tempo as iniciativas da NASA relativas à MBSE.

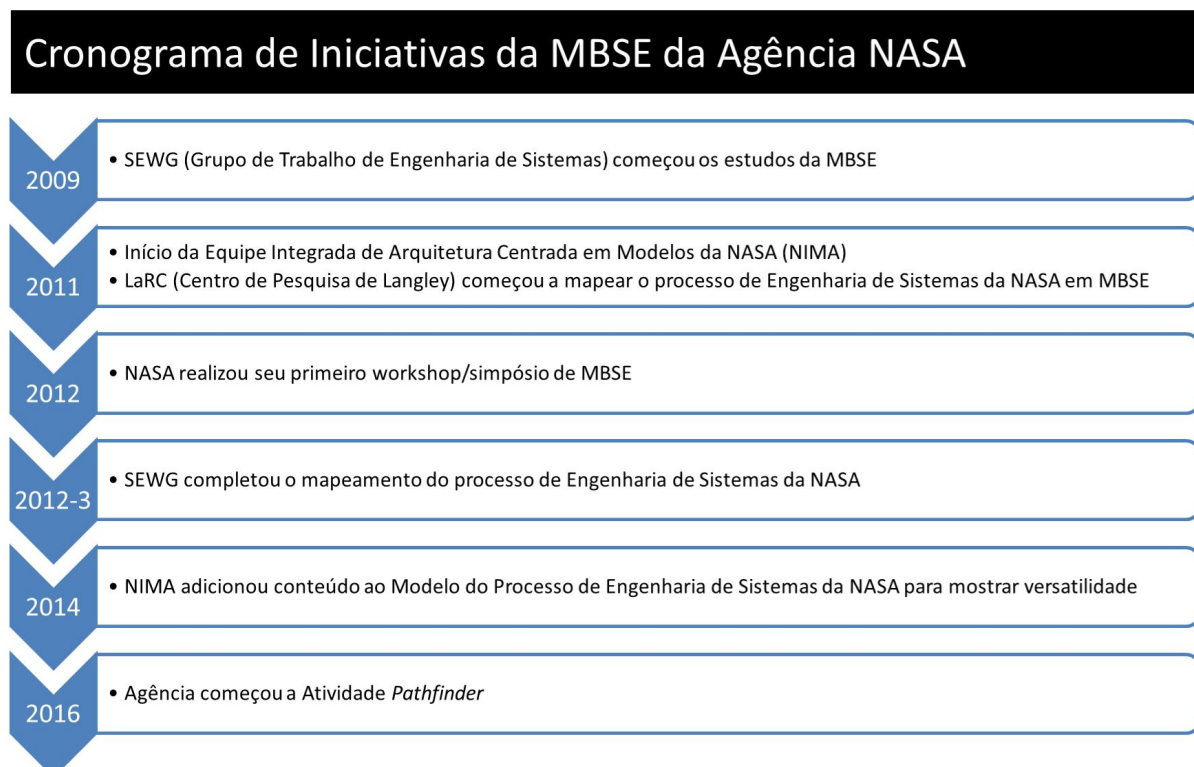


Figura 1. MBSE na NASA - Linha do tempo. Fonte: Traduzida de [Parrott 2016]



O avanço do uso da MBSE nas aplicações da NASA e o desejo de capturar lições aprendidas para guiar os próximos passos motivaram o estabelecimento, em 2016, de um estudo chamado MBSE Pathfinder [Weiland and Holladay 2017].

Conduzido pelo Centro de Engenharia e Segurança da NASA, esse estudo avaliou a facilidade com que a MBSE poderia ser implantada e aplicada em quatro áreas de interesse. Quatro equipes trabalhando em paralelo por oito meses demonstraram potenciais benefícios da utilização da MBSE para seus stakeholders e para a NASA como um todo [Holladay et al. 2019], como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Benefícios da MBSE demonstrados pelas equipes do Pathfinder 1 Fonte: Elaborada pela autora com as informações extraídas de [Holladay et al. 2019]

Área de interesse	Benefícios demonstrados
Uso e reuso da arquitetura da missão para uma campanha de missões humanas-para-Marte	A equipe demonstrou como os princípios de desenvolvimento ágil (semelhantes aos usados para engenharia de software) podem ser usados para criar modelos de sistema.
Fabricação aditiva para desenvolvimento de motores de foguetes.	A equipe gerou automaticamente requisitos e especificações de desempenho atualizados para permitir que os engenheiros rastreiem com mais facilidade as rápidas mudanças do sistema inerentes ao processo de fabricação aditiva.
Projeto de elemento de missão de um <i>Mars lander</i> (veículo para pousar em Marte).	A equipe gerou um subconjunto do pacote de revisão técnica para uma Revisão Preliminar de projeto.
Sombreamento do fluxo da missão de um projeto de foguete de sondagem.	A equipe modelou com sucesso as informações da Revisão de Projeto de uma missão anterior, descobrindo informações ausentes e inconsistências nos planos de teste.

A abordagem adotada para o MBSE Pathfinder forneceu uma série de lições aprendidas e construiu uma comunidade de usuários forte e colaborativa [Weiland and Holladay 2017].

Em 2017 foi estabelecida a parte 2 do MBSE Pathfinder com os objetivos de implementar as lições aprendidas na parte 1, focar no desenvolvimento de produtos de engenharia de sistemas ao longo do ciclo de vida, prover integração com várias ferramentas analíticas, como CAD, e demonstrar e comunicar valor para os projetos e Centros [Holladay et al. 2019].

Como na Parte 1 do MBSE Pathfinder, na Parte 2 os participantes também foram organizados em equipes virtuais representando vários centros da NASA. Dessa vez foram seis equipes em seis diferentes áreas de interesse. Quatro equipes continuaram o trabalho em relação ao ano anterior e duas novas equipes com dois novos tópicos foram acrescentadas: a equipe do ISRU (*in-situ resource utilization*) e Arquitetura de Habitat Integrada e a equipe do Adaptador de Carga SLS [Holladay et al. 2019].



Após essas duas experiências, a equipe de liderança do MBSE Pathfinder mudou o nome da iniciativa para Iniciativa de Infusão e Modernização de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelo (MIAMI), a fim de distinguir seu escopo expandido do trabalho do MBSE Pathfinder de 2016 e 2017. O foco mudou de “preparação para transição” para “implementação”. Vários programas e projetos na NASA passaram a aplicar a MBSE [Holladay et al. 2019].

[Holladay et al. 2019] apresenta uma figura (Figura 2) com um resumo do planejamento para implantação da MBSE na NASA de 2016 a 2020. Na parte superior da figura estão as *tag lines* para cada ano e na metade superior são mostradas breves descrições da abordagem de implementação. As áreas do MBSE Pathfinder, na seção inferior, indicam a estreita relação com as missões reais da NASA. O centro da figura destaca parcerias com outras organizações. A parceria MBMA (*Model-based Mission Assurance*) é realizada com o Escritório de Segurança e Garantia de Missão da NASA, e a parceira DoD e *Digital Engineering Strategy Tiger Team* são parcerias com o Departamento de Defesa. O marco em 2020 é uma implantação direcionada de infraestrutura, processos e ferramentas, comunidade de usuários e projetos piloto.

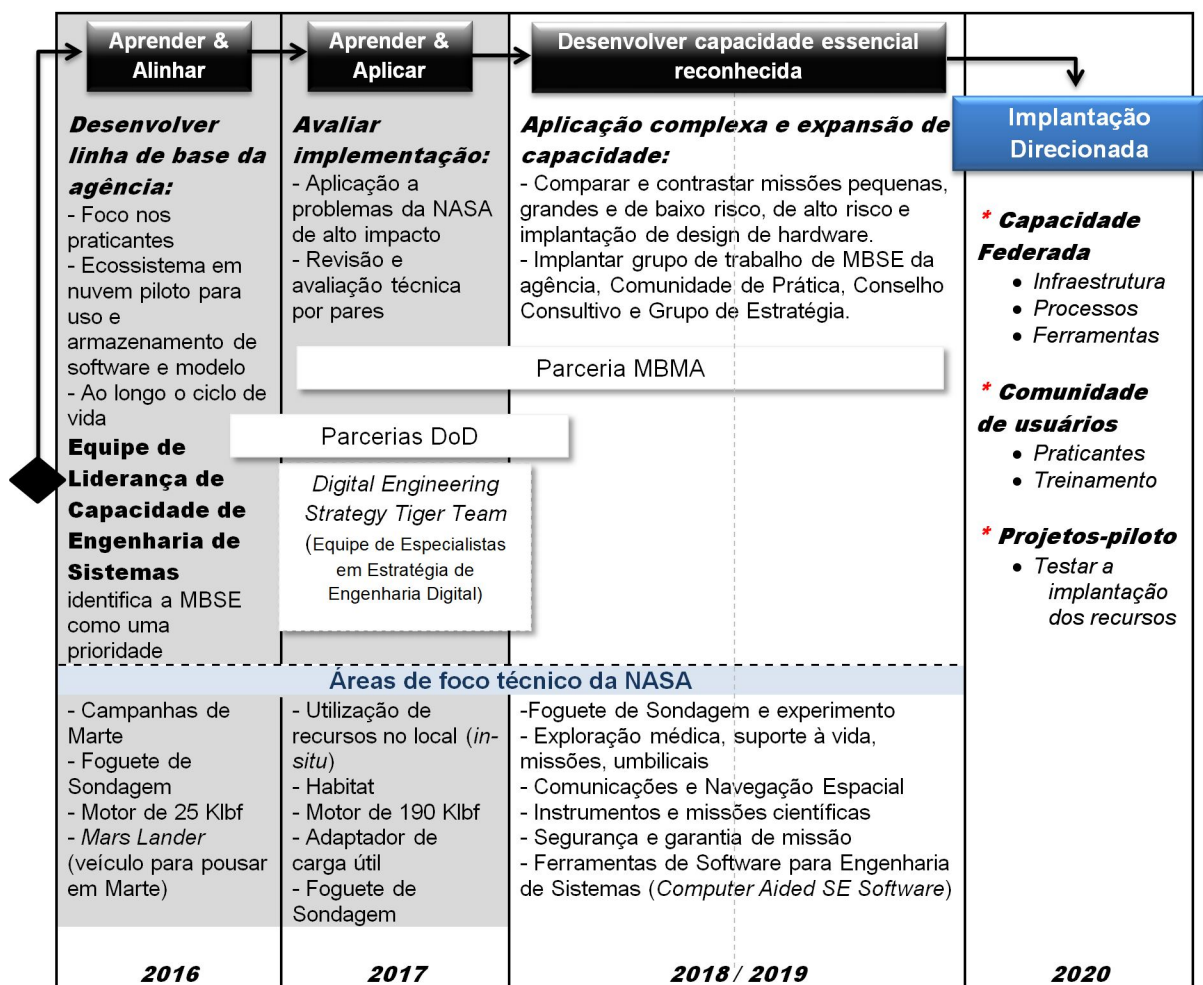


Figura 2. Resumo do Planejamento de Cinco Anos (2016 a 2020) da NASA para implantação da MBSE. Fonte: Traduzida de [Holladay et al. 2019]

3.2. MBSE na ESA

Na ESA a MBSE foi implementada como uma inovação dentro da missão, também inovadora, e.Deorbit, uma missão para remover detritos espaciais da órbita Sol-Síncrona entre 600 e 800km



de altitude. Considerada uma missão complexa envolvendo requisitos de robótica, orientação, navegação e controle, teve início em 2012, tendo um primeiro modelo, um modelo da arquitetura física, sido implementado durante a Pré-Fase A no CDF (*Concurrent Design Facility*) [WOLAHAN and BIESBROEK 2017], uma instalação de ponta onde especialistas de várias disciplinas aplicam métodos de engenharia simultânea ao projeto de futuras missões espaciais [ESA 2020].

Após o estudo de viabilidade interna, contratos industriais da Fase A foram firmados com três grandes Integradores de Sistemas (LSIs) europeus, Airbus Defense and Space, OHB e Thales Alenia Space. Como parte da Fase A, foi solicitado aos contratados usar MBSE para modelar as arquiteturas físicas e funcionais [Jessica 2017].

Após a conclusão bem-sucedida da Revisão Preliminar de Requisitos, foi recomendado estender o uso da MBSE também ao nível do sistema [Jessica 2017].

A Fase B1 começou em 2015 e terminou em 2017. Nessa fase foram feitos contratos com a Airbus e OHB, que foram incentivadas pela ESA a aplicar a MBSE sempre que possível. Cada contratado adotou diferentes ferramentas e metodologias para aplicação da MBSE, porém com os mesmos propósitos [Jessica 2017]:

- Analisar o problema e definir seus limites;
- Derivar e gerenciar os requisitos;
- Identificar os recursos/funções exigidos pelo sistema;
- Desenvolver a arquitetura funcional, lógica e física;
- Seguir os métodos de verificação/validação necessários;
- Iniciar simulações diretamente do modelo MBSE;
- Estabelecer uma troca de dados de “verdade única” no nível do sistema.

Esses foram os primeiros exemplos da ESA dos estudos da Fase B1, usando a MBSE, incluindo a arquitetura física da plataforma e a carga útil, juntamente com a arquitetura funcional e lógica da missão, com links diretos para algumas das ferramentas usadas para simulações [Jessica 2018].

3.3. MBSE na Thales Alenia Space

A Thales Alenia Space fornece soluções de alta tecnologia para telecomunicações, navegação, observação da Terra, gerenciamento ambiental, exploração, ciência e infraestrutura orbital [Thalesgroup 2020].

Em 2005 a Thales começou a investir na MBSE visando à melhoria do seu processo de engenharia. Investiu fortemente nos aspectos metodológicos e de ferramentas, tendo como parte dos resultados o método de desenvolvimento baseado em modelo chamado Arcadia e uma ferramenta de suporte a esse método, chamada Capella, que foi disponibilizada em 2014 em todas as unidades da Thales pelo mundo [Bonnet et al. 2016].

A solução Arcadia/Capella é inspirada nos conceitos da SysML, porém com meios de expressão reduzidos. Essa simplificação é possível devido ao seu escopo mais preciso. Arcadia/Capella não cobre todo o espectro das atividades de design, o foco está no projeto de arquitetura (justificação de componentes/interfaces por meio da análise funcional, avaliação não funcional antecipada da arquitetura e preparação das atividades de integração e validação), excluindo modelagem comportamental de baixo nível ou simulação [Bonnet et al. 2016] e [Eclipse 2017].

A simplificação ou especialização dos conceitos provenientes da SysML foi pensada visando uma curva de aprendizado facilitada [Eclipse 2017] que pudesse atingir os engenheiros de sistemas que não possuem experiência em engenharia de software, já que as origens da SysML na



orientação-a-objetos mostraram-se claramente um obstáculo para sua adoção pelos engenheiros de sistemas da Thales que não eram familiares com o mundo de desenvolvimento de software [Bonnet et al. 2016].

O objetivo final da Arcadia/Capella não é ter especialistas em modelagem, mas sim promover uma mudança cultural, direcionada para a MBSE, nas práticas dos engenheiros de sistemas [Bonnet et al. 2016] e [Eclipse 2017].

Podemos dizer que alguns conceitos da solução Arcádia/Capella são especializações de conceitos da SysML para melhor representar a realidade da Thales. Foi feita uma interpretação da especificação SysML de forma a prover os engenheiros de todos os meios de expressão que eles precisassem, porém evitando sobrecarrega-los com complexidade desnecessária, ajudando-os a seguir as metodologias da Thales e unificando a maneira como as arquiteturas de software e de sistemas são modelados na Thales [Calio et al. 2016].

O metamodelo da Capella se diferencia da SysML em vários conceitos, sendo as duas principais diferenças o gerenciamento da análise funcional e o gerenciamento de tipos e instâncias [Bonnet et al. 2016].

Quanto ao gerenciamento da análise funcional, [Bonnet et al. 2016] coloca que a análise funcional não é estritamente suportada pela SysML, já que ela não define os conceitos de “funções” e “hierarquia de funções”. E que apesar da abordagem orientada a função poder ser implementada na SysML por meio do diagrama de atividades e dos diagramas de Blocos e de Blocos Internos (a árvore funcional sendo capturada como uma hierarquia de blocos, com o fluxo de dados sendo representado como diagramas de Blocos Internos), não é uma opção que atenda aos requisitos de simplicidade do Arcadia.

Quanto ao gerenciamento de tipos e instâncias, o conceito de Partes da SysML fica oculto na solução Arcadia/Capella, onde cada componente é considerado como uma instância por padrão, permitindo uma modelagem simplificada [Bonnet et al. 2016].

Para ilustrar as diferenças entre Arcadia/Capella e SysML, a seguir é apresentada uma comparação entre os dois principais diagramas de estrutura da SysML e os diagramas oferecidos pela solução Arcadia/Capella [Eclipse 2017]. Uma comparação mais completa é apresentada por [Eclipse 2017].

3.3.1. Diagrama de Blocos SysML x Arcadia/Capella

Arcadia/Capella utiliza dois diagramas para representar o que a SysML representa no seu diagrama de Blocos:

- o Diagrama de Detalhamento de Componentes que mostra a hierarquia de componentes através de uma árvore gráfica; e
- o Diagrama de Interface de Componente que mostra o relacionamento de composição entre componentes por meio de contenção gráfica e relacionamentos entre componentes e interfaces através de portas. Nesse diagrama as propriedades do componente não são exibidas graficamente.

3.3.2. Diagrama de Blocos Internos SysML x Arcadia/Capella

O Diagrama de Blocos Internos da SysML captura a estrutura interna de um bloco em termos de propriedades e conectores entre propriedades.



Esse diagrama é dedicado a modelar a estrutura interna de um bloco. Um Bloco pode ser decomposto em Partes, que são instâncias de outros Blocos. Blocos são “definições” e Partes são instâncias dessas definições.

Um Bloco que define uma bicicleta, por exemplo, tem duas Partes: “roda dianteira” e “roda traseira”, que são definidas, ou tipificadas, pelo Bloco “roda”. A definição de “roda” pode ser reutilizada muitas vezes no sistema através do conceito de Parte.

Apesar desse paradigma bloco/parte também poder ser utilizado na solução Arcadia/Capella, por padrão Arcadia/Capella é configurado para uma modelagem controlada por instância, ou seja, componentes e funções são considerados por padrão como instâncias ou usos.

Essa abordagem baseou-se no retorno proveniente da experiência dos engenheiros de sistemas com a modelagem. Eles não se mostraram necessariamente confortáveis com o fluxo de trabalho de criação de elementos de definição primeiro (“blocos” ou “componentes”) para depois referenciá-los a partir de elementos de uso específico (“partes”). Além disso, distinguir as diferentes ocorrências de cada elemento e fornecer propriedades ou valores para cada ocorrência é fundamental para realizar análises não funcionais, como análise de segurança, que fazem parte do projeto arquitetônico da Capella.

3.4. MBSE na Airbus Defence and Space

Segundo [Sharples 2018], a Airbus Defense and Space tem uma rigorosa abordagem de MBSE que é utilizada em todos os seus projetos. E, segundo [Gregory et al. 2020], a Airbus liderou vários projetos buscando desenvolver técnicas de MBSE e aplicá-las a projetos do mundo real, sendo o mais significativo deles o desenvolvimento do modelo em SysML da missão e.Deorbit da ESA.

Em 2012 a Airbus sentiu a necessidade de uma ferramenta para dar suporte aos novos métodos baseados nos princípios da MBSE. Anteriormente, contava com ferramentas COTS disponíveis, que considerava bem estabelecidas e com bons resultados, porém complexas o suficiente para limitar sua implantação. A nova ferramenta deveria ser essencialmente flexível o suficiente para se adaptar ao vocabulário e aos conceitos da Engenharia de Sistemas da Airbus e para se ajustar facilmente às necessidades em evolução, à medida que os processos e métodos amadureciam gradualmente [Magnet 2016].

Para suprir essa necessidade, a Airbus desenvolveu e implantou uma ferramenta customizada, baseada na ferramenta de código aberto Eclipse Papyrus [Eclipse 2020] que fornece, entre outras coisas, suporte completo a SysML [Magnet 2016].

A Papyrus ofereceu a capacidade de criar rapidamente uma ferramenta personalizada que restringe alguns dos recursos gerais da SysML permitindo que os usuários trabalhem apenas com conceitos específicos do domínio. A linguagem SysML foi, portanto, personalizada para um formato mais facilmente compreensível pelos projetistas [Magnet 2016].

A ferramenta desenvolvida, chamada FAST, dá suporte às análises funcional e operacional, utilizando os diagramas de Atividades e de Blocos Internos da SysML fornecidos nativamente pela Papyrus. FAST permite a definição das funções necessárias para operar o sistema, bem como sua decomposição funcional e suas interfaces [Magnet 2016].

A extensibilidade geral da Papyrus também permitiu a inclusão de outras ferramentas, como verificações internas de consistência e geração automática de documentos [Magnet 2016].



3.5. MBSE no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

No INPE, uma metodologia de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos foi adotada na missão EQUARS (*Equatorial Atmosphere Research Satellite*) em desenvolvimento. EQUARS é uma missão que tem como objetivo “*promover o avanço do conhecimento científico em Aeronomia Equatorial, com ênfase no entendimento dos fenômenos físicos que perturbam o comportamento médio do plasma ionosférico*” [Hoffmann et al. 2018].

Além da aplicação prática na missão EQUARS, vários projetos desenvolvidos no INPE foram e estão sendo utilizados como base para pesquisas envolvendo a MBSE. Algumas dessas pesquisas são citadas a seguir:

- [Coicev and Loureiro 2019] apresenta 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 com o objetivo de 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 EGSEs.
- [Franco 2018] propõe um modelo de referência da interface entre o satélite e o veículo lançador, em linguagem SysML, para servir como base a futuros esforços na utilização da MBSE para definição e controle desta interface.
- [Aquino et al. 2018] realizou um projeto de Iniciação Científica que tem como objetivo a implementação da MBSE para o nano satélite AESP-14, primeira plataforma CubeSat brasileira, desenvolvido pelo ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica) com apoio do INPE.
- [Silva and Loureiro 2018], usando como exemplo o processo de Montagem, Integração e Testes (AIT) de satélites, fez uma análise da possível colaboração entre as atividades de modelagem da MBSE e as atividades de desenvolvimento de Sistemas de Informação para apoiar os processos do ciclo de vida de um produto espacial.
- [Burger 2018] apresenta em sua tese de doutorado um framework conceitual que considera o uso da MBSE para fornecer entradas para o planejamento da Montagem, Integração e Testes (AIT) de satélites.

3.6. Discussão

Esforços das grandes agências e indústrias da área espacial para implementar a MBSE sinalizam a confiança em que seus benefícios são promissores. Porém as experiências da NASA, ESA, Airbus e Thales Alenia Space mostram também que essa não é uma transição fácil e rápida. É um projeto de anos que envolve esforços de convencimento e adaptação.

A escolha da metodologia e das ferramentas para dar suporte à metodologia escolhida mostrou-se bem particular para cada organização. Embora existam ferramentas comerciais, o desenvolvimento customizado que busca preservar a cultura de engenharia de cada organização parece ser uma tendência. Mesmo a consagrada linguagem SysML ainda não representa um ponto de intersecção entre os engenheiros das diversas organizações. Nas experiências da Airbus e Thales Alenia, por exemplo, podemos perceber que optaram por desenvolvimento de ferramentas customizadas que adaptaram a linguagem SysML para seus processos de engenharia. Ao menos no caso da Thales Alenia, ficou claro que a opção pela customização se deu como uma forma de diminuir a distância entre a realidade da formação de seus engenheiros e a nova abordagem proposta. Esse é um ponto a ser pensado, se o mais adequado seria mesmo uma customização da linguagem, o que garantiu uma adesão mais suave e rápida, ou se o mais adequado seria que



os engenheiros aderissem à visão orientada a objetos que é a base da SysML, o que garantiria a longo prazo uma unicidade entre os modelos das várias organizações.

Percebemos que a customização aconteceu de forma distinta, cada organização de acordo com sua realidade prática. Visto que um projeto espacial normalmente é feito em parceria com outras organizações, o uso de diversas linguagens e ferramentas em diferentes fases ou em diferentes subsistemas, a depender da organização responsável pela etapa/subsistema, pode ser um fator que dificulte a efetiva migração para MBSE de todo o ciclo de vida de um produto espacial de forma integrada.

A despeito disso e de todas as dificuldades e desafios dessa transição para MBSE, os promissores benefícios têm impulsionado uma série de pesquisas e desenvolvimentos nessa área.

4. Conclusão

Este trabalho apresentou iniciativas de alguns dos principais atores da Engenharia de Sistemas Espaciais no que diz respeito à migração de uma abordagem tradicional de engenharia de sistemas, baseada em documentos, para a abordagem baseada em modelos, conhecida como MBSE (*Model Based Systems Engineering*). A customização de metodologias e ferramentas, para aproximá-las da realidade de cada organização, parece uma tendência que garante um caminho mais suave de transição, porém pode ser um dificultador para a adesão à MBSE de forma integrada em todo ciclo de vida de um projeto espacial, que normalmente envolve desenvolvimento em parceria com várias organizações. Embora a transição para MBSE na área espacial seja desafiadora, os benefícios promissores têm impulsionado pesquisas e desenvolvimentos na área.

Referências

- Aquino, E. R., Loureiro, G., and Burger, E. E. (2018). Mbse para engenharia de sistema de cubesats. In *SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO (SICINPE)*, São José dos Campos, SP.
- Bonnet, S., Voirin, J., Exertier, D., and Normand, V. (2016). Not (strictly) relying on sysml for mbse: Language, tooling and development perspectives: The arcadia/capella rationale. In *2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, pages 1–6.
- Burger, E. E. (2018). *A conceptual MBSE framework for satellite AIT planning*. Doutorado em engenharia e gerenciamento de sistemas espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Calio, E., Giorgio, F. D., and Pasquinelli, M. (2016). Deploying model-based systems engineering in thales alenia space italia. In *CIISE - 2nd INCOSE Italia Conference on Systems Engineering*, pages 112–118, Turin, Italy.
- Coicev, M. and Loureiro, G. (2019). Mbse i&’ sysml applied to the development of egse for sattelites assembly, integration and testing (ait) - a practical case. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 6:391–397.
- Eclipse (2017?). Equivalences and differences between sysml and arcadia/capella. Acesso em: 29 mai. 2020.
- Eclipse (2020?). Eclipse papyrus. Acesso em: 29 mai. 2020.
- ESA (2020). What is the cdf? Acesso em: 29 mai. 2020.



- Franco, R. (2018). *Um modelo de referência MBSE da interface entre satélite e um veículo lançador escolhido usando AHP*. Mestrado em engenharia e gerenciamento de sistemas espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Friedenthal, S., Moore, A., and Steiner, R. (2015). *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*. Elsevier, 3th edition.
- Gregory, J., Berthoud, L., Tryfonas, T., Rossignol, A., and Faure, L. (2020). The long and winding road: Mbse adoption for functional avionics of spacecraft. *Journal of Systems and Software*, 160. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121219302274>. Acesso em: 29 mai. 2020.
- Hoffmann, L. T., Branco, M. S. A., Branco, R. H. F., Gobbi, D., Silva, C. M. Z., and Perondi, L. F. (2018). A engenharia de sistemas espaciais da missão equars. In *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA ESPACIAL E AERONOMIA*, Santa Maria, RS.
- Holladay, J. B., Knizhnik, J., Weiland, K. J., Stein, A., Sanders, T., and Schwindt, P. (2019). Mbse infusion and modernization initiative (miami): “hot” benefits for real nasa applications. In *2019 IEEE Aerospace Conference*, pages 1–14.
- IBM (2012). *Essentials of IBM Rational Rhapsody for Systems Engineers v.7.6.1 - Student Manual vol 1*.
- INCOSE (2015). *Incose Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. Wiley, 4th edition.
- Jessica (2017). Applying mbse to a space mission. Acesso em: 29 mai. 2020.
- Jessica (2018). From active debris removal to in-orbit servicing: The legacy of e.deorbit. Acesso em: 29 mai. 2020.
- Magnet, A. (2016). Designing freedom of flight. Acesso em: 29 mai. 2020.
- Parrott, E. (2016). The value of successful mbse adoption. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170001634.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2020.
- Sharples, R. (2018). *Continuous Model Based System Engineering (MBSE) Improvement via Human System Integration and Customer Change*, pages 49–54.
- Silva, A. C. d. P. and Loureiro, G. (2018). The relationship between the model based systems engineering models and information systems to support space products lifecycle processes. In *INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS*, Bremen, Germany.
- Thalesgroup (2020). Space for life. Acesso em: 29 mai. 2020.
- Weiland, K. J. and Holladay, J. (2017). Model-based systems engineering pathfinder: Informing the next steps. *INCOSE International Symposium*, 27(1):1594–1608. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20180006165.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2020.
- WOLAHAN, A. and BIESBROEK, R. (2017). Model based systems engineering applied to esa’s e.deorbit mission. In *68th International Astronautical Congress 2017*, Adelaide, Australia.