



Atividades de V&V em projeto de satélite *CubeSat* desenvolvido com métodos ágeis

Lidia Hissae Shibuya Sato^{1,2}, Emerson Henrique Silva de Oliveira², Jonas Bianchini Fulindi², Luís Eduardo Vergueiro Loures da Costa², Maria de Fátima Mattiello-Francisco¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Doutorado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

²Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil

shibuya@ita.br

Resumo. *O presente trabalho apresenta as atividades de Verificação e Validação adotadas no projeto de um satélite padrão CubeSat para monitoramento do clima espacial. Metodologias ágeis estão sendo empregadas no desenvolvimento do satélite denominado SPORT (The Scintillation Prediction Observations Research Task) demandando adequações dos processos de V&V preconizados nas normas espaciais para maior aderência das atividades de V&V à proposta ágil de desenvolvimento. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica com o estado da prática em termos de atividades de V&V em CubeSats bem como um estudo dos padrões internacionais. Demonstra-se nesse trabalho as atividades de V&V executadas em dois momentos do projeto e os principais resultados obtidos até o presente momento.*

Palavras-chave: *CubeSat, Métodos Ágeis, Verificação e Validação.*

1. Introdução

Desde o lançamento do padrão *CubeSat*, nos idos de 2000, uma nova gama de aplicações vem sendo explorada que emprega estes artefatos espaciais, seja ele em universidades, centros de pesquisa ou para exploração comercial de serviços utilizando satélites. [Villela et al. 2019] apresenta em seu artigo uma revisita aos últimos 1000 satélites lançados até 2018. Neste artigo pode-se identificar que os *CubeSats* tornaram o acesso ao espaço mais democrático, no sentido que diversos países se tornaram capazes de explorar missões espaciais.

Nesse contexto, uma grande preocupação é o fato de que estes pequenos artefatos uma vez lançados, podem apresentar ainda um número elevado de falhas como apresentado por [Startwout 2016], onde o autor presume que uma das diferenças entre iniciantes (entusiastas, universidades e centros de pesquisa, por exemplo) e tradicionais desenvolvedores de missões espaciais é a falta de boas práticas em projeto, montagem e testes, que incluem os processos de verificação. Na tentativa de fazer projetos “rápidos, bons e baratos” utilizando tecnologias de *CubeSat* não se deve abrir mão de processos bem definidos e compreensivos em como demonstrado por [Forsberg 1999].



Para aumentar a chance de sucesso de uma missão um dos processos da engenharia de sistemas muito importante é o de Verificação e Validação (V&V). Este processo é bem estabelecido em normas e padrões internacionais, como NASA [NASA 2013] e ECSS [ECSS 2009], usualmente aplicados no setor espacial. Nestas normas, atividades de V&V com o emprego de técnicas e métodos específicos são associadas às etapas do ciclo de vida da missão espacial. Essas normas são tradicionalmente seguidas pelas grandes agências espaciais e institutos de pesquisa espaciais no desenvolvimento de satélites de grande porte. Entretanto, em satélites que adotam soluções comerciais (COTS – *Commercial of the shelf*), como o padrão *CubeSat*, por vezes se mostram incompatível com o ciclo de projeto curto e de baixo custo.

Em projetos de *CubeSats* o que se tem visto em termos de V&V são iniciativas que vão desde *tayloring* de padrões internacionais como apresentando em [Tiseo et al. 2019], verificação por *Hardware-in-the-loop* (HIL) como apresentado por [Corpino e Stesina 2014], até iniciativas que utilizam engenharia de sistemas baseada em modelos [Kaslow e Madni 2017]. O trabalho de [Batista et al. 2019] demonstra o uso de um framework de injeção de falha em canal de comunicação com o propósito de apoiar a verificação de requisitos de robustez de subsistemas comunicantes a bordo de um *Cubesat*.

Projetos de *CubeSats* são conhecidos por permitirem entrega de um produto em um tempo menor a custo reduzido, parcialmente impulsionadas pelo uso de componentes comerciais e padronização da estrutura do satélite e suas interfaces. Essas características fazem com que o uso de métodos ágeis seja um atrativo para o desenvolvimento destes satélites. [Shibuya et al. 2020] apresenta o desenvolvimento de projetos de *CubeSats* utilizando abordagens ágeis na missão SPORT [Spann et al. 2017]. Um dos fundamentos de se utilizar abordagens ágeis está no fato que intrinsecamente métodos ágeis aproximam desenvolvedores e *stakeholders* e, naturalmente, implementam um processo de verificação ao final de cada iteração do projeto na entrega do produto.

O presente artigo tem por objetivo discutir o papel fundamental das atividades de V&V realizadas no projeto SPORT. A missão SPORT é um projeto de cooperação binacional entre Brasil e Estados Unidos para monitorar o clima espacial, onde a parte brasileira é executada pelos Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), responsável pelo desenvolvimento da plataforma e integração das cargas úteis; e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) responsável por prover a infraestrutura para o processo de Montagem, Integração e Testes do modelo de voo e por operar o satélite em órbita. .

2. Metodologia

O processo de Verificação e Validação consiste em procedimentos independentes que são usados em conjunto para se assegurar que um produto, serviço ou sistema atende aos requisitos e especificações dos usuários e que estes cumprem sua finalidade. De acordo com as normas NASA e ECSS o termo Verificação está associado ao atendimento de requisitos e especificações e o termo Validação está associado ao atendimento as expectativas das partes interessadas (muito conhecidos como *stakeholders*). Os termos Verificação e Validação às vezes são precedidos por "independente", indicando que a Verificação e Validação devem ou foram realizadas por uma terceira parte.



2.1 As atividades de V&V segundo as normas NASA e ECSS

As atividades de V&V são bem definidas nos padrões NASA e ECSS, desde o planejamento até a conformidade dos resultados. Normalmente as atividades de V&V do produto ocorrem ao longo da fase de fabricação dentro ciclo de vida de uma missão espacial. Fazendo uma comparação da abordagem destas duas normas, temos as atividades de V&V bem definidas, assim como suas entradas e saídas. A Tabela 1 sumariza as atividades a serem executadas de acordo com esses padrões. A Tabela 2 e Tabela 3 mostram respectivamente as entradas e saídas esperadas.

Tabela 1. Atividades do Processo de V&V segundo NASA e ECSS

NASA	ECSS
Preparar para conduzir a verificação	Atribuir responsabilidade e executar verificação
Executar verificação	Definir requisitos para preparação e execução dos testes
Analisar resultados da verificação	Analisar não-conformidades
Preparar relatórios de verificação	Verificar resultados
Capturar produtos de trabalho gerados durante as atividades de verificação	

Tabela 2. Entradas para o processo de V&V segundo NASA e ECSS

NASA	ECSS
Produto a ser verificado	Abordagem de verificação
Baseline dos requisitos	Métodos de verificação
Plano de verificação do produto	Níveis e estágios de verificação,
Ferramentas de verificação	Descrição dos modelos, Ferramentas de verificação

Tabela 3. Saídas para o processo de V&V segundo NASA e ECSS

NASA	ECSS
Produto final verificado	Controle de verificação
Resultados da verificação do produto	Banco de dados de verificação
Relatórios de verificação	Fechamento da verificação
Produtos gerados pela verificação	Repetição da verificação



2.2 Atividades de V&V propostas utilizando métodos ágeis

Como apresentado em [Shibuya et al. 2020] o projeto SPORT vem sendo desenvolvido utilizando métodos ágeis. Isso significa que o desenvolvimento do projeto ocorre em *sprints* (ou *loops* de projeto) onde ao final de cada *sprint* um entregável de valor ao *stakeholder* é entregue.

Essas entregas ocorrem desde as fases iniciais do projeto. Para se assegurar que os produtos finais estão de acordo com as expectativas das partes interessadas, para aquele grau de maturidade do projeto, iterações com as partes interessadas e os desenvolvedores acontecem com frequência e são acompanhadas pelo processo de V&V.

Desta forma, as atividades de V&V propostas se iniciam em fases anteriores à Revisão Crítica de Projeto. A Figura 1 apresenta a atividade de verificação (em azul) estendida na proposta com métodos ágeis em comparação à atividade de verificação preconizada nas normas, com o uso dos métodos tradicionais.

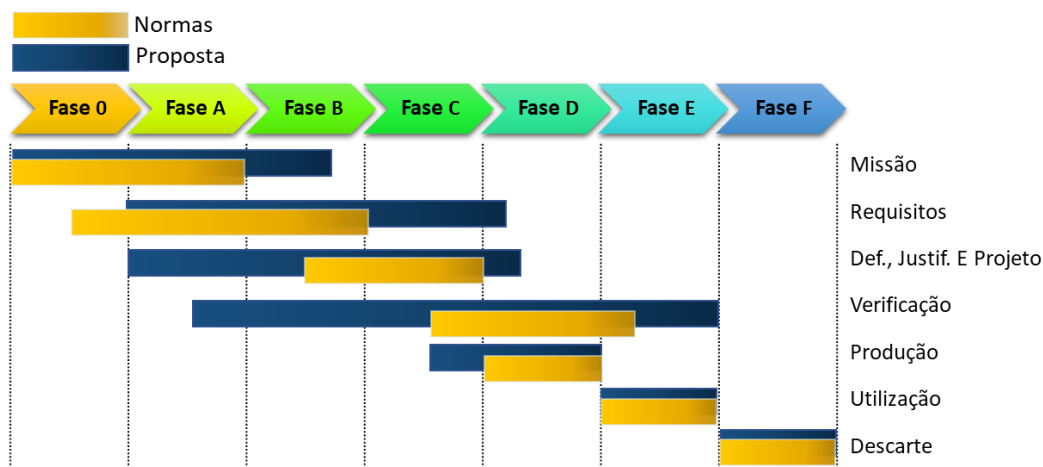


Figura 1. Atividades de Engenharia de Sistemas de acordo com o ciclo de vida de uma missão espacial [Fonte: Autor, 2020]

Ao longo de cada *sprint*, um conjunto de atividades relacionadas a V&V são executadas, como mostra a Tabela 4. Na Tabela 5 são apresentados as entradas necessárias para execução dos processos de Verificação e na Tabela 6 são apresentadas as saídas (ou resultados) do processo de verificação) aplicados a esta proposta.

Tabela 4. Atividades de V&V propostas utilizando métodos ágeis

Atividades de V&V
Definição dos requisitos a serem verificados (relacionado ao entregável do <i>sprint</i>)
Definição dos critérios de sucesso
Definição dos métodos de verificação
Elaboração dos procedimentos de verificação
Execução da verificação
Análise dos resultados
Elaboração de documentação
Registro das lições aprendidas



Tabela 5. Entradas para o processo de V&V proposto utilizando métodos ágeis

Entradas para o processo de V&V
Produto a ser verificado
Procedimentos de verificação, incluindo os requisitos e critérios de sucesso
Equipamentos de suporte em solo para verificação

Tabela 6. Saídas para o processo de V&V proposto utilizando métodos ágeis

Saídas para o processo de V&V
Produto verificado
Relatório de resultados do produto verificado
Formulário de verificação (<i>Verification Close-out</i>)
Lições aprendidas

O projeto SPORT, por ser um projeto binacional entre Brasil e Estados Unidos, segue fortemente o padrão NASA, assim processos, entradas e saídas desta proposta foram adaptados deste padrão.

3. Atividades de V&V no SPORT

A Figura 2 apresenta o desenvolvimento do projeto SPORT em *sprints* em relação ao ciclo de vida de uma missão espacial, dando ênfase à atividade de verificação. Nesta figura são apresentados os *sprints* de projeto e seus entregáveis.

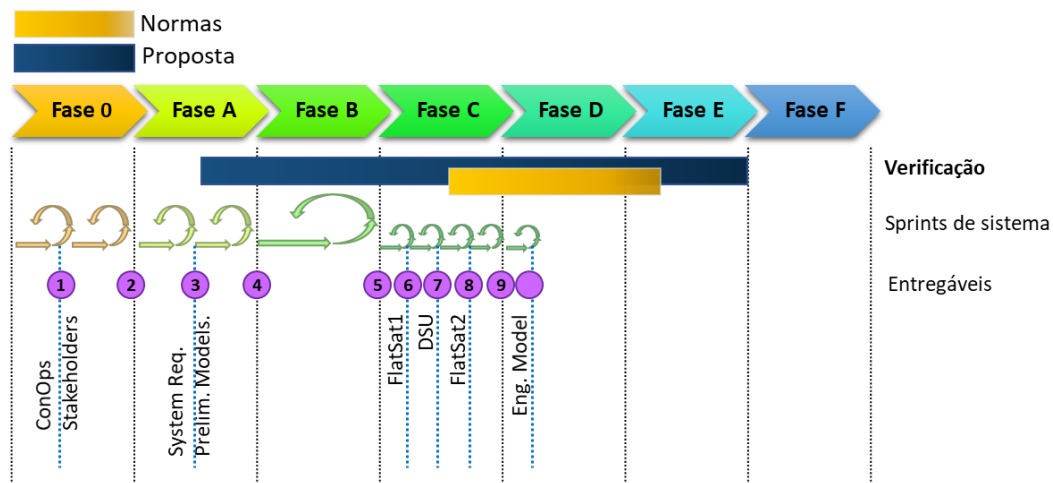


Figura 2. Sprints de sistema e seus entregáveis e sua relação com a atividade de V&V ao longo do ciclo de vida [Fonte: Adaptado de Shibuya et al. 2020]

Na próxima seção será apresentada a aplicação dos processos de V&V em dois *sprints* do projeto SPORT, o FlatSat-1 e FlatSat-2.

3.1 FlatSat-1

Simultaneamente ao início a fase C do projeto SPORT foi realizada uma campanha de integração de sistema chamada de FlatSat-1. Esta campanha de integração foi realizada em



novembro de 2018, em NASA *Goddard Space Flight Center*. O FlatSat-1 consistia em um conjunto de equipamentos que emularam os computadores de bordo da missão e uma placa desenvolvida pela equipe para realizar a interface elétrica e lógica com os instrumentos científicos.

Nesse *sprint* do projeto, as disciplinas foram trabalhadas de tal forma a entregar para a campanha FlatSat-1 um protótipo representativo da plataforma desenvolvida pelo ITA, tal que as interfaces lógicas, elétricas e cabeamento com as cargas úteis fosse demonstrada.

Nessa etapa, emuladores foram desenvolvidos pela equipe para reproduzir o comportamento das cargas úteis, tal que as interfaces elétricas e lógicas que estavam sendo desenvolvidas pudessem ser testadas antes da integração aos modelos de engenharia dos instrumentos.

A Tabela 7 apresenta um resumo dos objetivos de ensaio a aplicação dos processos de V&V citados na seção anterior. É importante ressaltar que nessa campanha a aquisição dos dados dos instrumentos foi feito de forma individual.

Tabela 7. Resumo do processo de verificação no *sprint* FlatSat-1

Objetivos do FlatSat-1 (atrelado aos requisitos de interface dos instrumentos)	<ol style="list-style-type: none">1. Conectar eletricamente os instrumentos científicos2. Alimentar e gerenciar os instrumentos3. Demonstrar a comunicação entre as partes4. Distribuir o sinal PPS
Critério de Sucesso	Integrar eletricamente o modelo de engenharia, protótipos ou emuladores da avionica do ITA e os instrumentos científicos do SPORT e testar o sistema para funcionalidades básicas.
Métodos de verificação	Inspeção, teste, demonstração
Modelos	FlatSat-1 (Protótipo)
Entradas dos processos de V&V	FlatSat-1 Modelos de Engenharia ou simuladores dos instrumentos científicos Procedimentos de Teste e Verificação Ferramentas de verificação
Saídas dos processos de V&V	<ul style="list-style-type: none">- Interface elétricas testadas (distribuição e controle da alimentação e níveis lógicos das interfaces de comunicação)- Interfaces lógicas demonstradas (comunicação com os instrumentos, exceção de uma carga útil que foi integrada posteriormente)- Cabeamento inspecionado e testado- Relatórios de V&V (incluídos no final do procedimento)- Reunião de fechamento onde os instrumentadores deram o aceite dos resultados obtidos



Nesta campanha estavam presentes os pesquisadores principais de três dos quatro instrumentos científicos a bordo do SPORT, e quatro membros da equipe SPORT, sendo que destes, dois atuaram diretamente nesta integração de sistema nos Estados Unidos e a equipe de Software e Eletrônica ficou a postos no Brasil para iterações com a equipe nos Estados Unidos. As atividades de V&V foram realizadas pelos participantes da campanha (desenvolvedores da plataforma e pesquisadores dos instrumentos científicos).

3.2 FlatSat-2

Ao final da fase C, anteriormente a revisão crítica de projeto, um novo *sprint* resultou na campanha FlatSat-2, realizada no INPE em junho de 2019. O FlatSat-2 consistia na evolução da plataforma, substituindo os emuladores dos computadores de voo por modelos de engenharia. Neste caso em particular, fez-se uso de uma das vantagens de se trabalhar com equipamentos COTS disponíveis para o padrão *CubeSat*. Desta forma, o modelo de engenharia é idêntico ao hardware de voo, recebendo este nome somente pelo seu uso durante o desenvolvimento. O FlatSat-2 é composto pela placa de circuito impresso que representa as interfaces do computador de gerenciamento de carga útil, o *Payload Data Handling Computer* (PLDH), o computador de gerenciamento de cargas úteis e o computador de bordo de missão (ambos unidades comerciais), pela placa EPS (*Electrical Power System*), responsável por fornecer e controlar as linhas de energia e por uma unidade de rádio.

O objetivo do FlatSat-2 foi testar as interfaces elétricas de alimentação e a comunicação de dados, assim como o processamento dos dados, entre o computador de bordo e as cargas úteis, denominados instrumentos científicos. Assim como na campanha do FlatSat-1, testes foram realizados utilizando emuladores dos instrumentos científicos caracterizando-os individualmente antes de serem integrados no FlatSat-2. Isto foi necessário pois os instrumentos científicos foram trazidos para integração na campanha do FlatSat-2, exceção de um dos instrumentos que já se encontrava no Brasil.

Para realizar os testes funcionais foi integrado também o rádio VHF/UHF embarcado e o Checkout Box, um simulador do Rádio da Estação Terrena conectado a um Notebook. O teste de RF (Rádio Frequência) consiste em enviar dados da Checkout usando a banda UHF e receber dados na caixa da Checkout usando a banda VHF. Esta etapa foi incluída para que fosse realizado o teste da interface solo-bordo, incluindo uma versão simplificada do SATCS (*Satellite Control Software*) que é o software de controle e operação de satélites do INPE [Cardoso et al. 2008]

Nessa campanha estavam presentes o Engenheiro de sistemas da NASA, o pesquisador principal de um dos instrumentos e os demais experimentadores atendendo remotamente. A equipe de desenvolvimento da plataforma era composta dos desenvolvedores de software, da equipe de eletrônica e coordenação técnica do ITA. A equipe do INPE também participou da campanha, atuando na demonstração da comunicação solo-bordo, com o uso do SATCS integrado à plataforma.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos objetivos de ensaio a aplicação dos processos de V&V citados na seção anterior.



Tabela 8. Resumo do processo de verificação no *sprint* FlatSat-2

Objetivos do FlatSat-2 (atrelado aos requisitos de interface dos instrumentos)	<ol style="list-style-type: none">1. Receber as telemetrias dos instrumentos científicos pela estação terrestre dos instrumentos2. Gerar, receber, distribuir o sinal e mensagem de PPS (pulso por segundo).3. Controlar a mudança de modo de operação dos instrumentos científicos por meio de telecomandos de solo4. Coletar simultaneamente os dados de todos os instrumentos a taxas de telemetria total.
Critério de Sucesso	Integrar eletricamente os modelos de engenharia de alta fidelidade da aviônica do ITA, os instrumentos científicos e a estação terrestre do SPORT e testar a funcionalidade de fim-a-fim (<i>end-to-end</i>) do sistema.
Métodos de verificação	Inspeção, demonstração, teste fim-a-fim
Modelos	FlatSat-2 (Protótipo)
Entradas dos processos de V&V	FlatSat-2 Modelos de engenharia ou modelos de qualificação dos instrumentos científicos Procedimentos de Teste Ferramentas de Verificação
Saídas dos processos de V&V	<ul style="list-style-type: none">- Interface elétricas testadas (distribuição e controle da alimentação e níveis lógicos das interfaces de comunicação)- Interfaces lógicas demonstradas (comunicação com os instrumentos, exceção de uma carga útil que foi integrada posteriormente)- Cabeamento inspecionado e testado- Demonstração do link solo-bordo (<i>end-to-end test</i>)- Relatórios de V&V- Reunião de fechamento onde os instrumentadores deram o aceite dos resultados obtidos e o engenheiro de sistemas da NASA resumiu a % de sucesso.

3.3 Discussão dos Resultados

Comparando-se as atividades de V&V desta proposta (Tabela 4) com a definida no padrão NASA (Tabela 1), pode-se destacar que algumas atividades foram inseridas, como definição dos requisitos a serem verificados naquele *sprint*, com seus critérios de sucesso e métodos de verificação. Como parte da preparação da verificação, foram incluídas a elaboração dos procedimentos e a atribuição dos responsáveis a conduzir a verificação. As demais atividades possuem equivalência.

Analisando-se as entradas para as atividades de V&V desta proposta (Tabela 5) e as entradas definidas pela NASA (Tabela 2) pode-se identificar que há grande semelhança, com a



ressalva que os requisitos são atrelados os métodos de verificação e os critérios de sucesso. Para as saídas das atividades de V&V (Tabela 3 e Tabela 6) existe novamente equivalência com a inclusão do formulário de verificação. Este formulário de verificação é uma ficha contendo informações resumidas do requisito verificado e dos conjuntos de dados referentes a aquele item.

Os métodos de verificação definidos estão relacionados as disciplinas que foram verificadas no *sprint* do FlatSat-1 e do FlatSat-2. Para a disciplina de software e telecomunicações, atreladas ao conceito de operação da plataforma com o segmento solo, a verificação foi feita por meio de demonstração e teste fim-a-fim, onde dados foram coletados, processados pelo computador e enviados para os instrumentadores, que fizeram a validação. Para a disciplina de eletrônica os métodos de verificação utilizados foram o de teste e inspeção, tais como inspeção dos cabos e tensões de alimentação e testes das interfaces elétricas para controle e alimentação das cargas úteis.

Os resultados obtidos na campanha do FlatSat-1 fizeram com que houvesse um remodelamento da arquitetura interna dos computadores de bordo do projeto SPORT e com isso a realocação de funcionalidades dentro desses computadores. Isso foi essencial para continuidade do desenvolvimento da arquitetura física da plataforma e da validação de que a arquitetura escolhida (solução de engenharia) atenderia aos requisitos dos instrumentos e da missão. Os resultados obtidos na campanha do FlatSat-2, com a implementação das alterações advindas do FlatSat-1 comprovaram para os instrumentadores e pesquisadores principais da missão que a plataforma desenvolvida pelo ITA atendia aos requisitos de projeto, incluindo o teste do link solo-bordo, enviando comandos via plataforma para os instrumentos e recebendo dados do instrumento e enviando a solo. Nessa campanha os dados dos instrumentos foram coletados de forma integrada. Identificou-se na campanha do FlatSat-2 a necessidade de implementar uma terceira unidade computacional para fazer a aquisição e tratamento dos dados científicos para solo. Um diferencial nessa campanha foi que as atividades de V&V foram executadas por uma equipe independente.

4. Conclusão

Uma das características de metodologias ágeis é a aproximação de desenvolvedores e partes interessadas. As entregas constantes, em intervalos e tempo menores, fazem com que mudanças possam ser implementadas mais rapidamente e inconsistências possam ser antecipadas. Entretanto, tudo isso não pode ser de fato comprovado se em conjunto com essas entregas não haja evidências de que o sistema entregue está de acordo com o requisito especificado (verificação) e com a expectativa do *stakeholder* (validação). O objetivo deste trabalho foi demonstrar a aplicação dos processos de V&V em estágios do desenvolvimento. Demonstra-se como as atividades de V&V foram realizadas no desenvolvimento do projeto SPORT e que os resultados obtidos nos *sprints* do FlatSat-1e FlatSat-2 auxiliaram no desenvolvimento da plataforma, dando à equipe de desenvolvimento e aos instrumentadores evidências de que o sistema está de acordo com os requisitos especificados. Demonstra-se neste trabalho também o papel fundamental da equipe de V&V ao longo do ciclo de desenvolvimento do projeto e a viabilidade de se implementar os processos de V&V em conjunto com um desenvolvimento ágil.



Agradecimentos: *Nossos agradecimentos ao Centro Espacial ITA e ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica por nos fornecerem o exemplo de aplicação a este trabalho e à FAPESP pelo financiamento (Projeto FAPESP # 2016 / 24970-7) e por fornecer bolsa de treinamento técnico para o primeiro e segundo autor do artigo. Nossos agradecimentos ao INPE pelo apoio e pela oportunidade dada para realização do doutorado. Nossos agradecimentos à equipe do projeto SPORT pela colaboração neste trabalho.*

Referências

- Batista, C. G., Weller, A.C., Martins, E., Mattiello-Francisco, M. F. (2019) “Towards increasing nanosatellite subsystem robustness”, Acta Astronautica, Elsevier
- Cardoso, P. E., Barreto, J. P., Cardoso, L. S., Hoffmann, L.T. (2008) “Using Design Patterns, Components and Metadata to design the Command and Monitoring Frameworks of the INPE’s Satellite Control System”, SpaceOps 2008 Conference
- Corpino, S., Stesina, F. (2014) “Verification of a CubeSat via Hardware-in-the-Loop Simulation” IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, vol 50, no 4
- ECSS (2009) “ECSS-E-ST-10-02C - Verification” Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands
- Kaslow, D., Madni, A.M., (2017) “Validation and Verification of MBSE-compliant CubeSat Reference Model” 15th Annual Conference on Systems Engineering Research, Redondo Beach, CA,
- NASA (2013) “NASA Systems Engineering Processes and Requirements”, EUA.
- Shibuya Sato, L.H., Fullindi, J.B., Loures, L.E.V., Mattiello-Francisco, M. F. (2020) “Agile methodology applied to System Engineering in the domain of CubeSat Project”, Latin American CubeSat Workshop, São José dos Campos
- Spann, J., Swenson, C., Durão, O., Loures, L.E.V and others (2017) “The Scintillation Prediction Observations Research Task: An international science mission using a CubeSat”, 31st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah
- Swartwout, K. (1999) “4 system engineering for faster, cheaper, better” INCOSE International Symposium, vol. 9, Wiley Online Library, pp. 924–932.
- Swartwout, M. (2016) “Secondary spacecraft in 2016: why some succeed (And too many do not)”, IEEE Aerospace Conference, IEEE, pp. 1–13
- Tiseo, B., Quaranta, B. Bruno, G., Sisinni, G. (2019) “Tailoring of ECSS Standard for Space Qualification Test of CubeSat Nano-Satellite”, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering Vol:13, No:4,
- Villela, T. Costa, C. A., Brandão, A. M., Bueno, F. T., Leonardi, R. (2019) “Towards the Thousandth CubeSat: A Statistical Overview”, International Journal of Aerospace Engineering, 13 pages