



## Modelagem e Simulação em Apoio às Atividades de Verificação e Validação: Uma Experiência no Curso de Inverno do INPE

RODRIGUES, I. P.<sup>1</sup>; SANTOS, B. P.<sup>2</sup>; MATUBARA, F. K.;<sup>2</sup>  
OLIVEIRA, G. R. A.<sup>2</sup>; OLIVEIRA, R. E. L.<sup>2</sup>; MARTINS, V. B.<sup>2</sup>;  
CERQUEIRA, C. S.<sup>3</sup>; AMBROSIO, A. M.<sup>4</sup>;

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Aluno de Doutorado do curso de Eng. e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

<sup>2</sup>Alunos Participantes do Curso de Inverno (2015).

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Professora no curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

<sup>4</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Ex-Aluno de Doutorado do curso de Eng. e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

italoprodrigues@gmail.com

---

**Resumo.** *O uso de Modelagem & Simulação contribui para a realização das atividades de Verificação & Validação de sistemas espaciais, ajudando a compreender o sistema e possibilitando análises para redução de riscos e custos. Este artigo apresenta o resultado de uma experiência realizada durante o estágio do Curso de Inverno realizado no INPE em 2015. O estágio foi dividido em três atividades nas quais os participantes realizaram um trabalho voltado à área de Modelagem & Simulação de modo a contribuir para do processo de Verificação & Validação de pico e nanossatélites. Neste artigo descreve-se a execução das atividades propostas, bem como os resultados obtidos.*

---

**Palavras-chave:** Modelagem & Simulação, Verificação & Validação, Subsistema de Suprimento de Energia.

### 1. Introdução

O Curso de Inverno (CI) “Introdução às Tecnologias Espaciais” é realizado, anualmente, no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com o objetivo de apresentar aos alunos de graduação noções básicas de engenharia e tecnologia espaciais, bem como as áreas de atuação do INPE, para tanto, divide-se o curso em palestras teóricas e um estágio técnico, no qual o participante tem a possibilidade de desenvolver uma atividade prática alinhada aos interesses do instituto. [CI 2016]

O trabalho apresentado neste artigo foi desenvolvido durante a semana de estágio do Curso de Inverno, em 2015, cuja a proposta foi apresentar aos alunos uma visão geral sobre as atividades do processo de Verificação & Validação (V&V) de pico e nanossatélites, sendo a Modelagem &



Simulação (M&S) uma das técnicas que apoiam este processo. A simulação permite medir o desempenho e/ou avaliar as funções do artefato sob verificação [ECSS 2009, Eickhoff 2009], em diferentes fases do ciclo de desenvolvimento, conforme ilustra a Figura 1, o que pode resultar em alguns benefícios, tais como, a redução de riscos e custos.

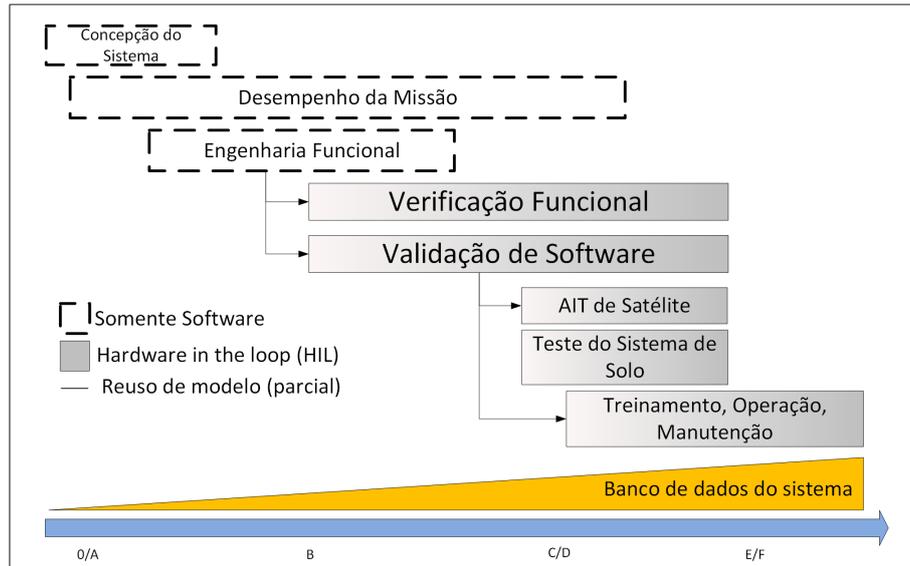


Figura 1. Simuladores ao Longo do Ciclo de Vida. Adaptada de [ECSS 2010a].

O estágio proposto foi dividido em três atividades, listadas a seguir:

- Atividade 1: Estudar o modelo comportamental do subsistema de energia elétrica (EPS, do inglês *Electrical Power Subsystem*) proposto por [Farid et al. 2008] e implementá-lo em *Simulink*, de modo a permitir a execução de simulações do EPS.
- Atividade 2: Montar um protótipo<sup>1</sup> do EPS em *hardware*, utilizando Arduino.
- Atividade 3: Desenvolver uma interface de usuário (GUI, do inglês, *Graphical User Interface*), para controlar a simulação e exibir os resultados em tempo de execução, obtidos a partir do modelo desenvolvido em (b).

O objetivo principal do estágio se concentrou na execução das atividades (1), (2) e (3). O objetivo secundário do estágio foi integrar as atividades, dessa maneira, o modelo implementado em (1), além de permitir a simulação virtual, poderia ser embarcado no protótipo construído em (2), permitindo realizar uma simulação com *hardware-in-the-loop* (HIL). Por fim, a simulação realizada em (1) ou com o HIL poderia ser controlada pela interface criada em (3). As atividades realizadas durante o miniestágio estavam alinhadas ao trabalho de [Rodrigues 2015a], em desenvolvimento na época da realização do CI.

A Figura 2 sumariza os objetivos do miniestágio. O cumprimento dos objetivos tem como finalidade demonstrar os benefícios da M&S em apoio ao processo de V&V de pico e nanossatélites.

Em uma missão de pico e nanossatélites, as atividades propostas no estágio, podem contribuir para o processo de V&V já nas fases iniciais do ciclo de desenvolvimento. Historicamente, 8 % destes satélites apresentaram alguma falha catastrófica, que levou a perda da missão, sendo o EPS responsável por 17 % dessas perdas. [Swartwout 2013]

<sup>1</sup>Modelo físico que ignora certos aspectos do sistema, mas é representativo. [DOD 2011]

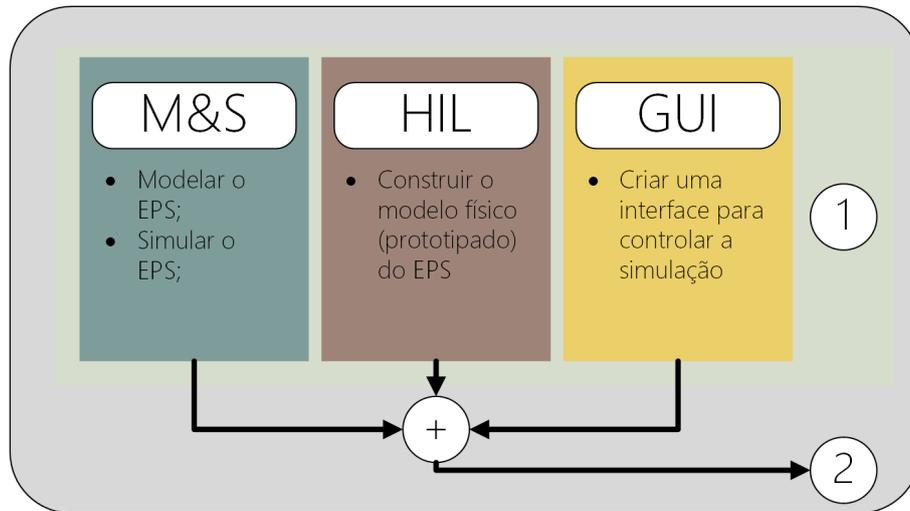


Figura 2. Objetivos do Miniestágio.

Este artigo se propõe em apresentar os resultados das atividades realizadas pelos alunos durante o miniestágio. Estas atividades contribuem para um processo sistemático V&V, que pode apresentar vantagens na detecção de não-conformidades em subsistemas de pico e nanossatélites antes de seu lançamento.

## 2. Trabalhos Relacionados

As missões de pico e nanossatélites têm como características fundamentais o baixo custo e o desenvolvimento ágil, quando comparadas às missões de satélites tradicionais [Puig-Suari et al. 2001]. Dessa forma, de acordo com [Corpino and Stesina 2014, Bürger 2014] as missões de pequenos satélites se preocupam, majoritariamente, com os testes ambientais, de modo a verificar se o satélite irá suportar o lançamento e o ambiente espacial.

[Corpino and Stesina 2014] afirmam que não há regras bem definidas para a execução de testes funcionais em pequenos satélites, sendo assim, a decisão de fazer ou não o teste cabe a cada desenvolvedor. Nesse sentido, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos, focando, principalmente, nos testes funcionais.

No artigo de [Corpino and Stesina 2014], se propõe o uso de um HIL para executar a verificação funcional de um CubeSat. Neste trabalho, os modelos executados em ambiente de simulação virtual, como por exemplo, o propagador de órbita, se comunicam com os modelos em *hardware*, neste caso, o subsistema de energia e do subsistema de controle de órbita e atitude.

[Rodrigues et al. 2016] propõem um *framework* para verificação automática de subsistemas de pico e nanossatélites. O *framework* apresenta algumas etapas que devem ser realizadas antes da execução automática dos testes, como por exemplo, o levantamento dos requisitos, modelagem das partes que compõem o subsistema e modelagem dos casos de teste. Nesta proposta, inicialmente têm-se os modelos que descrevem o subsistema e estes modelos podem ser substituídos gradualmente por *hardware*. Além disso, nesta proposta, as atividades de V&V se iniciam nas fases preliminares do ciclo de desenvolvimento. A diferença em relação ao trabalho de [Corpino and Stesina 2014] se dá pelo fato de que o *hardware* utilizado é um modelo utilizado na qualificação, enquanto o trabalho de [Rodrigues et al. 2016] permite o uso de protótipos, já que nas fases iniciais não há disponibilidade de *hardwares* mais representativos (modelo de qualificação ou modelo de voo).

Visando equilibrar o processo de V&V em termos de tempo e custo, [Conceição et al. 2016]



propõem um sistema de teste reutilizável, no contexto da família de nanossatélites da missão NanoSatC-BR. O sistema de teste proposto utiliza mecanismos de injeção de falhas, o que permite verificar o comportamento dos subsistemas em condição de operação normal, mas também, em situações de exceção.

Um simulador fim-a-fim é proposto em [Stesina et al. 2017] para contribuir com as atividades de V&V ao longo de todo ciclo de vida de uma missão de pequenos satélites, possibilitando a verificação de requisitos funcionais e operacionais, em nível de componente, subsistema e sistema. O simulador é caracterizado por ter uma arquitetura modular, o que permite adaptá-lo para diferentes missões.

O trabalho de [Batista et al. 2018] apresenta um mecanismo para emulação de falhas, cujo objetivo é emular falhas nas interfaces entre os subsistemas. O mecanismo apresentado mostrou-se útil para ser utilizado na verificação de requisitos durante a fase inicial do ciclo de desenvolvimento de um nanossatélite. Os autores também apontam que o mecanismo pode ser utilizado durante a fase de integração, de modo a executar testes de comunicação entre os subsistemas.

Como visto nesta seção, algumas pesquisas em V&V vêm sendo conduzidas no contexto das missões de pico e nanossatélites. Pode-se observar também que estas pesquisas visam melhorar a confiabilidade dos pico e nanossatélites sem comprometer suas características principais, isto é, sem aumentar o tempo e o custo de desenvolvimento. As atividades descritas na Seção 3 também seguem nesta direção por utilizar soluções de prateleira.

### 3. Implementação e Resultados

Esta seção apresenta a descrição das atividades propostas na Seção 1. Sendo assim, a Seção 3.1 e Seção 3.2 descrevem as atividades da Equipe 1, e a Seção 3.3 as atividades da Equipe 2.

#### 3.1. Modelagem & Simulação do Subsistema de Energia

O Subsistema de Energia de um satélite, incluindo os pico e nanossatélites, é responsável por fornecer, armazenar, distribuir e controlar a energia elétrica [Wertz and Larson 1999]. O EPS, ilustrado na Figura 3, é composto, basicamente, pelos seguintes elementos: (i) painel solar - transforma energia solar em energia elétrica; (ii) bateria - fornece energia ao satélite nos períodos de eclipse; (iii) distribuidor de energia - garante que a energia seja distribuída às cargas do satélite; (iv) regulador e controle - a regulação se divide em três categorias: controle da energia gerada pelo painel solar, regulação da tensão de barramento e controle de carga e descarga da bateria.

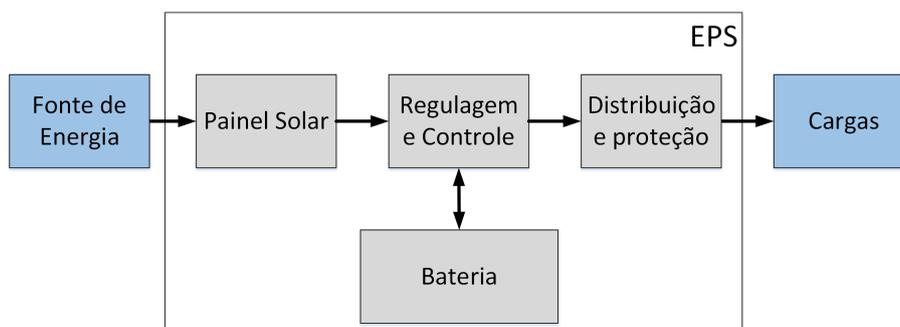


Figura 3. Diagrama de Blocos Simplificado do EPS.

A simulação do EPS utilizou o modelo comportamental descrito no trabalho de [Farid et al. 2008]. Assim, o modelo do EPS foi implementado em *Simulink*, utilizando a notação de Máquina de Estados Finitos (MEF). A implementação em MEF no *Simulink* se deu



peço fato de a ferramenta prover fácil comunicação com o *hardware* utilizado para construir o modelo físico do EPS, neste caso o Arduino.

A Figura 4 apresenta o resultado da implementação, que representa os modos de operação descritos a seguir:

- (a) Modo 1 - Satélite iluminado pelo Sol (bateria descarregada). Se selecionado, as baterias são recarregadas e as cargas do satélite são alimentadas, exclusivamente, pelos painéis solares.
- (b) Modo 2 - Satélite iluminado pelo Sol (baixo consumo). Neste modo as baterias estão totalmente carregadas, mas a demanda de potência é baixa. Sendo assim, as cargas são alimentadas somente pelos painéis solares.
- (c) Modo 3 - Satélite está iluminado pelo Sol (alto consumo). Tanto os painéis solares como as baterias são responsáveis por fornecer energia para as cargas, quando este modo entra em atuação. Esta situação ocorre quando a demanda de energia solicitada pelas cargas é maior que a energia fornecida pelos painéis solares.
- (d) Modo 4 - Satélite em eclipse. Quando este modo é ativado, as baterias devem fornecer energia para as cargas do satélite. Caso as baterias descarreguem até o limite permitido, algumas cargas, não-prioritárias, são desligadas.

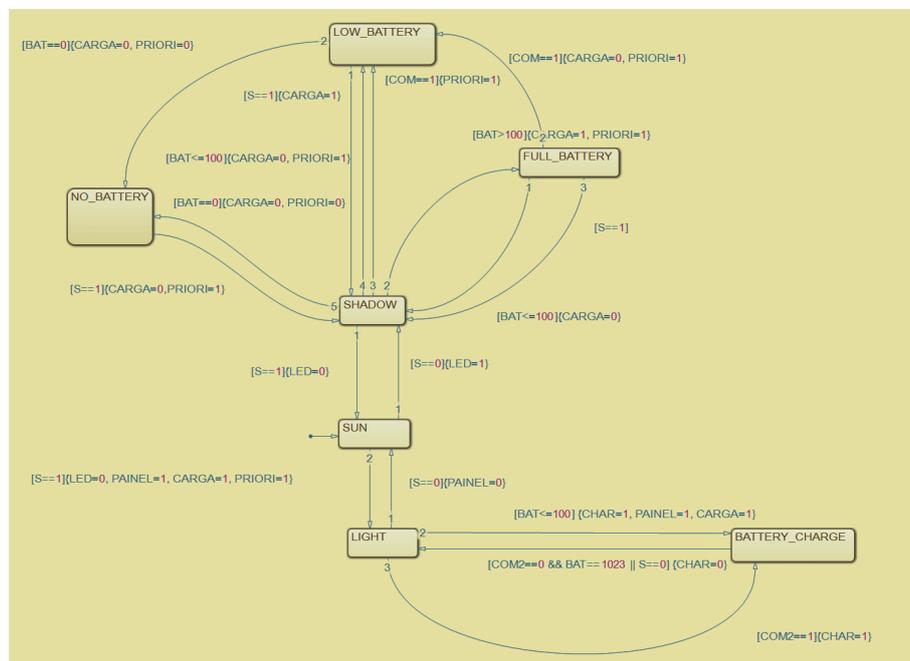


Figura 4. Modelo do EPS em MEF.

Durante as fases iniciais, sobretudo durante a fase B, do ciclo de desenvolvimento, a simulação em apoio as atividades de V&V pode ser utilizada para verificar se os artefatos atendem aos requisitos especificados. Além disso, é possível validar os modelos que representam tais artefatos [ECSS 2010a]. Neste contexto, os modelos iniciais do subsistema e os protótipos físicos são testados pelo simulador chamado de Simulador para Verificação (ou Validação) Funcional (FVT, do inglês *Functional Verification (Validation) Testbench*), descrito em [ECSS 2010a, ECSS 2010b].



### 3.2. Simulação com *Hardware-in-the-loop*

A simulação com HIL permite realizar análises no modelo físico frente a seus requisitos funcionais. Assim, os modelos virtuais podem ser substituídos gradualmente por modelos físicos. Nas fases iniciais do ciclo de desenvolvimento de um produto espacial, essas análises podem ser realizadas protótipos do modelo físico. Isto se deve ao fato de que nas fases iniciais um *hardware* mais representativo pode não estar disponível, mas também, devido ao custo associado a testes em modelos de voo.

Seguindo os modos de operação, descritos em [Farid et al. 2008], foi construído um protótipo do EPS utilizando Arduino. Dessa forma, o modelo físico prototipado, que pode ser observado na Figura 5, foi utilizado para dois propósitos, sendo eles:

- 1) HIL: neste contexto, as entradas para o modelo implementado pela Equipe 1 eram provenientes do *hardware* (Figura 5). Dessa maneira, o *hardware* fornecia uma saída, o modelo virtual recebia este valor na sua interface de entrada, executava sua ação interna e, por fim, fornecia uma outra saída que era enviada novamente para o *hardware*. A Figura 6 mostra o esquema utilizado para esta simulação, onde dentro do bloco EPS, no centro da figura, encontra-se o modelo virtual apresentado na Figura 4.
- 2) Somente *Hardware*: nesta simulação, realizada somente com modelos físicos, o modelo implementado pela Equipe 1 foi embarcado no protótipo construído, conforme mostrado na Figura 5. Neste caso, todos os testes foram executados utilizando somente o *hardware*.

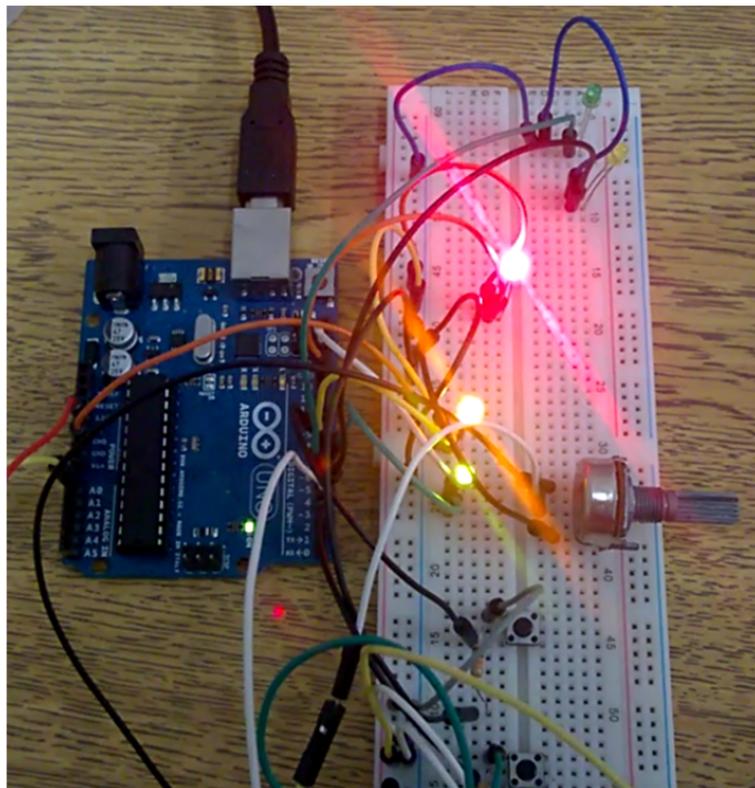


Figura 5. Foto do protótipo do EPS.

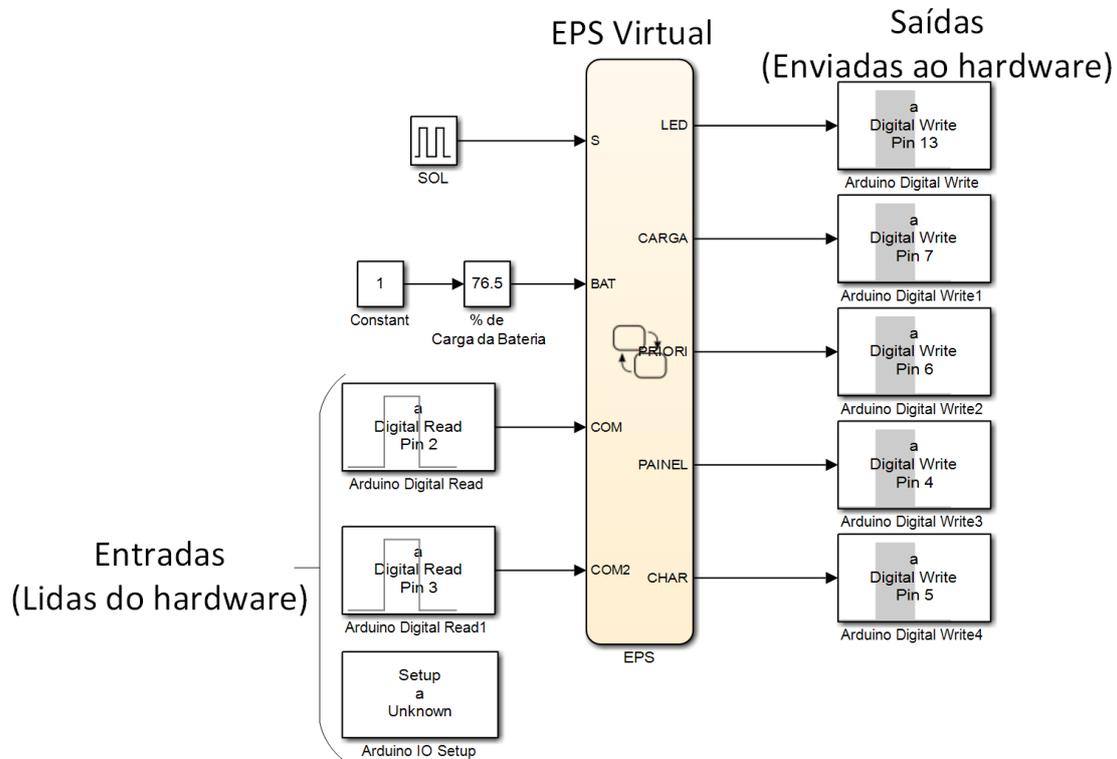


Figura 6. Modelo do EPS em MEF.

### 3.3. Interface para Controle da Simulação

O uso de *software* nas atividades de engenharia deve possibilitar interação intuitiva e prática para aos usuários. Então, para evitar que durante os testes seja necessário alterar linhas de código, o que pode acarretar a inclusão de defeitos, decidiu-se implementar uma interface. Esta interface permite ao usuário controlar simulação, mas também, visualizar os dados coletados, tais como, tensão e corrente.

A interface proposta pode ser visualizada na Figura 7. Com esta interface, foi possível controlar o início da simulação e coletar os dados durante a execução, incluindo a simulação com HIL, e exibi-los em tempo quase-real.

### 3.4. Considerações Finais

Apesar das equipes concluírem suas atividades, são propostas algumas melhorias.

Em relação ao modelo implementado para o EPS (ver Figura 4), apesar de refletir os modos de operação, há alguns estados que poderiam ser eliminados, como por exemplo “SUN”, “SHADOW” e “LIGHT”. Estes estados podem ser entendidos como estados transição, isto é, eles fazem parte do modelo, contudo, o EPS nunca está “parado” neles. Além disso, os estados “SUN” e “LIGHT” são redundantes. Dessa forma, pode-se imaginar dois macroestados para o EPS, ILUMINADO (“SUN” ou “LIGHT”) e ECLIPSE (“SHADOW”), e dentro desses macroestados os modos de operação descritos anteriormente. Assim, uma alternativa à implementação realizada pode ser observada na Figura 8, neste caso, somente os modos definidos foram implementados.

Em relação a interface, a mesma poderia exibir o nome dos gráficos ao invés de utilizar nomes genéricos como “Gráfico1” e “Gráfico2”, por exemplo, deixando a visualização mais intuitiva.

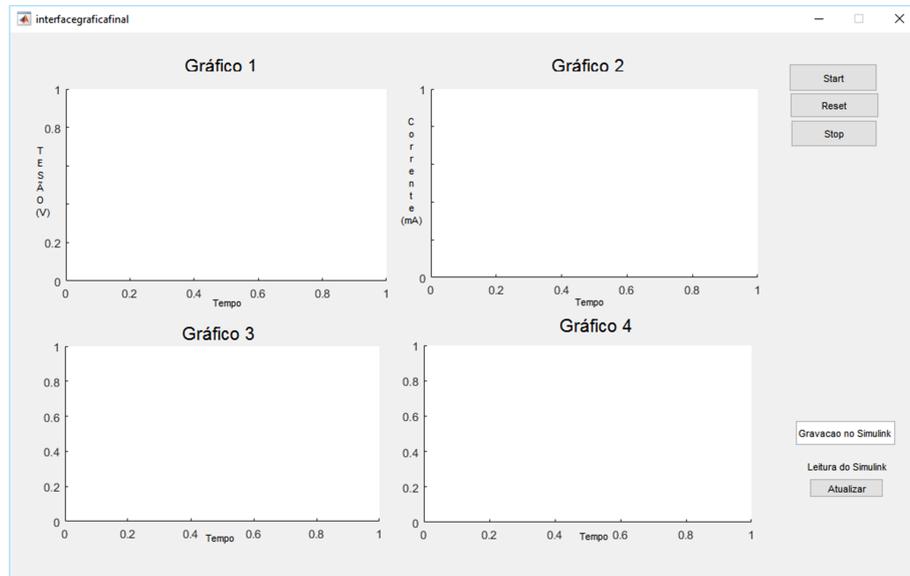


Figura 7. Interface Criada.

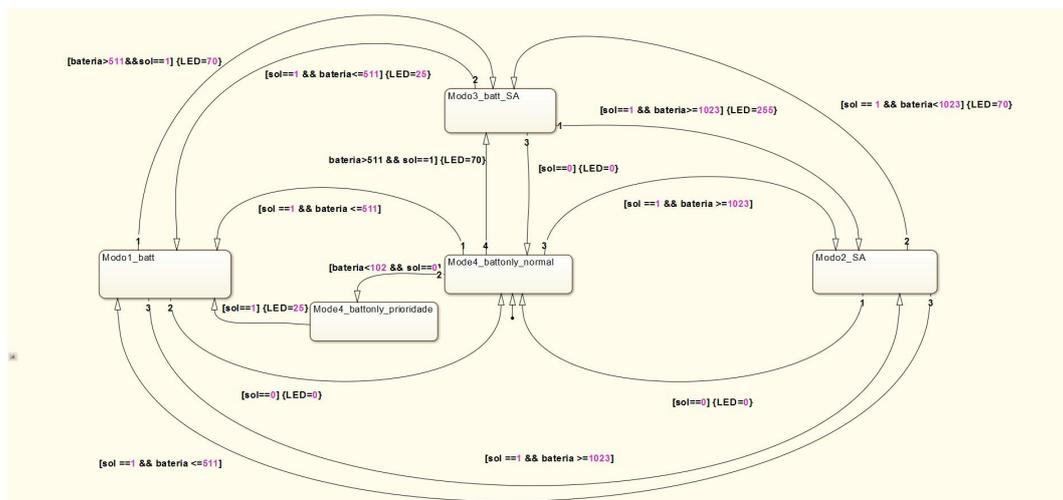


Figura 8. Modelo Alternativo do EPS em MEF. [Rodrigues 2015b]

Com ambiente desenvolvido nas atividades (1), (2) e (3) é possível executar testes manuais no subsistema de energia, isto é, excitar tanto o modelo virtual quanto o modelo físico de modo a permitir a verificação dos requisitos e a validação dos modelos que descrevem o subsistema. Dessa maneira, as atividades compreendidas neste artigo contribuem para o processo de V&V de pico e nanosatélites, no que diz respeito à simulação com modelos híbridos, ou seja, que levam em consideração modelos virtuais e físico e da criação de uma interface para análise dos resultados dos testes. A grande vantagem da utilização de modelos virtuais antes dos modelos físicos é a detecção não conformidades antes de construir a solução em *hardware*.

#### 4. Conclusão

Os dois grandes desafios para a execução deste trabalho foram: limitação do tempo, e o fato de os estudantes não terem sólidos conhecimentos sobre as atividades propostas e as ferramentas utilizadas. Todavia, foi possível realizar todas as atividades dentro do cronograma proposto.

A V&V de sistemas espaciais é um processo imprescindível para o sucesso das missões. Dessa



maneira, as atividades propostas se alinham com o interesse cada vez maior na verificação dos requisitos funcionais de pico e nanossatélites.

São propostos dois estudos futuros. Nos testes iniciais, utilizou-se uma função senoidal para gerar a informação iluminação (eclipse ou sol). De modo a tornar a simulação mais fiel, esta função pode ser substituída por um algoritmo de propagação de órbita. Sendo assim, este algoritmo pode fornecer a informação de ausência ou presença de radiação solar. Além disso, vislumbra-se que no futuro outros subsistemas sejam testados utilizando a solução proposta neste artigo.

O objetivo primário foi totalmente alcançado, uma vez que, todas as equipes conseguiram realizar suas atividades. O objetivo secundário, foi considerado parcialmente atingido, já que a interface proposta não pode ser integrada ao algoritmo propagação de órbita. No entanto, os resultados foram muito satisfatórios, graças a assimilação rápida dos conhecimentos pelos participantes.

A realização desta tarefa permitiu demonstrar o processo simplificado de Modelagem & Simulação, com foco na Verificação & Validação.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem o INPE pela oportunidade de realizar este trabalho e a CAPES pelo incentivo financeiro.

## Referências

- [DEPARTAMENT OF DEFENSE (DOD) 2011] DEPARTAMENT OF DEFENSE (DOD) (2011). Modeling and Simulation (M&S) Glossary. Technical Report 1, DOD. <http://goo.gl/dSZeeW>. Online, Acesso em 20 jul. 2016.
- [EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS) 2009] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS) (2009). Space engineering: Verification (ECSS-E-ST-10-02C). Technical report, ESA-ESTEC. <http://www.ecss.nl/>. Online, Acesso em 20 Jul. 2016.
- [EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS) 2010a] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS) (2010a). Space engineering: System modelling and simulation (ECSS-E-TM-10-21A). Technical report, ESA-ESTEC. <http://www.ecss.nl/>. Online, Acesso em 20 jul. 2016.
- [EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS) 2010b] EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS) (2010b). Space engineering: Verification guidelines (ECSS-E-HB-10-02A). Technical Report 1, ESA-ESTEC. <http://www.ecss.nl/>. Online, Acesso em 20 jul. 2016.
- [Batista et al. 2018] Batista, C. L. G., Martins, E., and Mattiello-Francisco, M. d. F. (2018). On the use of a failure emulator mechanism at nanosatellite subsystem integration tests. In *Proceedings... IEEE Latin-American Test Symposium*, 19. (LATS).
- [Bürger 2014] Bürger, E. E. (2014). Proposta de método para AIT de pico e nanossatélites. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.
- [CI 2016] CI (2016). Curso de Inverno. <http://www.inpe.br/ci/2015/>. Online; Acesso em 22 jul. 2016.
- [Conceição et al. 2016] Conceição, C., Ambrosio, A. M., and Mattiello Francisco, M. d. F. (2016). On the use of nanosat-br test system for payload operational requirements verification. *Latin American IAA CubeSat Workshop*, 2.
- [Corpino and Stesina 2014] Corpino, S. and Stesina, F. (2014). Verification of a cubesat via hardware-in-the-loop simulation. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, 50(4):2807–2818.
- [Eickhoff 2009] Eickhoff, J. (2009). *Simulating spacecraft systems*. Springer Aerospace Technology, Heidelberg, Germany, 1 edition.
- [Farid et al. 2008] Farid, H., El-Koosy, M., El-Shater, T., El-Koshairy, A., and Mahmoud, A. (2008). Simulation of a Leo Satellite Electrical Power Supply Subsystem In-Orbit Operation. In *Proceedings...*, Valencia, Spain. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 20 nov. 2015.
- [Puig-Suari et al. 2001] Puig-Suari, J., Turner, C., and Ahlgren, W. (2001). Development of the standard cubesat deployer and a cubesat class picosatellite. In *2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No.01TH8542)*, volume 1, pages 1/347–1/353 vol.1.
- [Rodrigues 2015a] Rodrigues, I. P. (2015a). Um framework para validação automática de modelos aplicado ao subsistema de energia de um picosatélite. Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.



**9º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais**  
15 e 16 de Agosto de 2018

- [Rodrigues 2015b] Rodrigues, I. P. (2015b). Verificação de requisitos através do uso de um simulador funcional. In Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, J. W., editor, *Anais...*, São José dos Campos. Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, 6. (WETE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- [Rodrigues et al. 2016] Rodrigues, I. P., Ambrosio, A. M., and Cerqueira, C. S. (2016). Towards an automated hybrid test and simulation framework to functional verification of nanosatellites' electrical power supply subsystem. Latin American IAA CubeSat Workshop, 2.
- [Stesina et al. 2017] Stesina, F., Corpino, S., and Feruglio, L. (2017). An in-the-loop simulator for the verification of small space platforms. *International Review of Aerospace Engineering (IREASE)*, 10(2). doi:10.15866/irease.v10i2.10593.
- [Swartwout 2013] Swartwout, M. (2013). The First One Hundred CubeSats: A Statistical Look. *Journal of Small Satellite*, 2(2):213–233.
- [Wertz and Larson 1999] Wertz, J. and Larson, W. (1999). *Space Mission Analysis and Design*. Space Technology Library. Springer Netherlands, 3 edition.