



11º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais
18, 19 e 20 de agosto de 2020

Concepção do Segmento Solo de Missões Espaciais: Proposta de um Framework

Antonio Cassiano Julio Filho¹

Maurício Gonçalves Vieira Ferreira², Ana Maria Ambrosio³

^{1,2,3}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

¹Doutorando do Curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE

²Professor no Curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE
Centro de Rastreo e Controle de Satélites - COCRC

³Professora no Curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE
³Divisão de Sistemas Espaciais - DIDSE

¹cassiano.filho@inpe.br

Resumo. *As agências espaciais estimulam pesquisas alinhadas entre o segmento espacial e segmento solo que visam a eficiência, a interoperabilidade, o cross support e a redução de riscos e custos. O segmento espacial, de forma clássica, apresenta requisitos que determinam a concepção e projeto da missão e direcionam novos modos (modelos) de controle e operação que são solicitadas ao segmento solo. Este trabalho apresenta uma proposta de um framework baseado em modelos – Model-Based Systems Engineering (MBSE) – que permita o apoio à concepção de soluções para sistemas espaciais, na perspectiva do segmento solo, aperfeiçoando e padronizando os procedimentos de engenharia de sistemas em conformidade com as diretrizes da European Cooperation for Space Standardization (ECSS), e da National Aeronautics and Space Administration (NASA) e de acordo com as recomendações do Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) e a interação com o segmento espacial.*

Palavras-chave: CCSDS; MBSE; Segmento Solo; Arquitetura; Interoperabilidade.



1. Introdução

O crescente número de missões espaciais impulsiona a pesquisa de soluções alinhadas entre o segmento espacial e o segmento solo. As agências espaciais estimulam iniciativas e o desenvolvimento de projetos que visam a eficiência, a interoperabilidade, o *cross support* a redução de riscos e de custos.

O segmento espacial, de forma clássica, apresenta requisitos que determinam a concepção e projeto da missão e direcionam novos modos (modelos) de controle e operação que são solicitadas ao segmento solo. Na perspectiva do segmento solo, é essencial demonstrar a inovação de conceitos que são solicitados aos sistemas devido ao crescimento do volume e tipos de dados e seus processos, por exemplo, *machine learning*, *artificial intelligence* (sistemas especialistas) e a utilização de protocolos de comunicação, processamento *onboard*, e o aumento das taxas de *uplink* e *downlink*.

Estes conceitos incluem a concepção, desenvolvimento e a operação de missões espaciais em conformidade com as diretrizes - não limitadas à estas organizações - da *European Cooperation for Space Standardization (ECSS)* e da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* e as recomendações do *Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS)*.

Este trabalho apresenta uma proposta de um framework baseado em modelos que permita o apoio à concepção de soluções para sistemas espaciais, na perspectiva do segmento solo, aperfeiçoando e padronizando os procedimentos de engenharia de sistemas, estabelecendo metodologias para otimização das atividades de desenvolvimento, gerenciamento e execução de projetos do segmento solo, bem como a sua interação com o segmento espacial.

2. Metodologia

Realizamos um exame da literatura para determinar a contribuição científica deste estudo. Primeiramente foi realizado um estudo sobre a evolução das arquiteturas do segmento solo. Numa segunda etapa foram estudadas as diretrizes para o desenvolvimento do segmento espacial [ECSS 2003], [ECSS 2008] e [NASA 2013]; em seguida foi realizado um estudo sobre o desenvolvimento dos módulos de serviços e cargas úteis [CCSDS 2003], [CCSDS 2006], [CCSDS 2007], [Fortescue et al. 2003] e [Larson and Wertz 1999].

Em outra etapa foram estudados projetos do segmento solo, incluindo o segmento solo do INPE, de acordo com as diretrizes [ECSS 2003] e [NASA 2013] para engenharia de sistemas e as recomendações CCSDS para interoperabilidade e *cross support* entre agências espaciais [CCSDS 2006] e [CCSDS 2007] e as redes de estações internacionais [Julio Filho 2015].

Posteriormente foram estudadas publicações sobre *Model-Based Systems Engineering (MBSE)* [Friedenthal et al. 2009], [INCOSE 2007] e [Smith et al. 2014].

Os resultados são apresentados de forma sucinta e direcionam os estudos para a elaboração da proposta de um framework baseado em modelos para a concepção do segmento solo de missões espaciais.



3. Resultados e Discussão

3.1 Breve histórico da evolução das arquiteturas para o segmento solo

Até 2002, as principais soluções para problemas de interoperabilidade (inicialmente recepção de telemetrias e envio de telecomandos) no segmento solo foram a instalação de hardwares e a implantação de interfaces bilaterais.

A primeira solução foi a instalação de hardwares nas estações terrenas provedoras para formar a interface com o sistema de antenas. Uma abordagem simples, porém, com grande esforço para transporte, armazenamento, manutenção, treinamento operacional e retirada após o apoio a fase *Launch and Early Orbit Phase (LEOP)* [Schulz et al. 2002].

A segunda solução foi a utilização de interfaces bilaterais, sem a instalação de hardwares. As agências, envolvidas, definiam uma interface, um protocolo e a codificação dos dados. Esta solução solicitava o desenvolvimento de gateways com custo e tempo elevados, grande esforço para análise, testes e aceitação das interfaces.

Para resolver as questões inerentes ao grande número de interfaces para troca de serviços entre as estações terrenas provedoras e usuários o CCSDS recomenda um conjunto de serviços para telemetria e telecomando, denominado *Space Link Extension (SLE)* [CCSDS 2005], [CCSDS 2006], [CCSDS 2010a], [CCSDS 2010b] e [CCSDS 2010c] e suas atividades de gerenciamento.

A normalização das atividades de gerenciamento dos serviços SLE [Barkley et al. 2006] e [Pietras et al. 2010] são apresentadas nas recomendações [CCSDS 2009] e [CCSDS 2011]. Estas recomendações SLE foram adotadas pelas principais agências espaciais, como: CNES, DLR, ESA, ESOC, INPE, JAXA e NASA, e por empresas da iniciativa privada.

Em 2013 foram realizados testes de aceitação do protocolo SLE, com a transferência bilateral de dados de telemetria e telecomando (interoperabilidade) entre o INPE e a ESOC da ESA.

3.2 Elementos de uma missão espacial

A Figura 1 mostra a composição da missão CBERS-4A [Julio Filho et al. 2019]. A missão é formada pelos seguintes elementos:

- a) Segmento Espacial: constituído pelo veículo espacial configurado com seus módulos de serviço e de cargas úteis;
- b) Segmento Solo: constituído, basicamente, por estações terrenas para recepção de telemetrias, rastreo e envio de comandos - *Telemetry, Tracking, and Command (TT&C)* - e o Centro de Controle de Satélites (CCS) que são configurados para controlar, monitorar e analisar a operação do veículo espacial,
- c) Segmento de Aplicação: composto por estações de recepção e gravação de dados, pelo Centro de Missões (CMCD) para planejar e coordenar a operação da aquisição de dados pela a carga útil, e pelo Centro de Dados de Sensoriamento Remoto (CDSR), que coleta, processa, armazena e disponibiliza os dados aos usuários;
- d) Segmento Lançador: responsável por colocar o veículo espacial (satélite) em órbita.

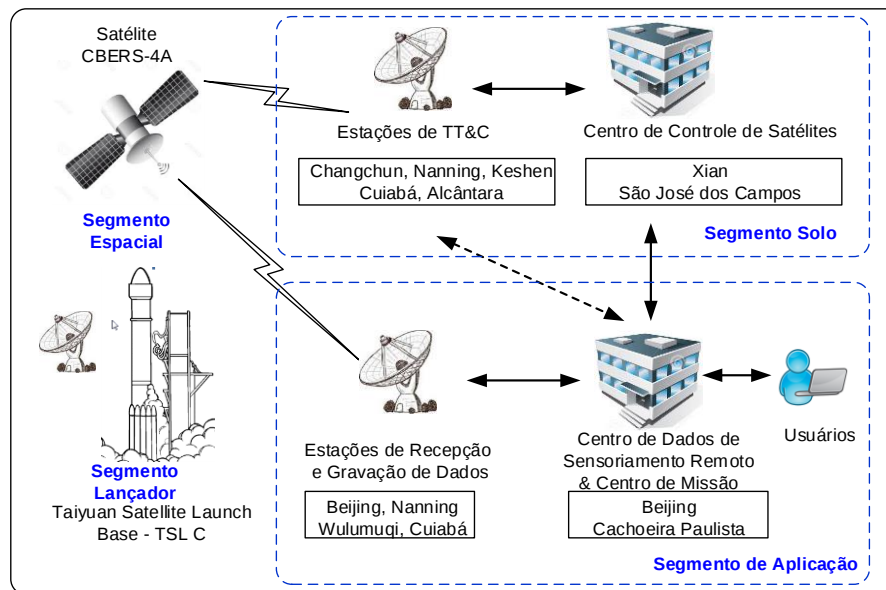


Figura 1. Elementos da Missão CBERS-4A. Adaptado de [Julio Filho et al. 2019].

3.2.1 Arquitetura do Segmento Solo e os Serviços do Protocolo SLE

Atualmente, a arquitetura do segmento solo é baseada nos serviços do Protocolo SLE que fazem parte de recomendações para a interoperabilidade e o *cross support* entre agências espaciais. Os serviços SLE estão incorporados como parte do segmento solo do INPE. A Figura 2 ilustra a arquitetura do segmento solo, incluindo o “Gerenciamento Dinâmico de Serviços do Protocolo SLE” proposto por [Julio Filho 2015].

A ideia do “Gerenciamento Dinâmico de Serviços do Protocolo SLE” é simplificar o acesso às estações terrenas e permitir a detecção em tempo real da redundância entre duas estações; a transparência na comutação e um rastreamento estendido no tempo.

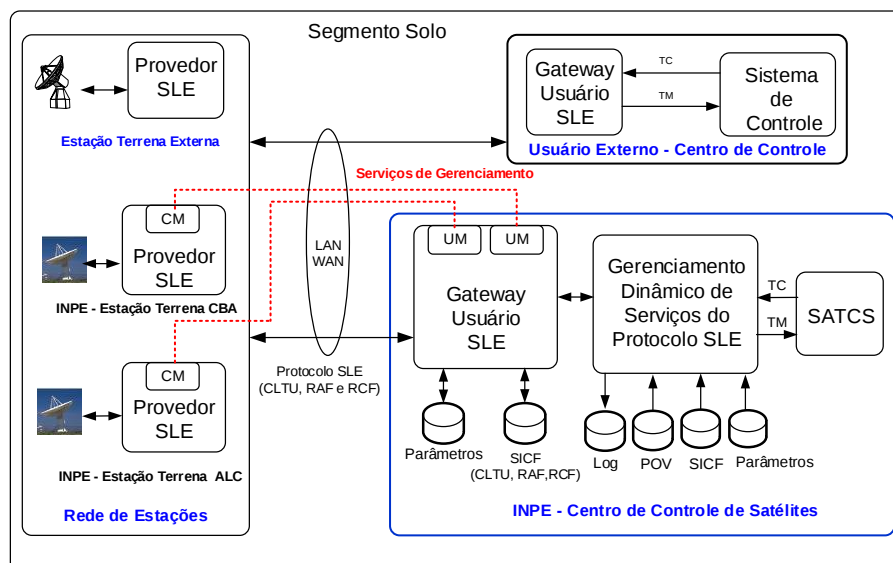


Figura 2. Arquitetura do Segmento Solo. [Julio Filho 2015].



3.2.2 Rede de Estações Internacionais

A adoção dos serviços SLE incentivou a evolução das estações proprietárias para um sistema de rede de estações em benefício da interoperabilidade e *cross support*.

A Figura 3 ilustra a rede Estrack da ESA que fornece o enlace entre satélites e o ESOC [ESA 2020]. Como exemplo de rede comercial e pertencente a iniciativa privada é a Prioranet.



Figura 3. Rede de Estações Terrenas Estrack. [ESA 2020].



3.3 Model-Based Systems Engineering

Segundo [Smith et al. 2014] os sistemas continuam aumentando em complexidade e são necessárias práticas mais rigorosas e padronizadas. O emprego da MBSE vem atender a essa necessidade. A MBSE colabora para gerenciar a complexidade movendo a prática de engenharia de sistemas baseada em documentos para uma abordagem baseada em modelos.

A MBSE usa a modelagem para apoiar a análise, especificação, projeto e verificação de sistemas em desenvolvimento. Esta abordagem melhora as comunicações entre os times de desenvolvimento, a qualidade das especificações e de projeto e possibilita o reuso de especificações e artefatos [Friedenthal et al. 2009].

De acordo com [Friedenthal et al. 2009] uma linguagem de modelagem padronizada e robusta é considerada um facilitador para a MBSE. A *Systems Modeling Language (SysML)* é uma linguagem de modelagem gráfica com base semântica para representar requisitos, comportamento, estrutura e propriedades dos sistemas e seus componentes, e destina-se a modelar sistemas automotivos, médicos, aeroespaciais, etc.

“A engenharia de sistemas baseada em modelos é a aplicação formalizada de modelagem para apoiar os requisitos de sistemas, projeto, análise, verificação e validação das atividades iniciadas na fase de projeto conceitual e continuando ao longo do desenvolvimento das fases posteriores do ciclo de vida” [INCOSE 2007].

3.4 Concepção do Segmento Solo de Missões Espaciais: Proposta de um Framework

As agências espaciais, como: CNES, DLR, ESA, ESOC, JAXA e NASA, estimulam iniciativas e o desenvolvimento de projetos, alinhadas entre o segmento espacial e o segmento solo, que visam a eficiência, a interoperabilidade, o *cross support* e a redução de riscos e de custos.

O segmento espacial, de forma clássica, apresenta requisitos que determinam a concepção e projeto da missão e direcionam novos modos (modelos) de controle e operação que são solicitadas ao segmento solo.

Na perspectiva do segmento solo, é essencial demonstrar a inovação de conceitos que são solicitados aos sistemas devido ao crescimento do volume e tipos de dados e seus processos, por exemplo, *machine learning*, *artificial intelligence* (sistemas especialistas) e o emprego de protocolos de comunicação, como o SLE e do protocolo para transporte de arquivos *CCSDS File Delivery Protocol (CFDP)* [CCSDS 2007] e [Haddow et al. 2012], processamento *onboard*, e da alta taxa de dados para os enlaces de *uplink* e *downlink*.

Neste cenário, os sistemas se tornam mais complexos e a herança de sucesso do desenvolvimento de projetos deve ser acompanhada de mecanismos que possibilitem colaborações entre os interessados e assegurar o cumprimento dos objetivos das missões.

A proposta de um framework baseado em modelos para a concepção do segmento solo de missões espaciais contribui nas pesquisas que visam aumentar a eficiência do segmento solo na recepção, controle, armazenamento, distribuição e acesso por múltiplos usuários, e permite a proposição, concepção e especificação de requisitos do segmento solo que podem



colaborar para definir ou refinar os requisitos da arquitetura do segmento espacial. A Figura 4 apresenta uma visão geral dos elementos do framework proposto.

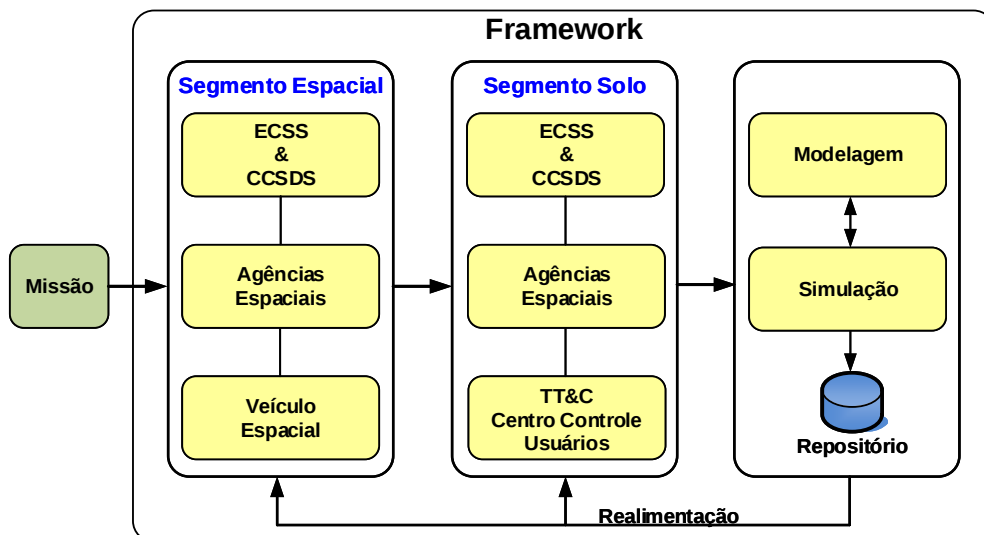


Figura 4. Concepção do Segmento Solo de Missões Espaciais – Framework proposto.

Neste Framework os requisitos da missão direcionam, inicialmente, o desenvolvimento do segmento espacial e definem os requisitos do segmento solo. Estes conjuntos de requisitos permitem a modelagem, simulação e avaliação do comportamento dos sistemas envolvidos, com realimentações para cada segmento, e análise dos resultados.

A Figura 5 ilustra um ambiente de avaliação constituído de modelos dos módulos de serviços, cargas úteis, segmento solo, protocolos que serão formalizados pela MBSE [Friedenthal et al. 2009].

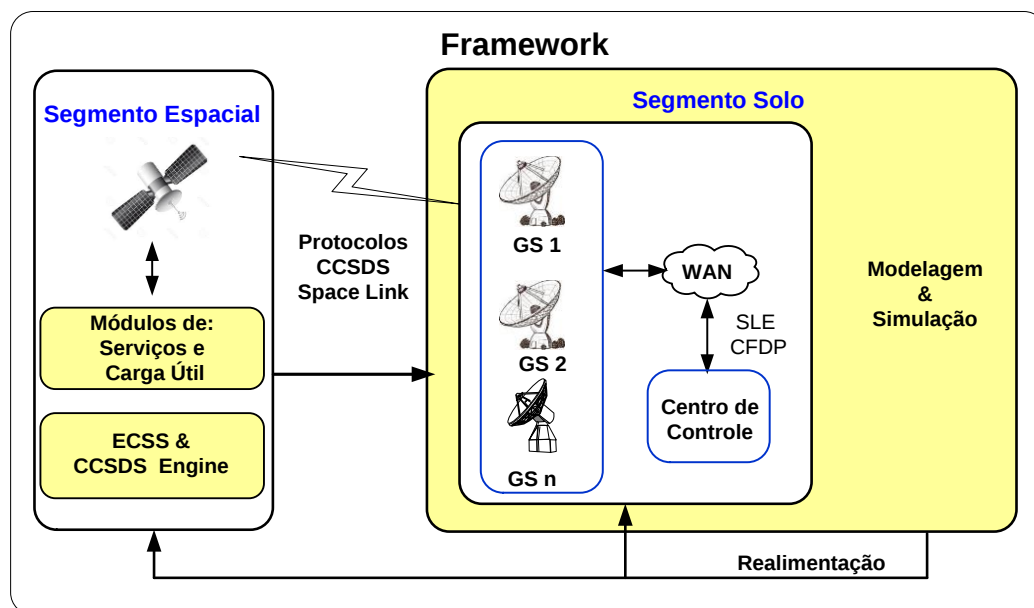


Figura 5. Ambiente para avaliação do Framework para Concepção do Segmento Solo.



3.4.1 Exemplo de aplicação do Framework

Consideremos que durante a fase de concepção de veículo espacial é encontrada como possível solução a redução de armazenamento de dados a bordo para atender requisitos de consumo de potência, de massa e do cronograma de desenvolvimento do veículo espacial.

O segmento solo, existente ou em desenvolvimento, atende o requisito: redução de armazenamento de dados a bordo?

Quais os impactos no segmento solo relativos aos cenários de operação, aos processos e as interfaces? Há aumento do número de passagens pela estação terrena?

Segundo [Smith et al. 2014] as alterações na concepção do veículo espacial normalmente geram requisitos e custos adicionais para o segmento solo e os impactos podem ser mais difíceis de avaliar sem análises complexas.

Neste exemplo, um modelo pode colaborar para a avaliação dos impactos reais, no segmento solo, das alterações propostas no veículo espacial e antecipar a apresentação de novas opções. A modelagem e análises no início do ciclo de desenvolvimento pode reduzir a necessidade de revisão do projeto, a avaliação de soluções alternativas, os custos e riscos ao final do desenvolvimento.

4. Conclusão

Esta pesquisa busca analisar o estado da arte e contribuir com soluções que atendam as demandas nos cenários nacional e internacional. Os resultados preliminares direcionam nossos esforços para a concepção de soluções para sistemas espaciais, na perspectiva do segmento solo, de acordo com os princípios da *Model-Based Systems Engineering* e a colaboração de sistemas especialistas, a fim de demonstrar suas possíveis vantagens (comunicação, qualidade, produtividade e redução de riscos) e eventuais desvantagens.

Um modelo pode colaborar para a avaliação dos impactos reais, no segmento solo, das alterações propostas no veículo espacial e antecipar a apresentação de novas opções no início do desenvolvimento e continuar ao longo das fases posteriores do ciclo de vida dos sistemas.

Neste contexto, como trabalho futuro, espera-se contribuir com as atividades do Centro de Projeto Integrado de Missões Espaciais (CPRIME/INPE) para estabelecer requisitos do segmento solo que podem colaborar para definição dos requisitos da arquitetura do segmento espacial.

Agradecimentos: Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo suporte, aos organizadores do WETE 2020 e a Pós-Graduação que possibilitaram a realização deste trabalho.



Referências

- Barkley, E., et al. (2006) "CCSDS SLE service management : real-world use cases", In: International Conference on Space Operations, Rome, Italy. Proceedings... Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2014/39898>>. Acesso em: 10 de fev. de 2017.
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2003) "TM space data link protocol - CCSDS 132.0-B-1". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems.
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2005) "Cross support reference model - Part 1: space link extension services - CCSDS 910.4-B-2". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems.
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2006) "Cross support concept - Part 1: space link extension services - CCSDS 910.3-G-3". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems.
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2007) "CCSDS File Delivery Protocol (CFDP) - Part 1: Introduction and Overview CCSDS 720.1-G-3. Green Book. Issue 3". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems.
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2009) "Space communication cross support - service management-service specification - CCSDS 910.11-B-1". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems.
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2010a) "Space link extension - return all frames service specification - CCSDS 911.1-B-3". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems. (sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/07.22.12.40-Nota Técnica).
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2010b) "Space link extension - forward cltu service specification - CCSDS 912.1-B-3". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems. (sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/07.22.13.02).
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2010c) "Space link extension - return channel frames service specification - CCSDS 911.2-B-2". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems. (sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/07.22.12.45-Nota Técnica).
- Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) (2011) "Space communication cross support - service management - operations concept - CCSDS 910.14-G-1". Reston: Consultative Committee for Space Data Systems. (sid.inpe.br/mtc-m18/2011/06.17.15.22-Nota Técnica).
- European Cooperation for Space Standardization (ECSS) (2003). "ECSS-E-70-41A. Space engineering - ground systems and operations telemetry and telecommand packet utilization". Disponível em: <<http://www.ecss.nl/>>. Acesso em: 10 de maio de 2018.
- European Cooperation for Space Standardization (ECSS) (2008) "ECSS-E-ST-70C. Space engineering - ground systems and operations". Disponível em: <<http://www.ecss.nl/>>. Acesso em: 05 de maio de 2016.



- European Space Agency (ESA) (2020) "Estrack Ground Stations". Disponível em: https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Estrack/Estrack_ground_stations
Acesso em: 20 de maio de 2020.
- Fortescue, P.; Stark, J.; Swinerd, G. (2003) "Spacecraft systems engineering 3". Chichester, UK : John Wiley. ISBN: 678 ISBN 0-471-61951-5.
- Friedenthal, S.; Moore, A.; Steiner, R. (2009) "Practical guide to SysML: the systems Modeling Language". Amsterdam, The Netherlands: Morgan Kaufmann. ISBN 978-0-12-378607-4.
- Haddow, C. R.; Pecchioli M.; Montagnon, E. and Flentge, F. (2012) "File Based Operations – The Way Ahead", In International Conference on Space Operations, Stockholm, Sweden. Proceedings.. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/book/10.2514/MSPOPS12>
Acesso em: 05 de maio de 2018.
- International Council on Systems Engineering (INCOSE) (2020) "Systems Engineering Vision 2020, version 2.03". Seattle, WA: International Council on Systems Engineering, Seattle, WA, INCOSE-TP-2004-004-02.
- Julio Filho, A. C. (2015) "An Architecture for Dynamic Management of the Space Link Extension Protocol Services". Dissertation (Master's degree in Space Systems Engineering and Management) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, Brazil. URL:<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HP2P7P> (acesso em ago. de 2018).
- Julio Filho, A. C.; Ambrosio, A. M.; Ferreira, M. G. V.; Loureiro, G. (2019) "The China-Brazil Earth Resources Satellite - CBERS-4A: a proposal for ground segment based on the space link extension protocol services". In: International Astronautical Congress 70º, Washington, DC.
- Larson, W.J.; Wertz, J. R. (Ed). (1999) "Space mission analysis and design 3". Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic, 1999. ISBN: 969306936 ISBN 1-881883-10-8.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2013) "NASA Procedural Requirements - NPR 7123.1B. Systems Engineering Processes and Requirements". Washington, DC.
- Pietras, J. V.; Barkley, E.J.; Crowson, A. (2010) "CCSDS space communication cross support service management". In: International Conference on Space Operations, Huntsville, Alabama, EUA. Proceedings... Disponível em: <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2010-2283>. Acesso em: 12 de abr. de 2018.
- Schulz, K.J., et al. (2002) "ESA's approach to stations and communication networks interoperability". In: International Conference on Space Operations, Houston, Texas, USA. Proceedings...Disponível em: <http://www.spaceops.org/2002/papers/SpaceOps02-P-T1-14.pdf>. Acesso em: 13 de abr. de 2018.
- Smith, R.R., Schimmels, K. A., Lock, P.D., Valerio, C.P. (2014) "A Model-Based Approach to Developing Your Mission Operation System". In: Proceedings International Conference on Space Operations, Pasadena, CA. Proceeding...URL: <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2014-1793> Acesso em: 10 de dez. de 2019.