



Concepção de um Subsistema de Microssatélite usando Processos Colaborativos e Modelagem Multiparadigma

OLIVA, L.L.¹, SOUZA, M.L.O.²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Doutorado do curso de Mecânica Espacial e Controle – CMC.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Pesquisador Titular do Departamento de Mecânica e Controle – DMC.

leonardoleite.oliva@gmail.com

Resumo. *O trabalho em questão tem por escopo desenvolver, em linhas gerais, um subsistema de um microssatélite usando duas ou mais abordagens de modelagem, inseridas numa rede colaborativa virtual. São levantadas características particulares desses veículos, que levam ao delineamento dos requisitos gerais dos subsistemas em questão. É feito um diagrama de relações entre os submodelos envolvidos direta ou indiretamente no projeto. Este serve de base para o desenvolvimento das ferramentas (de cálculo e de simulação) e sua conexão na rede. São propostas três cadeias de desenvolvimento, cada qual com seus prós e contras. Espera-se construir uma cadeia que opere de modo sinérgico, reduzindo o tempo de desenvolvimento inicial de um sistema.*

Palavras-chave: Abordagem física; Abordagem informacional; Ambiente colaborativo; Simulação; Validação.

1. Introdução

A integração de ferramentas de desenvolvimento ocorre à medida que a complexidade dos sistemas aumenta, ocasionando um crescimento exponencial de custos (Bearden 2001). Dessa forma, a construção de um ambiente virtual composto por ferramentas remotas, de diversos domínios e abordagens, que possam ser integradas e executadas desde as etapas iniciais de desenvolvimento, é um fator crucial em termos de custo e tempo. Esse processo de fusão computacional permite a incorporação do fenômeno da complexidade nos sistemas representados, o que leva a uma melhor orientação do ciclo de vida do produto.

A possibilidade de executar uma cadeia de processo remotamente dá a possibilidade de cada equipe melhorar seu modelo de forma mais eficaz, balizada pelas restrições adjacentes. Além disso, a não obrigatoriedade de possuir ferramentas de cálculo e simulação numa única máquina libera o usuário da necessidade de usar (pagar) várias licenças e de possuir equipes grandes, com várias especialidades, numa única instituição /



local. Soma-se a isso o fato das simulações exigirem menos recursos computacionais – e, portanto economizarem tempo. Dessa forma, a execução remota vence as barreiras espaciais e temporais presentes em todo grande projeto, seja ele de ciência, engenharia, economia ou política.

Pode-se estabelecer uma comparação entre desenvolvimento tradicional e colaborativo a partir de três medidas de efetividade: processo, informação e ferramentas (Tabela 1).

Tabela 1. Comparativo entre tipos de desenvolvimentos. [Fonte: produção do autor]

Desenvolvimento Tradicional (Td) e Colaborativo (Co)		
Medidas	Tipos	Características relevantes
Processo	Simultânea (Td)	Integração e fidelidade.
	Sequencial (Co)	Dependência da ferramenta, porém amplitude de capacidades.
Informação	Isolado (Td)	Acesso difícil a relatórios e informação. Pouco intercâmbio de conhecimento. Baixa taxa de aprendizado em equipe.
	Compartilhado (Co)	Agilidade no desenvolvimento. Comunicação fluída. Alinhamento de objetivos. Alta taxa de aprendizado geral (equipe).
Ferramentas	Concentrado (Td)	Mais máquinas e demanda de memória (RAM / HD). Muitas licenças de software (alto custo). Grande dependência.
	Distribuído (Co)	Menos máquinas e demanda de memória. Poucas licenças de software (menor custo). Independência relativa.

O comparativo da Tabela 1 revela que a colaboração (Co) é mais sinérgica do que os métodos tradicionais (Td) do ponto de vista da fluidez de informação e das ferramentas. Enquanto a colaboração aumenta a transparência da informação e facilita a troca de resultados e conhecimento; as ferramentas, ao serem interligadas, aumentam a eficiência da rede com a minimização de máquinas, licenças e consumo de memória. Para projetos de alto índice de complexidade as vantagens de economia se tornam cada vez mais evidentes, de acordo com [Bearden, 2001].

O objetivo deste trabalho é conceber em linhas gerais um subsistema de controle de atitude de um microsatélite (10 a 100 kg) fazendo uso de: (a) subsistemas / fenômenos diretamente relacionados; (b) modelos simbólicos apoiados em diferentes paradigmas; (c) ferramentas computacionais diversas, com finalidades distintas e; (d) simulação interconectada através de um ambiente que integre as ferramentas. Além disso, propõe-se o uso de ferramentas que vise melhorar a interação entre os diversos agentes da rede, (ex: convergência de valores, otimização, validação, etc). Todo processo de desenvolvimento e



resultados serão documentados e analisados à luz das demandas hodiernas de representação computacional de sistemas complexos.

2. Metodologia

Para atingir os fins estabelecidos foi estabelecido um roteiro que parte de uma revisão de literatura – que esclarece os princípios do pensamento sistêmico, apresenta o conceito de modelo, compara abordagens (física x informacional) e chega até o modo geral de funcionamento de uma rede colaborativa. A partir daí, definiu-se um subsistema a ser desenvolvido em suas primeiras fases usando os métodos e ferramentas propostos para um microsatélite. A partir daí são introduzidos os conceitos de micropropulsão e de controle desses veículos, que servirão de plataforma para o desenvolvimento de modelos simbólicos. A representação analítica foi feita de modo matemática – facilmente convertível em diagramas de blocos (DB) – ou diretamente por grafos de ligação (GL), a depender da natureza do subsistema / fenômeno em questão. Cada modelo simbólico desenvolvido é mais bem implementado por uma ferramenta. A relação entre estas é estabelecida desde o princípio do estudo, dando um mapa de relações. Ver-se-á que cada ligação tem uma natureza específica, e que a partir desse mapeamento é possível estabelecer os fundamentos para a construção de uma biblioteca de modelos que permite o reuso dos mesmos.

Baseado nas premissas e requisitos do subsistema, as ferramentas foram: desenvolvida simbólica (i) e computacionalmente (ii); integradas (iii) e interconectadas em rede colaborativa (iv) – cuja natureza será descrita adiante – e executadas (v) a título de constatar a funcionalidade da mesma. A partir daí pôde-se traçar sugestões de melhorias e acréscimos para futuros trabalhos.

A princípio são propostas três cadeias de desenvolvimento (Figura 1).

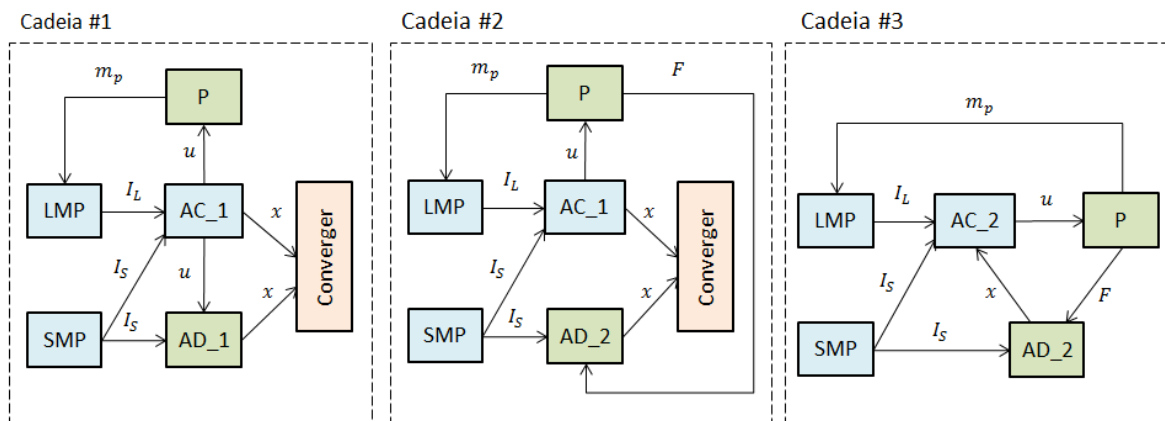


Figura 1. Cadeias de processo propostas. [Fonte: produção do autor].



Cada retângulo representa uma ferramenta. A cor azul denota que se trata de um modelo que usa abordagem informacional, o que é o caso das ferramentas de cálculo das propriedades inerciais da estrutura (*Structure Mass Properties – SMP*) e do propelente (*Liquid Mass Properties – SMP*) e da lógica de controle (*Attitude Control - AC*). Este último foi elaborado em duas versões: uma modelando em espaço de estados apenas a planta (dinâmica do satélite); e outra modelando tanto esta quanto o atuador (propulsor). A cor verde indica os modelos de apoiados na abordagem física: a mecânica rotacional do veículo (*Attitude Dynamics – AD*) e o subsistema propulsivo (*Propulsion – P*). A ferramenta de convergência (*converger*, em rosa) visa estabelecer uma comparação entre variáveis idênticas oriundas de duas ferramentas distintas.

Os efeitos ambientais relevantes como torque magnético e aerodinâmico foram colocados explicitamente na ferramenta AD, ao passo que os torques gravitacionais foram inseridos na própria dinâmica veicular quando o modelo simbólico foi construído (implícito).

As variáveis que fluem na cadeia são: momento de inércia da estrutura (I_S), fixa; e do propelente (I_L), variável ao longo da vida operacional; o vetor sinal de controle u ; o vetor de estados x ; o vetor empuxo F ; e o escalar massa de propelente m_p .

O diagrama de relações (Figura 2) serve de bússola para a construção futura de uma biblioteca de modelos, que facilitará a política de reuso dos mesmos dentro de uma instituição.

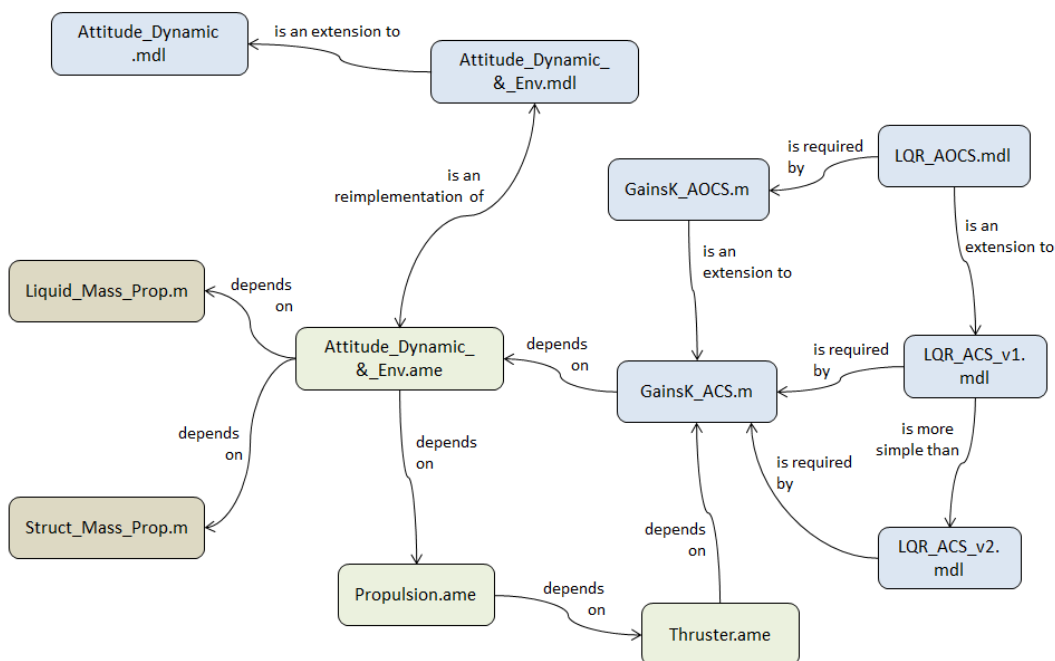


Figura 2 Diagrama de relações entre modelos. [Fonte: produção do autor]



Na Figura 2 existem ferramentas de cálculo (*scripts* MatLab .m, em cinza), de simulação física (modelos *AMESim*, .ame) e informacional (modelos em MatLab/Simulink, .m/.mdl). A natureza de cada uma delas e seu escopo determina o tipo de relação. Estas podem ser unidirecionais e bidirecionais. No primeiro caso podemos citar o modelo informacional de controle de atitude e órbita (AOCS), que é uma extensão do modelo de controle de atitude (ACS) – a relação inversa não se aplica. No segundo caso pode ser citado a dinâmica de atitude e o ambiente espacial, cujo modelo informacional (*Attitude_dynamic_env.mdl*) é uma reimplantação de outro físico (*Attitude_dynamic_env.ame*), e vice-versa. Mais detalhes dos tipos de relações podem ser encontrados em [OLIVA, 2018].

3. Desenvolvimento e Integração das Ferramentas

O primeiro passo do estudo consistiu em estabelecer as características gerais, mais tangíveis (dimensões, massa, potência) dos microssatélites e levantar os conceitos de micropropulsão existentes, além de algumas questões particulares do tipo de controle. A partir desse ponto foram estabelecidas as hipóteses e os modelos foram elaborados, inicialmente em seu aspecto simbólico (conceitual), para em sequência ser elaborado em sua vertente computacional (implementação).

Baseado em características hidrodinâmicas e termodinâmicas adotou-se um sistema monopropelente de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Detalhes que levaram a essa escolha podem analisados em outro trabalho do autor.

O modelo ambiental considerou os torques de campo gravitacional, magnético e aerodinâmico. A Tabela 2 revela que esses torques, somados à variação do momento de inércia (motivo da construção da ferramenta LMP, Figura 1) do veículo, devem ser incorporados ao modelo ambiental – que por sua vez influencia o controle do satélite.

Tabela 2. Fatores ambientais mais influentes para diferentes classes de satélites.
[Fonte: produção do autor]

Fatores mais influentes (de controle) para diferentes classes de satélites			Classe do satélite		
			Convencion al [>500 kg]	Minisat [500-100 kg]	Microsat [100-10 kg]
Fatores influentes para projeto de SCAO	Missão	Órbita	Torques de distúrbio	X	X
			Campo gravitacional		X
			Campo magnético		X
			Carga útil	X	X
			Variação de momento de inércia		X
			Geometria	X	X
			Custos	X	X
			Requisitos de estabilização		X



Equações clássicas da estática para determinação de propriedades inerciais foram usadas para a implementação da ferramenta SMP. Para implementar a lei de controle foi adotado o método do regulador quadrático linear (*Linear Quadratic Regulator* - LQR), que é o mais adequado para o tipo de planta em questão [SOUZA, 2013]. No case de estudo foi admitido que os estados estão disponíveis para realimentação.

O sistema foi assumido como linear, sendo descrito pelas equações matriciais de estado.

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) \quad (2)$$

A Teoria de Controle afirma que se todos estados são realimentados, o par (A,B) é controlável e o par (A,C) é observável, o que colima num controlador LQR cuja expressão de controle é dada por:

$$u(t) = K_{LQR} \cdot x(t) \quad (3)$$

Que minimiza o funcional que representa a soma de todo controle e energia [2]. Após a resolução da Equação de Ricatti, chega-se a uma expressão em malha fechada, dada por:

$$\dot{x}(t) = (A - BK_{LQR}) \cdot x(t) \quad (4)$$

A dinâmica de atitude do satélite (AD) se funde com as condições ambientais, resultando num sistema com três equações diferenciais de movimento [2].

Os modelos computacionais de atitude e do subsistema propulsivo foram construídos baseados em Grafos de Ligação (GL), que representam diretamente fluxos de potência – seja matéria ou energia entre os componentes. Estes, por sua vez, devem conversar com o controlador LQR, construído a partir do equacionamento matemático que apoia o modelo em Diagrama de Blocos (DB). A determinação das propriedades inerciais cabe às ferramentas de cálculo, que alimentam tanto os modelos informacionais quanto os físicos, direta ou indiretamente. Devido à necessidade de síntese serão mostradas, em linhas gerais, como as ferramentas foram integradas ao RCE e como irão se interconectar.

O esquema da Figura 3 fornece uma visão geral do que se pretende implementar.

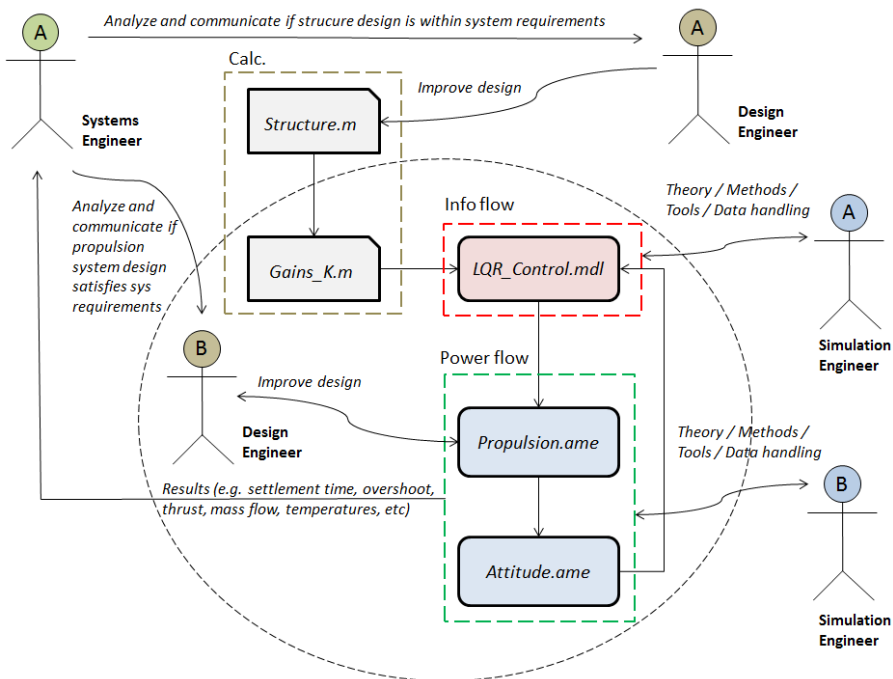


Figura 3 Esquema geral de funcionamento do processo colaborativo. [Fonte: produção do autor]

Existem três classes de engenheiros: de sistema, de projeto e de simulação. Cada qual possui um escopo específico dentro da funcionalidade que lhe é característica. O engenheiro de sistemas passa para o de projeto estrutural os requisitos físicos do sistema. Este, por sua vez, delimita (calcula) parâmetros estruturais, que servirão de base para a determinação dos ganhos LQR. Esses alimentam o modelo de simulação do controlador, que determina os sinais que irão realimentar os modelos físicos. No caso simplificado (cadeia #1 ou #2) não há um *loop* entre as ferramentas AC e AD, ou seja, a ferramenta P não estabelece um elo entre ambos. Caso se pretenda ser fiel ao diagrama (Figura 3), a cadeia #3 é a mais adequada, pois considera o atuador (propulsor). Isso implica em reconfigurar a implementação de AC – daí versão AC_1 e AC_2 – inserindo um modelo em espaço de estados que precede a planta. Este recebe o sinal e dá o empuxo à planta. Esta, por sua vez, fornece ao controlador o vetor estados que servirá de base para a realimentação. Fecha-se assim um ciclo. Quanto à dinâmica de atitude, quando se recebe empuxo (F) e não sinal (u) como entrada, deve-se fazer um simples ajuste de configuração no modelo e no roteiro de pré-execução da ferramenta. Nesse caso a mudança AD_1 e AD_2 é um pequeno detalhe.

4. Resultados e Discussão

Todas as ferramentas devem ser acionadas via linha de comando. Existe um roteiro pré-execução e um pós-execução que devem copiar arquivos e modelos necessários à execução, além de captar os resultados.



As ferramentas de cálculo SMP e LMP já foram integradas e funcionam adequadamente. AC (versão 1 e 2) é acionado via um arquivo .m (ganhos K), que por sua vez chama o modelo .mdl, que armazena os valores de interesse e deixa-os num diretório específico. AD e P – construídas em *AMESim* – possuem uma lógica de acionamento diferente. Deve-se criar um arquivo compactado (.zip) de um modelo .ame, e a seguir descompactá-los na pasta de trabalho. Aí estarão os arquivos que permitem o comando de execução do modelo (simulação). Após a execução dos modelos físicos iniciar-se-á a construção das cadeias de processo.

5. Conclusão

A eficácia da rede colaborativa é evidente se aplicada em grande escala. Esse estudo propõe-se a iniciar uma aplicação em escala micro, fazendo uso de diferentes paradigmas de modelagem. A incorporação de ferramentas diferenciadas sem que isso afete o andamento das equipes de desenvolvimento é o grande mérito do desenvolvimento colaborativo. Ao mesmo tempo, aumenta a confiabilidade nos resultados, colimando em tempo de desenvolvimento menor e menos custos.

Os próximos passos consistem em amadurecer a rede, incorporando a ferramenta de convergência e interconectando as ferramentas em sua totalidade.

Agradecimentos: Gostaria de agradecer ao INPE pela oportunidade de estudo e pesquisa, ao meu pai pelo auxílio e minha esposa pelo apoio. Agradeço igualmente o Rodrigo Britto, da Embraer que, apesar de todos empecilhos inerentes à rotina, encontrou tempo para me auxiliar com o manejo do ambiente colaborativo.

Referências

Gerndt, A et. al. “Model Linking to Improve Visibility and Reusability of Models during Space System Development”. German Aerospace Center (DLR). Simulation and Software Technology.

Oliva, L.L. and Souza, M.L.O. (2018) “Conception of a Microsatellite System using Collaborative Multidisciplinary Processes and Model Based Systems Engineering”, In: SAE international 2018.

Souza, L.C.G, Pinheiro, E.R. “Projeto do Sistema de Controle de Atitude de um Microsatélite usando o LQG”. Guidelines of Workshop on Space Engineering and Technology, June 2011.