

## AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO AMBIENTE MATLAB/SIMULINK PARA A MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS AEROESPACIAIS

Código do Trabalho:

**52045**

**Resumo:** Atualmente se faz cada vez mais necessária a modelagem e a simulação de um sistema real de forma a permitir a análise do desenvolvimento de determinados aspectos do sistema sem a necessidade de observá-las no mundo real, seja por impossibilidade seja pelo elevado custo. Para esta modelagem matemática modernamente usam-se recursos computacionais, como os ambientes de modelagem e simulação, que permitem descrevê-la em termos numéricos/ computacionais, inclusive para o caso em que a modelagem e/ou a solução do problema não pode ser feita através de técnicas analíticas.

Neste trabalho efetuamos uma avaliação preliminar do ambiente MATLAB/Simulink para a modelagem e a simulação de veículos aeroespaciais. Para tanto modelamos e simulamos um veículo hipotético com parâmetros disponíveis na literatura aberta para servir de termo de comparação com nossos resultados. Para a avaliação adotamos critérios previamente estabelecidos, tais como: facilidade de modelagem, fidelidade das simulações, recursos para modelagem e simulação, iniciar, parar e repetir simulações, resultados apresentados, geração de códigos e documentação dos modelos.

**Palavras-chave:** avaliação de ambientes de simulação, veículos aeroespaciais, MATLAB/Simulink, sistemas dinâmicos.

## **1. INTRODUÇÃO**

A indústria aeroespacial, entre tantas outras, é uma das indústrias que mais se valem da modelagem e simulação de sistemas físicos no desenvolvimento de seus produtos. Por impossibilidades ou dificuldades, sejam elas físicas ou econômicas, de se avaliar o comportamento do sistema observando-o no mundo real, recorrem-se às simulações, que podem ser físicas, computacionais, ou de ambas as formas. Estas simulações são ferramentas presentes em todas as fases do desenvolvimento de um produto, desde as especificações até o lançamento do produto no mercado, passando pelo projeto, desenvolvimento, testes, entre outras etapas.

Para realizar estas simulações, se faz cada vez mais necessário o uso de recursos computacionais, que permitem não somente que a análise matemática do modelo e a otimização dos seus componentes seja feita de forma mais rápida, mas que também problemas que não podem ser resolvidos analiticamente o sejam por métodos numéricos.

Progressivamente, as várias ferramentas computacionais utilizadas para este fim foram sendo agrupadas em ambientes de modelagem, identificação e simulação – MIS. Entre estes ambientes de MIS encontra-se o MATLAB, que, como se exige desses ambientes, atende vários dos requisitos para modelagem de um sistema físico, a saber: inclusão no modelo de todos os seus subsistemas; possibilidade de ajustes na complexidade (graus de realismo) dos modelos de acordo com a aplicação; simulação não somente do sistema completo, mas também do ambiente no qual ele se insere; além da possibilidade de se simular partes diferentes do sistema com níveis diferentes de precisão; e possibilidade de reuso do modelo. Este tipo de ambiente reduz o tempo de desenvolvimento do produto, além de melhorar os resultados buscados.

## **2. REQUISITOS ESPECÍFICOS DA ENGENHARIA AEROSESPACIAL**

No desenvolvimento de um veículo aeroespacial existem vários requisitos a serem atendidos por um ambiente de simulação. Um deles é a padronização da linguagem para que, ao se trocar informações sobre o projeto com grupos de trabalho localizados até em vários países, os significados não se confundam. Outros requisitos importantes são: interoperabilidade dos modelos e códigos gerados; possibilidade de reuso dos modelos para produção e testes; possibilidade de utilização dos protótipos para certificação do produto e treinamento de clientes; possibilidade de reuso e utilização de softwares legados, já validados e aprovados; sendo que com isto a confiabilidade do produto aumenta e o tempo de desenvolvimento do produto é reduzido.

## **3. MODELO DE UM VEÍCULO AEROSESPACIAL EM MALHA ABERTA**

Neste trabalho modelamos um veículo aeroespacial hipotético em malha aberta, encontrado na literatura. Para que o modelo seja válido, todos os seus subsistemas devem ser representados e modelados. Além disso, o modelo do ambiente deve estar incluído com todas as suas influências sobre o sistema. A modelagem dos seus subsistemas é mostrada abaixo, na Fig (1):

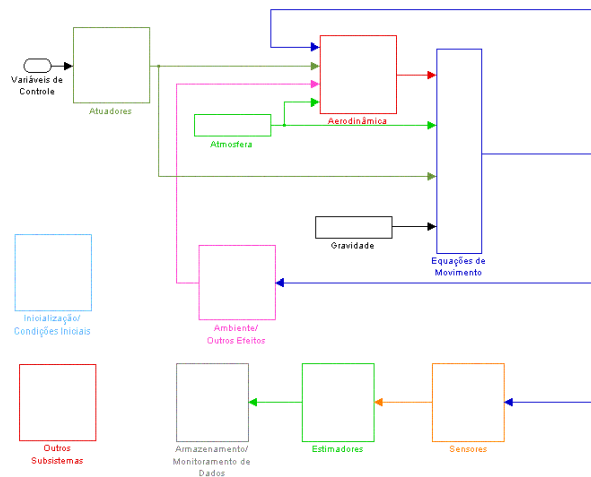


Figura 1. Modelo genérico de um veículo aeroespacial em malha aberta

À medida que se faz necessário, deve ser possível aumentar o nível de fidelidade do modelo, acrescentar subsistemas, e mudar o nível de precisão das simulações. A modelagem matemática deste veículo hipotético foi feita conforme parâmetros a seguir:

Densidade do ar =  $1,225 \text{ kg/m}^3$  (ISA h=0m)

$V_{\text{som}} = 340,27 \text{ m/s}$  (ISA h=0m)

$g_i = [0 \ 0 \ 9,81]^T \text{ m/s}^2$

$S = 0,0185 \text{ m}^2$  (área representativa)

$d = 0,152 \text{ m}$  (diâmetro representativo)

Massa  $m = 70 \text{ kg}$

Momentos de inércia:  $I_x = 0,78 \text{ kgm}^2$  e  $I_y = 69,8 \text{ kgm}^2$

Máximo fator de carga = 40g

Desl\_sensor\_xb = 1m (acelerômetros posicionados 1m à frente do CG)

Saída =  $[V_b \ \omega_b \ \text{quat} \ \text{pos}_{\text{inercial}} \ \alpha \ \beta \ f_{yb} \ f_{zb}]^T$

Onde  $V_b$  é a velocidade linear no referencial do corpo, com componentes  $[u \ v \ w]^T$

$\omega_b$  é a velocidade angular no referencial do corpo, com componentes  $[p \ q \ r]^T$

quat é o quartérion ref. à posição medida pelo veículo, com componentes  $[\lambda \ \rho_x \ \rho_y \ \rho_z]^T$

$\text{pos}_{\text{inercial}}$  é a posição inercial do veículo, com componentes  $[x_i \ y_i \ z_i]^T$

$\alpha$  é o ângulo de ataque

$\beta$  é o ângulo de derrapagem

$f_{yb}, f_{zb}$  são medidas de força específica

Com controle dado por: Controle =  $[\delta_{\text{pitch}} \ \delta_{\text{yaw}}]^T$

Os coeficientes aerodinâmicos foram obtidos através da extrapolação de dados da Tab (1):

Tabela 1. Valores de coeficientes aerodinâmicos utilizados na modelagem do veículo aeroespacial:

<i>Mach</i>	0	0.12	0.27	0.41	0.56	0.72	0.88	1.04	1.2	1.35	1.47	2.51
<i>CD0</i>	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.96	1.04	1.21	1.22	1.21	1.19	1.17
<i>CL<math>\alpha^*.5</math></i>	29.03	29.03	29.15	29.41	29.71	30.09	30.98	33.71	34.58	34.92	34.76	34.53
<i>CL<math>\delta</math></i>	2.9	2.9	2.91	2.94	3.0	3.14	3.27	3.33	2.49	2.02	1.85	1.80
<i>Clp*(-1)</i>	2131.9	2131.9	2131.9	2148.3	2159.5	2170.8	2204.1	2313.6	2421.4	2476.8	2483.1	2475.2
<i>Cm<math>\alpha^*(-1)</math></i>	16.08	16.08	16.64	17.88	17.82	15.84	12.88	11.36	49.21	64.69	77.87	87.64
<i>Cmq*(-10<sup>4</sup>)</i>	2.685	2.685	2.703	2.742	2.792	2.856	2.944	3.366	3.632	3.976	4.088	4.146
<i>Cm<math>\delta^*(-1)</math></i>	71.53	71.53	72.12	73.41	75.72	79.52	85.71	104.0	99.27	93.29	87.66	84.36

$C_{l\alpha\beta}=2e-3$  (coeficiente de rolamento induzido por ângulo de incidência assimétrico)

Estes coeficientes foram utilizados para se calcular os seguintes parâmetros:

$$C_x = -[C_{D0} + C_{La}(\alpha^2 + \beta^2)] \quad (1)$$

$$C_y = -[C_{La}\beta + C_{L\delta}\delta_{yaw}] \quad (2)$$

$$C_z = -[C_{La}\alpha + C_{L\delta}\delta_{pitch}] \quad (3)$$

$$F_{xb} = C_x \cdot qS \quad (4)$$

$$F_{yb} = C_y \cdot qS \quad (5)$$

$$F_{zb} = C_z \cdot qS \quad (6)$$

$$C_l = C_{lp} \frac{p \cdot d}{2V_{tot}} + C_{l\alpha\beta}(\beta - \alpha)(\beta + \alpha)\alpha\beta \quad (7)$$

$$M_{xb} = C_l \cdot qSd \quad (10)$$

$$C_m = C_{m\alpha}\alpha + C_{mq} \frac{q \cdot d}{2V_{tot}} + C_{m\delta}\delta_{pitch} \quad (8)$$

$$M_{yb} = C_m \cdot qSd \quad (11)$$

$$C_n = -C_{m\alpha}\beta + C_{mq} \frac{r \cdot d}{2V_{tot}} - C_{m\delta}\delta_{yaw} \quad (9)$$

$$M_{zb} = C_n \cdot qSd \quad (12)$$

Onde  $V_{tot}$  é o módulo da velocidade linear, dada por:

$$V_{tot} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (13)$$

e os parâmetros  $qS$  e  $qSd$  são dados por:

$$qS = q \cdot d \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

$$qSd = qS \cdot d \quad (15)$$

$$q \cdot d \cdot \sin \alpha = 0,5 \cdot \rho \cdot V_{tot}^2 \quad (16)$$

e os ângulos de ataque e derrapagem são dados pelas seguintes expressões:

$$\alpha = \text{atan}(w/u) \quad (17)$$

$$\beta = \text{asen}(v/V_{tot}) \quad (18)$$

Também, as medidas de força específicas são calculadas com o uso dos coeficientes aerodinâmicos, como se segue:

$$f_{yb} = \frac{C_y \cdot qS}{m} + \dot{r} \cdot \text{Desl\_sensor\_xb} \quad (19)$$

$$f_{zb} = \frac{C_z \cdot qS}{m} - \dot{q} \cdot \text{Desl\_sensor\_xb} \quad (20)$$

As equações dinâmicas são dadas por:

$$\dot{\vec{V}}_b = \frac{\vec{F}_b}{m} + \vec{g}_b + (\vec{V}_b \times \vec{\omega}_b) \quad (21)$$

$$\vec{g}_b = D_i^b \vec{g}_i \quad (22)$$

As outras equações de movimento utilizadas no diagrama de blocos e simulação do míssil são listadas abaixo:

$$\dot{p} = \frac{M_{xb}}{I_{xmissil}} \quad (23)$$

$$\dot{q} = \frac{M_{yb}}{I_{ymissil}} + p.r \quad (24)$$

$$\dot{r} = \frac{M_{zb}}{I_{ymissil}} - p.q \quad (25)$$

$$\dot{q}_{uat} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} q_{uat} \quad (26)$$

$$\dot{pos}_{inercial} = D_i^b [u \quad v \quad w]^T \quad (27)$$

A matriz de transformação do referencial inercial para o corpo é dada por:

$$D_i^b = \begin{bmatrix} \lambda^2 + \rho_x^2 - \rho_y^2 - \rho_z^2 & 2(\rho_x \rho_y - \lambda \rho_z) & 2(\rho_x \rho_z + \lambda \rho_y) \\ 2(\rho_x \rho_y + \lambda \rho_z) & \lambda^2 - \rho_x^2 + \rho_y^2 - \rho_z^2 & 2(\rho_y \rho_z - \lambda \rho_x) \\ 2(\rho_x \rho_z - \lambda \rho_y) & 2(\rho_y \rho_z + \lambda \rho_x) & \lambda^2 - \rho_x^2 - \rho_y^2 + \rho_z^2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Para que o MatLab possa realizar a simulação, é necessário introduzir as condições iniciais do problema, que são:

$$\begin{aligned} V_b(0) &= [750 \ 10 \ 4]^T \text{ m/s} \\ \omega_b(0) &= [220 \ 0 \ 0]^T \text{ graus/s} \\ quat(0) &= [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ D_i^b(0) &= I \\ pos_{inercial}(0) &= 0_{3 \times 1} \end{aligned}$$

A simulação deste veículo foi feita no ambiente MATLAB/ Simulink, com o objetivo de se fazer uma avaliação preliminar do ambiente segundo critérios previamente estabelecidos, como: facilidade de modelagem; fidelidade das simulações; recursos para modelagem e simulação; iniciar, parar e repetir simulações; resultados apresentados; geração de códigos; e documentação dos modelos.

#### 4. O AMBIENTE DE MIS MATLAB/SIMULINK

O MATLAB/Simulink é um sistema computacional que, como todo ambiente de MIS, tem a capacidade de manipular estruturas de dados, matrizes e vetores, etc. Inclui uma linguagem de programação de alto nível com capacidade para visualizar dados interativamente. Sua versão atual é o Release 14, embora a versão utilizada para esta avaliação tenha sido a Release 13. É um ambiente bastante difundido em todo o mundo, tanto na área acadêmica quanto na indústria. Sua estrutura é mostrada na Fig. (2) abaixo:

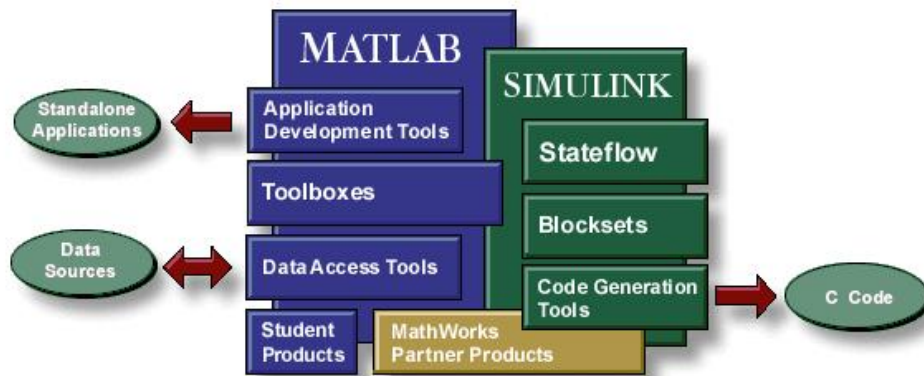


Figura 2. Arquitetura da família MATLAB. Fonte: The MathWorks (2004)

O nome MATLAB se refere a três componentes do ambiente: uma linguagem de programação interpretada, de comandos, para realização de cálculos numéricos; o ambiente de modelagem e simulação de sistemas físicos; e também a estrutura sobre a qual os comandos e dados são inseridos para realização de cálculos numéricos.

O MATLAB possui uma interface gráfica com o usuário, altamente intuitiva, e arquitetura aberta, permitindo a inclusão e modificação de funções do ambiente. Estas funções podem ser incluídas através de arquivos chamados *M-files*, que utilizam a própria linguagem MATLAB, ou rotinas em C, C++, Java, Fortran ou COM. A linguagem MATLAB oferece a facilidade de sua estrutura ter a mesma forma matemática escrita. Possui um ambiente gráfico em 2 ou 3 dimensões e conta, ainda com um amplo sistema de ajuda.

Existem pacotes de funções voltadas para áreas específicas, incluindo sistemas de controle, chamadas *toolboxes*, fabricados tanto pela própria The MathWorks quanto por terceiros. As *toolboxes* são construídas em linguagem MATLAB, podendo ser visualizadas e modificadas pelo usuário. O ambiente conta, ainda, com ferramentas de desenvolvimento de aplicações que permitem o uso por outros ambientes das aplicações *standalone* desenvolvidas em MATLAB. Possui também ferramentas de acesso de dados que importam e controlam a aquisição dos dados, além de permitir interfaces com dispositivos de *hardware*.

A simulação gráfica e interativa é feita no MATLAB através do Simulink, que representa graficamente os sistemas, permitindo a análise do comportamento de sistemas físicos. Possui uma linguagem de diagrama de blocos, que constrói modelos de simulação a partir de uma descrição por diagrama de blocos, trabalhando sobre a estrutura do MATLAB. Realiza análise, plotagem ou manipulação de modelos com a ajuda de uma biblioteca extensa de blocos pré-construídos.

Há também o ambiente gráfico de simulação para modelagem e projeto de sistemas que evoluem por eventos, o diagrama de fluxo de estados. Este diagrama utiliza o Simulink para apresentar soluções de projeto de controle ou lógica para sistemas embarcados.

Dentro do Simulink se encontram também as ferramentas para geração de código, *Real-Time Workshop* (RTW) e *Stateflow Coder*. O RTW gera códigos C ou ADA a partir dos diagramas de blocos do Simulink, possuindo extensão para geração de códigos para sistemas embarcados (RTW *Embedded Coder*). Já o *Stateflow Coder* gera códigos apenas em C a partir dos diagramas de fluxo de estados do Simulink e é facilmente integrável ao RTW.

A documentação do projeto é feita através do *Simulink Report Generator*, que cria um bloco que descreve totalmente o modelo construído em Simulink, incluindo as especificações de blocos, além de

documentar modelos do Simulink e diagramas de fluxo de estado em vários formatos, como HTML, RTF, XML, etc.

## 5. SIMULAÇÕES DE TESTE TÍPICOS DE UM VEÍCULO AEROESPACIAL HIPOTÉTICO NO AMBIENTE MATLAB/SIMULINK

O diagrama de blocos do modelo do veículo hipotético pode ser visto na Fig. (3):

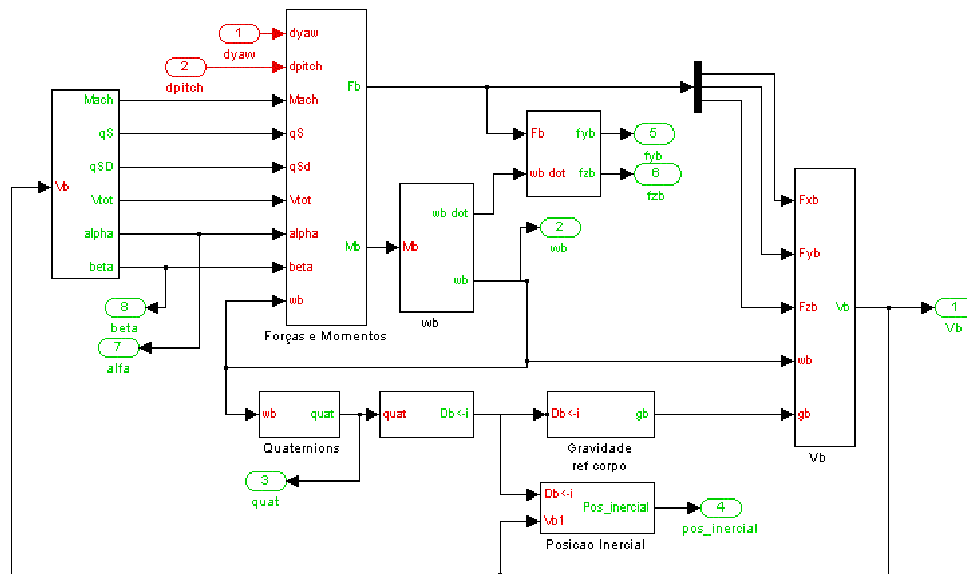


Figura 3. Diagrama de blocos do veículo hipotético em malha aberta feito no MATLAB/ Simulink

Alguns dos resultados da simulação são apresentados na Fig (4) abaixo:

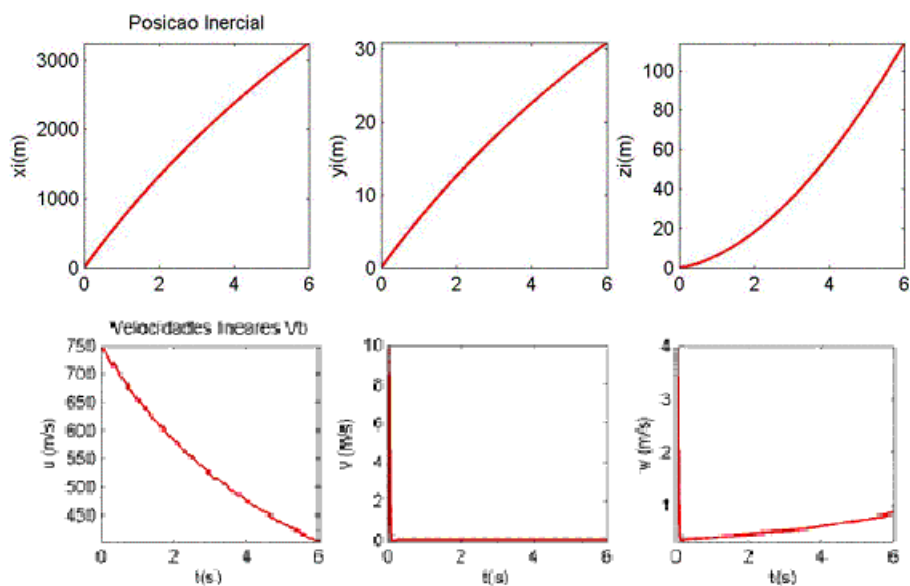


Figura 4. Alguns resultados da simulação do veículo hipotético feita em MATLAB/ Simulink

## 6. AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO AMBIENTE MATLAB/SIMULINK PARA A MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS AEROSPACIAIS

Uma primeira avaliação geral do ambiente MATLAB/ Simulink foi feita por Trivelato e Souza (2001) e é apresentada na Tab. (2). Ela considera aspectos como: instalação; uso; plataformas; suporte; interfaces; recursos para modelagem e simulação; apresentação dos resultados; documentação de projeto e código; geração de código; conversão contínuo- discreto; e suporte a tempo real.

Tabela 2. Avaliação geral das funcionalidades do ambiente MATLAB/Simulink (Trivelato e Souza, 2001):

Item	MATLAB
Instalação	Fácil
Uso	Fácil e intuitivo
Plataforma	DOS/WINDOWS, OpenVMS, UNIX, VxWorks, Maços (5.3)
Suporte	Muito bom
Interfaces	Visuais, gráficas e intuitivas
Recursos para modelagem/ simulação	Muito bom e vastíssimo se consideramos as toolboxes
Controle da simulação	Pause, resume e re-run
Apresentação de resultados	Objetos gráficos
Documentação de projeto	Muito boa
Documentação de código	Pobre
Geração de código	C (restrição) e ADA
Conversão contínuo /discreto	Necessita inclusão de sample e holder no modelo
Suporte a real-time	Toolboxes de terceiros

O ambiente é de utilização fácil, sendo bastante intuitivo, com interfaces gráficas e intuitivas. Funciona em diversas plataformas, como DOS/Windows, UNIX, VxWorks, entre outras. A simulação pode ser controlada através de comandos pause, resume e re-run, sendo que seus resultados são apresentados principalmente através de objetos gráficos.

O ambiente MATLAB proporciona facilidades para modelagem dos sistemas físicos, dispondo de vários recursos interativos para a construção do modelo e para a simulação, principalmente se considerarmos as toolboxes. Permite inclusive que as simulações sejam paradas e reiniciadas, além de apresentar coerência entre resultados da mesma simulação. Há a possibilidade de escolha pelo usuário do método numérico utilizado nas integrações. Mas a geração de códigos do módulo RTW não é apropriada para uso direto em aplicações no hardware, necessitando de correções e revisões antes de ser utilizada.

Uma 1ª avaliação específica do ambiente MATLAB/Simulink baseada nas simulações feita por nós no item 5 é apresentada na Tab. (3). Ela considera aspectos de utilização e facilidades práticas.



Tabela 3. Avaliação de funcionalidades práticas do ambiente MATLAB/ Simulink:

Critérios	MATLAB/ Simulink
Auto Coerência	Não
Help	Fácil Utilização
Hierarquia de janelas	Subsistemas abertos em várias janelas
Manipulação de estruturas (matrizes e vetores)	Sim
Propagação de nomes de blocos	Não
PDM's	Não

Nesta avaliação observamos aspectos práticos do ambiente de simulação. Possui um help de fácil utilização inclusive para usuários iniciantes, de forma que, juntamente com sua interface fácil e intuitiva permite que as modelagens e simulações sejam feitas rapidamente e com eficiência mesmo para usuários que não são muito familiares com o ambiente, com a programação podendo ser feita na linguagem MATLAB ou mesmo, no módulo Simulink, podendo ser feita graficamente sem a necessidade da programação convencional por linhas de código. No ambiente Simulink pode-se manipular estruturas não escalares, como matrizes e vetores, sem a necessidade de separação em componentes, o que deixa a visualização do diagrama de blocos mais clara. O ambiente, particularmente o módulo Simulink, não conta com uma auto coerência, de forma que variáveis não definidas, dimensões não consistentes e outros erros passem despercebidos na formulação e modelagem do problema, sendo detectados apenas no momento da depuração ou simulação do modelo. No entanto, seu depurador indica a localização dos blocos responsáveis pelos erros numéricos quando há algum problema com a simulação. Ao se navegar pelos blocos do modelo, janelas são abertas para cada nível (subsistema), dificultando a visualização hierárquica dos blocos, que não têm seus nomes propagados para os blocos seguintes. Não possui ferramenta para modificação de parâmetros durante a simulação, chamada PDM (Matrizes dependentes de parâmetros, ou Parameter Dependent Matrices).

## 7. CONCLUSÕES

Neste trabalho efetuamos uma avaliação preliminar do ambiente MATLAB/Simulink para a modelagem e a simulação de veículos aeroespaciais. Para tanto modelamos e simulamos um veículo hipotético com parâmetros disponíveis na literatura aberta para servir de termo de comparação com nossos resultados. Tal avaliação mostra que o ambiente se é adequado para a modelagem e simulação de veículos espaciais, realizando os cálculos de maneira fiel, permitindo inclusive que o usuário escolha algoritmos de integração. Os resultados apresentados são de fácil interpretação, inclusive com opções de apresentação a serem definidas pelo usuário.

## 8. REFERÊNCIAS

Trivelato, G., Souza, M.L.O., "Comparando MATRIXx e MATLAB para modelagem e simulação de veículos aeroespaciais", Trabalho TRB-2439, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica-COBEM, Uberlândia, MG, 26-30/11/2001 em CD-ROM; e também publicado como INPE-9659-PRE/5267, em 2003.

Linkens, D. A.(editor), "CAD for Control Systems", Marcel Dekker, New York, NY, USA, 1993, 584 pp.

The MathWorks, Inc., “MATLAB Product Family Manuals”, The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 1996.

Abdallah, Y.M. Curso Básico de MATLAB R13, INPE, São José dos Campos, SP, 2004 (em publicação).

## **PRELIMINARY EVALUATION OF MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT FOR MODELLING AND SIMULATING AEROSPACIAL VEHICLES**

### **Maria Cecilia Pereira de Faria**

INPE – National Institute for Space Research

ETE/CMC – Spacial Engineering and Technology Course/ Spacial Mechanics and Control

[sisa@uai.com.br](mailto:sisa@uai.com.br)

Av. dos Astronautas, 1758

12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil

### **Marcelo Lopes de Oliveira e Souza**

INPE – National Institute for Space Research

DMC – Spacial Mechanics and Control Department

[marcelo@dem.inpe.br](mailto:marcelo@dem.inpe.br)

Av. dos Astronautas, 1758

12227-010 – São José dos Campos – SP – Brasil

### **Hassan Ahmad Sidaoui**

Mectron – Engineering, Industry and Commerce

[hassan@mectron.com.br](mailto:hassan@mectron.com.br)

Av. Brigadeiro Faria Lima, 1399

12227-000 - São José dos Campos – SP – Brasil

**Abstract:** *Nowadays it has been more and more necessary modelling and simulating real systems, i order to enable an analysis of the development of some aspects of the systems without observing them in the real world, for impossibilities or even high cost. To perform this modelling mathematically we use modelling and simulating environments, which enable us to describe it numerically/ computationally even in case in which modelling and/or the solution cannot be done using anayitical techniques.*

*In this work we procedured a preliminary evaluation of MATLAB/Simulink environment for modelling and simulating aerospaceal vehicles. For this we have modelled and simulated an hypothetic vehicle which parameters are available in open literature to compare with our results. To perform the evaluation we have used previously set up criteria, such as: modelling facilities; fidelity; devices for modelling and simulation; play, stop and repeating simulations; presented results; code generation and model documentation.*

**Keywords:** *simulation environments evaluation, aerospaceal vehicles, MATLAB/Simulink, dynamic systems*