



## INTEGRAÇÃO DE FERRAMENTAS CAE PARA PROJETO E SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS ADAPTATIVAS

**Gastão M. da Silva,**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Centro Técnico Aeroespacial – CTA  
CEP 12228-901 São José dos Campos - SP

**Luiz C. S. Góes**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Centro Técnico Aeroespacial – CTA  
CEP 12228-901 São José dos Campos - SP

**Resumo.** *Este trabalho apresenta uma forma de integração dos programas ADAMS<sup>®</sup>, ANSYS<sup>®</sup> e MATLAB<sup>®</sup>, com o objetivo de se obter um modelo matemático linearizado de um sistema mecânico multicorpo com elos flexíveis. O modelo obtido é utilizado, no ambiente MATLAB<sup>®</sup>, para o desenvolvimento de estratégias de controle ativo para controle posicional do sistema flexível. Esta integração é aplicada a um exemplo prático representativo de uma estrutura espacial tipo satélite com painéis flexíveis. O estudo é realizado em duas etapas complementares. A primeira etapa compreende a inclusão das características de flexibilidade dos apêndices do sistema modelado no ADAMS<sup>®</sup>, através da discretização usando o método de elementos finitos no programa ANSYS<sup>®</sup>. A segunda etapa consiste na obtenção de um modelo matemático linearizado no ambiente ADAMS<sup>®</sup>, e a sua utilização no projeto de controle ativo usando o programa MATLAB<sup>®</sup>. O controlador projetado no ambiente MATLAB<sup>®</sup> é transportado para o ambiente ADAMS<sup>®</sup> visando a comparação dos resultados simulados obtidos no MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup> com os obtidos no ambiente gráfico do ADAMS<sup>®</sup>. Estudos de validação dos resultados simulados foram realizados comparando-se os resultados teóricos com dados experimentais obtidos em laboratório.*

**Palavras-chave:** *Integração, ADAMS<sup>®</sup>, ANSYS<sup>®</sup>, MATLAB<sup>®</sup> e Flexibilidade*

### 1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho é apresentada uma solução de integração operacional do programa ADAMS<sup>®</sup> (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) versão 8.2 com o programa de análise de elementos finitos ANSYS<sup>®</sup> (Analysis System) versão 5.3 e com o programa de cálculo matricial para análise de sinais e sistemas, MATLAB<sup>®</sup> (Matrix Laboratory) versão 4.2 (Silva, 1998), tendo como objetivo básico a formalização de uma metodologia simples, para análise de sistemas mecânicos multicorpos com elos flexíveis e o desenvolvimento de seus sistemas de instrumentação e controle.

Os programas mencionados acima possuem as mais variadas aplicações em vários ramos da engenharia mecânica e por serem programas que incorporam o conceito CAE (Computer Aided Engineering), permitem a troca de informações na forma de arquivos com os mais diversos fins. Na Fig. 1 apresentamos um diagrama de blocos das integrações utilizadas neste trabalho.



Figura 1 – Diagrama das integrações realizadas

## 2. INTEGRAÇÕES

As integrações entre os programas utilizados neste trabalho são realizadas através de arquivos específicos, gerados por cada programa, que podem sofrer ou não algum tipo de manipulação antes de serem utilizados por outro.

### 2.1. ANSYS® e ADAMS®

A inclusão de características de flexibilidade no programa ADAMS® pode, na versão corrente (9.1), ser realizada de duas formas, ambas utilizando um programa de elementos finitos: na primeira, são transferidos os dados geométricos e as matrizes de massa, amortecimento e rigidez para o modelo no ADAMS®; na segunda, são transferidas, no lugar das matrizes, as frequências e modos de vibração naturais obtidos através de análises modais do componente.

Foi utilizada neste trabalho a primeira opção na qual, o componente original é discretizado, usando o método de elementos finitos, no ANSYS® fornecendo um conjunto de arquivos que descrevem o modelo discreto. Estes arquivos basicamente possuem as seguintes informações: as posições dos nós, arquivo .NODE, as relações elementos vs. nós, arquivo .ELEM, e as matrizes de massa, rigidez e amortecimento, arquivos .ASC e .OUT.

Os arquivos criados são manipulados, de acordo com as instruções do usuário, pelos módulos ANSUNI, que compacta todas as informações em um único arquivo .UNI, e UNIADM, que gera o modelo discreto do elo em um arquivo .ADM, da interface ADAMS/FEA® (1994). A Fig. 2 apresenta, esquematicamente, o fluxo de arquivos empregados na integração destes programas

O módulo UNIADM utiliza a posição dos nós, as relações elementos vs. nós, e a matriz de massa para definir a geometria e as características de massa e inércia dos elos discretos criados e suas matrizes de amortecimento e rigidez para conectar os elos discretos entre si através de forças dependentes da posição e da velocidade relativa entre eles.

### 2.2. ADAMS® e MATLAB®

O aplicativo MATLAB® é utilizado no projeto de sistemas de controle para o modelo criado no ADAMS®. Este procedimento é realizado em duas etapas básicas sendo a primeira a geração de um modelo matemático linearizado (ADAMS/Linear® Version 8.0, 1994) através do módulo Linear do ADAMS®. Este modelo é usado no MATLAB® para o desenvolvimento

de um sistema de controle. A segunda etapa consiste na inclusão do sistema de controle no modelo do ADAMS<sup>®</sup> para verificação do funcionamento do controlador com o modelo não linear do sistema mecânico completo.

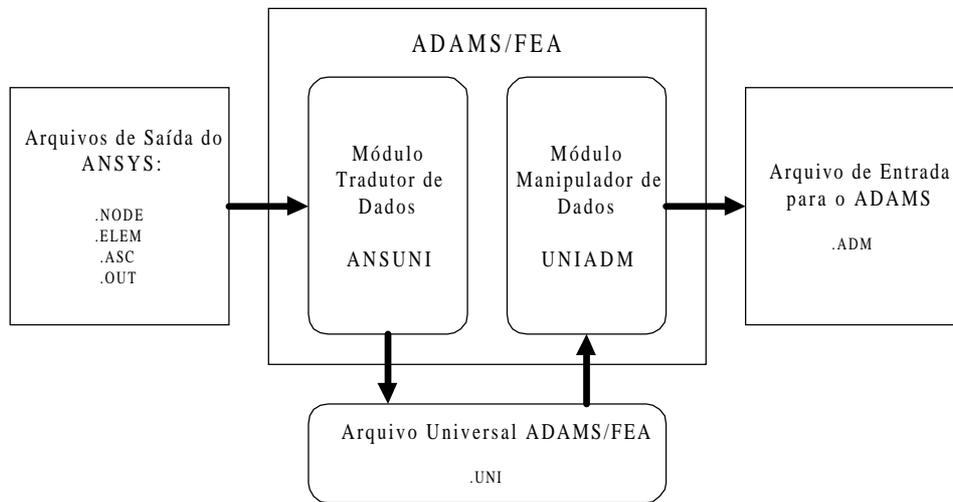


Figura 2 – Fluxo de Arquivos na Integração ANSYS<sup>®</sup> - ADAMS<sup>®</sup>

O módulo Linear automaticamente lineariza o modelo do ADAMS<sup>®</sup> em torno de um ponto de equilíbrio, sendo necessário explicitar esse ponto de equilíbrio através da execução, prévia, de uma análise estática ou transiente. O resultado final é a criação de uma representação no espaço de estados na forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (\text{equação de estado}) \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{D} \mathbf{u} \quad (\text{equação de saída}) \quad (2)$$

onde;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  e  $\mathbf{D}$  são matrizes;  $\mathbf{u}$  é o vetor de entradas;  $\mathbf{y}$ , o vetor de saídas e  $\mathbf{x}$ , o vetor de estados.

Para a criação desta representação, são definidas, usando as declarações *VARIABLE*, *PINPUT* e *POUTPUT*, as variáveis de entrada e saída do modelo as quais podem incluir equações algébricas que contenham dados calculados durante a simulação tais como deslocamentos, velocidades e acelerações de determinados pontos ou ainda podem incluir a saída ou entrada de uma função de transferência. Essas alternativas são importantes pois permitem que os modelos dos sensores e atuadores presentes no sistema mecânico sejam incluídos no modelo do ADAMS<sup>®</sup>.

Uma vez que o controlador esteja desenvolvido, ele pode ser incorporado ao modelo do ADAMS<sup>®</sup>, na forma de equações diferenciais, funções de transferência e/ou de representações no espaço de estados. A escolha da forma como o controlador será implementado levará em consideração a complexidade do mesmo.

Para a inclusão do controlador, no modelo ADAMS<sup>®</sup>, é necessário realizar-se a conexão das variáveis de entrada e saída do modelo original com as de entrada e saída do controlador, de acordo com o modelo de controle desenvolvido. Esta conexão fica mais fácil de ser realizada criando-se variáveis auxiliares que serão resultantes de somatórios, multiplicações, e outras operações similares.

### 3. SISTEMA ESTUDADO E RESULTADOS

Os procedimentos de interfaceamento dos vários aplicativos descritos na seção anterior foram aplicados na modelagem de um experimento montado no Laboratório de Dinâmica do ITA-IEMP, apresentado na Fig. 3, que consiste de uma viga de alumínio fixada a uma inércia. Esta inércia é formada por uma base de aço onde está preso o suporte de alumínio que prende a viga. A base esta apoiada sobre um colchão de ar que, para efeito de modelagem, elimina o atrito estático entre ela e o suporte do sistema. Fixo ao suporte existe um motor DC que está ligado à base de aço e que fornece a excitação para o sistema flexível. Na modelagem deste sistema, levou-se em consideração a simetria do sistema modelando-se apenas metade do sistema mecânico de acordo com os dados apresentados na Tabela 1.

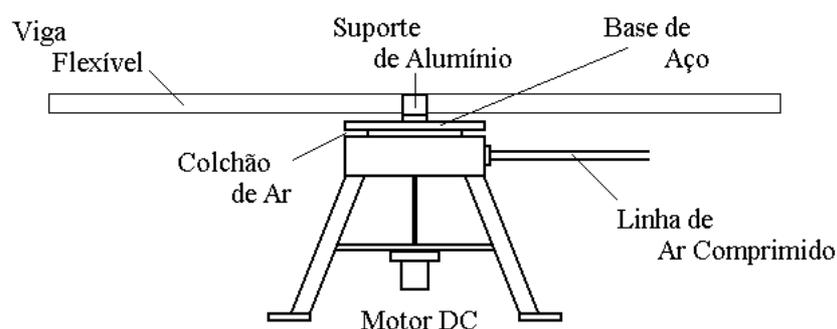


Figura 3 – Sistema Modelado

Para a modelagem deste sistema no ADAMS, inicialmente criou-se um modelo de elementos finitos da viga, apresentado na Fig. 4, no qual a viga foi modelada usando uma malha de 7x2 elementos SHELL63 do ANSYS®, que são formados por quatro nós tendo cada um seis graus de liberdade. É importante lembrar que este modelo poderia ter sido feito com o elemento de viga BEAM4, porém optou-se pelo elemento de placa devido a sua generalidade e facilidade na visualização do movimento.

Tabela 1 – Dados Físicos do Sistema

Comprimento, Altura e Espessura da Viga	$l : h : e$	$1,977 : 80,78 \times 10^{-3} : 4,12 \times 10^{-3} \text{ m}$
Densidade do Alumínio	$\rho$	$2795 \text{ Kg/m}^3$
Módulo de Young do Alumínio	$E$	$6,89 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Massa da Base de Aço	$m_B$	$2,377 \text{ Kg}$
Centro de Massa da Base de Aço	$cm_B (x, y, z)$	$(0, -0,037, 0) \text{ m}$
Momentos de Inércia da Base de Aço	$I_{Bxx}, I_{Byy}, I_{Bzz}$	$(4,7 \times 10^{-3}, 8,1 \times 10^{-3}, 4,7 \times 10^{-3}) \text{ Kg m}^2$
Massa do Suporte de Alumínio	$m_S$	$0,204 \text{ Kg}$
Centro de Massa do Suporte de Alumínio	$cm_S (x, y, z)$	$(0, -0,016, 0) \text{ m}$
Momentos de Inércia do Suporte de Alumínio	$I_{Sxx}, I_{Syy}, I_{Szz}$	$(7,1 \times 10^{-5}, 6,8 \times 10^{-5}, 9,1 \times 10^{-5}) \text{ Kg m}^2$
Momento de Inércia do Motor	$J_m$	$2,6 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$
Constante de Torque do Motor	$K_T$	$0,54 \text{ N m/A}$
Constante de Força Contra-Eletromotriz	$K_B$	$0,54 \text{ V/(rad./s)}$
Resistência da Armadura	$R_a$	$1,5 \Omega$
Atrito Viscoso do Rotor	$C_v$	$4 \times 10^{-5} \text{ N m/(rad/s)}$

O modelo de elementos finitos foi então empregado na criação do modelo discreto da viga, usado no modelo do sistema criado no ADAMS®, do qual foram criadas inicialmente três partes: referência, base de aço e suporte de alumínio. A referência e a base de aço foram

conectadas usando-se uma junta revoluta e a base de aço e o suporte de alumínio usando-se uma junta fixa.

A viga foi inserida incluindo-se o arquivo .ADM contendo o seu modelo discreto no modelo do sistema, sendo empregada uma outra junta fixa para conectá-la ao suporte de alumínio através de um dos seus elos discretos.

Até este ponto o modelo do sistema, apresentado na Fig. 5 possui os seguintes componentes:

- sete partes, sendo quatro partes relacionadas com a representação da viga flexível obtida na seção anterior, mais a Referência do modelo, a Base de Aço e o Suporte de Alumínio e
- três juntas sendo uma revoluta e duas fixas.

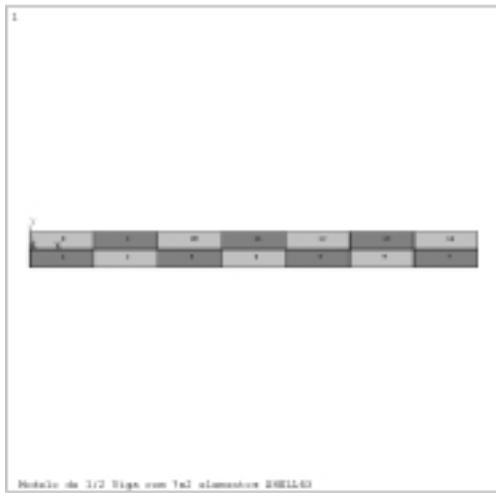


Figura 4 - Modelo da viga no ANSYS®

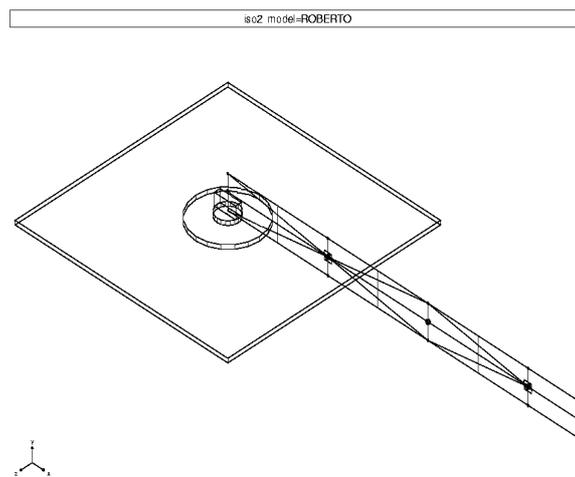


Figura 5 - Modelo da sistema no ADAMS®

Por último são incluídos os modelos do atuador e dos sensores existentes no sistema mecânico, conforme esquematizado na Fig. 6 abaixo.

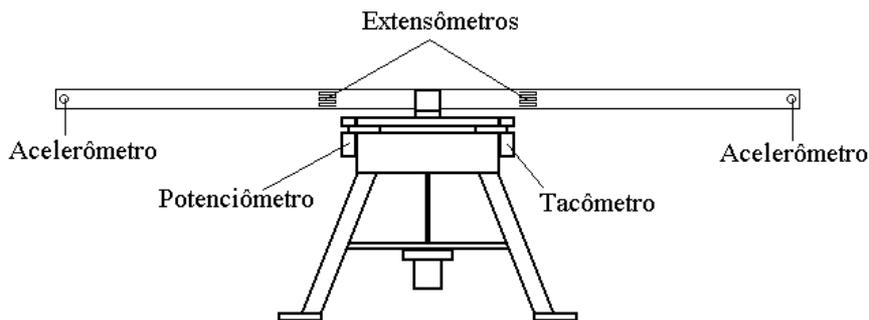


Figura 6 - Conjunto de Sensores existentes no experimento

O atuador consiste de um motor DC no qual o sinal de entrada é a tensão na armadura e a saída é o torque fornecido. O modelo matemático para um motor DC é dado por:

$$T_1 = \frac{K_T}{R_a} e_a - J_m \ddot{\theta}_m - \left( \frac{K_b K_T}{R_a} + C_v \right) \dot{\theta}_m, \quad (3)$$

onde;  $R_a$  é a resistência da armadura;  $e_a$ , a tensão na armadura;  $K_b$ , a constante de força contra-eletromotriz do motor;  $\dot{\theta}_m$ , a velocidade angular do rotor;  $J_m$ , o momento de inércia do motor mais redutor, se existir;  $C_v$ , o coeficiente de atrito viscoso;  $\ddot{\theta}_m$ , a aceleração angular do rotor;  $T_1$ , o torque fornecido ao sistema e  $K_T$ , a constante de torque do motor.

Um potenciômetro e um tacômetro são empregados para monitorar a posição e a velocidade do cubo central, sendo suas equações dadas por:

$$e_{\text{pot.}} = K_{\text{pot.}} \theta(t) \text{ (potenciômetro)} \quad (4)$$

$$e_{\text{taco.}} = K_{\text{taco.}} \dot{\theta}(t) \text{ (tacômetro)} \quad (5)$$

onde;  $e_{\text{pot.}}$  e  $e_{\text{taco.}}$  são as tensões de saída do potenciômetro e do tacômetro, respectivamente,  $K_{\text{pot.}}$  e  $K_{\text{taco.}}$  são ganhos,  $\theta(t)$  é o ângulo de rotação da base de aço e  $\dot{\theta}(t)$  a sua velocidade angular.

Um acelerômetro localizado na extremidade da viga fornece um sinal que é integrado duas vezes pelo sistema de aquisição de dados. A relação de entrada/saída para o sinal processado é dada por:

$$e_{\text{acel.}} = K_{\text{acel.}} \left( -\frac{1}{2} \theta(t) + z(l/2, t) \right) \quad (6)$$

onde;  $e_{\text{acel.}}$  é a tensão de saída do acelerômetro,  $K_{\text{acel.}}$  é um ganho,  $l$  é o comprimento total da viga e  $z(l/2, t)$  é o valor da deformação transversal no plano XZ na extremidade da viga.

O sinal negativo na componente relacionada com o movimento de corpo rígido,  $1/2 \theta(t)$ , foi definido com o objetivo de retirar o efeito do movimento de corpo rígido sobre o modelo do acelerômetro, pois as variáveis de estado obtidas do modelo do ADAMS<sup>®</sup> são relativas a um sistema global inercial. Assim, os deslocamentos angulares já consideram o movimento de corpo rígido do sistema.

Um extensômetro foi utilizado para medir a deformação transversal da viga. Para isso, foi utilizada a equação, obtida usando-se a teoria de resistência dos materiais, que relaciona a deformação transversal e a deformação longitudinal de uma viga. Através desta relação, obtém-se para o sinal do extensômetro:

$$e_{\text{extens.}} = K_{\text{extens.}} \frac{e}{2} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \Big|_x \quad (7)$$

onde;  $e_{\text{extens.}}$  é a tensão de saída do extensômetro,  $K_{\text{extens.}}$  é um ganho,  $e$  é a espessura da viga,  $z$  é a deformação transversal no plano XZ que é função da distância  $x$  do eixo de rotação do sistema ao ponto considerado e do tempo  $t$

Estes modelos foram incluídos no modelo do sistema do ADAMS<sup>®</sup> e então a representação no espaço de estados para o modelo foi obtida tendo como entrada a tensão na armadura do motor DC e como saídas os sinais de saída dos sensores.

A representação no espaço de estados obtida foi utilizada inicialmente para se comparar o modelo do ADAMS<sup>®</sup> com o sistema mecânico. Isso foi realizado no programa MATLAB<sup>®</sup> através das Funções de Resposta em Frequência, FRF's, obtidas usando-se a representação no espaço de estados gerada e os dados experimentais obtidos por (Negrão, 1998) no Laboratório de Sistemas Dinâmicos do ITA/IEMP.

Os resultados das comparações realizadas são apresentados na Fig. 7, entre a entrada do motor DC e a saída fornecida pelo potenciômetro, e nas Figs. 8, 9 e 10, entre a entrada do motor DC e a saída fornecida pelo tacômetro, extensômetro e acelerômetro respectivamente. Nestas figuras vê-se que as curvas obtidas com o modelo criado, apresentam boa aproximação com os dados obtidos em laboratório, possuindo picos ressonantes bem próximos.

Com a representação no espaço de estados validada, esta foi usada no programa MATLAB<sup>®</sup> para desenvolver dois controladores de posição, um proporcional-derivativo (PD) e um proporcional-integral-derivativo (PID) sendo definido como objetivo, para ambos, levar o sistema da posição angular inicial para uma nova posição angular definida através de um sinal de referência fornecido. Estes controladores foram desenvolvidos empiricamente no MATLAB/Simulink<sup>®</sup> usando o diagrama de blocos esquematizado na Fig. 11. Como requisitos para a resposta do sistema foram definidos sobre-sinal máximo de 25 % e tempo de subida máximo de 1s.

Os resultados obtidos com estes simuladores são apresentados nas Fig. 12 e 13 nas quais tem-se as saídas fornecidas pelo potenciômetro e tacômetro, respectivamente, a uma entrada degrau unitário para a posição da base de aço. Nestas figuras vê-se que as metas definidas foram satisfeitas com sistema possuindo tempo de subida < 1s, sobre-sinal < 25% e tempo de estabelecimento aproximadamente de 5s e que a velocidade máxima do modelo é de aproximadamente 1,3rad/s em t=0,4s.

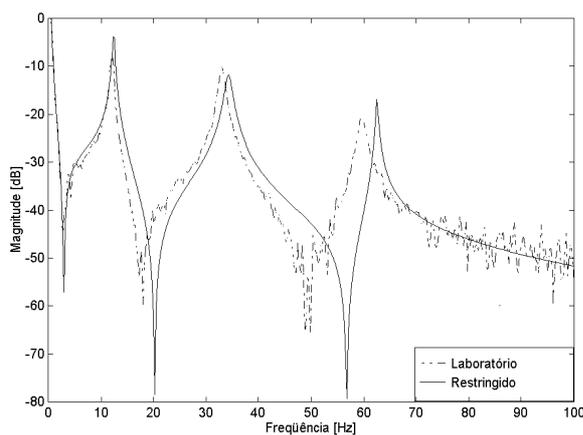


Figura 7 – FRF's Motor – Potenciômetro

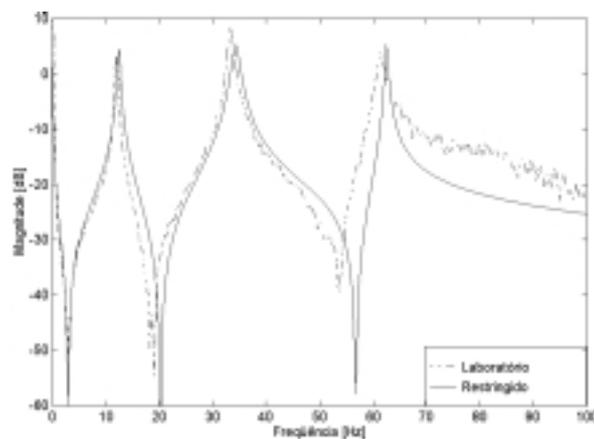


Figura 8 – FRF's Motor – Tacômetro

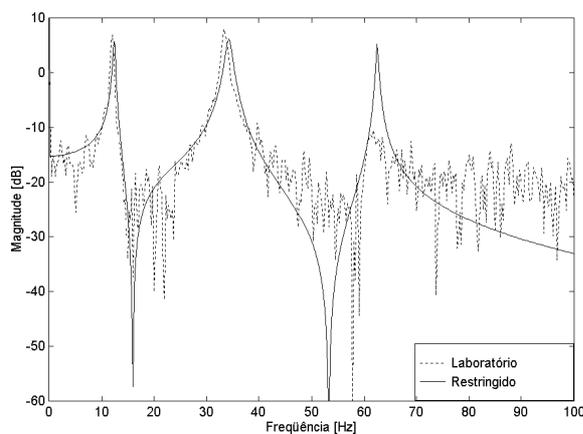


Figura 9 – FRF's Motor – Extensômetro

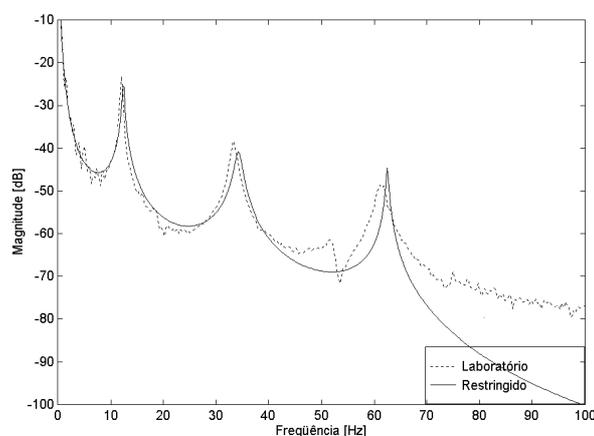


Figura 10 – FRF's Motor – Acelerômetro

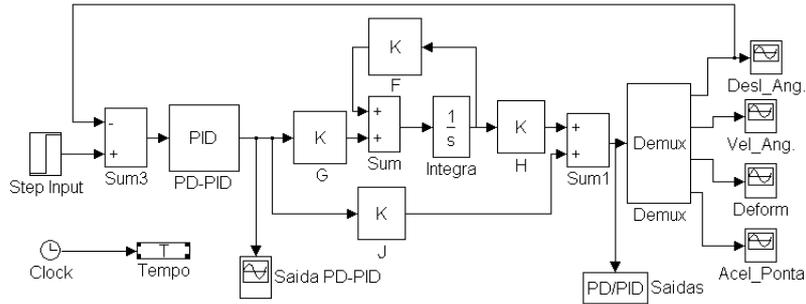


Figura 11 – Diagrama de simulação dos controladores PD e PID no MATLAB®

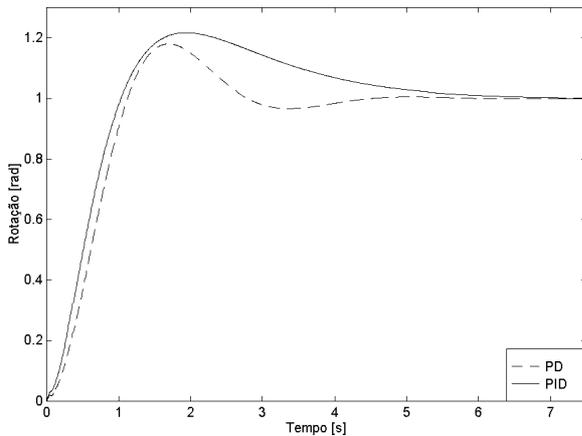


Figura 12 – Saída do Potenciômetro com controladores PD e PID no MATLAB®

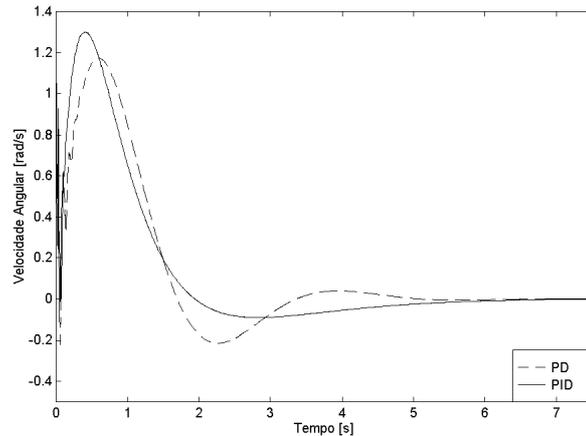


Figura 13 – Saída do Tacômetro com controladores PD e PID no MATLAB®

O modelo completo do sistema foi obtido incluindo-se os dois controladores desenvolvidos no MATLAB® sendo, inicialmente, criadas variáveis auxiliares, comuns aos dois, relacionadas com o sinal de referência e o sinal de erro. A Fig. 14 apresenta o diagrama de blocos representativo das conexões realizadas para se incluir os controladores desenvolvidos no modelo do ADAMS®.

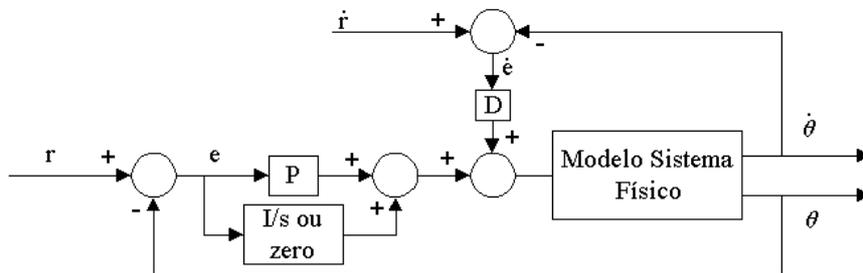


Figura 14 – Diagrama de blocos representativo da inclusão dos controladores no ADAMS®

A componente proporcional-integral do sinal de erro, no controlador PID, foi obtida através da inclusão da sua função de transferência ou seja,

$$PI(s) = K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{K_p s + K_I}{s} \quad (11)$$

Com os controladores inseridos no modelo do ADAMS<sup>®</sup>, os modelos com os dois controladores foram simulados com o mesmo sinal de referência usado no MATLAB<sup>®</sup>. Os sinais obtidos como saídas do potenciômetro e do tacômetro são apresentados na Figs. 15 e 16, respectivamente. Nelas verifica-se que as respostas obtidas, apesar de diferenças nas escalas, são as mesmas obtidas na simulação realizada no MATLAB/Simulink<sup>®</sup> comprovando assim a eficiência dos controladores no modelo não linear do ADAMS<sup>®</sup>.

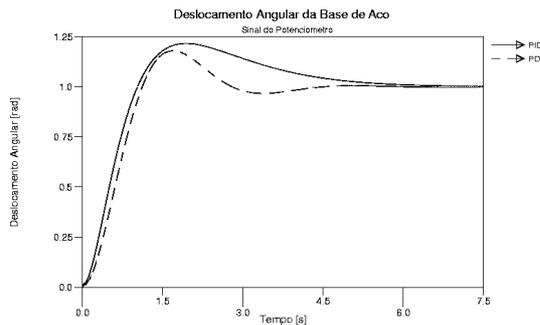


Figura 15 – Saída do Potenciômetro com controladores PD e PID no ADAMS<sup>®</sup>

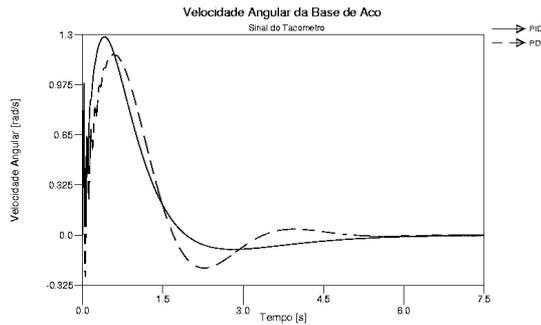


Figura 16 – Saída do Tacômetro com controladores PD e PID no ADAMS<sup>®</sup>

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a integração dos programas ANSYS<sup>®</sup>, ADAMS<sup>®</sup> e MATLAB<sup>®</sup> a qual demonstrou reproduzir as características reais de um sistema de controle de uma estrutura com múltiplos apêndices flexíveis.

Os resultados experimentais representados pelas funções resposta em frequência serviram para validar as duas estratégias de simulação descritas sendo uma a simulação no MATLAB<sup>®</sup> do modelo linearizado e do sistema de controle desenvolvido e a segunda, a simulação do sistema não linear no ADAMS<sup>®</sup> tendo o sistema de controle desenvolvido no MATLAB<sup>®</sup> integrado a ele.

#### REFERÊNCIAS

- ADAMS/FEA Reference Manual Version 8.0., 1994, Ann Arbor, Michigan: Mechanical Dynamics.
- ADAMS/Linear Version 8.0., 1994, Ann Arbor, Michigan: Mechanical Dynamics.
- NEGRÃO, R. G., 1998, **Dinâmica e Controle de um Sistema Mecânico com Apêndices Flexíveis**. Tese Mestrado, Instituto tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- SILVA, G. M., 1998, **Integração de Ferramentas CAE para Controle de Sistemas Mecânicos Multicorpos Flexíveis**. Tese Mestrado, Instituto tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.

## **Integration of CAE Tools to design and simulation of adaptive structures**

**ABSTRACT.** *This work presents the integration of CAE programming tools such as ADAMS<sup>®</sup>, ANSYS<sup>®</sup> and MATLAB<sup>®</sup>, to obtain a linear mathematical model of a multibody mechanical dynamical system with flexible appendages. The obtained model is employed in the development of linear control strategies for active positional control of the multibody flexible system. The integration of these different software environments is applied to an aerospace case study representative of a satellite with flexible solar panels. The study comprehends two complementary phases. In the first one the integration of the software ADAMS<sup>®</sup> and ANSYS<sup>®</sup> is carried out to include the dynamic characteristics of the flexible appendages. The linear model of the discretized system is employed in the second phase to carry out control strategies studies in the MATLAB<sup>®</sup> environment. The elected control strategies are transported to the ADAMS<sup>®</sup> graphical environment to simulate the flexible multibody dynamic system in closed loop. Model validation studies are carried out by comparing simulation results with experimental data from a similar flexible body laboratory experiment.*

**Keywords:** *Integration, ADAMS<sup>®</sup>, ANSYS<sup>®</sup>, MATLAB<sup>®</sup> and Flexibility*