



## **ROBÔ SIMULADOR AEROSTÁTICO COM ELOS FLEXÍVEIS**

### **Firmino Neto Veroneze Dos Santos**

ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50- Vila das Acácias  
S. J. dos Campos- CEP 12228-900  
e-mail [veroneze@mec.ita.br](mailto:veroneze@mec.ita.br)

### **Luiz Carlos Sandoval Góes**

ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50- Vila das Acácias  
S. J. dos Campos- CEP 12228-900  
e-mail [goes@mec.ita.br](mailto:goes@mec.ita.br)

### **Alberto Adade Filho**

ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50- Vila das Acácias  
S. J. dos Campos- CEP 12228-900  
e-mail [adade@mec.ita.br](mailto:adade@mec.ita.br)

**Resumo.** *Os manipuladores espaciais utilizados na captura e liberação de satélites ou estruturas espaciais, funcionam como um braço mecânico cuja base geralmente é uma espaçonave ou satélite. No entanto, quando efetuam qualquer movimento, transmitem uma reação que altera o posicionamento de sua base, sendo necessária a aplicação de medidas corretivas para fazê-la retornar à posição inicial ou de referência. Para o desenvolvimento de aplicações dessa natureza é interessante o acesso a um sistema simulador das condições no espaço. Isso possibilitaria uma investigação mais detalhada de estratégias de controle para minimizar as reações. Este trabalho focaliza a implementação de um Robô para essa finalidade. Seu controle deverá ser realizado visando tanto o posicionamento otimizado do órgão terminal, quanto às correções de movimentos causados pelas reações. Sua base e suas articulações são apoiadas sobre mancais aerostáticos axiais, que deslizam sobre uma superfície de vidro nivelada, garantindo, assim, um atrito mínimo (gravidade zero). O monitoramento e realimentação de posição serão realizados por sensores angulares, acoplados aos motores. Sensores de flexão distribuídos estrategicamente nos dois elos flexíveis possibilitarão um controle para eliminar as vibrações estruturais. Assim, o trabalho apresenta e discute aspectos construtivos do robô, modelos e simulações de movimento.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Na intenção de verificar a viabilidade de esquemas de controle operacional de robôs espaciais, surgiu a necessidade de se desenvolver um robô simulador aerostático. Uma pesquisa bibliográfica mostrou que outros grupos de pesquisa realizam experiências parecidas desde 1987. Porém, nenhum com elos flexíveis flutuantes. Essa nova tecnologia de enviar robôs controlados para fazerem

montagens e consertos no espaço, reduz o trabalho dos astronautas, os riscos de acidentes, o custo e aumenta a precisão e a eficiência. Por outro lado, enfrentamos a dificuldade de não termos no controle de sistemas robóticos espaciais uma base fixa como usualmente temos aqui na Terra. Qualquer movimento na junta do manipulador induz uma força de reação e momentos na base, provocando distúrbios em sua posição e atitude. Esse comportamento é ditado pela dinâmica natural dos elos flutuantes. Um protótipo foi implementado a fim de demonstrar a validade e a eficácia prática de métodos de controle usando sensores reais, computadores e um conjunto mecânico.

A dificuldade de se simular um ambiente de micro gravidade na Terra é um grande desafio na pesquisa e desenvolvimento da robótica espacial. Há necessidade de se fazer experiências em um laboratório adequado, todavia, a simulação de micro gravidade é muito difícil. São conhecidos pelo menos quatro métodos para simular um ambiente de gravidade zero, porém, cada método tem suas vantagens e desvantagens. Baseado em exemplos de trabalhos anteriores, de utilizar mecanismo simples para observar o comportamento das ligações mecânicas e suas reações em um ambiente de gravidade zero com o menor distúrbio, concluiu-se que colocar o conjunto sobre mancais aerostáticos axiais mostra-se a maneira mais simples e econômica, comparada às demais. Para o estudo experimental, foi adotado e desenvolvido um modelo de robô espacial apoiado sobre mancais aerostáticos axiais, dotado de sensores de movimento em sua base e sensores de força e deslocamento angular em seus elos. Com este experimento iremos simular movimentos assistidos e controlados via software, de uma articulação no espaço. Por possuir ausência quase total de atrito, seus movimentos simulam a falta de gravidade que existe no espaço e monitorando seus movimentos pode-se fazer uma série de ensaios seguindo a mesma linha de raciocínio e orientação adotadas por outros pesquisadores.

Este trabalho vai focalizar problemas de controle de movimento que surgem com os manipuladores no espaço. Para isso foi desenvolvido um hardware de controle simulador. No que concerne a modelagem para fins de controle, utiliza-se uma matriz Jacobiana generalizada (GJM), muito útil na concepção e desenvolvimento do controle do movimento proporcional, resolvendo assim o controle da aceleração do robô simulador aerostático. O ponto central foi o movimento de reação da base, em relação ao sistema de coordenada inercial. Uma lei de compensação na reação efetiva é diretamente derivada pela formulação dinâmica Jacobiana.

## **2. DESCRIÇÃO DO ROBÔ**

A estrutura do robô consiste de uma base de alumínio apoiada por 03 (três) mancais aerostáticos axiais de alumínio, distribuídos de forma que traga equilíbrio ao conjunto, suportando o peso do motor, conexões pneumáticas e sensores. O braço robótico consiste de dois elos seriais flexíveis acionados por motores instalados nas juntas entre os elos. Tanto o órgão terminal como os motores das juntas estão apoiados em mancais aerostáticos axiais.

Pelo fato desses elos serem flexíveis irão conter sensores de flexão (strain gage) que são utilizados no controle de vibrações decorrentes dos movimentos gerados pelos motores.

O robô simulador aerostático, quando acionado desliza quase sem atrito sobre a mesa, e nos dá a possibilidade de estudar um dos problemas que ocorrem com maior frequência em termos de movimento no espaço, que é a reação de um corpo depois de lhe ser aplicada uma força. Como o robô possui dois motores que irão orientar o órgão terminal, quando eles forem acionados causarão uma reação na sua base, podendo mudar a orientação do conjunto, conforme o ângulo e a velocidade imprimida pelos motores. Enfim, esse deslocamento que o conjunto sofre deve ser minimizado ou então estudado de forma que ele possa ser predito e corrigido.

Os movimentos angulares do manipulador serão realizados através de dois motores, comandados por computador. Com esse sistema poderemos não só orientar o órgão terminal do equipamento em relação a um objeto qualquer situado sobre o vidro da mesa, assim como os efeitos de reação a choque poderão ser analisados e estudados, conforme os sinais enviados pelos sensores distribuídos no

equipamento, que estão sendo monitorados pelo computador de controle.

As simulações poderão ser feitas das mais variadas formas, seguindo uma lógica, e serão montados sistemas que irão garantir a repetibilidade e confiabilidade do ensaio. Um estudo analítico e computacional dos resultados obtidos em cada ensaio serão comparados com os ensaios experimentais e com os resultados relatados por outros pesquisadores.

### 3. DESCRIÇÃO DA MESA

Todo conjunto deverá ficar sobre uma mesa, com o tampo de vidro com laterais de segurança. A espessura do vidro é definida de modo a evitar flambagem, e seu acabamento superficial é importante para minimizar o atrito com o manipulador. A estrutura da mesa deve ser em aço e confeccionada de modo a garantir uniformidade na base do vidro. Esta base deve ser apoiada em três pontos com parafusos de rosca fina para que possam ser feitos os ajustes necessários, e assim garantir o melhor nivelamento possível do vidro. Isso é imprescindível para se realizar as simulações práticas, pois, como o atrito será mínimo um desnivelamento traria instabilidade ao conjunto, que deve ficar estático, movendo-se apenas aos comandos dados.

Futuramente o equipamento deverá possuir as fontes de energia acoplados a ele e poderá ser comandado e assistido de uma outra sala via controle remoto. Porém, por enquanto possuirá um cabo e uma mangueira suspensos em forma de espiral (minimizar interferências), presos a um braço fixado à mesa para alimentação de ar comprimido e interface computacional do robô.

### 4. INTRODUÇÃO À MODELAGEM DINÂMICA

Existem várias formas de se modelar uma estrutura flexível: (i) modelo de elementos finitos mostra que as funções admissíveis são locais e pertencem à classe de funções polinomiais (JONKER, J. B., 1990); (ii) modelo de modos assumidos mostra que as funções admissíveis são globais e pertencem a classe de funções trigonométricas (THEODORE R. J. AND GHOSAL A., 1995); (iii) modelo a parâmetros concentrados. Uma das propostas deste trabalho é o de fazer a simulação utilizando o programa Spacedyn, desenvolvido no Japão (YOSHIDA K. 1998), especificamente para simular os movimentos de um manipulador no espaço (ausência de gravidade). Este programa foi desenvolvido para receber os dados de uma estrutura flexível modelada através de parâmetros concentrados. Portanto, neste trabalho iremos utilizar o formalismo discreto (lumped mass approach) (MACHADO, C. C., 1998). A técnica consiste em dividir cada elo em duas partes de mesmo comprimento e posicionar as articulações na metade de cada uma dessas partes, surgindo assim seis elementos rígidos conectados por quatro articulações fictícias (passivas) e duas reais que promovem o torque (ativas) conforme (Fig (1)).

A equação de Euler-Lagrange que descreve o movimento é dada por:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = f_i(t) \quad (1)$$

onde  $i$  é o índice relacionado ao elemento rígido,  $f_i(t)$  corresponde aos esforços oriundos dos potenciais não conservativos (torque do motor e atritos, por exemplo) e  $L$  é o lagrangeano do sistema, definido por :

$$L = T - V \quad (2)$$

Onde  $T$  é a coenergia cinética total e  $V$  a energia potencial total do sistema.

Seja:

$$T = T_{ri} + T_{mi} + T_{mc} + T_{mB}$$

$$T_{ri} = \frac{1}{2} I_{r1} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{r2} \dot{\theta}_4^2 \quad \text{é a energia cinética dos rotores}$$

$$T_{mi} = \sum_{i=1}^6 \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) \quad \text{é a energia cinética devido ao movimento da massa } m_i \text{ (elos)}$$

$$T_{mc} = \frac{1}{2} m_c (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) \quad \text{é a energia cinética devido ao movimento da carga no end point (garra)}$$

$$T_{mB} = \frac{1}{2} m_B (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2) \quad \text{é a energia cinética devido ao movimento da base (massa } m_B)$$

Deve-se ressaltar que as componentes rotacionais de energia cinética (em torno do centro de massa), tanto dos elementos rígidos quanto da carga terminal, foram negligenciadas, Isto é, foram consideradas pequenas em relação as de translação.

Não há torques de natureza gravitacional e, portanto, a energia potencial existente é a elástica em função das deformações nas articulações fictícias (passivas). A energia potencial total é dada por:

$$V = \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} k_n (\theta_n - \theta_{n-1})^2$$

é a parcela de energia potencial relativa a deformação nas juntas fictícias, onde  $k_n$  representa a constante elástica da mola equivalente na junta, relativa à elasticidade do elo.

Portanto:

$$L = \frac{1}{2} I_r \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_r \dot{\theta}_4^2 + \sum_{i=1}^6 \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) + \frac{1}{2} m_c (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + \frac{1}{2} m_B (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2) - \sum_{n=1}^4 \frac{1}{2} k_n (\theta_n - \theta_{n-1})^2$$

Analisando as forças externas que interagem no sistema, temos:

$$f_1(t) = 0 \quad (3)$$

Considerando  $i = 1$  na equação (1) tem-se:

$$f_2(t) = T_{m1} - c_{r1} \dot{\theta}_1 - c_1 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \quad (4)$$

onde  $c_{r1}$  e  $c_{r2}$  são os coeficientes de atrito viscoso atuante nos rotores e  $T_{m1}$  e  $T_{m2}$  são os torques dos motores.

Quando  $i = 2$  tem-se:

$$f_3(t) = -c_1 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) - c_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3) \quad (5)$$

onde  $c_1$  é o coeficiente de atrito viscoso estrutural (material) na articulação passiva 1 e  $(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)$  é a velocidade de deformação elástica da primeira articulação.

Quando  $i = 3$  tem-se:

$$f_4(t) = -c_2(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) \tag{6}$$

onde  $c_2$  é o coeficiente de atrito viscoso estrutural (material) na articulação passiva 2 e  $(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)$  é a velocidade de deformação elástica na Segunda articulação.

Assim, conforme mostra (figura 1) tem-se:

$$f_5(t) = T_{m2} - c_{r2}\dot{\theta}_4 - c_3(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_5) \tag{7}$$

$$f_6(t) = -c_3(\dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_4) - c_4(\dot{\theta}_5 - \dot{\theta}_6) \tag{8}$$

$$f_7(t) = -c_4(\dot{\theta}_6 - \dot{\theta}_5) \tag{9}$$

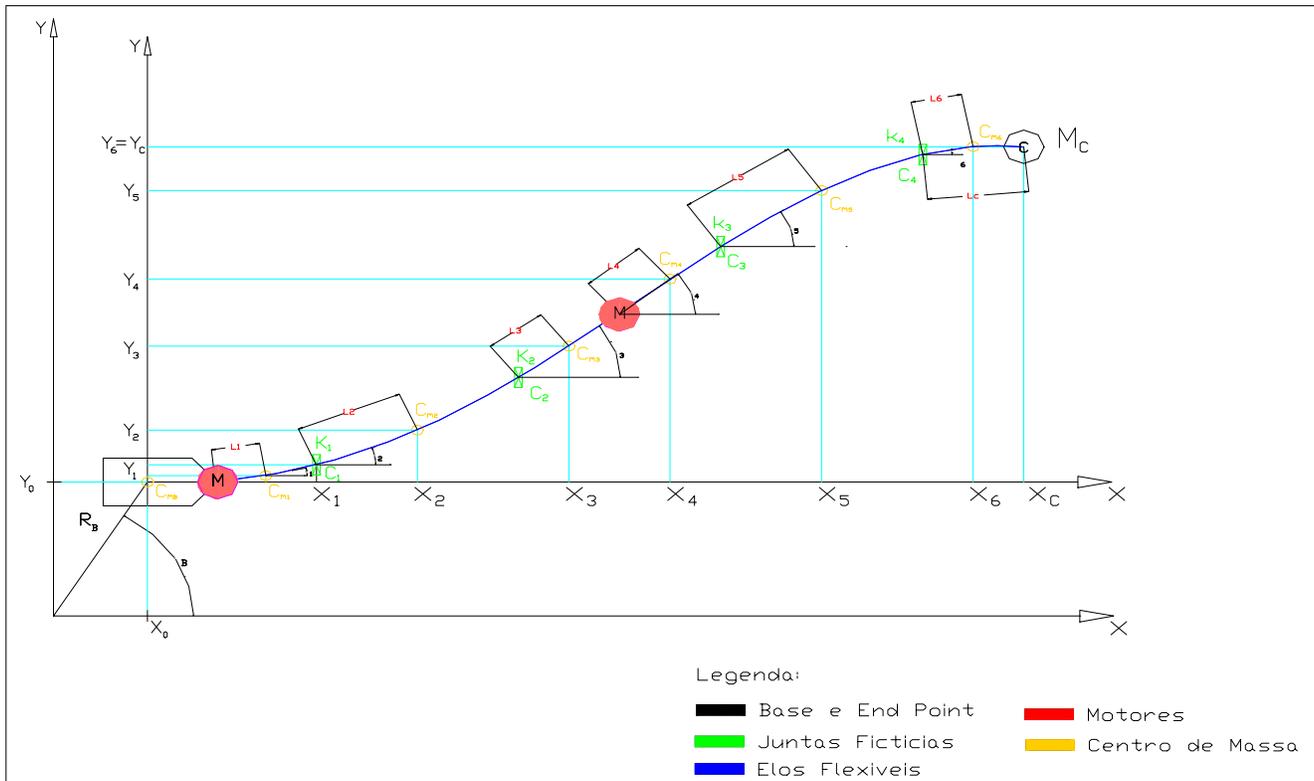


Figura 1. Esquema do Sistema

#### 4.1. Obtenção do modelo utilizando Formalismo Discreto

Aplicando as equações de Euler-Lagrange (1) ao Lagrangeano (2) e simplificando, obtém-se a seguinte equação matricial.

$$[I_m]\ddot{\theta} + [C_{at}]\dot{\theta} + [K_{el}]\theta = B'T_{m1} + B'T_{m2} \quad (10)$$

$$[I_m] = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} & I_{15} & I_{16} & l_{17} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} & I_{25} & I_{26} & l_{27} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} & I_{34} & I_{35} & I_{36} & l_{37} \\ I_{41} & I_{42} & I_{43} & I_{44} & I_{45} & I_{46} & l_{47} \\ I_{51} & I_{52} & I_{53} & I_{54} & I_{55} & I_{56} & l_{57} \\ I_{61} & I_{62} & I_{63} & I_{64} & I_{65} & I_{66} & l_{67} \\ l_{71} & l_{72} & l_{73} & l_{74} & l_{75} & l_{76} & l_{77} \end{bmatrix}, \quad \text{matriz de inércia}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_B \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [C_{at}] = \begin{bmatrix} C_{r1} + C_1 & -C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_1 & C_1 + C_2 & -C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_2 & C_2 + C_{r2} & -C_{r2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{r2} & C_{r2} + C_3 & -C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_3 & C_3 + C_4 & -C_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_4 & C_4 \end{bmatrix}, \quad \text{matriz de atritos}$$

$\theta = \theta_i$  é o ângulo entre a direção x e o respectivo elemento rígido de número i.

A matriz de constantes elásticas (Gomes & Chretien. 1992) é mostrada abaixo,

$$[K_{el}] = \begin{bmatrix} \alpha_1 K & -\alpha_1 K & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_1 K & \alpha_1 K + \alpha_2 K & -\alpha_2 K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_2 K & \alpha_2 K + \alpha_3 K & -\alpha_3 K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_3 K & \alpha_3 K + \alpha_1 K & -\alpha_1 K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_1 K & \alpha_1 K + \alpha_2 K & -\alpha_2 K & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_2 K & \alpha_2 K + \alpha_3 K & -\alpha_3 K \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_3 K & \alpha_3 K \end{bmatrix}$$

onde,

$$k = n \frac{EI}{l}, \quad \text{com } n = 4 \quad (11)$$

Os termos k são multiplicados por uma constante  $\alpha_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), que foram obtidos atribuindo-se valores aos mesmos, entre um valor inicial (próximo a zero) e um final (próximo a 5), com um passo de variação de 0.005. Para cada conjunto de valores  $\alpha_i$ , as frequências de vibração do modelo discreto eram obtidas e comparadas às frequências analíticas. Para  $n = 3$ , foram encontrados:  $\alpha_1 = 2.645$ ;  $\alpha_2 = 0.78$  e  $\alpha_3 = 0.145$ .

Tanto  $C_1, C_2, C_3$  quanto  $C_4$ , podem ser determinados experimentalmente, a partir da análise de resultados em malha aberta. No caso deste trabalho, que trata de uma lamina metálica com massa na extremidade, o atrito das articulações passivas é muito menor do que o existente no atuador, tendo-se adotado 0,5% deste (Gomes & Chretien, 1992).

A equação matricial que representa o sistema de equações diferenciais é de 2ª ordem, podendo ser reduzida a uma de 1ª ordem a partir da seguinte redefinição de variáveis:

$$\begin{array}{ccccccc} x_0 = \theta_B & x_1 = \theta_1 & x_2 = \theta_2 & x_3 = \theta_3 & x_4 = \theta_4 & x_5 = \theta_5 & x_6 = \theta_6 \\ x_7 = \dot{\theta}_B & x_8 = \dot{\theta}_1 & x_9 = \dot{\theta}_2 & x_{10} = \dot{\theta}_3 & x_{11} = \dot{\theta}_4 & x_{12} = \dot{\theta}_5 & x_{13} = \dot{\theta}_6 \end{array}$$

resultando a seguinte equação de estado:

$$\dot{x} = Ax + BT_{m1} + BT_{m2} \quad (12)$$

onde:

$$A = \begin{bmatrix} [0]_{7 \times 7} & [I]_{7 \times 7} \\ -[I_m]_{7 \times 7}^{-1} [K_{el}]_{7 \times 7} & -[I_m]_{7 \times 7}^{-1} [C_{at}]_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad e \quad B = \begin{bmatrix} [0]_{7 \times 1} \\ [I_m]_{7 \times 7}^{-1} B'_{7 \times 1} \end{bmatrix}$$

## 5. CONCEPÇÃO DE CONTROLE

### 5.1. Funções de Transferência Analíticas

Podemos obter as funções de transferência para o caso não colocado, quando o sensor não ocupa a mesma posição que o atuador ( $x_s \neq x_a$ ). Utilizando a modelagem de formalismo discreto (Machado, 1999), considerando apenas os três primeiros modos flexíveis. Obtemos as matrizes do modelo dinâmico:

$$[I_m] \ddot{\theta} + [C_{at}] \dot{\theta} + [K_{el}] \theta = B'T_{m1} + B'T_{m2}$$

Esta equação representa um sistema de equações diferenciais de Segunda ordem, Onde  $\theta(t) = [\theta_{r1}(t) \theta_1(t) \theta_2(t) \theta_3(t) \theta_{r2}(t) \theta_4(t) \theta_5(t) \theta_6(t)]^T$  é o vetor com as posições angulares, sendo  $\theta_{r1}(t)$  e  $\theta_{r2}(t)$  relativo aos rotores dos motores 1 e 2, com o índice de redução de 1:1, enquanto  $\theta_i(t)$ , com  $i$  variando de 1 à 6 correspondem aos ângulos das articulações fictícias.  $I_m, C_{at}$  e  $K_{el}$  são as matrizes de inércia, atritos e constantes elásticas, respectivamente, sendo  $\bar{B} = [1001000]^T$  e  $u(t)$  os torques dos motores 1 e 2 no instante  $(t)$ . As frequências analíticas podem ser conhecidas a partir da massa da extremidade, das dimensões, da massa específica e do módulo de elasticidade do elo (Pereira, 1999).

Define-se então um vetor de estado dado por:

$$x(t) = [\theta_{r1}(t) \theta_1(t) \theta_2(t) \theta_3(t) \theta_{r2}(t) \theta_4(t) \theta_5(t) \theta_6(t) \dot{\theta}_{r1}(t) \dot{\theta}_1(t) \dot{\theta}_2(t) \dot{\theta}_3(t) \dot{\theta}_{r2}(t) \dot{\theta}_4(t) \dot{\theta}_5(t) \dot{\theta}_6(t)]^T \quad (13)$$

Para a simulação do sistema em malha fechada adotou-se uma estratégia de controle descentralizado de junta. Onde o torque de entrada nas juntas é dado por uma alimentação direta de estado:

$$T = K_p (\{\theta_d\} - \{\theta\}) - K_v \dot{\theta} \quad (14)$$

onde  $\theta_d$  são as posições desejadas das juntas,  $K_p$  e  $K_v$  são as matrizes diagonais de ganho de posição e velocidade, respectivamente.

Em termos de variável de estado pode-se escrever também:

$$u = [K_p K_v] \cdot (\{X_d\} - \{X\}) \quad (15)$$

onde  $X_d$  é o estado desejado com a componente de velocidade nula ( $\dot{\theta}_d = 0$ ) e  $X(t)$  o estado do sistema.

## 6. ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

### 6.1. Simulação Utilizando o Programa SPACEDYN

O programa Spacedyn é um programa desenvolvido em linguagem MATLAB para simulação cinemática e dinâmica de uma cadeia articulada aberta de sistemas multicorpos conectados a uma base flutuante. Este programa modela um sistema robótico composto de  $n+1$  corpos conectado por  $n$  juntas, onde o corpo zero (corpo de referência) é uma base flutuante. O programa permite a especialização de forças e torques na base flutuante e em cada junta da cadeia cinemática. As equações de movimento são integradas para se obter as posições velocidade e acelerações do centróide de cada corpo, bem como as variáveis de junta da cadeia.

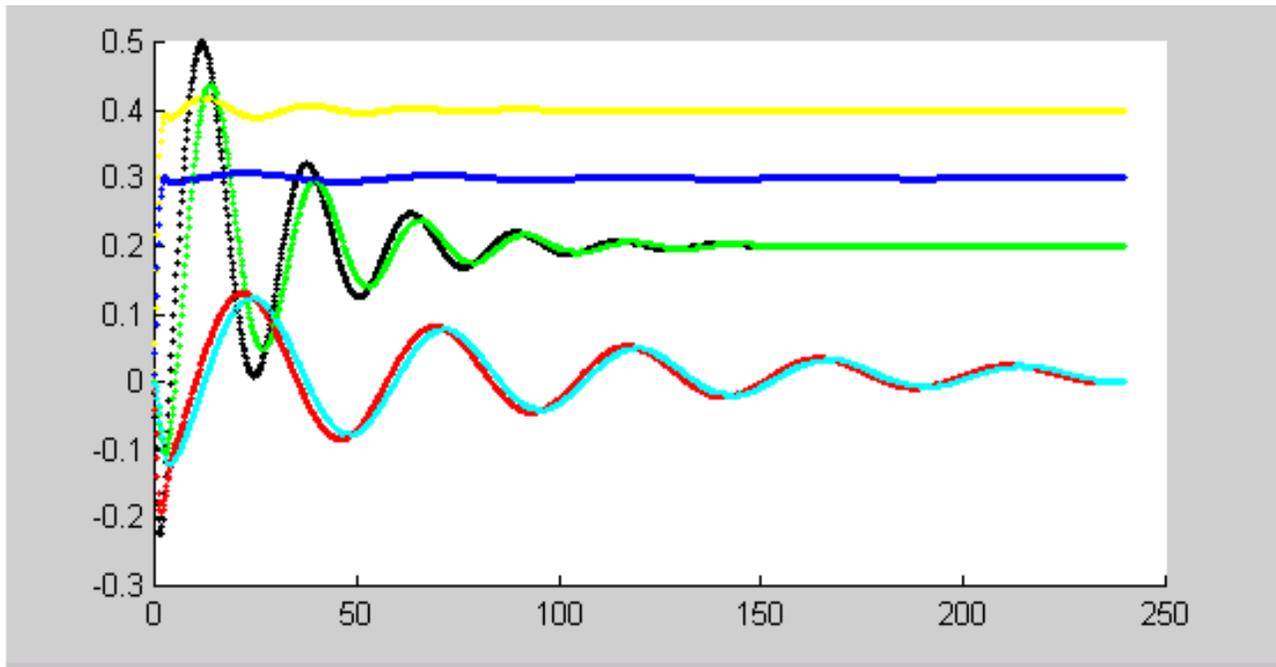


Figura 2. Vertical posição, horizontal tempo(min.)

### 6.2. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Para garantir a eficácia do programa Spacedyn foram feitas duas versões de programa sample: uma delas considerando duas juntas ativas e duas juntas passivas; a outra com duas juntas ativas e quatro

juntas passivas. Ambos foram testados várias vezes em malha aberta, para que pudessemos determinar o valor do fator de amortecimento de cada junta. Podemos notar através dos gráficos plotados, que se confirma a observação de (MACHADO, C. C., 1999), afirmando que ao dividirmos um elo flexível em Três elos rígidos unidos por duas juntas visco-elásticas passivas, apresenta melhor desempenho do que um elo dividido em duas partes rígidas unidas por uma junta passiva, porém, ao contrário do que possa parecer, se dividirmos o elo em mais de quatro partes o desempenho tende a cair. Os resultados da simulação indicam que: A estratégia de controle proposta é capaz de controlar a posição das juntas do robô flexível com erro zero, porém, com um longo tempo de estabilização (Fig. (2)). Uma vez que, a estratégia de controle proposta não contempla o controle ativo das vibrações nos elos flexíveis.

## 7. REFÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ADADE, A. F., 1992, Fundamentos de robótica, S.J.Campos, ITA, 353p.
- AGRAWAL, S. K., HIRZINGER, G., LANDZETTEL, K. AND SCHWERTASSEK, R., 1996, "A New laboratory simulator for study of motion of free- floating robots relative to space targets", IEEE Transactions on robotics and automation, vol. 12.
- ANNAPRAGADA, M. AND AGRAWAL, S. K., 1997, "Design of a free-floating planar robot for autônomos chese and capture operations in space", submitted to robotics end Autonomous systems.
- DE LUCA, A. AND SICILIANO, B., 1991, "Closed-form dynamic model of planar multilink Lightweight robots", IEEE Transaction on systems, man, and cybernetics, vol. 21.
- GARIMELLA, R. AND AGRAWAL, S. K., 1994, "Kinematics, workspace, and design of a dual Arm spatial robot in zero gravity, journal of mechanical design", transactions of asme, vol.116.
- JONKER, J. B., 1993, "A finite element Dynamic analysis of flexible manipulators", Int. J. Robotics Res. 9(4).
- JUNKINS, J. L. AND KIN, Y., 1993, "Introduction to dynamics and Control of flexible Structures".
- YOSHIDA, K. AND UMETANI, Y., 1989, "Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators With Generalized Jacobian Matrix", IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5.
- YOSHIDA, K. AND UMETANI, Y., 1993, "Control of space manipulators with generalized jacobian matrix", Space Robotics Dynamics and Control, Academic Press.
- MACHADO, C. C., PEREIRA, A. E. L. AND GOMES, S. C. P., 1998, "Um novo algoritmo para a modelagem dinâmica de manipuladores flexíveis", Dep. De Matemática, UFRG, BRASIL, Tese de mestrado.
- MEIROVITCH, L., 1986, "Elementos of vibration analysis", 2<sup>nd</sup> ed., Mc Graw-Hill Book, CO.
- SHIMIZU, M., HIRAOKA, T., FUJISHIMA, K. AND YOSHIDA, K., 1998, "The spacedyn", a MATLAB toolbox for space and mobile robots, The Space Robotics Lab. Tohoku University, Japan.
- SHIRUMALLA, S. AND AGRAWAL, S. K., 1993, "Kinematics, Motion planning and design of a free-floating dual-arm planar manipulator", Mechanism and Machine Theory, vol.2.
- THEODORE, J. R. AND GHOSAL, A., 1995, "Comparison of the assumed modes and finite element models for flexible multi-link manipulators", The international journal of robotics research.
- XU, Y. AND KANADE, T., 1993, "Dynamics and Control Space Robotics", Kluwer Academic Publisher.

## AEROSTATIC ROBOT SIMULATOR WITH FLEXIBLE LINKS

### **Firmino Neto Veroneze Dos Santos**

ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50- Vila das Acácias  
S. J. dos Campos- CEP 12228-900  
e-mail [veroneze@mec.ita.br](mailto:veroneze@mec.ita.br)

### **Luiz Carlos Sandoval Góes**

ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50- Vila das Acácias  
S. J. dos Campos- CEP 12228-900  
e-mail [goes@mec.ita.br](mailto:goes@mec.ita.br)

### **Alberto Adade Filho**

ITA- Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50- Vila das Acácias  
S. J. dos Campos- CEP 12228-900  
e-mail [adade@mec.ita.br](mailto:adade@mec.ita.br)

***Abstract.** The spatial manipulators employed for satellites and spatial structures capturing and releasing usually act as a mechanical arm whose base is generally a spacecraft or satellite. As they execute any maneuver there is a reaction, which alters its base positioning, requiring corrective actions to return it to its initial or reference position. In order to develop this type of applications it is interesting to have a space conditions' simulator system. This would allow a detailed control strategy investigation in order to minimize the reactions. This work focuses on a robot implementation to this end. Its base and articulations stand on axial aerostatic bears, which slide over a leveled glass surface, thus assuring minimum friction (zero gravity). The position monitoring and feedback will be through angular sensors coupled to the motors. Strain gage sensors strategically distributed on the two flexible links will allow a control of the structural vibration or even their elimination. The control aims end link positioning as well as movement corrections caused by the reactions. Thus, this work presents and discusses design aspects, models and movement simulations for this robot.*

**Keywords:** Robot Simulator, Aerostatic Bearing, Space Systems, Flexible Links, Spacedin applications.