

## ANÁLISE DE SINAIS EM MANIPULADORES COM MEMBROS FLEXÍVEIS

### **José Luiz Ferreira Martins**

Universidade Federal Fluminense / CTC / TCE / Departamento de Engenharia Mecânica  
Rua Passo da Pátria, 156 - São Domingos - Niterói - RJ - Brasil  
CEP 24210-240 Fax: (021) 7174446  
E.Mail: jlfmtem@hotmail.com

### **José António Tenreiro Machado**

Instituto Politécnico do Porto - Instituto Superior de Engenharia  
Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Rua de S Tomé  
4200 Porto - Portugal - E.Mail: jtm@dee.isep.ipp.pt

**Resumo.** Neste trabalho apresenta-se a análise de sinais da dinâmica de uma estrutura robótica com membros flexíveis. A estrutura mecânica deste manipulador é composta de membros constituídos de segmentos rígidos interligados por juntas rotacionais. Elabora-se a dinâmica inversa utilizando-se uma formulação numérica recursiva de Newton-Euler, semelhante à utilizada para sistemas rígidos. Pela manipulação adequada de vetores de entrada, na rotina de estruturação da dinâmica inversa, obtém-se a matriz de massa e os vetores relacionados com a ação da gravidade, de Coriolis e centrípeta. Assim, obtém-se o sistema dinâmico direto da estrutura discretizada com um número adequado de graus de liberdade *n*. Impõe-se no eixo do segmento ativo de um membro um binário perturbador de excitação senoidal. Pela dinâmica direta faz-se a simulação, com discretização temporal, desse sistema utilizando métodos de integração numérica. Obtém-se a resposta temporal dos vetores deslocamento, velocidade e aceleração de todas as juntas. Através do MatLab os dados são tratados para analisar as funções de resposta no tempo e em frequência. São apresentados alguns resultados obtidos com algumas simulações realizadas.

**Palavras Chave:** Robótica, Manipuladores Flexíveis, Simulação Dinâmica, Análise de Sinais

## 1. INTRODUÇÃO

Para a estruturação de sistemas de manipulação robótica requer-se uma série de componentes na montagem de "hardware" mecânico e eletrônico interligados por software para realização de tarefas diversas. Estas tarefas são limitadas pela possibilidade das características de geração de trajetória, e estão relacionadas com o comportamento cinemático e dinâmico da estrutura mecânica do manipulador visando um controle da mesma para realização das tarefas de forma mais adequada possível. Desta forma, avaliações de comportamento são de grande interesse para o sucesso na realização das tarefas.

Podem ser consideradas duas partes principais na estrutura mecânica do manipulador: A primeira parte é o braço constituído, no mínimo, por três graus de liberdade (gdl) utilizados para posicionamento do ponto de concentração dos referenciais de orientação. A segunda parte é o punho, normalmente constituída por outros três gdl's rotacionais para orientação do referencial terminal.

Não levando em consideração folgas mecânicas e deformação nas juntas ativas, pode considerar-se que os membros com gdl's responsáveis pela orientação são rígidos, pois os respectivos referenciais são sobrepostos em um ponto comum, assim como o membro responsável pelo primeiro gdl devido a sua ligação direta com o referencial inercial. Neste pressuposto, o problema de vibração estrutural fica restrito ao segundo e terceiro membros de posicionamento.

De forma semelhante a apresentada por Martins *et al.*(1996), estabelece-se o modelo matemático de simulação dinâmica sob a ação de um binário excitador. Assim sendo, os vetores temporais de deslocamento, velocidade e aceleração são obtidos pela imposição de um binário aplicado na junta ativa do segundo membro.

Com o armazenamento dos vetores, faz-se a análise das respectivas frequências naturais, através de suas transformadas rápidas de Fourier e das funções de transferência relativas aos deslocamentos (receptância), velocidades (mobilidade) e acelerações (inertâncias) para cada junta ativa e passiva.

## 2. ESTRUTURA MECÂNICA

A estrutura mecânica do manipulador analisado é composta de membros constituídos de segmentos rígidos interligados por juntas rotacionais. Os segmentos são considerados ativos ou passivos. Os segmentos passivos podem apresentar deformação, em flexão em um e/ou dois planos e/ou torção, que é compensada nas articulações fictícias dos mesmos.

A estrutura do manipulador com membros flexíveis proposto consiste, basicamente, num mecanismo em cadeia aberta composto de  $n$  membros conectados por juntas rotacionais, que correspondem aos gdl's ativos onde estão presentes os atuadores, e  $nseg$  juntas rotacionais que correspondem a  $(nseg-1)$  segmentos por cada membro. Em cada segmento consideram-se de um a três gdl's passivos. Os membros constituintes da estrutura têm a forma apresentada na Figura 1. O primeiro membro é considerado rígido O segundo membro é considerado flexível e é constituído por uma junta ativa no eixo  $Z_{2,0}$  do referencial do membro. A partir desse referencial, estabelecem-se os referenciais das juntas passivas desse membro, designadas por  $Z_{2,j}$  onde  $j=1, \dots, nseg-1$ . Para os membros seguintes adota-se a mesma convenção.

Para analisar as deformações faz-se a aproximação de cada membro flexível por uma série de pequenos segmentos rígidos interligados por juntas fictícias, como em Huang *et al.* (1988) e Feliu *et al.* (1992), nas quais são concentradas as deformações devido à flexão e/ou torção de cada segmento. Não se considera o efeito de deformação longitudinal dos segmentos da estrutura. Os segmentos ativos dos membros possuem apenas um gdl no eixo Z do seu respectivo referencial. Nos segmentos passivos dos membros assume-se que os gdl's correspondentes dependem do tipo de análise. Considera-se o tipo T1 para o caso em que os segmentos passivos de cada membro, da estrutura articulada são deformáveis em Z (flexão),  $tip=1$ . Para o tipo T2, deformação nos eixos Y e Z (flexão em dois planos),  $tip=2$ . No tipo T3, deformação nos três eixos de cada segmento (flexão em dois planos e torção),  $tip=3$ . Desta forma, os gdl's são definidos por:

$$ngl = n [tip(nseg - 1) + 1] - tip(nseg - 1) \quad (1)$$

Esta avaliação do número total de graus de liberdade deve-se ao fato de se trabalhar na elaboração da dinâmica da estrutura com dois campos vetoriais. Internamente, nas subrotinas de avaliação do vetor que envolve os momentos das forças (giroscópica, centrípeta e de gravi-

dade, de deformação e de fricção) e dos vetores para o cálculo da matriz inercial do sistema tem-se a definição dos vetores das variáveis independentes com três dimensões. Essas dimensões referem-se ao membro, ao segmento do membro e ao eixo considerados. Externamente a essas subrotinas é mais conveniente trabalhar-se com os elementos desses vetores unidimensionalmente; ou seja, orientá-los sequencialmente, para a elaboração e resolução do sistema dinâmico. Desta forma, desenvolveu-se um conjunto de subrotinas com a finalidade de identificar as passagens de um campo vetorial para outro e vice-versa.

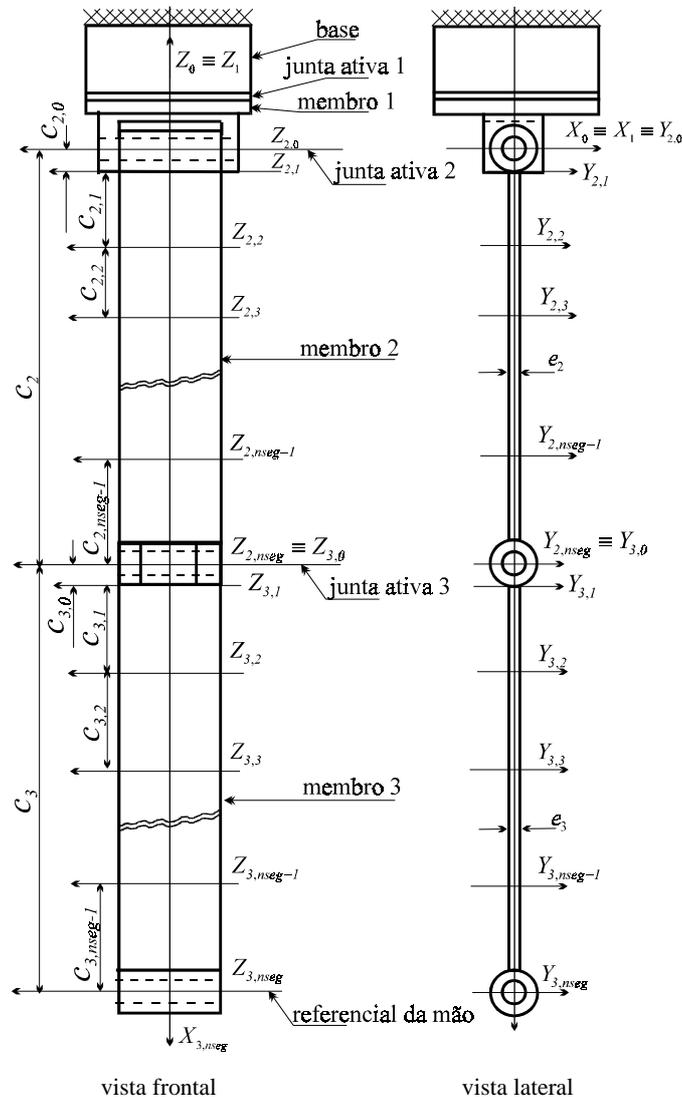


Figura 1 - Estrutura mecânica do manipulador

Na Figura 2 mostram-se as variáveis independentes consideradas nos tipos de análise da estrutura, onde  $\theta_{i,0,0}$  é o ângulo ativo do membro  $i$  medido sobre o eixo  $Z_{i,0}$  entre os eixos  $X_{i-1,nseg-1}$  e  $X_{i,0}$ ,  $\theta_{i,j,k}$  corresponde ao ângulo passivo do segmento  $j$  do membro  $i$  medido entre os eixos  $k$  dos segmentos  $j-1$  e  $j$ . Considera-se que  $i=1,\dots,n$ ,  $j=0,\dots,nseg-1$ . No caso de  $k=1,\dots,3$ , faz-se a avaliação do sistema com análise do tipo T3, ou seja, tem-se rotação nos três eixos. Para  $k=2,3$  faz-se a análise do tipo T2, assim, considera-se rotação nos eixos  $Y$  e  $Z$ . Finalmente, para  $k=3$  faz-se a análise do tipo T1, com rotação no eixo  $Z$ . Note-se que o número de segmentos deve ser, sempre, maior ou igual a dois, pois, estabeleceu-se que cada membro é definido por um segmento rígido, seguido dos respectivos segmentos flexíveis.

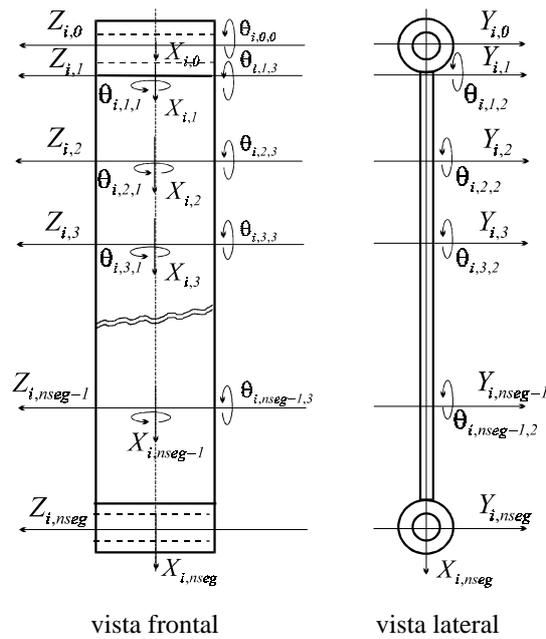


Figura 2 - Convenções das variáveis independentes para análise tipo T3

Esta metodologia foi concebida a partir da possibilidade de uma verificação da importância de se considerar a rotação em todos os eixos dos referenciais passivos como do tipo T3. Entretanto, se os vetores envolvidos, nesse caso, não forem significativos, há a possibilidade de uma simplificação do modelo, para os tipos T2 ou T1. Desta forma, pode-se avaliar com maior segurança as simplificações possíveis, tendo em vista as características do manipulador robótico e das tarefas a serem realizadas no ambiente de trabalho.

### 3. ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA DINÂMICO

Na elaboração do modelo matemático da estrutura mecânica considera-se que a deformação dos membros fica restringida a variações angulares nas juntas passivas, pelo que todos os segmentos podem ser considerados rígidos. Desta forma, é possível elaborar um modelo semelhante ao método recursivo de Newton-Euler (N-E) utilizado para sistemas rígidos na resolução da dinâmica inversa (Huang *et al.*, 1988). A partir desse método, estabelece-se o sistema dinâmico da estrutura com um número qualquer de membros e segmentos. Assim, o modelo desenvolvido pode ser aplicado para vários níveis de precisão através da seleção do número adequado de segmentos por membro e do tipo de segmento a ser utilizado.

Para a realização da simulação dinâmica faz-se necessário a montagem do sistema dinâmico da estrutura analisada, a avaliação dos ângulos das juntas passivas nas condições iniciais e o tipo de excitação a ser utilizado. Desta forma, obtêm-se os vetores deslocamento, velocidade e aceleração discretizados no tempo. Alguns cuidados são necessários no tratamento destes vetores, para uma avaliação adequada na obtenção de respostas em frequência. Apresenta-se a seguir as etapas para avaliação da simulação proposta.

#### 3.1 - Estabelecimento do Sistema Dinâmico

Para estabelecer a dinâmica da estrutura do manipulador, faz-se uso de um conjunto de equações dinâmicas que, simbolicamente, podem ser escritas da seguinte forma:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{T}_{IN} = \mathbf{T}_{EX} \quad (2)$$

em que

$$\mathbf{T}_{IN} = \mathbf{T}_{GC} + \mathbf{T}_{FL} + \mathbf{T}_{FR} \quad (3)$$

Nas equações dinâmicas do sistema proposto em (2) assume-se que  $\mathbf{M}$  representa a matriz de massa, a qual depende do vetor posição  $\mathbf{q}$ , e é uma matriz não singular, simétrica, positiva definida e com dimensão  $ngl \times ngl$ . O vetor  $\ddot{\mathbf{q}}$  representa a aceleração das juntas ativas e passivas, com dimensional  $ngl \times 1$ , que é representado por:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \left\{ \ddot{\theta}_{1,0,0} \quad \ddot{\theta}_{2,0,0} \quad \ddot{\mathbf{q}}_{2,1}^T \quad \ddot{\mathbf{q}}_{2,2}^T \quad \cdots \quad \ddot{\mathbf{q}}_{2,nseg-1}^T \quad \cdots \quad \ddot{\theta}_{n,0,0} \quad \ddot{\mathbf{q}}_{n,1}^T \quad \ddot{\mathbf{q}}_{n,2}^T \quad \cdots \quad \ddot{\mathbf{q}}_{n,nseg-1}^T \right\}^T \quad (4)$$

onde  $\ddot{\theta}_{i,0,0}$  representa a aceleração angular da junta ativa do membro  $i$ ;  $\ddot{\mathbf{q}}_{i,j}$  depende do tipo de análise, ou seja, para os tipos T1, T2 e T3,  $\ddot{\mathbf{q}}_{i,j} = \left\{ \ddot{\theta}_{i,j,3} \right\}^T$ ,  $\ddot{\mathbf{q}}_{i,j} = \left\{ \ddot{\theta}_{i,j,2} \quad \ddot{\theta}_{i,j,3} \right\}^T$ ,  $\ddot{\mathbf{q}}_{i,j} = \left\{ \ddot{\theta}_{i,j,1} \quad \ddot{\theta}_{i,j,2} \quad \ddot{\theta}_{i,j,3} \right\}^T$ , respectivamente;  $\ddot{\theta}_{i,j,k}$  representa a aceleração angular no membro  $i$ , do segmento  $j$ , do respectivo eixo de rotação  $k$  ( $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 0, \dots, nseg - 1$  e  $k = 1, 2, 3$ ). Raciocínio semelhante é utilizado na definição dois vetores a seguir.

O vetor  $\mathbf{T}_{IN}$  é composto pelos vetores:  $\mathbf{T}_{GC}$  que é um vetor dependente dos vetores posição  $\mathbf{q}$  e velocidade  $\dot{\mathbf{q}}$ , representando os efeitos das forças centrífugas, de Coriolis e de gravidade, com dimensão  $ngl \times 1$ ,  $\mathbf{T}_{FL}$  é um vetor dependente do vetor posição  $\mathbf{q}$ , e quantifica a rigidez dos segmentos passivos dos membros da estrutura, com dimensão  $ngl \times 1$  e  $\mathbf{T}_{FR}$  é um vetor dependente do vetor velocidade  $\dot{\mathbf{q}}$ , e representa as perdas por fricção nas juntas ativas e passivas, com dimensão  $ngl \times 1$ .

$$\mathbf{T}_{GC} = \left\{ gC_{1,0,0} \quad gC_{2,0,0} \quad \mathbf{gC}_{2,1}^T \quad \mathbf{gC}_{2,2}^T \quad \cdots \quad \mathbf{gC}_{2,nseg-1}^T \quad \cdots \quad gC_{n,0,0} \quad \mathbf{gC}_{n,1}^T \quad \mathbf{gC}_{n,2}^T \quad \cdots \quad \mathbf{gC}_{n,nseg-1}^T \right\}^T \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_{FL} = \left\{ 0 \quad 0 \quad \mathbf{fL}_{2,1}^T \quad \mathbf{fL}_{2,2}^T \quad \cdots \quad \mathbf{fL}_{2,nseg-1}^T \quad \cdots \quad 0 \quad \mathbf{fL}_{n,1}^T \quad \mathbf{fL}_{n,2}^T \quad \cdots \quad \mathbf{fL}_{n,nseg-1}^T \right\}^T \quad (6)$$

onde  $\mathbf{fL}_{i,j}$  depende do tipo de análise, ou seja, para os tipos T1, T2 e T3,  $\mathbf{fL}_{i,j} = \left\{ fL_{i,j,3} \right\}^T$ ,  $\mathbf{fL}_{i,j} = \left\{ fL_{i,j,2} \quad fL_{i,j,3} \right\}^T$ ,  $\mathbf{fL}_{i,j} = \left\{ fL_{i,j,1} \quad fL_{i,j,2} \quad fL_{i,j,3} \right\}^T$ , respectivamente ( $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 0, \dots, nseg - 1$  e  $k = 1, 2, 3$ ); em que  $fL_{i,j,1} = \frac{G_i I_{ix}}{l_{i,j}} \theta_{i,j,1}$ ,  $fL_{i,j,2} = \frac{E_i I_{iy}}{l_{i,j}} \theta_{i,j,2}$ ,

$fL_{i,j,3} = \frac{E_i I_{iz}}{l_{i,j}} \theta_{i,j,2}$ . Sendo que  $G_i$  representa o módulo de elasticidade transversal do membro

$i$ ;  $E_i$  o módulo de elasticidade normal do membro  $i$ ;  $I_{ix}$  o momento polar da área definida por  $YZ$  do segmento  $j$  do membro  $i$ ;  $I_{iy}$  o momento de inércia da área definida por  $XZ$  do segmento  $j$  do membro  $i$  e  $I_{iz}$  o momento de inércia da área definida por  $XY$  do segmento  $j$  do membro  $i$ .

$$\mathbf{T}_{FR} = \left\{ fr_{1,0,0} \quad fr_{2,0,0} \quad \mathbf{fr}_{2,1}^T \quad \mathbf{fr}_{2,2}^T \quad \dots \quad \mathbf{fr}_{2,nseg-1}^T \quad \dots \quad fr_{n,0,0} \quad \mathbf{fr}_{n,1}^T \quad \mathbf{fr}_{n,2}^T \quad \dots \quad \mathbf{fr}_{n,nseg-1}^T \right\}^T \quad (7)$$

Considerando-se o atrito nas juntas ativas da estrutura segundo os modelos de atrito viscoso e de Coulomb, como referido por Craig (1989), e o atrito nas juntas passivas segundo os modelos apresentados por Inman (1994) e Dimarogonas (1996) pode escrever-se:

$$\mathbf{fr}_{i,j} = \gamma_{Vi,j} \dot{\theta}_{i,j,0} + \gamma_{Ci,j} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{i,j,0}) \quad \text{para } j=0 \quad (8)$$

$$\mathbf{fr}_{i,j} = \gamma_{Di,j} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{i,j,0}) \theta_{i,j,0}^2 + \gamma_{Si,j} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{i,j,0}) \left| \theta_{i,j,0} \right| \quad \text{para } j>0 \quad (9)$$

em que  $\gamma_{Vi,j}$  e  $\gamma_{Ci,j}$  representam as constantes de atrito viscoso e de Coulomb na junta ativa do membro  $i$ , respectivamente;  $\gamma_{Di,j}$  e  $\gamma_{Si,j}$  são a constante de amortecimento de deslocamento quadrado e de deslocamento sólido da junta passiva  $j$  do membro  $i$ , respectivamente.  $\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{i,j,0}) = 1$  para  $\dot{\theta}_{i,j,0} > 0$ ,  $\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{i,j,0}) = 0$  para  $\dot{\theta}_{i,j,0} = 0$ ,  $\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{i,j,0}) = -1$  para  $\dot{\theta}_{i,j,0} < 0$  e  $||$  representa o módulo do parâmetro especificado.

$$\mathbf{T}_{EX} = \left\{ ex_{1,0,0} \quad ex_{2,0,0} \quad \mathbf{0}^T \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad ex_{n,0,0} \quad \mathbf{0}^T \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad \mathbf{0}^T \right\}^T \quad (10)$$

Apresenta-se na figura 3 um fluxograma evolutivo para simulação do sistema. Note-se que a utilização da decomposição LU de  $\mathbf{M}(\mathbf{q})$  para resolução do sistema, não há necessidade de inverter essa matriz para a obtenção de  $\ddot{\mathbf{q}}$  (Press *et al.*, 1988), economizando-se assim o tempo de processamento correspondente.

Para integrar o vetor aceleração obtido a partir da resolução do sistema (2) e assim obter os vetores de velocidade e de deslocamento do passo seguinte, dadas as condições iniciais, entre os vários métodos disponíveis, são utilizados alguns métodos numéricos (Martins *et al.*, 1996). Assim, faz-se a comparação entre a precisão e o esforço computacional (Machado *et al.*, 1993; Hairer, 1978), a fim de utilizar uma metodologia mais apropriada para as análises do presente trabalho.

### 3.2 Avaliação Estática dos Ângulos das Juntas Passivas

A avaliação estática faz-se necessária para o estabelecimento dos ângulos de deformação das juntas passivas, nas condições de posição impostas nas juntas ativas. Esta avaliação é realizada através de um procedimento recursivo com erro predefinido no cálculo dos binários, utilizando-se a rotina da dinâmica inversa e da relação dos binários atuantes nas juntas passivas, os quais são dependentes da posição. Assim sendo, o primeiro passo é realizado através da utilização da dinâmica inversa em que calculam-se os binários necessários para uma determinada posição das juntas ativas, considerando-se, em primeira aproximação, que os ângulos de deformação das juntas passivas iguais a zero, assim como os vetores velocidade e aceleração, ou seja,  $\mathbf{q} = \left\{ \theta_{1,0,0} \quad \theta_{2,0,0} \quad \mathbf{0}^T \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad \theta_{n,0,0} \quad \mathbf{0}^T \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad \mathbf{0}^T \right\}^T$ ,  $\dot{\mathbf{q}} = \{\mathbf{0}\}$  e  $\ddot{\mathbf{q}} = \{\mathbf{0}\}$ , respectivamente. No segundo passo, através do vetor dos binários calculado no passo anterior, faz-se a próxima aproximação dos ângulos de deformação nas juntas

passivas através das relações : para torção em X tem-se  $\theta_{i,j,1} = \frac{fl_{i,j,1} l_{i,j}}{G_i I_{ix}}$ ; para flexão em Y considera-se  $\theta_{i,j,2} = \frac{fl_{i,j,2} l_{i,j}}{E_i I_{iy}}$  e para flexão em Z tem-se  $\theta_{i,j,3} = \frac{fl_{i,j,3} l_{i,j}}{E_i I_{iz}}$ .

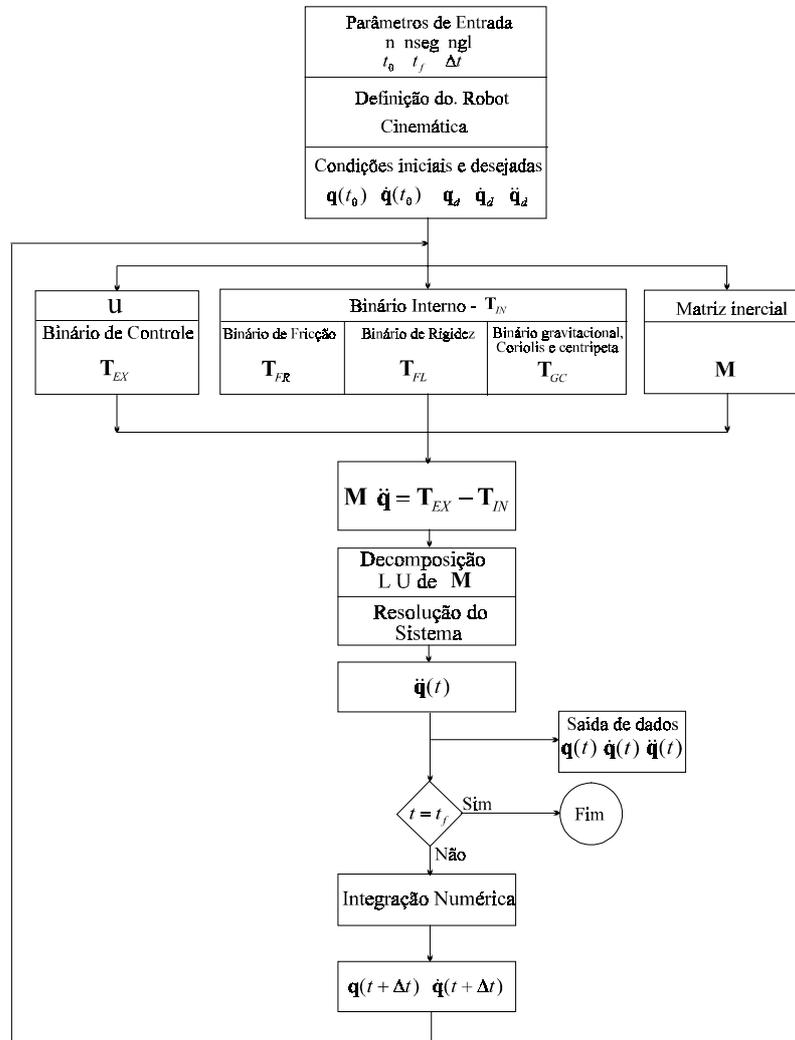


Figura 3 - Fluxograma do Sistema.

O próximo passo consiste em entrar com os novos valores dos ângulos calculados em (11-13) na rotina da dinâmica inversa, obtendo-se novos valores para os binários nas juntas passivas. A seguir, comparam-se os valores destes binários com os novos valores de  $fl_{i,j,k}$ . Este procedimento se encerra no momento em que a diferença entre os valores dos binários for igual ou menor que a uma tolerância predefinida. Desta forma, têm-se estabelecidos os ângulos e seus correspondentes binários estáticos nas juntas passivas.

### 3.3 Tipo de Excitação Utilizada

Neste trabalho adotou-se um sinal de comando senoidal discretizado, com amplitude e frequência fixas, aplicado na junta ativa do segundo membro, ou seja:

$$\mathbf{T}_{EX} = \left\{ 0 \quad ex_{2,0,0} \quad \mathbf{0}^T \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad 0 \quad \mathbf{0}^T \quad \mathbf{0}^T \quad \dots \quad \mathbf{0}^T \right\}^T \quad (11)$$

sendo o elemento  $ex_{2,0,0} = ex_{2,0,0}^S + W (\sin(2\pi \omega n \Delta t))$ , onde  $ex_{2,0,0}^S$  corresponde ao valor do momento necessário estaticamente,  $W$  uma amplitude máxima coerente do sinal,  $\omega$  corresponde a frequência do sinal em Hz,  $n$  número inteiro  $\geq 1$  correspondente ao passo da discretização e  $\Delta t$  corresponde ao incremento de tempo utilizado em cada passo na discretização.

### 3.4 Geração e Tratamento dos Dados

Na simulação mostrada neste trabalho adotou-se a estrutura com o segundo e terceiro membros na horizontal com análise do tipo T1. Cada um desses membros com um segmento rígido e três segmentos flexíveis com um modo de vibração cada. Nos segmentos rígidos não se considerou atrito de qualquer espécie. Nos segmentos flexíveis considerou-se um pequeno amortecimento estrutural. O período de tempo de discretização total utilizado foi de  $T=10$  s, com incremento de tempo  $\Delta t=10^{-3}$  s. Estes dados (Ewins, 1984) conduzem à frequência mínima ou de base  $f_b=10^{-1}$  Hz e frequência máxima ou amostral  $f_s=5 \cdot 10^2$  Hz. Considerou-se o binário excitador com uma frequência de 2 Hz. Esta frequência foi escolhida por observar-se não ser uma das frequências naturais da estrutura.

Para as juntas de cada membro montou-se um arquivo de dados em que para cada instante de tempo tem-se o registro do deslocamento, velocidade e aceleração correspondentes. Esses arquivos são tratados no MatLab, obtendo-se as respectivas transformadas de Fourier dos deslocamentos, velocidades e acelerações. A seguir calculam-se funções de transferência tais como: 1 - transformadas de Fourier dos deslocamentos pelas transformadas de Fourier do excitador, que corresponde a receptância; 2 - transformadas de Fourier das velocidades pelas transformadas de Fourier do excitador, que corresponde a mobilidade; e 3 - transformadas de Fourier das acelerações pelas transformadas de Fourier do excitador, que corresponde a inércia.

Para o caso analisado tem-se interesse no segundo e terceiro membros. Mostram-se a seguir respostas de sinais que destacam mais informações sobre a dinâmica da estrutura utilizada para simulação.

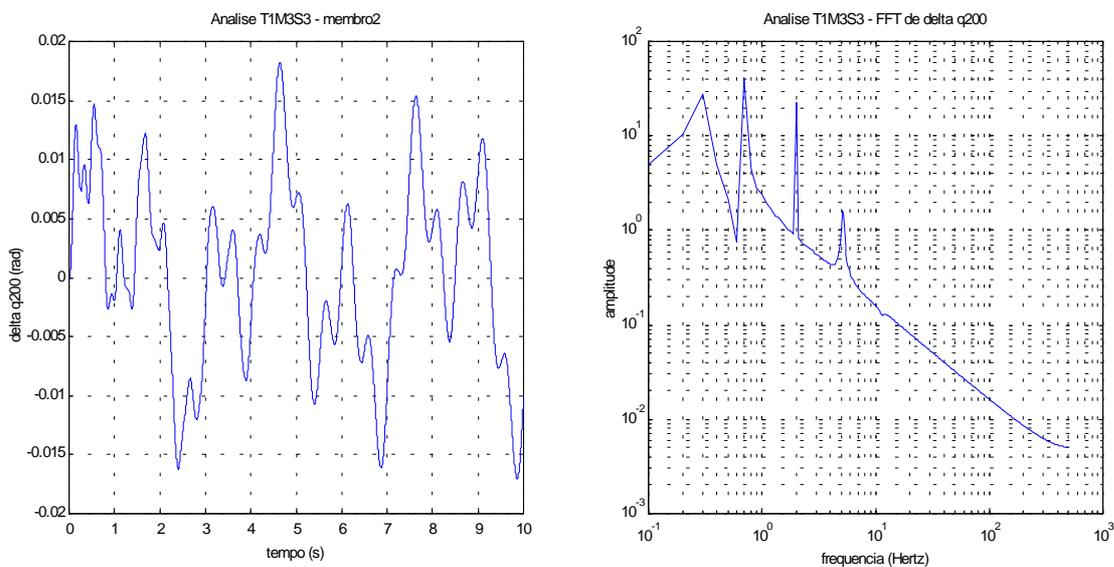


Figura 4 - Diagramas da junta ativa do segundo membro.

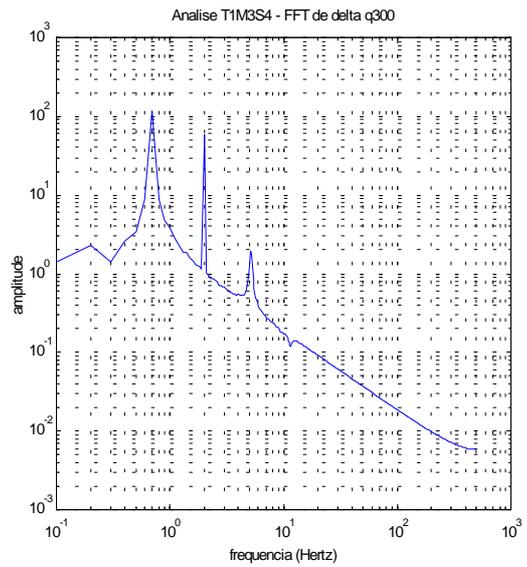
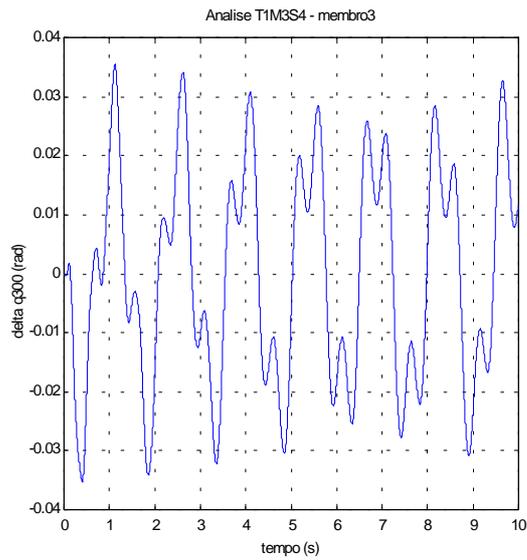


Figura 5 - Diagramas da junta ativa do terceiro membro.

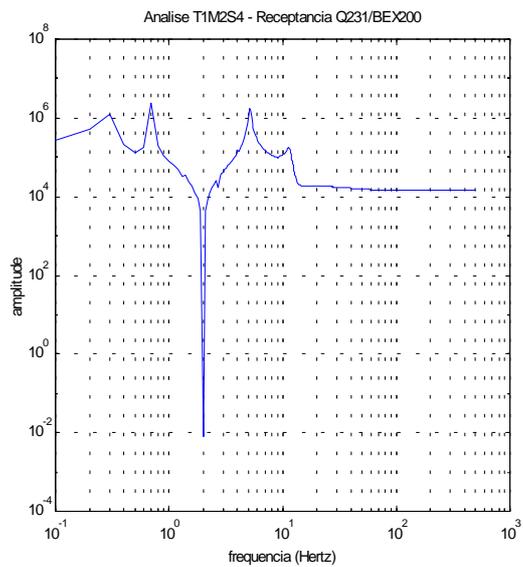
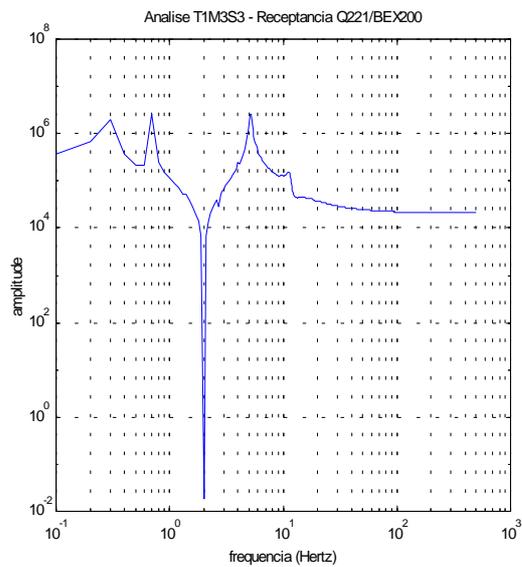
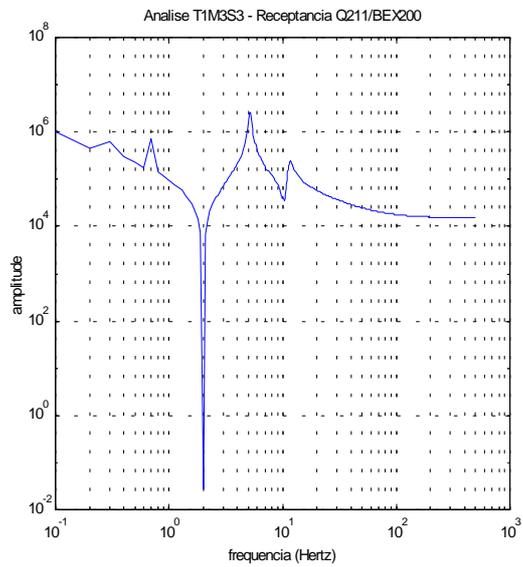
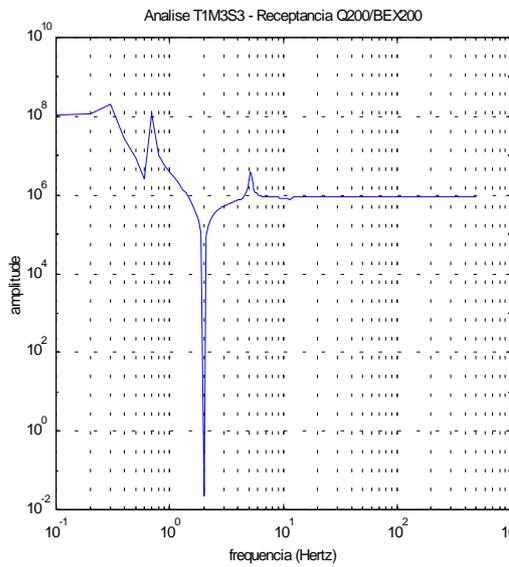


Figura 6 - Funções de Transferência do segundo membro.

## CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações com elevação progressiva do número de segmentos por membro observando-se, além das frequências de cada modo identificado, os novos modos de vibração acrescentados no modelo. Em simulações onde variou-se comprimento e espessura dos membros observou-se a variação do comportamento da estrutura. Constatou-se também que apesar de alterar a frequência do excitador, as frequências naturais consideradas em cada discretização permaneceram as mesmas. Utilizando-se excitador com frequência idêntica a alguma frequência natural, observa-se a amplificação dos sinais temporais, caracterizando ressonância estrutural. A metodologia apresentada neste trabalho mostrou-se eficaz na avaliação das características dinâmicas e vibratórias de estruturas robóticas com membros flexíveis.

## REFERÊNCIAS

- Craig, J.J., 1989, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", Addison-Wesley Publishing Company.
- Dimarogonas, A., 1996, "Vibration for Engineers", Prentice-Hall International.
- Ewins, D.J., 1984, "Modal Testing: Theory and Practice", Letchworth, England, Research Studies Press Ltd.
- Feliu, V., Rattan, K.S., and Brown Jr, H.B., 1992, "Modelling and Control of Single-Link Flexible Arms with Lumped Masses", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, March, vol. 114, pp 59-69.
- Hairer, E., 1978, "A Runge-Kutta Method of Order 10", J. Inst: Maths Applics, vol. 21, pp 47-59.
- Huang, Y., and Lee, C.S.G., 1988, "Generalization of Newton-Euler Formulation of Dynamic Equations to Non-rigid Manipulators", ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, vol. 110, pp 308-315.
- Inman, D.J., 1994, "Engineering Vibration", Prentice-Hall International.
- Judd, R., and Falkenburg, D., 1985, "Dynamics of Nonrigid Articulated Robot Linkages"; IEEE Transactions on Automatic Control, vol AC-30 n° 5, pp 499-502.
- Machado, J.A.T. e Galhano, A.M.S.F., 1993, "Customised Direct Dynamics of Robot Manipulators", IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, France.
- Martins, J.L.F., e Machado, J.A.T., 1996, "Simulação Dinâmica de Manipuladores Flexíveis", Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, pp. 577-582.
- Meirovitch, L., 1986, "Elements of Vibration Analysis", Mc Graw-Hill International.
- Pham, C.M., Khalil, W. and Chevallereau, C.; 1993, "A nonlinear model-based control of flexible robots", Robotics, vol 11, pp 73-82.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A, and Vetterling, W.T., 1988, "Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing", Cambridge University Press.
- Walker, M.W, and Orin, D.E., 1982, "Efficient Dynamic Simulation of Robot Mechanisms", ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 104, pp 205-211.
- Yoshikawa, T., 1990, "Foundations of Robotics: Analysis and Control", MIT Press Cambridge.
- Zampieri, D.E., Rosário, J.M., Martins, J.L.F., Saramago, M.A.P., 1991, "Projeto e Modelagem de Um Manipulador", Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Natal, RN, pp 9-16.

## SIGNAL ANALYSIS IN MANIPULATORS WITH FLEXIBLE MEMBERS

**Summary.** *This paper deals with signal analysis of the dynamics of a robotic structure with flexible members. The mechanical structure is composed of flexible links, where each one is composed of several rigid segments connected through rotational joints. The inverse dynamics is elaborated being used a Newton-Euler recursive numeric formulation similar to rigid systems. With the adequate manipulation of the input vectors, it is possible to obtain the mass matrix and the vectors that consider the gravitational, Coriolis and centripetal effects. The direct dynamic system of the structure is obtained with an adapted number of degrees of freedom ngl. It is imposed in the axis of the active segment of a member a disturbing binary with senoidal excitation. Using the direct dynamics it's possible to simulate the behavior of the structure. It is obtained the temporary response of the displacement, velocity and acceleration of all joints. Through MatLab software the data are treated to analyze the response functions in the time and in frequency. Some simulation results are presented.*

**Keywords:** *Robotics, Flexible Manipulators, Dynamic Simulation, Signal Analysis*