

SISTEMAS ELASTOCINEMÁTICOS: MODELAMENTO E CONTROLE DA VIBRAÇÃO

Arthur Tarso Rego (PUC MINAS) arthur.tarso@outlook.com
Daniel Marques Megale (PUC MINAS) megaledm@outlook.com

Resumo: O trabalho foi desenvolvido com base em materiais reunidos sobre sistemas elastocinemáticos, seus componentes, os tipos de vibração associados a eles e o modelamento e controle da vibração. Seu objetivo é apresentar uma estratégia de controle que atinja um erro irrisório ao controle do processo proposto. Analisou-se o comportamento de cada um dos elementos constituintes do sistema separadamente e em conjuntos, em relação à sua influência na vibração total do sistema. Em sequência, foi desenvolvido o modelamento matemático de um arranjo preestabelecido para análises computacionais de comportamento. Foi feito um estudo das possíveis estruturas de controle e então foi escolhido o controle em avanço como melhor opção para controlar o sistema proposto, dado o conhecimento do modelo matemático a possibilidade de obter os dados necessários para seu modelamento. O controlador em avanço se mostrou eficaz para controlar o sistema proposto, já que foi possível fazer o modelamento matemático e, a qualquer momento, saber qual o valor necessário do coeficiente de amortecimento para atingir o set point desejado. Conclui-se que, caso não seja possível obter um modelo matemático com suficiente precisão, o controlador proposto não será eficaz para o controle, dado que para seu modelamento é necessário uma ampla base de dados que relaciona diferentes valores de entrada e suas respectivas saídas.

Palavras-chave: Sistemas Elastocinemáticos. Modelamento Matemático. Controle em Avanço. Vibração. MatLab.

ELASTOKINEMATIC SYSTEMS: VIBRATION MODELING AND CONTROL

Abstract: This work was developed based on gathered material regarding elastokinematic systems, its components, the types of vibration linked to it and the modeling and control of the vibration. The objective is to present a control strategy that has an insignificant error on controlling the proposed process. The behavior of each of the components of the system was analyzed separately and in groups, related to its influence on overall vibration in the system. In sequence, the mathematical modeling of a predetermined arrangement for computational behavior analyzes was determined. A study of possible control structures was made and then was chosen feedforward control as the best option for controlling the proposed system, given the knowledge of the mathematical model the possibility to obtain the necessary data for modeling the controller structure. The feedforward controller was effective on controlling the proposed system, since it was possible to mathematically model it and, at any time, know the value needed for the damping coefficient to achieve the desired setpoint. It follows that, if it's not possible to build a model with sufficient accuracy, the proposed controller will not be effective for the control, since its modeling depends on a large database that relates different input values and their outputs.

Keywords: Elastokinematic Systems. Mathematical Modeling. Feedforward Control. Vibration. MatLab.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho estuda uma peneira vibratória onde a vibração é desejável para a separação de pedras, mas é indesejável que essa vibração atinja o solo, pois seria nociva ao ambiente. Primeiramente são apresentados a representação do sistema, o modelo matemático e a simulação na ferramenta computacional MatLab para conhecimento dos resultados obtidos. Finalmente a conclui-se qual o método mais eficaz para o controle da vibração no sistema proposto.

1.1. Problema Motivador

O ambiente industrial é repleto de fontes de vibração: processos de impacto, máquinas rotativas ou alternativas tais como motores e compressores, veículos de transporte tais como caminhões, trens e aviões, o fluxo de fluidos, etc. A presença de vibrações frequentemente conduz a efeitos indesejáveis tais como: falhas mecânicas ou estruturais, manutenção frequente e dispendiosa de máquinas, e danos e desconforto para o homem.

A primeira alternativa para controlar vibração é tentar eliminar, isolar ou alterar a fonte da vibração. Isto nem sempre é possível, seja por motivos técnicos ou econômicos. Alguns exemplos de fontes de vibrações que não podem ser alterados são terremotos, turbulência atmosférica (aviação), irregularidades em estradas e instabilidades em motores a combustão, ou mesmo uma situação em que é desejável a vibração em alguns pontos do processo, como no caso de peneira vibratória, mas não é desejável que essa vibração se espalhe pelo ambiente.

1.1.1. Justificativa

Tendo em vista esta limitação, as técnicas de controle são uma alternativa para tentar manter os níveis de vibração em valores aceitáveis sem que seja necessário super-dimensionar os amortecedores e molas que isolam a vibração do sistema. Por meio das técnicas de controle, é possível monitorar as vibrações em um estágio desejável do processo e ajustar por meio de atuadores a vibração nos estágios do processo onde esta é indesejável.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. O modelo

O sistema proposto para estudo é o de uma peneira vibratória. Essa peneira é composta por três massas conectadas por molas e amortecedores, sendo a primeira uma plataforma que recebe a excitação vinda de um excêntrico, a segunda a peneira que receberá o material a ser peneirado e a última uma mesa que suporta todo o sistema descrito. O controle do sistema foi feito variando o coeficiente de amortecimento do amortecedor que suporta a mesa. A Figura 1 mostra o esquema do sistema proposto para estudo no presente trabalho.

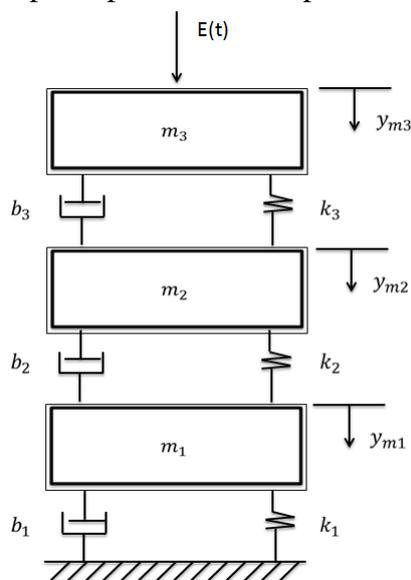


Figura 1 – Sistema proposto (Fonte: Elaborada pelos autores).

O modelamento de um sistema elástico-cinemático parte de um estudo dos diagramas de corpo livre das massas que compõe o sistema. Esse estudo permite determinar as equações de estado do sistema e assim saber, a qualquer momento, quais as forças atuantes sobre as massas, assim como velocidade, aceleração e posição das massas, molas e amortecedores do sistema. Os coeficientes da matriz de estados obtida são representados por:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{b_2+b_3}{m_1} & \frac{b_2}{m_2} & 0 & -k_1 & k_2 & 0 \\ \frac{b_2}{m_1} & -\frac{b_2+b_3}{m_2} & \frac{b_3}{m_3} & 0 & -k_2 & k_3 \\ 0 & \frac{b_3}{m_2} & -\frac{b_3}{m_3} & 0 & 0 & -k_3 \\ \frac{1}{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{m_1} & \frac{1}{m_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_2} & \frac{1}{m_3} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad D = 0 \quad (1)$$

2.2. Simulações

Para simular o sistema, a ferramenta computacional Matlab foi utilizada. As equações de estado foram inseridas dentro de um bloco que recebe os parâmetros referentes ao sistema e as entradas, coeficiente de amortecimento do amortecedor que suporta a mesa (b₁) e massa total da peneira (m₂), para então dar a resposta do sistema a determinada excitação. A Figura 2 mostra o bloco e a tela para inserção de parâmetros desenvolvidos no Matlab.

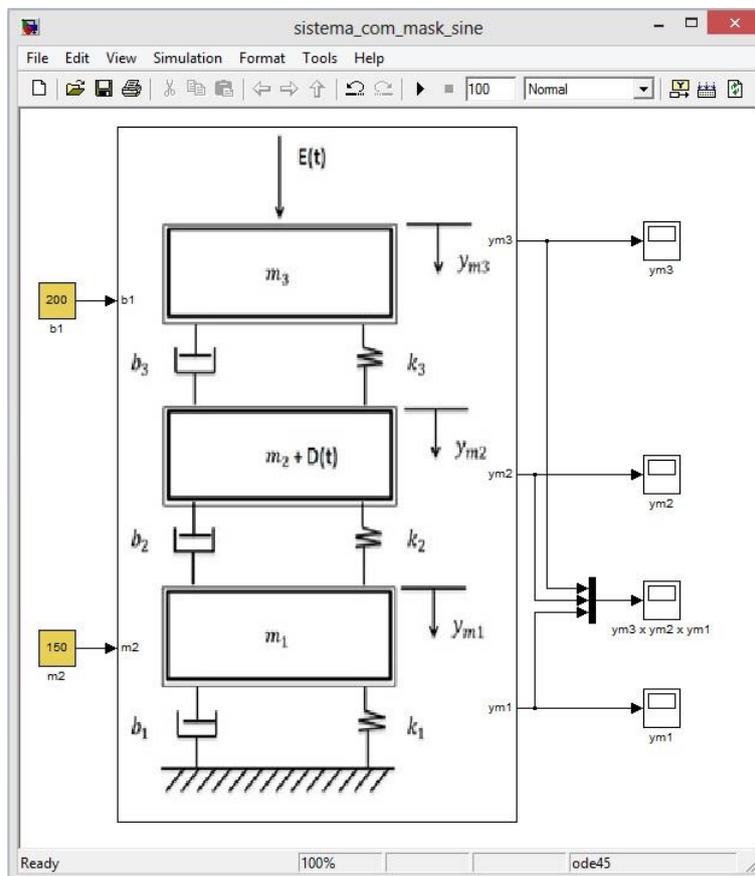


Figura 2 – Modelo em Matlab (Fonte: Elaborada pelos autores).

Primeiro foi verificada a estabilidade do sistema em malha aberta por meio da aplicação de um impulso como excitação. Para que seja confirmada a estabilidade, ao responder ao impulso o sistema deve, após determinado tempo, voltar ao repouso. Esse efeito pode ser observado na Figura 3.

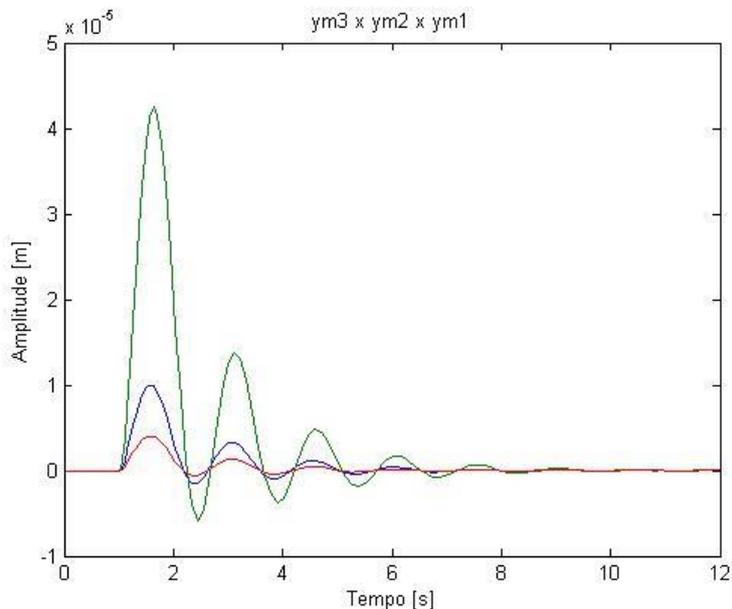


Figura 3 – Resposta ao impulso (Fonte: Elaborada pelos autores).

2.3. Controlador

Primeiramente foi testada a controlabilidade do sistema proposto. Para isso a matriz de controlabilidade do sistema, representada na Figura 4, foi obtida por meio da ferramenta computacional MatLab, utilizando as matrizes de estado que representam o sistema. Para que um sistema seja totalmente controlável, o rank da matriz de controlabilidade deve ser igual à ordem do sistema. Concluiu-se assim que o sistema é totalmente controlável.

```
matriz_controlabilidade =
    1.0e+003 *
      0          0          0.00133333333333333  0.01271111111111111
-0.968242962962963 -1.055074765432099          0.00253333333333333 -0.02791555555555556
      0          0.00100000000000000  0.00253333333333333 -0.02791555555555556
0.109969481481481 -2.637887683950618          0.00386666666666667  0.00987111111111111
      0.00100000000000000 -0.00100000000000000 -0.00386666666666667  0.00987111111111111
0.007429037037037 -0.060732365432099          0          0.00002666666666667
      0.00025422222222222 -0.019364859259259          0          0.00002666666666667
      0          0          0.00000666666666667 -0.00000977777777778
-0.000440325925926  0.020097989135802          0.00000666666666667 -0.00000977777777778
      0          0.00005000000000000 -0.00005666666666667 -0.00021022222222222
0.000679659259259 -0.000361678024691          0.00005666666666667 -0.00021022222222222
```

Figura 4 – Matriz de controlabilidade (Fonte: Elaborada pelos autores).

Em seguida foi projetado o controlador em avanço. Para isso, foram tabelados diversos valores de RMS para a posição da mesa para cada valor de coeficiente de amortecimento no amortecedor da mesa, utilizando três massas distintas: a vazia, meia carga e plena carga. Os

valores obtidos foram plotados em um gráfico que relaciona coeficiente de amortecimento por valor RMS de posição da mesa, como mostrado na Figura 5. Utilizando a ferramenta *cftool* do Matlab, foi obtida a equação cuja curva melhor representa os valores obtidos na tabela.

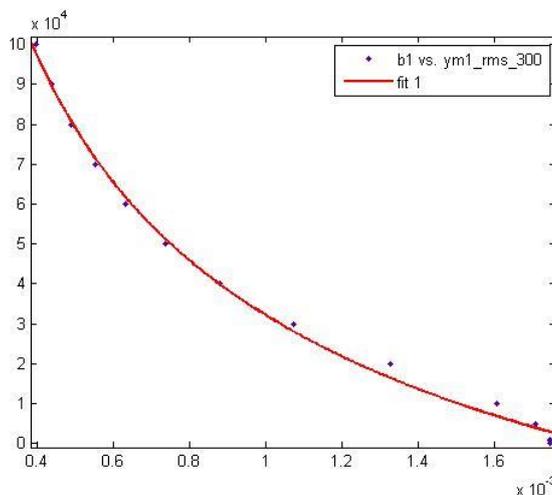


Figura 5 – Gráfico de coef. de amortecimento x valor RMS da posição da mesa para meia carga (Fonte: Elaborada pelos autores).

O valor desejado de RMS é então inserido como setpoint e tratado por um bloco que contém a equação que o relaciona com o coeficiente de amortecimento necessário para obter o valor desejado. A saída desse bloco é o sinal de controle. A Figura 6 mostra a inserção do bloco dentro do modelo previamente representado pela Figura 2.

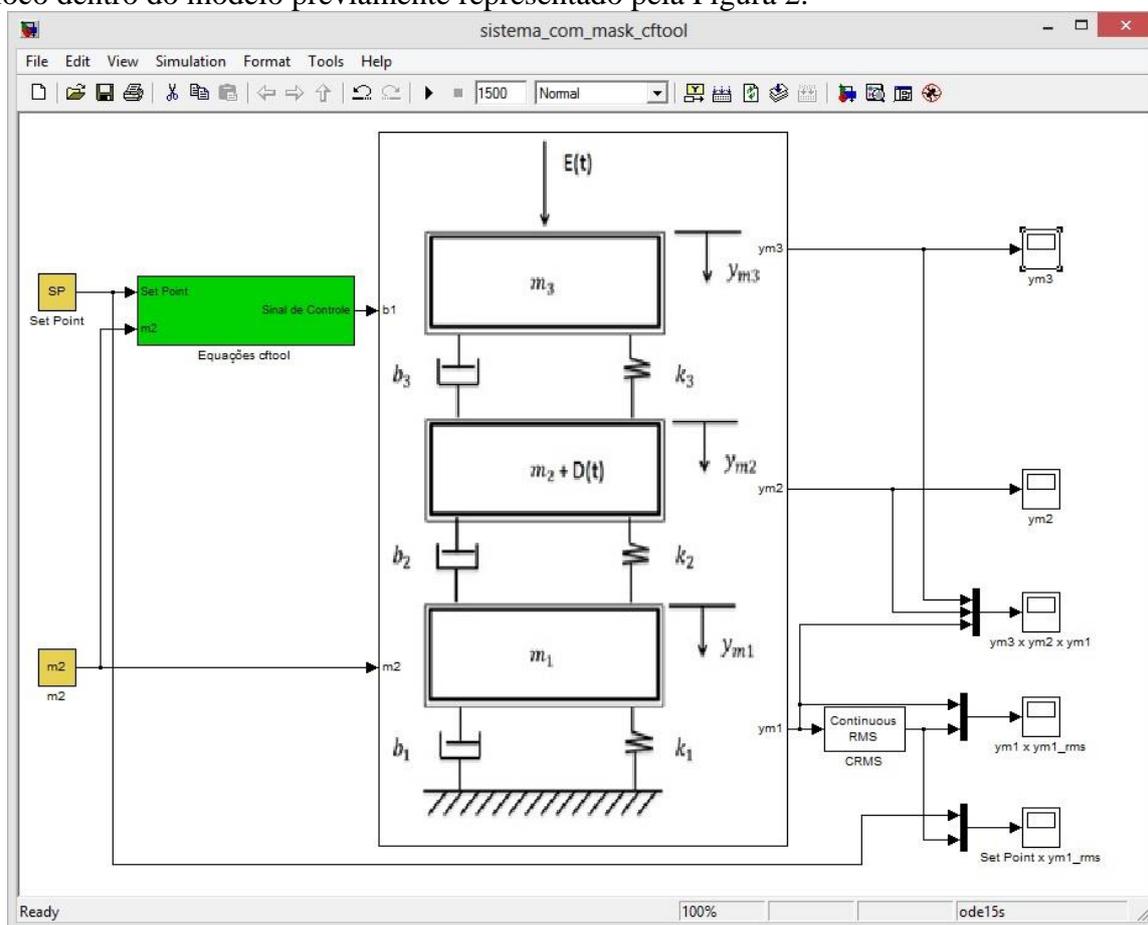


Figura 6 – Modelo em Matlab com controle (Fonte: Elaborada pelos autores).

2.4. Resultados

Para obtenção dos resultados, foram feitos testes a vazio, com meia carga e plena carga na peneira. Para cada valor de massa que o conjunto da peneira assume foram traçados os gráficos de posição da mesa pelo tempo.

O resultado dos testes para o controlador em avanço quando submetido ao teste, com um setpoint de um milímetro e meia carga é mostrado na Figura 7. O erro obtido, ou seja, a diferença do valor RMS obtido pelo sistema e o valor desejado de resposta é irrisório em valores absolutos, sendo de aproximadamente dois milímetros.

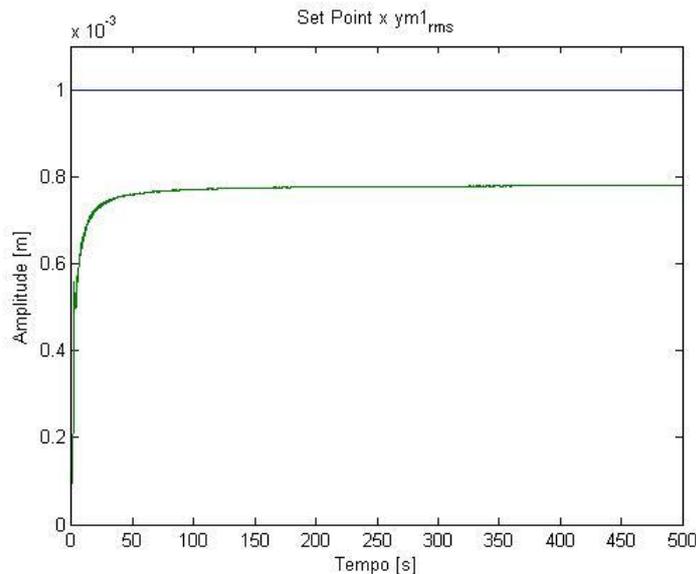


Figura 7 – Resultado obtido para RMS versus setpoint (Fonte: Elaborada pelos autores).

Em seguida foram feitos testes variando a carga a peneira entre a vazio, meia carga e plena carga e foi analisada a capacidade do controlador de responder à variação da massa. A Figura 8 mostra a variação da carga na peneira pelo tempo. Cada carga foi mantida durante um tempo de mil segundos para que fosse possível observar a resposta do controlador.

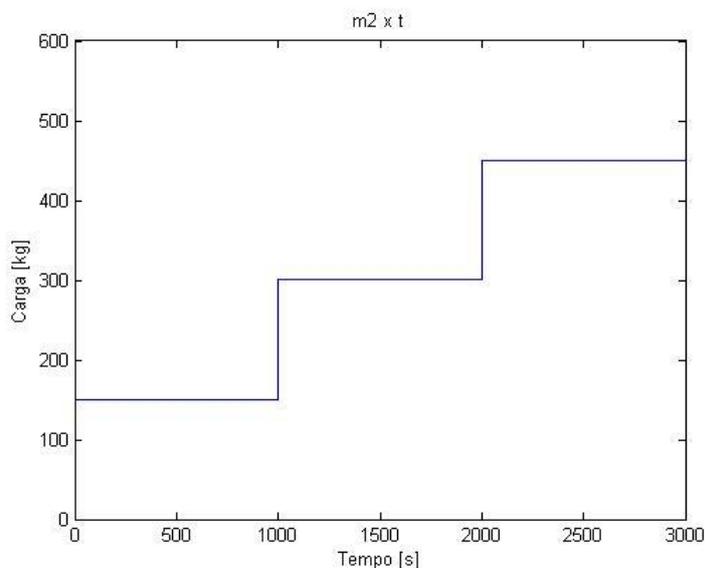


Figura 8 – Teste de variação na carga da peneira (Fonte: Elaborada pelos autores).

Para o setpoint de um milímetro, é possível observar o efeito da atuação do controlador sobre o amortecedor que suporta a mesa pela Figura 9, visando minimizar o erro em relação ao valor desejado na saída.

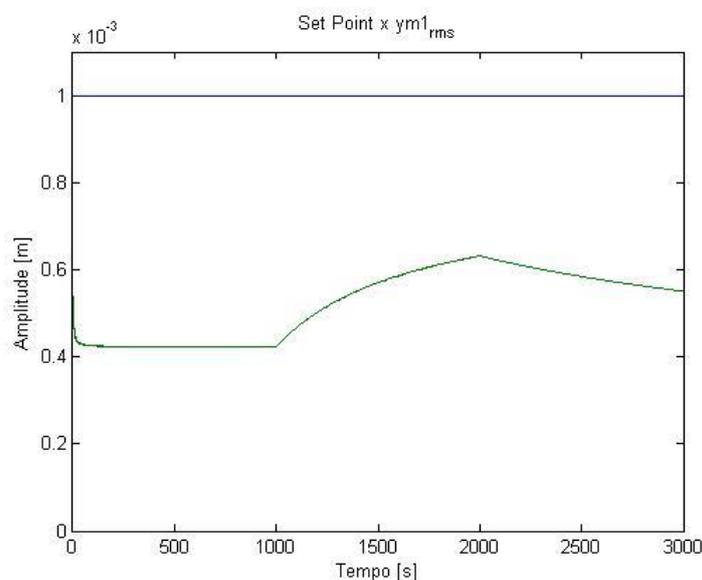


Figura 9 – Resultado do teste de variação de massa na peneira (Fonte: Elaborada pelos autores).

3. CONCLUSÃO

Sabendo-se o modelamento matemático do sistema, foi possível obter maior conhecimento sobre o sistema, estudar seu funcionamento e conhecer sua dinâmica. Desta forma, o modelamento foi imprescindível para a escolha do controlador que melhor atenderia ao processo.

Neste trabalho, foi projetado um controlador em avanço a partir de testes feitos com o sistema, de forma a serem obtidas equações que descrevessem a resposta dinâmica do sistema para diversos conjuntos de entrada, de forma que a ação de controle sempre seria a mais efetiva possível.

Para atestar a qualidade do controlador projetado, podem ser analisados o tempo de resposta do sistema com controle e o erro em regime estacionário. Considerando-se que se trata de um sistema mecânico, sendo envolvidas massas de até 450 kg, o tempo de resposta de pouco mais de 20 segundos foi bastante eficiente e o erro, apesar de ser relativamente grande se comparado ao *setpoint*, não foi um fator preocupante, pois em momento algum o valor da vibração do sistema ultrapassou o valor desejado inserido no controlador.

Desta forma, pode ser concluído que, quando for possível fazer o modelamento do sistema ou ter o conhecimento das saídas do mesmo para cada conjunto de entrada possível, o controlador em avanço será mais efetivo, já que é possível equacionar as saídas para cada entrada e assim sempre obter um valor próximo do valor desejado na saída.

Caso não seja possível obter todos os detalhes de saída para as diversas entradas do sistema, outro tipo de controlador deve ser projetado.

REFERÊNCIAS

AGUADO, Alexandre; CANTANHEDE, Marco. Lógica Fuzzy. Disponível em: <http://www.ft.unicamp.br/liag/wp/monografias/monografias/2010_IA_FT_UNICAMP_logic aFuzzi.pdf> Acesso em: 28 set. 2013.

ARGE. Espaço de estados. 2012 Disponível em: <http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ790/Cap_8.pdf> Acesso em: 25 set. 2013.

BEER, F.; JOHNSTON, E.H. (1994). **Mecânica vetorial para engenheiros: estática** (5th ed.). São Paulo: Markron Books.

CARDON, André; MÜLLER, Daniel. **Introdução às redes neurais artificiais**. Disponível em: <http://www.inf.ufrgs.br/~danielnm/docs/intro_rna.pdf> Acesso em: 05 out. 2013.

ENOKA, R.M. (2000). **Bases Neuromecânicas da Cinesiologia**. São Paulo: Manole.

FILIPOVIC, Damir, SCHÖDER, Dierk. **Control of vibrations in multi-mass systems with locally controlled absorbers**. Institute for Electric Drives, TechnicalUniversityMunich, Munich, Germany, 2000.

GUERRINI, Iria. Conservação da quantidade de movimento. Disponível em: <http://educar.sc.usp.br/sam/quantidade_movimento_roteiro.html> Acesso em: 26 set. 2013.

INMAN, Daniel John. **Engineering Vibration**. 3 ed. Prentice Hall.

MIZUNO, T, MORIYA, M., ARAKI, K. **Robust disturbance cancellation in an active dynamic vibration absorber system**. Departament of Mechanical Engineering, Saitama University, Japan, 1994.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4 ed. Universityof Minnesota. 2002.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4 ed.

REGO, Renata Umbelino. **Controle de Amortecimento para Atenuação das Vibrações em Sistemas de Massa Variável**. 2013. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Estado de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.

RICO, Júlio Elias Normey. **Projeto de Controladores PID Industriais**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.

TOMAR, Instituto politécnico de. Espaço de estados. 2012 Disponível em: <http://orion.ipt.pt/~anacris/ci_1/pdf/aula7.pdf> Acesso em: 25 set. 2013.

WADE, Harold. **Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application**. 2 ed.