



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande - Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPE

ENSINO DE SISTEMAS DE CONTROLE USANDO APLICAÇÕES REAIS EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Marco A. A. Melo – mant@mackenzie.com.br

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia

Rua Itambé, 45 – Prédio 6 - Higienópolis

01239-902 – São Paulo – SP

Claude Emile Strohl - claude@mackenzie.com.br

Marcio Eisencraft – marcioft@mackenzie.com.br

***Resumo:** Sistemas de controle é uma das disciplinas mais promissoras, importante e relativamente complexa no ensino de engenharia, sendo constantemente aplicada em equipamentos mecânicos, eletrônicos, processos industriais e outras áreas, fazendo que o engenheiro necessite de um sólido conhecimento teórico e vivência prática. Este trabalho mostra o desenvolvimento que está sendo feito para o ensino de sistemas de controle sustentado por aplicações reais em práticas laboratoriais, para permitir um aprendizado consistente e motivador ao aluno. Mostraremos aplicações reais que utilizam uma grande parte de modelos teóricos encontrados na literatura de controle, como o sistema massa mola e amortecedor e também sistemas de controle avançado com aplicações em um levitador magnético. Estas aplicações podem ajudar a fixar os conceitos teóricos de sistemas de controle, como por exemplo o uso de técnicas de controle como processamento de sinais e uso de controladores digitais PID para obtenção de uma determinada resposta de sistema desejada. Os sistemas de controle são modelados no domínio da frequência e no domínio do tempo com o uso de espaço de estados.*

***Palavras chaves:** Ensino de Sistemas de Controle, Práticas laboratoriais em sistemas de Controle Digital, PID, Espaço de Estado, Levitador Magnético.*

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de Controle fazem parte do nosso dia à dia e estão ao nosso redor em muitas aplicações que proporcionam uma melhor qualidade de vida. Um sistema de controle é formado por subsistemas e plantas (ou processos), que devem corresponder com alguma resposta real para uma determinada entrada desejada por nós.

O objetivo de um sistema de controle é proporcionar uma resposta adequada para uma saída de uma planta.

Ultimamente os sistemas de controle se apresentam no nosso meio de forma simples como por exemplo um termostato até formas complexas como veículos pilotados automaticamente. Isto é possível devido o avanço tecnológico dos subsistemas que são integráveis aliado ao processamento de sinais com o uso de processadores digitais de sinais (DSP).

Os benefícios dos sistemas de controle são resumidos em quatro razões.

A primeira razão é a amplificação de potência, a segunda razão é o controle remoto, a terceira razão é a facilidade de uso da forma de entrada onde uma grandeza física pode estar representando uma outra grandeza física, como por exemplo a entrada de um sistema é a posição de um sensor que representa uma determinada temperatura, a quarta razão é compensação de perturbações existentes no mundo real (NISE, 2002).

Para o ensino de sistemas de controle, necessita-se do conhecimento de equações diferenciais que representam sistemas com uma entrada e uma saída até sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas, sendo feito o uso de sistemas por espaço de estados.

A dificuldade de modelar tal sistema de controle que é parcialmente complexa, pode ser feita no domínio do tempo (espaço de estados) ou no domínio da frequência, sendo esta última apropriada para a questão da solução de sistemas por Laplace, evitando diretamente a solução das equações diferenciais, e abordada inicialmente no ensino de sistemas de controle.

Cabe ao engenheiro de sistemas usar os conhecimentos para associar os diversos subsistemas existentes no mundo real de modo a projetar os sistemas de controle. Isto só é possível com o uso de muitos conceitos de física, cálculo, análise de sistemas lineares e processamento de sinais aplicados. Isto pode gerar dificuldades para o aluno, podendo gerar desmotivação.

Este trabalho mostra uma abordagem de ensino no qual a prática de sistemas de controle é importante, não sendo só simulada por ferramentas computacionais, mas mostrando respostas reais, que em geral são diferentes das respostas calculadas devido a não existências de variações nos sistemas computacionais, como por exemplo o envelhecimento dos componentes e a ausência de ruídos ou perturbações. (KRAUS, 1991)

Segue nas próximas seções os conceitos de sistemas de controle necessários para o modelamento e análise, seguido de aplicações reais e conclusão de maneira resumida tratadas no curso de Engenharia Elétrica na Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

2. CONCEITOS DE SISTEMA DE CONTROLE

Em sistemas de Controle, o comportamento dinâmico é descrito por equações diferenciais de variáveis reais que são funções do tempo. Por exemplo um conjunto massa-mola-amortecedor a seguir:

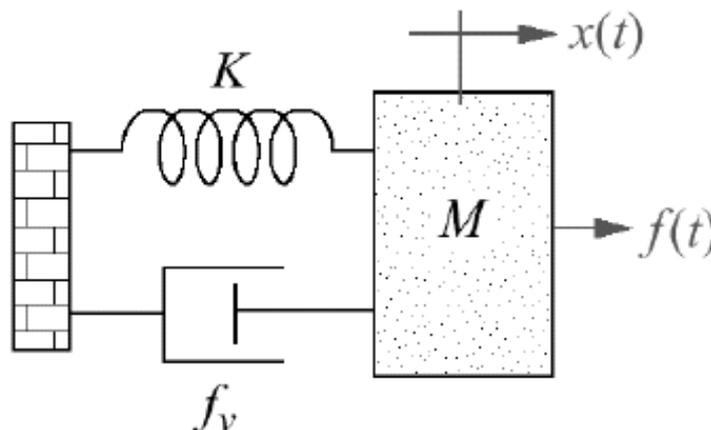


Figura 1 – Sistema Massa-Mola-Amortecedor.

A posição da massa, indicada por $x(t)$ neste caso obedece a seguinte equação diferencial mostrada abaixo.

$$M\ddot{x}(t) + f_v\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

Tomando a transformada de Laplace da equação (1) e depois rearranjando para obter a Função de Transferência do sistema como descrito na equação (2) e (3) abaixo.

$$H(s) = \frac{1}{Ms^2 + fv_s + k} \quad (2)$$

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} \quad (3)$$

Para o caso de amortecimento subcrítico, a solução (resposta) não-forçada é da forma

$$x(t) = \frac{x(0)}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin\left(\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} t + \theta\right) \quad (4)$$

Quando encontramos a função de transferência a partir de equações diferenciais, tipicamente escrevemos o resultado na forma polinomial (Nise,2002)

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

Distribuindo os termos da equação (2) e comparando-os com os coeficientes do denominador de $H(s)$ da equação (5) encontramos a seguinte correspondência entre os parâmetros:

$$\sigma = \zeta\omega_n \quad \text{e} \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (6)$$

Onde o parâmetro ζ é a taxa de amortecimento e ω_n é a frequência natural não amortecida.

Estas variáveis podem ser determinadas pelo tempo de assentamento e tempo de pico respectivamente mostradas a seguir:

$$T_s = \frac{4}{\delta\omega_n} \quad (7)$$

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \delta^2}} \quad (8)$$

Os pólos da função de transferência estão localizados a um raio ω_n e um ângulo $\theta = \arcsin \zeta$ como mostrado na figura a seguir:

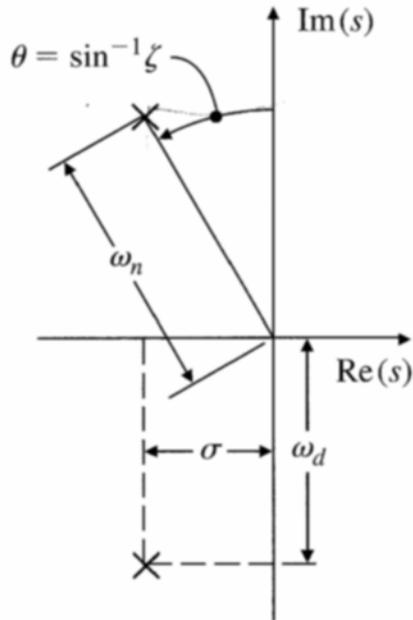


Figura 2– Parâmetros da localização de um par de pólos complexos (DORF).

Desta forma, a taxa de amortecimento reflete o nível de amortecimento como uma fração do amortecimento crítico em que os pólos tornam-se reais.

Em coordenadas retangulares $s = -\sigma \pm j\omega_d$.

Quando $\zeta = 0$ não temos amortecimento, $\theta = 0$ e a frequência natural amortecida $\omega_d = \omega_n$ é igual à frequência natural sem amortecimento.

A antitransformada de Laplace de (9) fornece a resposta impulsiva

$$h(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\sigma t} (\sin \omega_d t) u(t) \quad (9)$$

A figura 3 a seguir mostra $h(t)$ para diversos valores de ζ tendo sido o tempo normalizado em relação à frequência natural não amortecida ω_n .

Note que a frequência real ω_d decai suavemente conforme a taxa de amortecimento cresce, e também que para amortecimentos muito pequenos a resposta é oscilatória enquanto que para grandes amortecimentos (ζ) a resposta não mostra oscilação.

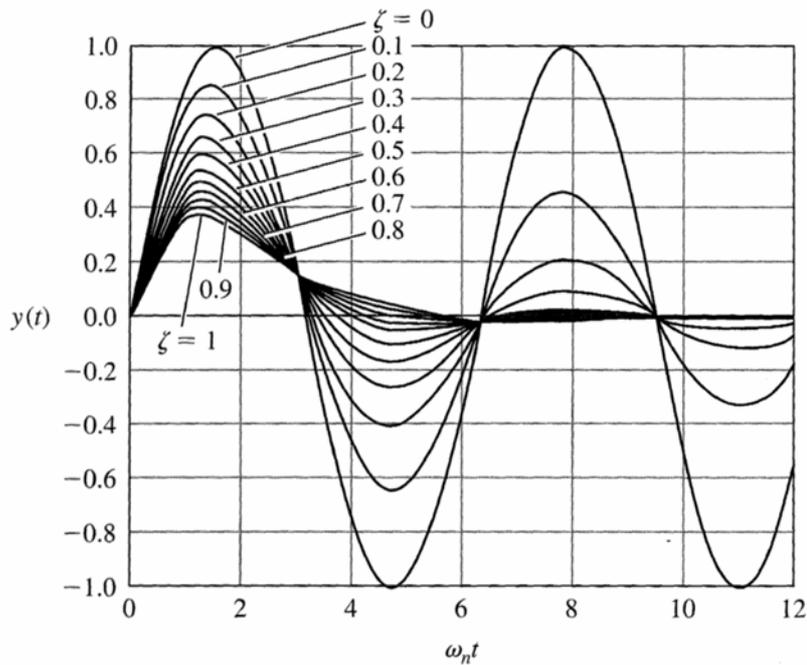


Figura 3 – Respostas impulsivas subamortecidas de um sistema de ordem dois (DORF).

Algumas destas respostas estão mostradas também na figura a seguir para mostrar qualitativamente como a mudança nos locais dos pólos no plano- s afeta as respostas impulsivas.

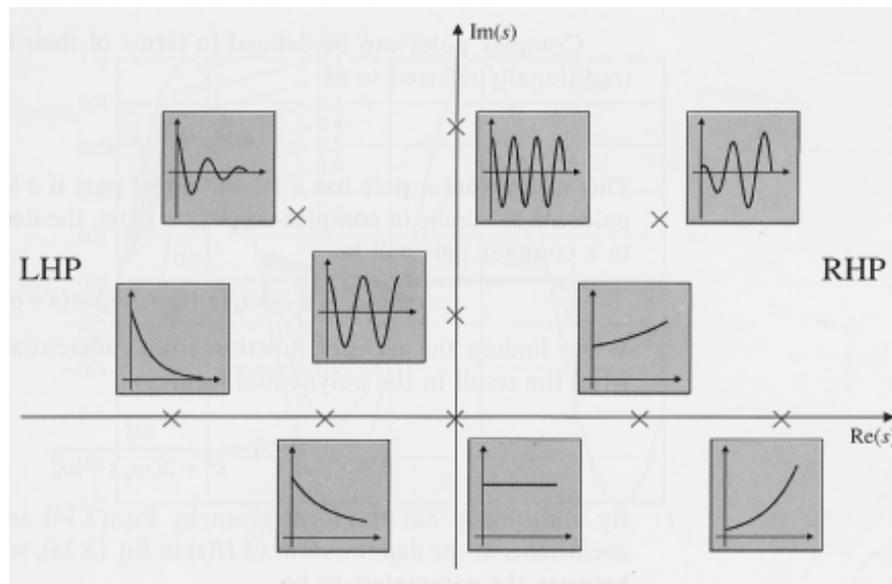


Figura 4 – Respostas impulsivas em função da localização dos pólos no plano (DORF).

Para sistema de 2ª ordem temos a análise da estabilidade e resposta transitória, sendo a análise da estabilidade do sistema estável se todos os pólos têm parte real negativa.

A resposta transitória podendo ser subamortecida se os pólos são complexos conjugados, superamortecida se os pólos são reais e diferentes e com amortecimento crítico de os pólos são reais e iguais.

O lugar das raízes é a ferramenta de análise e representação gráfica dos pólos a malha fechada em função da variação de um parâmetro do sistema.

A resposta em frequência é uma outra ferramenta importante para o projeto e análise de sistemas de controle. Em regime estacionário, entradas senoidais aplicadas a sistemas lineares geram respostas senoidais de mesma frequência.

Embora a frequência da entrada e da saída sejam as mesmas, elas diferem com relação à amplitude e ao ângulo de fase. Estas diferenças são funções da frequência.

A equação (10) mostra a relação de magnitude entre a saída e a entrada.

$$M(\omega) = \frac{M_o(\omega)}{M_i(\omega)} \quad \phi(\omega) = \phi_o(\omega) - \phi_i(\omega) \quad (10)$$

Definimos a Margem de ganho, G_M , como a mudança no valor do ganho a malha aberta no ponto com fase de 180° , expressa em decibéis (dB) necessária para tornar instável o sistema com malha fechada. Definimos Margem de fase, Φ_M como a mudança no valor da fase da malha aberta no ponto com ganho unitário necessária para tornar o sistema instável o sistema a malha fechada.

É muito importante para um projetista de controle ter na mente os conceitos mencionados acima para que possa entender como as mudanças na localização de pólos, LGR e a resposta em frequência influenciam na resposta temporal.

Com estes conceitos, podemos exercitar o projeto de sistemas de controle e sua análise, para aplicações modernas com o uso de controladores PID digitais.

As funções importantes dos controladores são a realização da supervisão, controle por métodos de compensação e os componentes analógicos são substituídos por cálculos do computador digital que imitam o componente físico, com a vantagens de redução de custo, flexibilidade para realizar mudanças de projeto e imunidade a ruído.

A figura 5 mostra um sistema de controle digital. (OPPENHEIM)

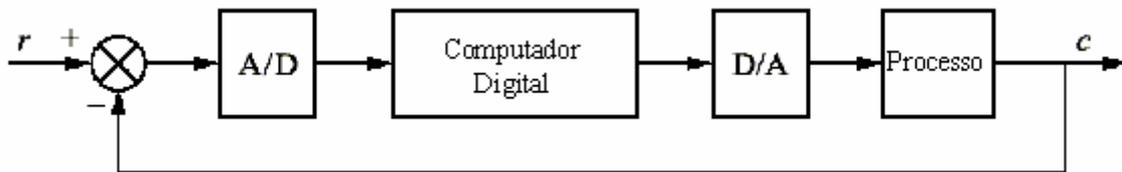


Figura 5 – Configuração típica de um sistema de controle digital (NISE)

As disciplinas de Controle I (7º semestre) e controle II (8º semestre), tratam destes conceitos mostrados anteriormente no curso de Engenharia Elétrica da UPM.

As práticas laboratoriais, em Controle Digital estão disponíveis seis conjuntos de sistemas de controle baseados em plataforma computacional da ECP Systems incluindo industrial, sistema retilíneo, sistema torcional, pêndulo invertido, levitador magnético e giroscópio (ECP, 1999).

Neste trabalho será mostrado aplicações de sistemas massa mola amortecedor e levitador magnético.

3. PRÁTICAS REAIS COM SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

O levitador magnético é composto por duas bobinas, uma inferior e outra superior que geram um campo magnético pela passagem de uma corrente. Essas bobinas interagem através do campo com um ou dois discos magnéticos que se deslocam em uma barra de vidro que serve como guia. Variando-se a magnitude da corrente na bobina inferior, pode-se controlar a posição do magneto inferior fazendo-o levitar através de uma força magnética repulsiva. Similarmente, o magneto superior é posicionado através de uma força magnética de atração, adotando-se um valor adequado de corrente na bobina superior. Com a proximidade dos discos surge também interação magnética (força de repulsão) entre os dois magnetos. Dois sensores ópticos baseados em sensores de laser são utilizados para medir a posição dos magnetos.

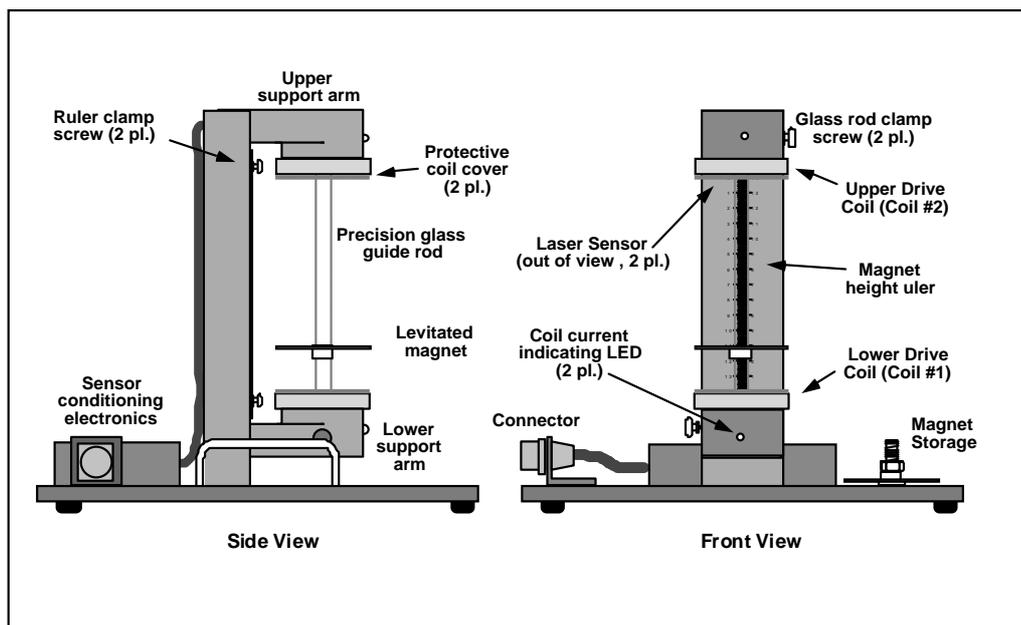


Figura 6 - Diagrama do levitador magnético (MANUAL ECP).



Figura 7 - Levitador magnético operando.

A resposta obtida no levitador magnético quando se aplica um degrau unitário é mostrada abaixo.

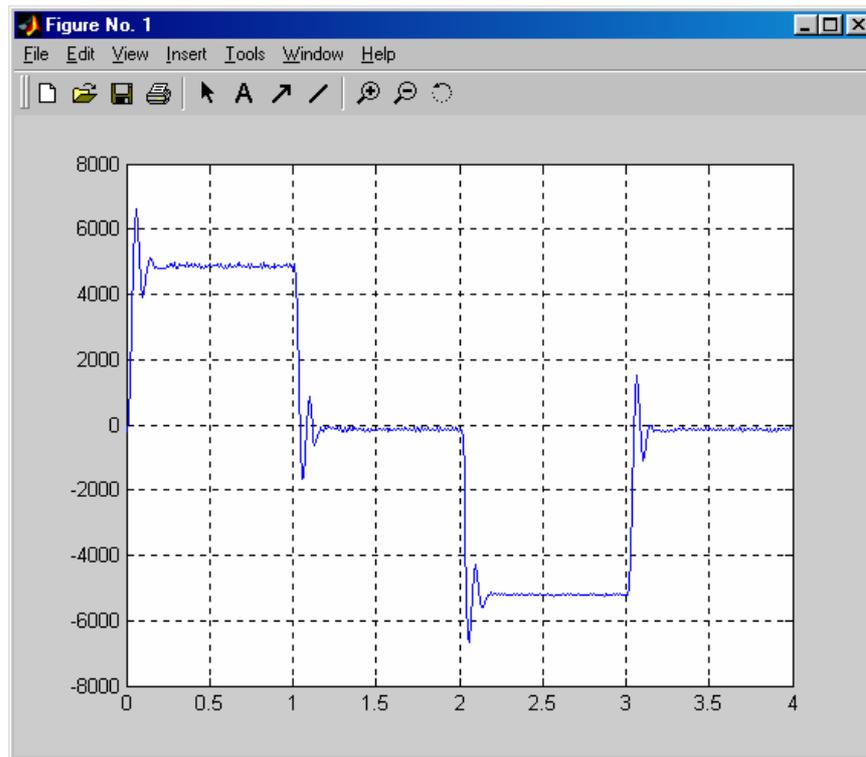


Figura 8 - Resposta temporal obtida no levitador magnético para entrada degrau

A partir da resposta temporal extraíndo daí valores de tempos e amplitudes que com o uso das equações (5), (6), (7), (8), (9) e (10) obtém-se a função de transferência do sistema.

$$T_s = \frac{4}{\delta\omega_n} \quad T_s = 0,062 \text{ s} \quad (11)$$

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\delta^2}} \quad T_p = 0,248 \text{ s} \quad (12)$$

Igualando as equações (11) e (12), temos:

$$\frac{4}{\delta \cdot 0,248} = \frac{\pi}{0,062 \cdot \sqrt{1-\delta^2}} \quad (13)$$

Resolvendo a equação 13 temos que:

$$\boxed{\delta = 0,3033} \quad (14)$$

Usando a equação (5), temos:

$$0,248 = \frac{4}{0,3033 \cdot \omega_n} \quad (15)$$

$$\omega_n = 53,176 \text{ rad/s}$$

(16)

Portanto temos:

$$f.t.M.F. = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{2827,68}{s^2 + 32,22s + 2827,68}$$

(16)

$$f.t.M.F. = \frac{G(s)}{1 + G(s).H(s)} = \frac{2827,68}{s^2 + 32,22s + 2827,68}$$

(17)

$$\frac{G(s)}{1 + G(s).1} = \frac{2827,68}{s^2 + 32,22s + 2827,68}$$

(18)

Isolando $G(s)$ na equação acima, temos:

$$f.t.M.A. = G(s) = \frac{2827,68}{s^2 + 32,22s}$$

(19)

É obtido assim a função de transferência do sistema em malha aberta ($f.t.M.A$) e a função de transferência do sistema em malha fechada ($f.t.M.F$).

4. APLICAÇÕES MODELADAS POR ESPAÇO DE ESTADO, COM EXEMPLO EM SISTEMAS MASSA MOLA AMORTECEDOR

Está sendo desenvolvido um experimento com massa-mola-amortecedor modelado usando o espaço de estados.

O modelo do sistema pode ser representado de várias formas equivalentes, como mostrados nas equações abaixo (Ogata, 2003)

$$M\ddot{x}(t) = -fv\dot{x}(t) - kx(t) + u(t)$$

(20)

$$M\dot{v}(t) = -fv(t) - k \int v(t) dt + u(t)$$

(21)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{M} & -\frac{fv}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} u(t)$$

(22)

Nas equações (20) e (21), o conhecimento do valor da respectiva variável dependente (x para (20) e v para (21)), num determinado instante, não é suficiente para determinar, só

com as informações daquele instante, os valores das demais grandezas. A representação por espaço de estados é mostrada na equação (22).

O modelo está sendo implementado usando ECP Systems sistema retilíneo, o qual é mostrado na figura 9 abaixo.



Figura 9 - Sistema Massa Mola e Amortecedor (MANUAL ECP).

O controlador implementado PID para o sistema massa mola amortecedor é mostrado na figura abaixo.

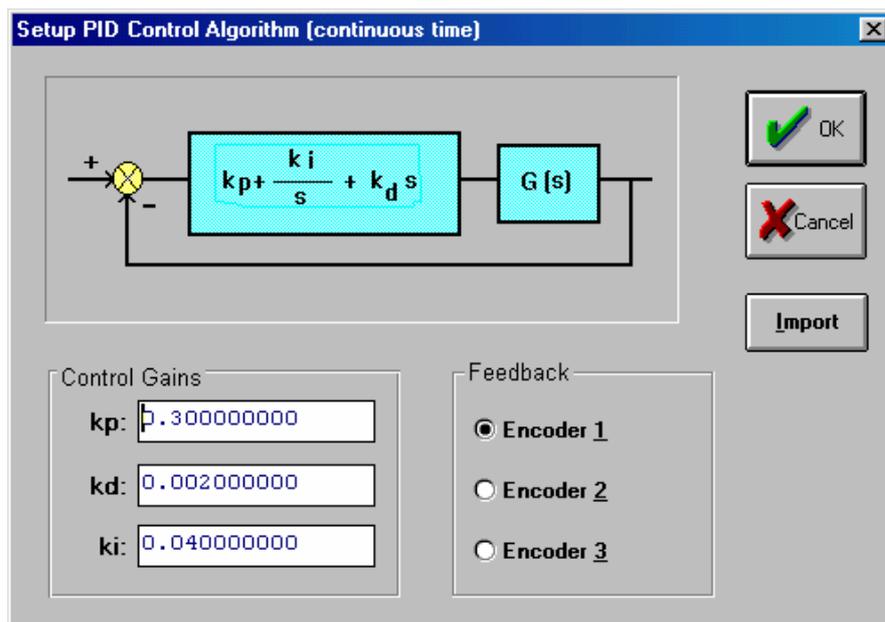


Figura 10 - PID para o sistema Massa Mola e Amortecedor (MANUAL ECP).

As respostas obtidas do sistema é mostrada na figura 11.

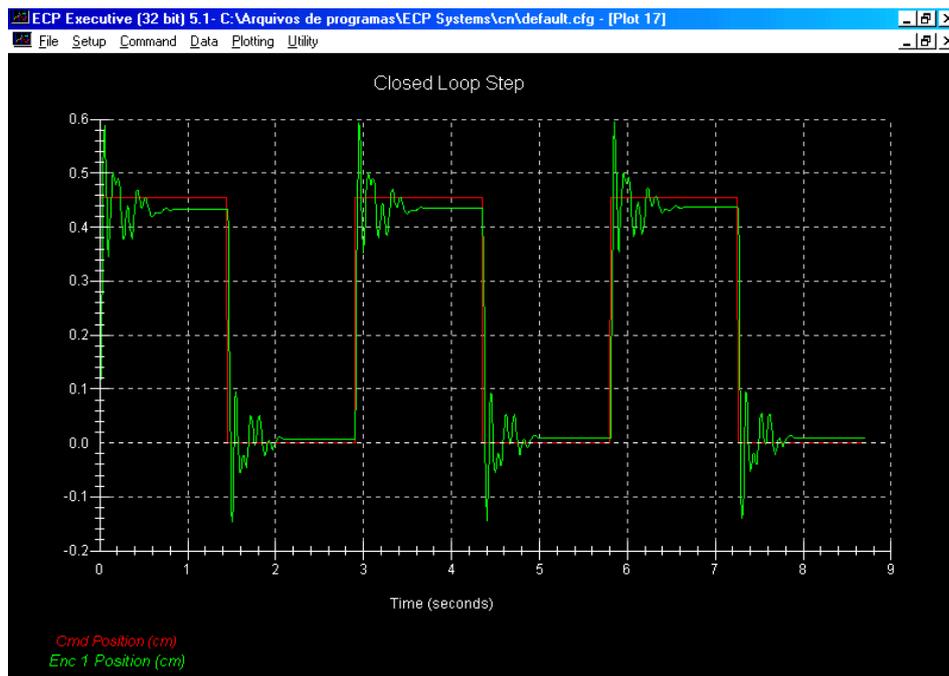


Figura 11 - Resposta do sistema Massa Mola e Amortecedor (MANUAL ECP).

5. CONCLUSÕES

O curso de controle apresentou bons resultados verificados pela análise das notas dos alunos e pelos relatórios dos experimentos feitos, onde vários alunos mostraram disposição para realizar as experiências e desenvolver seu próprio sistemas de controle.

Esta abordagem de ensino assegurou aos alunos um forte conceito da teoria verificado pelas notas e também de vivência prática verificada pelos desenvolvimentos práticos de sistemas de controle. Acreditamos que este bom desempenho seja devido ao fato do aluno apresentar interesse por sistemas de controle reais, com aplicações interessantes como é o caso do levitador magnético. Com esta metodologia adotada onde o aluno verifica de modo real o efeito do seu sistema de controle implementado e corrige os eventuais erros, acreditamos melhorar o perfil do futuro engenheiro, formando um profissional mais preparado para o mercado de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ECP EDUCATIONAL CONTROL PRODUCTS. **Manuals for Model 205/205a, 220, 730 and 750**, 1999.
- DORF, R.C. **Sistemas de Controle Modernos**. 8ª edição, LTC, 2001.
- KRAUS JR. W., FARINES J.M., BRUCIAPAGLIA A.H., J.E. N RICO, CURY J.E.R.; "An Experiment in the Use of a Virtual Laboratory in Control Theory Teaching"; Advances in Control Education Conference, pp. 50-55, Boston(MA)-USA, 24-25 June 1991.
- NISE, N. S. **Control Systems Engineering**. Reading: John Wiley & Sons, 2000.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª edição, Prentice-Hall do Brasil, 2003.

EDUCATION OF CONTROL SYSTEMS USING REAL APPLICATIONS IN ELECTRIC ENGINEERING

***Abstract:** Systems of control are one of discipline them more promising, important and relatively complex in the education of engineering, being constantly applied in mechanical, electronic equipment, industrial processes and other areas, making that the engineer needs a solid theoretical knowledge and practical experience. This work shows the development that is being made for the education of systems of control supported for real applications in practical laboratories, to allow to a consistent learning and motivate-pain to the pupil. We will show real applications that use a great part of found theoretical models in the control literature, as the system mass spring and shock absorber and also systems of advanced control with applications in a magnetic levitated. These applications can help to fix the theoretical concepts of control systems, as for example the use of control techniques as processing of signals and use of digital controllers PID for attainment of one determined desired reply of system. The control systems are shaped in the domain of the frequency and the domain of the time with the use of space of states.*

***Key-words:** Education of Systems of Control, Practical Laboratory in Systems of Digital Control, PID, Space of State, Magnetic Levitated.*