

PROJETO DE UM CONTROLADOR DIGITAL PARA UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO SUBMICROMÉTRICO

Walter L. Weingaertner
e-mail: wlw@emc.ufsc.br

Ricardo Compiani Tavares
e-mail: rct@lmp.ufsc.br

Czeslau Barczak
email: czeslau@mbox1.ufsc.br

Carlos Alberto Martin
e-mail: martin@emc.ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP
Caixa Postal - 476 - EMC
Campus Universitário - Trindade
88.040-970 - Florianópolis - SC
Fone: (048) 331 9395 ou 234 5277
Fax: (048) 234 1519

Resumo. Neste artigo é proposto o projeto de um controlador digital de alta resposta dinâmica, projetado para o controle de posição de um sistema de posicionamento submicrométrico. Este sistema posicionador simulado é constituído por uma mesa guiada por mancais de molas (flexural spring guides), acionada por um atuador piezelétrico (piezoelectric actuator) e com extensômetros dispostos em ponte para o sensoreamento de sua posição linear. A discretização do sistema de posicionamento submicrométrico, compreendendo o atuador piezelétrico e seus subsistemas mecânicos e eletrônicos, foi executada com sucesso. A resposta dinâmica da planta e do grampeador de ordem zero (zero-order hold) foi muito boa, com uma sobrepassagem (overshoot) menor em aproximadamente 20% em comparação com a resposta dinâmica do controlador e da planta contínuos no tempo. O projeto do controlador PD (Proporcional-Derivativo) discreto resultou em um sistema com um desempenho dinâmico excelente, com um tempo de resposta e um tempo de estabilização bem menores do que os resultados obtidos pela discretização do sistema contínuo.

Palavras-chave: Controlador digital, Posicionamento submicrométrico, Discretização, Atuador piezelétrico, Controlador PD.

1. INTRODUÇÃO

Propõe-se neste artigo apresentar o projeto de um controlador digital de um sistema de posicionamento submicrométrico para um eixo de translação, constituído por um atuador piezelétrico e guias de molas acionadas diretamente.

A metodologia de desenvolvimento do processo de projeto do controlador baseou-se em dois métodos:

projeto do controlador digital do sistema de posicionamento submicrométrico através da discretização do sistema contínuo no tempo;

projeto do controlador digital do sistema de posicionamento por meio de métodos discretos no tempo (controlador PID discreto no plano z).

O atuador (motor) piezelétrico PZT empregado no acionamento do posicionador submicrométrico é o modelo P-172, fabricado pela Physik Instrumente. O P-172 incorpora uma ponte formada por quatro extensômetros para o controle em malha fechada de sua expansão. Esta ponte é empregada também para sensorar a posição submicrométrica da mesa, através da medição indireta de sua posição. A Tabela 1 fornece os principais dados técnicos do atuador piezelétrico P-172.

Tabela 1- Dados Técnicos do P-172

<i>Características técnicas</i>	<i>P-172</i>
Tensão nominal	-1000 V
Tensão operacional máxima	-1500 V
Polaridade	negativa
Força de expansão máxima	1000 N
Força de contração máxima	100 N
Expansão nominal (à -1000 V)	20 μm
Expansão máxima (à -1500 V)	30 μm
Rigidez	35 N/ μm
Capacitância elétrica	38 nF
Frequência de ressonância	9 kHz
Coefficiente de dilatação térmica	0,4 $\mu\text{m}/\text{K}$
Peso	0,08 N

O posicionador possui as seguintes características, as quais devem ser satisfeitas pelo controlador a ser projetado:

- precisão de posicionamento de ± 50 nm;
- resolução de 0,1 μm ;
- tempo de estabilização (*settling time*) menor do que 10 ms;
- tempo de resposta (*rise time*) menor do que 0,5 ms.

2. PROJETO DO CONTROLADOR CONTÍNUO

O modelamento do sistema de posicionamento submicrométrico constituído pelo atuador piezelétrico e sua eletrônica, juntamente com a mecânica do posicionador resultou nas funções de transferência do sistema, mostradas a seguir (Ogata, 1998, Tavares, 1995 e Troncoso *et al*, 1994).

A função de transferência do atuador piezelétrico com a sua eletrônica é dada por:

$$G(s)_1 = \frac{K \cdot \omega_{n1}^2}{s^2 + 2\xi_1 s + \omega_{n1}^2} \quad (1).$$

Das referências (Tavares, 1995; Troncoso *et al*, 1994 e Lutrell *et al*, 1987) têm-se que a frequência angular natural ω_{n1} é de $5,03 \times 10^4$ rad/s, o coeficiente de amortecimento ξ_1 corresponde a 0,7 e o ganho K vale 1×10^3 $\mu\text{m/V}$. Substituindo estes valores na equação (1), resulta:

$$G(s)_1 = \frac{2,53 \times 10^6}{s^2 + 7,04 \times 10^4 s + 25 \times 10^9} \quad (2).$$

A função de transferência da mecânica do posicionador é definida pela equação dada a seguir.

$$G(s)_2 = \frac{\omega_{n2}^2}{s^2 + 2\xi_2 s + \omega_{n2}^2} \quad (3).$$

Da referência (Tavares, 1995), obtêm-se os seguintes parâmetros:

$$\omega_{n2} = 2 \times 10^4 \text{ rad/s};$$

$$\xi_2 = 0,08.$$

Substituindo-se os valores dados acima na equação (3), resulta:

$$G(s)_2 = \frac{4 \times 10^4}{s^2 + 3,2 \times 10^3 s + 4 \times 10^8} \quad (4).$$

A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos em malha fechada do sistema de posicionamento submicrométrico.

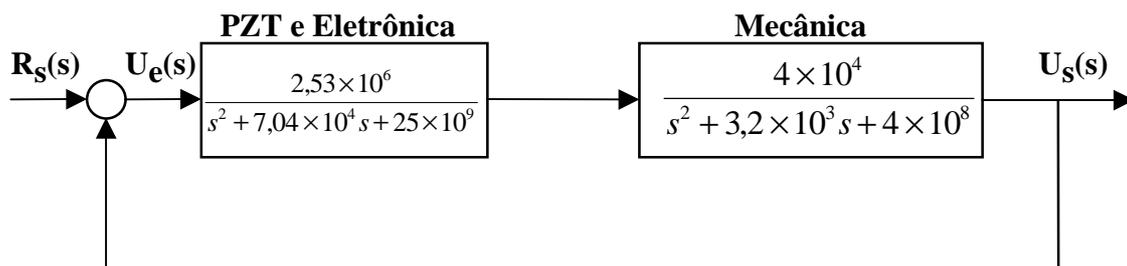


Fig. 1- Diagrama de Blocos em Malha Fechada do Posicionador

Fazendo-se $G(s) = G(s)_1 \cdot G(s)_2$, vem:

$$G(s) = \frac{1,01 \times 10^{15}}{s^4 + 7,36 \times 10^4 s^3 + 3,16 \times 10^9 s^2 + 3,64 \times 10^{13} s + 1,01 \times 10^{18}} \quad (5).$$

Com a função de transferência do sistema de posicionamento submicrométrico definida pela equação (5) foram realizadas simulações para obtenção da resposta do sistema contínuo

ao degrau unitário, bem como geradas respostas em frequência do sistema (Diagramas de Bode). A Figura 2 apresenta a resposta do sistema ao degrau, enquanto que a Figura 3 mostra a resposta do sistema em frequência.

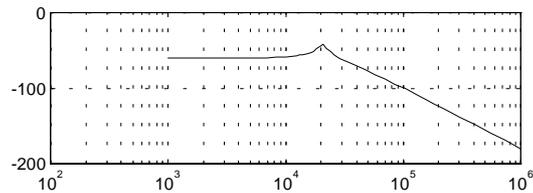
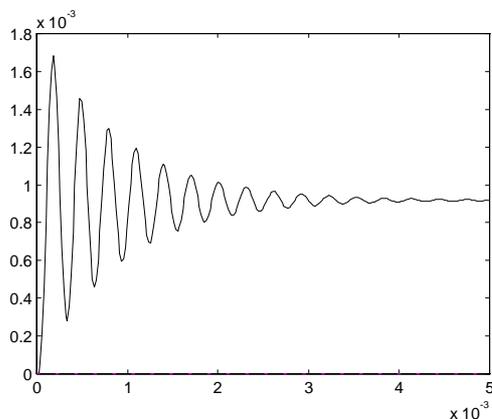


Fig. 2-Resposta do Sistema ao Degrau Unitário Fig. 3- Resposta em Frequência do Sistema

Conforme os resultados das simulações apresentadas, o sistema de posicionamento submicrométrico apresentou um excelente tempo de resposta, em aproximadamente 0,25 ms, bem menor do que o valor especificado de 0,50 ms. Além disto, o sistema se estabilizou em aproximadamente 5 ms, sendo este um tempo de estabilização muito menor do que o especificado de 10 ms. Verifica-se ainda que a margem de ganho do sistema está em torno de 60 dB, comprovando a excelente dinâmica do posicionador submicrométrico. Apesar do sistema de posicionamento submicrométrico apresentar uma sobrepassagem (*overshoot*) de aproximadamente 70%, ele se estabiliza rapidamente. Embasado por este fato e ainda de acordo com Levine, 1996 e Franklin *et al*, 1994, os quais definem o tempo de estabilização ou de assentamento como sendo o tempo para o sistema tornar-se estável, com um erro de $\pm 1\%$ em sua resposta, quando ele é excitado por um degrau unitário de referência, conclui-se que como este tempo está em torno de 5 ms, o qual é muito menor do que os 10 ms especificados no projeto, não se faz necessário o emprego de um compensador para melhorar a dinâmica do sistema, comprovando que o mesmo possui um excelente comportamento dinâmico.

3. DISCRETIZAÇÃO DA PLANTA CONTÍNUA

Neste item será apresentada a função de transferência discreta da planta referente ao posicionador submicrométrico.

Inicialmente foi feita uma seleção seguida da análise da influência do grampeador de ordem zero (ZOH- *Zero Order Hold*) contínuo no tempo $G_{oz}(s)$, servindo-se para tanto dos diagramas de Bode. A seguir, foi realizada a discretização da função de transferência contínua $G(s)$ obtida no item anterior segundo as referências Franklin *et al*, 1998, Bishop, 1997 e Ogata, 1995, gerando-se os diagramas discretos de resposta ao degrau unitário e os de resposta em frequência.

3.1. Seleção e análise da influência do grampeador de ordem zero $G_{oz}(s)$

Através de uma aproximação de $G_{oz}(s)$ dada pela equação (6) e com um tempo de amostragem arbitrado em $T = 0,0001 \text{ s} = 0,1 \text{ ms}$, levando-se em conta a dinâmica do sistema, obtém-se (Barczak, 1995):

$$G_{oz}(s) = \frac{2/T}{s + 2/T} \quad (6),$$

$$G_{oz}(s) = \frac{\frac{2}{0,0001}}{s + \frac{2}{0,0001}} \Rightarrow G_{oz}(s) = \frac{20000}{s + 20000} \quad (7).$$

O posicionador submicrométrico com o grampeador de ordem zero $G_{OZ}(s)$ apresenta a configuração determinada pela Figura 4.

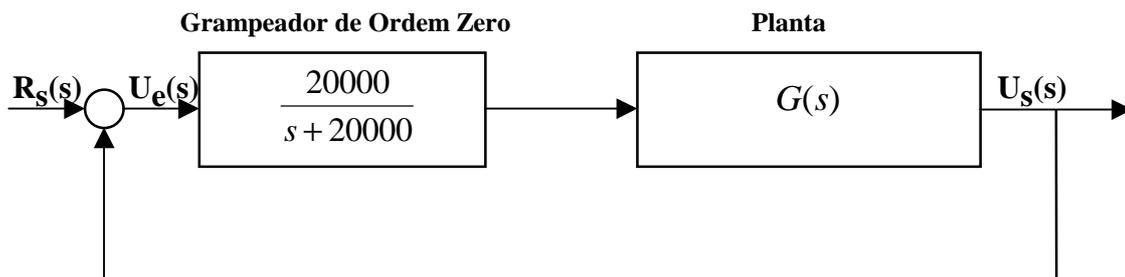


Fig. 4- Diagrama de Blocos do Sistema Contínuo com $G_{OZ}(s)$

As Figuras 5 e 6 mostram o resultado da simulação do sistema, apresentando o lugar das raízes e os diagramas de Bode. Da Figura 5 constata-se que o pólo adicional devido ao grampeador de ordem zero não afeta o comportamento dinâmico do sistema, pois este pólo tende negativamente ao infinito. A margem de ganho do sistema continua sendo de 60dB (Figura 6).

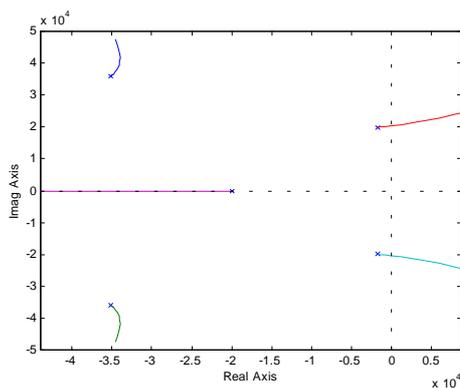


Fig. 5- Lugar das Raízes para o Sistema com $G_{OZ}(s)$

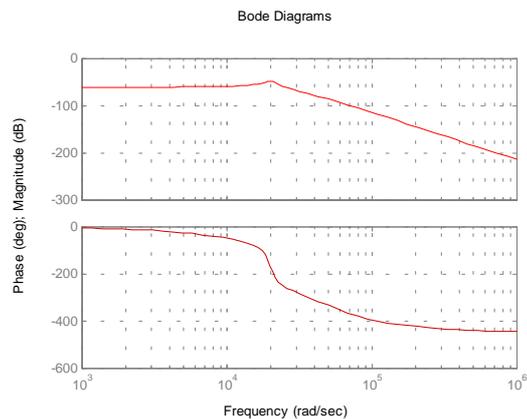


Fig. 6- Diagramas de Bode para o Sistema com $G_{OZ}(s)$

Da Figura 7, resposta do posicionador submicrométrico ao degrau, constata-se que a sobrepassagem do sistema com $G_{OZ}(s)$ é aproximadamente 12% menor do que a resposta do sistema contínuo, visto na Figura 2. O tempo de resposta com o grampeador $G_{OZ}(s)$ continua sendo de 3 ms.

A inclusão do grampeador de ordem zero $G_{OZ}(s)$ no sistema contínuo por si só melhorou o desempenho dinâmico do posicionador submicrométrico.

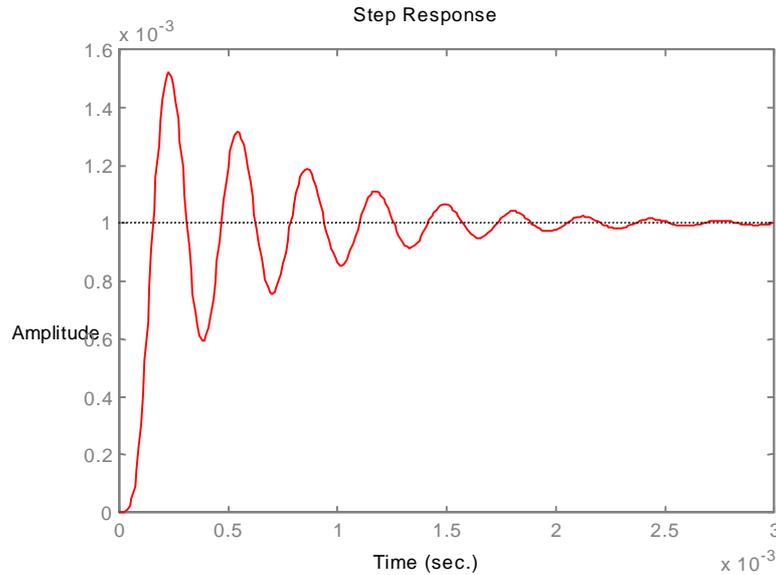


Fig. 7- Resposta ao Degrau Unitário do Posicionador Submicrométrico com $G_{OZ}(s)$

3.2. Discretização da planta

Empregando-se a aproximação bilinear de Tustin, obtém-se uma expressão da função de transferência discretizada da planta $G'(z)$, a partir do sistema contínuo $G(s)$.

Como já foi detalhado no item 2, a função de transferência contínua do sistema posicionador $G(s)$ vale:

$$G(s) = \frac{1,01 \times 10^{15}}{s^4 + 7,36 \times 10^4 s^3 + 3,16 \times 10^9 s^2 + 3,64 \times 10^{13} s + 1,01 \times 10^{18}} \cdot$$

Desta equação, obtém-se a função de transferência discreta de $G(s)$, ou seja, $G'(z)$.

$$G'(z) = \frac{1 \times 10^{-3} (0,07 + 0,27z^{-1} + 0,41z^{-2} + 0,27z^{-3} + 0,07z^{-4})}{1 - 0,86z^{-1} + 0,76z^{-2} + 0,02z^{-3} + 0,17z^{-4}} \quad (8).$$

3.3. Discretização do grampeador de ordem zero

A função de transferência discreta de $G_{OZ}(s)$ pode ser obtida da mesma forma vista anteriormente, gerada pela transformação bilinear de Tustin, resultando numa função discreta no tempo $G_{OZ}(z)$. Portanto, tem-se:

$$G_{OZ}(s) = \frac{0,33 + 0,33z^{-1}}{1 - 0,33z^{-1}} \quad (9).$$

3.4. Obtenção da função de transferência discreta da planta $G(z)$ com o grampeador de ordem zero $G_{oz}(s)$

Com as funções de transferência discretas do grampeador de ordem zero e da planta, $G_{oz}(z)$ e $G'(z)$ respectivamente, obtidas nos itens 3.2 e 3.3, é possível determinar-se a função de transferência discreta do sistema de posicionamento $G(z)$. Da mesma forma que no sistema contínuo, verifica-se que $G(z)$ é o produto entre $G_{oz}(z)$ e $G'(z)$, ou seja, $G(z) = G_{oz}(z) \cdot G'(z)$ (10), conforme a Figura 8.

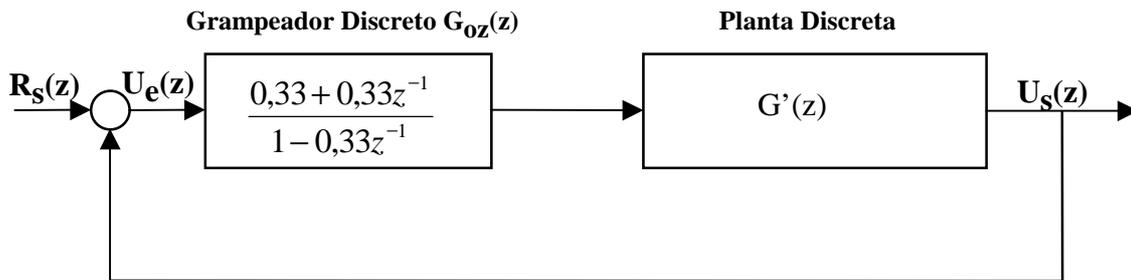


Fig. 8- Diagrama de Blocos para o Sistema Discreto

Substituindo as funções de transferência correspondentes a $G_{oz}(z)$ e $G'(z)$ na equação (10), resulta:

$$G(z) = \frac{0,33 + 0,33z^{-1}}{1 - 0,33z^{-1}} \cdot \frac{1 \times 10^{-3} (0,07 + 0,27z^{-1} + 0,41z^{-2} + 0,27z^{-3} + 0,07z^{-4})}{1 - 0,86z^{-1} + 0,76z^{-2} + 0,02z^{-3} + 0,17z^{-4}}$$

Desenvolvendo a expressão acima, obtém-se (11):

$$G(z) = \frac{2,31 \times 10^{-5} + 1,12 \times 10^{-4} z^{-1} + 2,21 \times 10^{-4} z^{-2} + 2,21 \times 10^{-4} z^{-3} + 1,12 \times 10^{-4} z^{-4} + 2,31 \times 10^{-5} z^{-5}}{1 - 1,19z^{-1} + 1,04z^{-2} - 0,23z^{-3} + 0,16z^{-4} - 0,06z^{-5}}$$

Das simulações de $G(z)$ foram obtidas os diagramas da resposta ao degrau e resposta em frequência do sistema discreto do posicionador submicrométrico, de acordo com as Figuras 9 e 10.

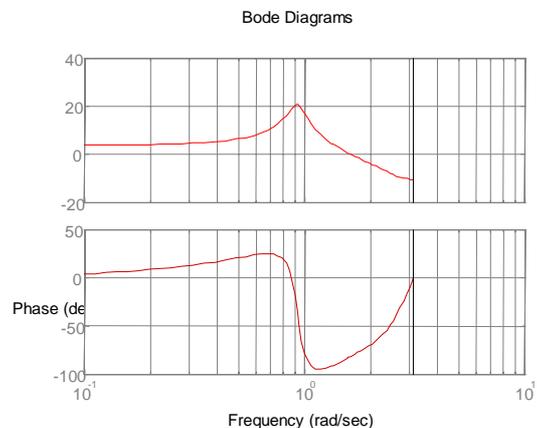
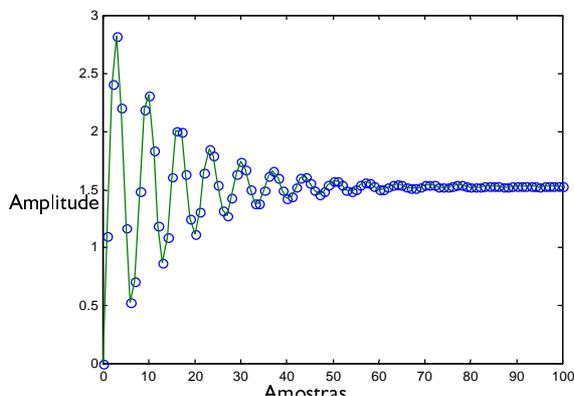


Fig.9-Resposta do Sistema Discreto ao Degrau Fig.10- Resposta em Frequência do Sistema

Da Figura 9, resposta do sistema discreto ao degrau unitário, constata-se que o sistema discretizado apresentou uma sobrepassagem menor em 20% do que no caso em que o sistema é contínuo (Figura 2). Além disto, todas as demais especificações de projeto dadas anteriormente são atendidas quando o sistema discreto se estabiliza em regime permanente, em aproximadamente na amostra 70. Finalmente, analisando-se a Figura 10, resposta em frequência do sistema discreto, constata-se que a margem de ganho é bastante alta, da ordem de 20 dB.

4. PROJETO DO CONTROLADOR PID DISCRETO

A partir da função de transferência discreta do sistema $G(z)$ dada pela equação (11),

$$G(z) = \frac{2,31 \times 10^{-5} + 1,12 \times 10^{-4} z^{-1} + 2,21 \times 10^{-4} z^{-2} + 2,21 \times 10^{-4} z^{-3} + 1,12 \times 10^{-4} z^{-4} + 2,31 \times 10^{-5} z^{-5}}{1 - 1,19z^{-1} + 1,04z^{-2} - 0,23z^{-3} + 0,16z^{-4} - 0,06z^{-5}}$$

procurou-se projetar um controlador discreto, com o intuito de melhorar a dinâmica do sistema de posicionamento submicrométrico. A Figura 11 mostra esquematicamente um diagrama do sistema com o controlador digital proposto.

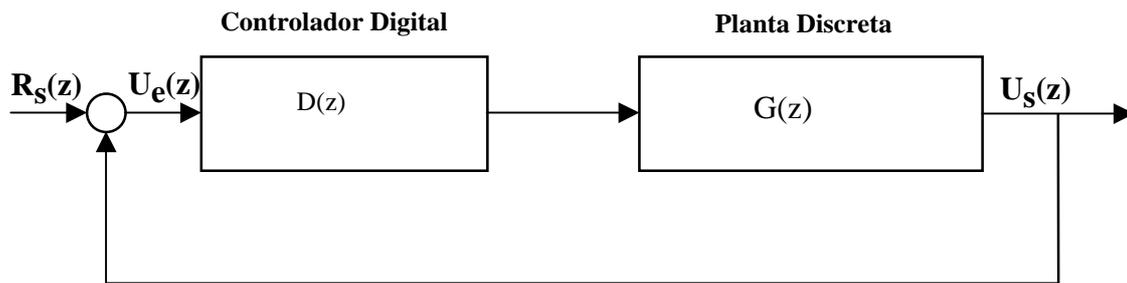


Fig. 11- Diagrama de Blocos do Sistema Discreto de Posicionamento com Controlador Digital

4.1. Controlador proporcional-derivativo (PD)

Sabendo-se que o controlador proporcional-derivativo é descrito por $D(z) = K_p + K_D(1 - z^{-1})$, onde K_p é o ganho proporcional e K_D é o ganho derivativo, resulta:

$$D(z) = \frac{(K_p + K_D)z - K_D}{z} \quad (12).$$

Reescrevendo (12), tem-se:

$$D(z) = \frac{k(z - a)}{z} \quad (13), \text{ com } 0 \leq a \leq 1.$$

Comparando-se as equações (12) e (13) verifica-se que:

$$k = K_p + K_D \quad \text{e} \quad a = \frac{K_D}{K_p + K_D}.$$

Desenvolvendo a equação (13) em termos de potências negativas de z , vem:

$$D(z) = k(1 - az^{-1}) \quad (14).$$

A Figura 12 apresenta a resposta ao degrau unitário do sistema com um controlador proporcional-derivativo (PD) discreto, com $K_P = 0,5$ e $K_D = 0,5$ resultando em $a = 1$. Através deste gráfico constata-se que a sobrepassagem está em torno de 1000 vezes menor do que ocorre no sistema contínuo, conforme a Figura 2, com o controlador digital PD melhorando consideravelmente a dinâmica do sistema.

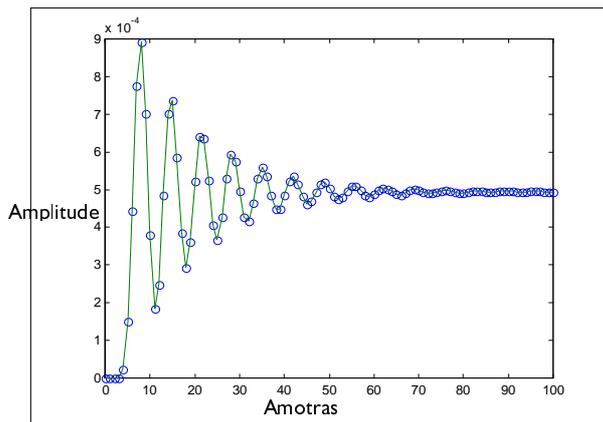


Fig.12- Resposta do Sistema e Controlador PD Discretos ao Degrau Unitário

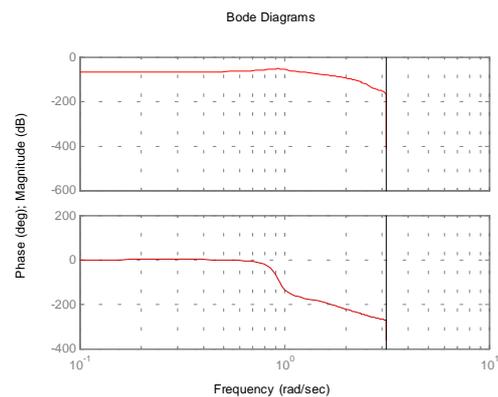


Fig. 13- Resposta em Frequência do Sistema e Controlador PD Discretos

A Figura 13 apresenta os diagramas de Bode da resposta em frequência do sistema de posicionamento submicrométrico com o controlador digital PD. Nesta figura constata-se que a margem de ganho é excelente, sendo de aproximadamente 80 dB.

5. CONCLUSÕES

A discretização do sistema de posicionamento submicrométrico formado pelo PZT e sua eletrônica mais o subsistema mecânico contínuos no tempo, foi realizada com sucesso. De fato, a resposta da planta $G(z)$ com o grampeador de ordem zero $G_{oz}(z)$ apresentou uma boa dinâmica, com uma sobrepassagem menor do que 20% se comparado em relação à resposta do sistema contínuo.

O projeto do controlador (compensador) proporcional-derivativo (PD) discreto resultou num sistema com características dinâmicas muito melhores, mesmo se comparado com o sistema discretizado com $G_{oz}(z)$ sem compensador. Apresentou uma sobrepassagem 1000 vezes menor e com tempos de resposta e de estabilização bem pequenos, resultando em consequência numa maior precisão de posicionamento do sistema como um todo. Além disto, a margem de ganho do sistema com controlador digital (80 dB) foi superior a do sistema contínuo (60dB), melhorando em consequência consideravelmente o seu desempenho dinâmico. Adotou-se o controlador PD por ser de concepção mais simples e, além disto, por ter satisfeito os requisitos de projeto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro do CNPq (bolsa de doutorado) para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bishop, R. H. Modern Control Systems. Analysis & Design: Using MATLAB and SIMULYNK. Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 1997.
- Barczak, C. Controle Digital de Sistemas Dinâmicos. Edgar Blücher, São Paulo, SP, 1995.
- Franklin, G. F., Powell, J. D., Emami-Naeini, A. Feedback Control of Dynamic Systems, 3rd. Ed. Addison-Wesley, Reading, MA, 1994.
- Franklin, G. F., Powell, J. D., Workman, M.L. Digital Control of Dynamic Systems, 3rd. Ed. Addison-Wesley, Reading, MA, 1998.
- Levine, W. S. The Control Handbook. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996.
- Luttrell, D. E., Down, T.A. Development of a High Speed System to Control Dynamics Behaviour of Mechanical Structures. Precision Engineering, Vol. 9, Nr. 4, Butterworth Scientific Ltd., Surrey, UK, october 1987.
- Ogata, K. Discrete-Time Control Systems, 2nd Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- Ogata, K. System Dynamics, 3rd. Ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1998.
- Tavares, R. C. Projeto de um Posicionador Submicrométrico para Litografia Óptica. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, 1995.
- Troncoso, L. S., Albertazzi, A, Barczak, C. Sistema Ativo de Estabilização Aplicado à Holografia Eletrônica. Laboratório de Metrologia e Automatização. Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. Anales VI Congresso Nacional de Ingenieria Mecânica, Santiago, Chile, 1994.

DESIGN OF A DIGITAL CONTROLLER FOR A SUBMICROMETRIC POSITIONING SYSTEM

Abstract. *This paper concerns a digital controller design and simulation for position control of a sub-micrometric system of high dynamic response. The system is assembled on a table with flexural spring guides driven by a piezoelectric actuator, and with extensometers for linear position measurement. The discretization of the sub-micrometric positioning system through the piezoelectric actuator, and its mechanical sub-system was successfully performed. The dynamic response of the plant with zero-order hold was very good, with an overshoot of less than 20%, same as response of the continuous system. The design of a PD discret controller resulted in a even better dynamic performance, with rise and settling times less than those obtained with the discretization of the continuous system.*

Key words: *Digital controller, Submicrometric positioning, Discretization, Piezoelectric actuator, PD controller.*