

AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO SUBMICROMÉTRICO

Gilva Altair Rossi de Jesus

Carlos Alberto Martin

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, 31270-901, Belo Horizonte-MG, Brasil. E-mail : gilva@vesper.demec.ufmg.br

Resumo

Este artigo apresenta a automação e a técnica de controle de posição empregada em um sistema de posicionamento que utiliza um módulo CNC (comando numérico computadorizado) de arquitetura semi-aberta. É empregada a estratégia de controle PI-D+*feedforward* de velocidade e aceleração no controle da posição e a técnica de posicionamento de pólos é empregada na sintonia do controlador de tal modo a se obter um erro de posicionamento na ordem submicrométrica. A automação de importantes eventos na planta é realizada de forma que se tenha uma operação segura do sistema de posicionamento, o qual, futuramente, irá compor um torno de ultra-precisão. Ensaios de seguimento de trajetória realizados no sistema de posicionamento são apresentados

Palavras-chave: Sistema de controle, controlador PID, controlador *feedforward*, posicionamento de pólos, posicionamento de precisão.

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de componentes com qualidade superficial nanométrica e incerteza dimensional submicrométrica vem impulsionando pesquisas na área de desenvolvimento de máquinas-ferramentas de ultra-precisão. Com o emprego da tecnologia de ultra-precisão obtém-se componentes tais como cilindros para fotocopiadoras, lentes especiais para câmaras fotográficas, espelhos planos utilizados em sistemas de medição laser, etc., os quais devem possuir incerteza dimensional entre 0,2 μm até 10 nm e rugosidade menor ou igual a 25 nm (Schroeter, 1997). A usinagem de ultra-precisão, capaz de produzir componentes com tais características, emprega ferramentas de diamante monocristalino de elevada precisão em máquinas-ferramenta especialmente projetadas para esta função e sob condições controladas de temperatura, umidade e meio ambiente.

Uma máquina-ferramenta de ultra-precisão requer um sistema de posicionamento com uma estrutura eletro-mecânica capaz de proporcionar erro de posicionamento (posição desejada menos posição real - quando o posicionar está parado) na ordem submicrométrica e erro de seguimento (posição desejada menos posição real - quando o posicionador está em

movimento) também submicrométrico. Na seção 2 deste artigo é apresentada a estrutura eletro-mecânica do sistema de posicionamento que, futuramente, irá compor um torno de ultra-precisão. Na seção 3 são apresentados o módulo de controle CNC, a implementação dos itens de segurança e o sistema de controle de posição. A técnica de posicionamento de pólos empregado em sintonia do controlador é mostrada na seção 4 e por fim, alguns ensaios são apresentados.

2. O SISTEMA DE POSICIONAMENTO ZX

O sistema de posicionamento é composto por dois eixos com estrutura eletro-mecânicas diferentes. No eixo Z do posicionador, mostrado na figura 1(a), são utilizadas duas guias cilíndricas aerostáticas e um servo-motor translativo CC sem escovas (De Jesus, 1999). Com isso, obtém-se um eixo cujo movimento será sem contato mecânico entre parte móvel (carro) e fixa, e conseqüentemente, com atrito desprezível. Além disso, dispensa o uso de conversores de movimento rotacional para translacional e de acoplamentos, de modo que o eixo fica livre de problemas como folgas e elasticidade e com isso a rigidez entre motor e eixo é maior, o que permite obter respostas mais rápidas e melhor precisão. Como sistema de medição utilizou-se uma escala opto-eletrônica com resolução de 50 nm. Quando energizado, o motor gera uma força que irá fazer com que o carro se deslize sobre as guias cilíndricas aerostáticas. A escala opto-eletrônica, presa ao carro, irá realimentar o valor medido de posição para o controlador de posição.

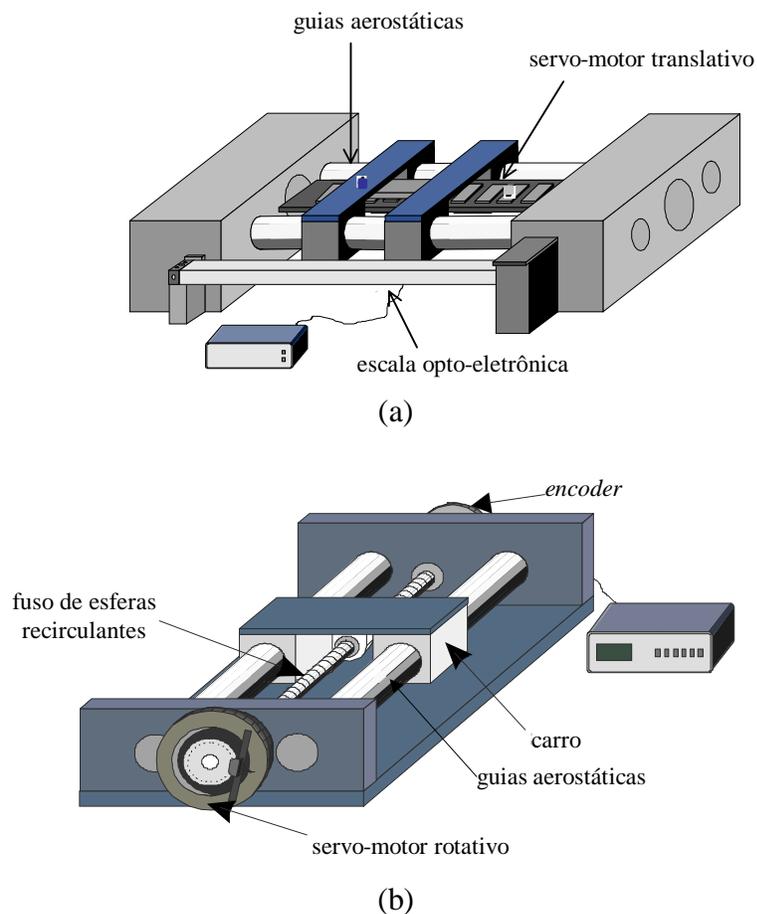


Figura 1 : (a) Eixo Z e (b) Eixo X

No eixo X, mostrado na figura 1(b), também foram utilizadas as guias aerostáticas, no entanto, optou-se por um servo-motor sem escovas CC, rotativo e sem carcaça, montado diretamente no fuso de esferas recirculantes de precisão. O servo-motor aciona o fuso, que através da castanha, transmite o movimento translativo a um carro sustentado por um par de guias aerostáticas. É utilizado um *encoder* que provê uma resolução linear de 0,77 nm. A figura 2 apresenta o esquema dos dois eixos sobrepostos. A estrutura eletro-mecânica do eixo Z permite avaliar a eficiência de servo-motores translativos neste tipo de aplicação e comparar com uma estrutura mais conhecida, ou seja, eixos que empregam servo-motores rotativos juntamente com fusos de esferas recirculantes (Slocum, 1992).

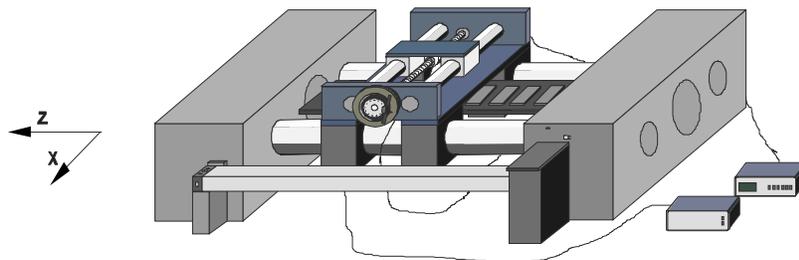


Figura 2 : Sistema de Posicionamento - Eixo Z e X

Para monitorar o sistema de posicionamento e controlar a posição de cada um dos eixos é utilizado um módulo de controle CNC, o qual possui o seu próprio processador aritmético (DSP – *Digital Signal Processor*) e banco de memórias.

3. O MÓDULO CNC

O módulo CNC tem como tarefas principais : (1) converter as informações de geometria espacial (comandos de entrada) em comandos para os dispositivos de acionamento (comandos de saída); (2) controlar a posição e velocidade dos eixos; (3) monitorar variáveis medidas na máquina; (4) e gerar perfis de trajetórias com diferentes níveis de complexidade (interpolação linear, circular, cúbica e spline).

A figura 3 mostra o fluxo principal de sinais entre o módulo CNC e a planta, e ilustra suas principais funções. O programa-peça, desenvolvido pelo usuário de acordo com a trajetória desejada, ao ser executado, passa ao algoritmo de controle o valor da referência de posição desejada. O algoritmo de controle simultaneamente recebe o valor da posição medida. Baseado na diferença entre estes dois valores (erro de posição), o algoritmo de controle irá calcular o valor do sinal de comando para o respectivo acionamento. Simultaneamente, o módulo CNC monitora a pressão das guias aerostáticas, limites de curso, emergência e falha do servo-conversor e poderá desabilitar o acionamento do eixo Z ou X se houver necessidade.

É importante lembrar que os comandos de posição somente serão executados com exatidão se o sistema de controle do eixo envolvido estiver corretamente ajustado (ou seja, de forma a minimizar o erro de posicionamento), pois é função do algoritmo de controle de posição fazer com que a posição medida seja igual à posição de referência. No item 4 será mostrado uma técnica de ajuste do sistema de controle.

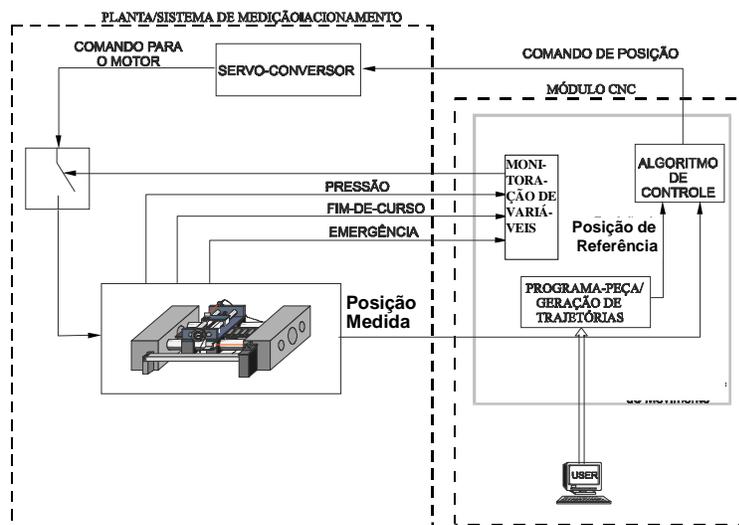


Figura 3 : Fluxo de Sinais entre Módulo CNC e Posicionador

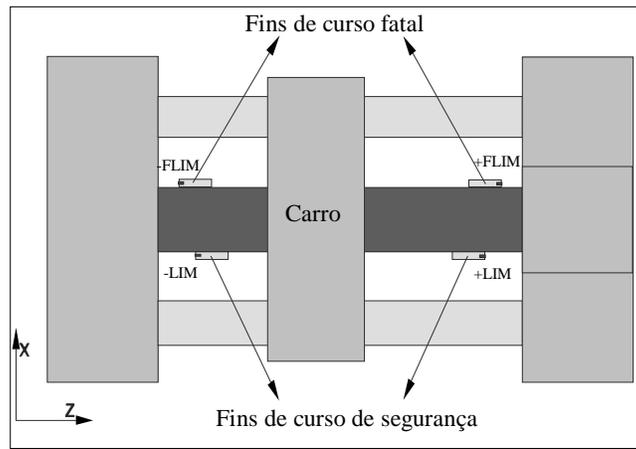
3.1 - Monitoração de Variáveis

Antes de se colocar um eixo em operação é necessário implementar alguns itens de segurança a fim de proteger os elementos que compõem o sistema de posicionamento e garantir o seu funcionamento adequado. Os programas de monitoração supervisionam sinais provenientes do sistema de posicionamento e executam medidas de segurança sempre que necessário. A seguir é apresentada a implementação da monitoração dos fins-de-curso do eixo Z.

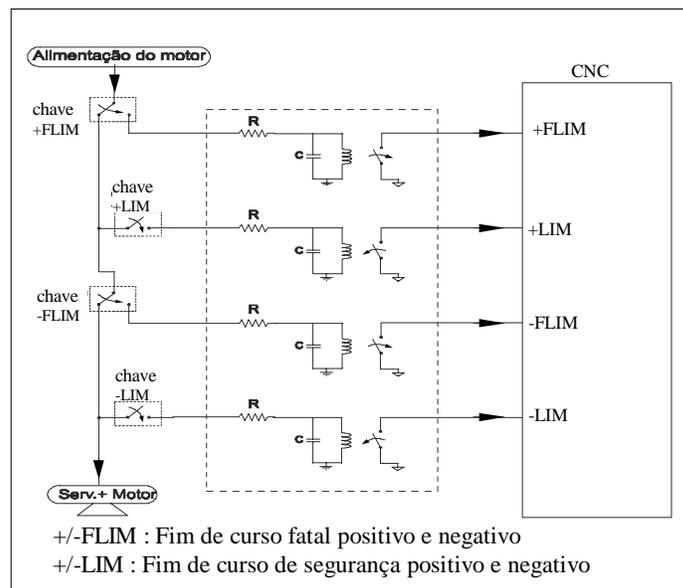
Em cada eixo foram instalados quatro interruptores de movimento, dois em cada extremidade do eixo, que irão atuar como fins-de-curso fatal e de segurança. A figura 4(a) mostra a disposição de tais interruptores no eixo Z, e um esquema semelhante à este é implementado no eixo X. Os sinais elétricos provenientes dos interruptores são conectados ao módulo CNC, através de um circuito elétrico envolvendo relés (figura 4(b)). No CNC, um programa especialmente desenvolvido monitora estes sinais.

Durante a movimentação, assim que o carro do posicionador atingir uns dos fins de curso de segurança, positivo ou negativo, o CNC irá interromper o movimento, mantendo o carro do posicionador fixo naquela posição. O operador é avisado, através de uma mensagem na tela do computador, que o fim-de-curso de segurança foi atingido. Caso ocorra do primeiro fim-de-curso ser atingido pelo carro e mesmo assim, por alguma falha, o movimento continuar, o carro irá tocar o segundo interruptor, isto é, o fim-de-curso fatal. Quando isso ocorrer, a alimentação do motor é cortada (figura 4(b)).

A pressão do ar comprimido utilizado nas guias aerostáticas também é monitorada. Quando a pressão do ar cair abaixo do valor permitido (5 bar) é acionado um circuito semelhante ao mostrado na figura 4(b), que interrompe o funcionamento do motor, além de avisar ao operador, através de uma mensagem na tela. Também para o interruptor de emergência um esquema semelhante é implementado. Desta forma, garante-se que somente quando todas as condições forem favoráveis, o posicionador irá operar. Este mesmo procedimento é repetido para os dois eixos envolvidos.



(a)



(b)

Figura 4 : (a) Fins-de-curso localizados no Eixo Z e (b) Diagrama Esquemático do Circuito de Relés

3.2 Algoritmo de Controle

A figura 5 mostra o diagrama de blocos da malha de controle de posição do eixo Z. A malha de controle do eixo X é constituída por subsistemas similares, no entanto, com outras características, conforme apresentado na seção anterior. O comportamento estático e dinâmico da resposta do sistema (posição medida), avaliado através do erro de posicionamento, rapidez de resposta e padrão de oscilação dependerá da lei de controle aplicada à planta e dos ajustes de seus coeficientes. No caso em questão, o algoritmo de controle de posição é do tipo proporcional-integral-derivativo juntamente com a ação *feedforward* (FF) de velocidade e aceleração (PI-D+FF).

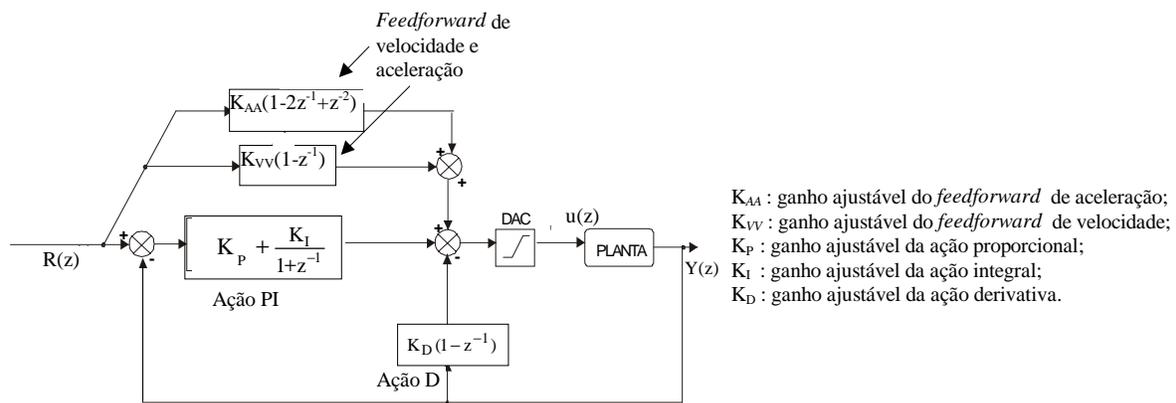


Figura 5 : Diagrama de Blocos da Malha Fechada com Controlador PI-D+FF

O ganho proporcional (K_p) influi na rapidez e conseqüentemente na rigidez e estabilidade da resposta, um ganho muito alto aumenta a velocidade de resposta do sistema, a rigidez aumenta, e o sistema fica mais próximo à instabilidade. Já o termo integral (K_i) permite reduzir o erro de regime estacionário e o termo derivativo (K_d) atua sobre o amortecimento do sistema. Uma ação derivativa muito forte poderá amplificar o ruído do sistema, e uma ação integral muito forte poderá causar um aumento na sobre-passagem (Delta Tau, 1991). Além de erro de posicionamento mínimo e sobre-passagem nula, deseja-se que o sistema de posicionamento apresente uma alta rigidez, de forma a reduzir o máximo possível o aumento no erro de posicionamento devido à variação dos esforços de usinagem introduzidos pela peça (durante a usinagem) e devido às perturbações provenientes da própria máquina e do meio externo.

Na ação FF de velocidade, o ganho K_{vv} atua na redução de erros de seguimento (de posição) proporcionais à velocidade comandada, acarretados pelo amortecimento viscoso do sistema. Já a ação FF de aceleração é necessária para se reduzir os erros de seguimento proporcionais à aceleração comandada, acarretados pela inércia do sistema. Conforme mostrado na figura 5, as ações FF de velocidade e de aceleração são somadas ao comando de torque do motor, as quais são proporcionais à velocidade e aceleração comandadas, respectivamente. A velocidade comandada é obtida através da derivada da posição comandada ($R(z)$). A aceleração comandada é obtida através da segunda derivada da posição comandada.

4. SINTONIA ATRAVÉS DE POSICIONAMENTO DE PÓLOS

Obtido o modelo matemático da planta, constituída pelo servo-motor, pela mecânica do posicionador (transmissão, guias, etc.) e pelo sistema de medição de posição, é possível aplicar a teoria de controle clássico juntamente com a técnica de posicionamento de pólos a fim de se obter os ajustes do controlador ((Santina, 1996), (Ogata, 1995) e (Vásquez, 1994)). O modelo matemático da planta é obtido através do método de identificação dos mínimos quadrados não recursivos, o qual utiliza dados obtidos em ensaios realizados na planta. Para isso, o sistema em malha aberta é excitado com um sinal randômico e então, a entrada (referência de posição) e os dados de saída (posição) são usados no algoritmo dos mínimos quadrados não recursivos para se obter os parâmetros do modelo matemático (De Jesus, 1999). O modelo de cada eixo é de segunda ordem, e pode ser representado pela seguinte função de transferência :

$$G(z) = \frac{b_0 z}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (1)$$

onde, $G(z)$ é a função de transferência da planta, no domínio z ; b_0 , a_1 e a_2 são os parâmetros do modelo matemático identificado; e z é o operador da transformada z . A função de transferência em malha fechada é obtida através da figura 5. A equação característica, dada pelo denominador da função de transferência em malha fechada, fornece os pólos do sistema em malha fechada, ou seja :

$$\text{Eq. Caract.} = Z^3 + (a_1 + b_0 K_D - 1)z^2 + (a_2 - a_1 - b_0 K_D - b_0 K_P)z - (a_2 - b_0 K_D) \quad (2)$$

Empregando a técnica de posicionamento de pólos, pode-se impor os valores dos pólos da função de transferência da malha fechada e em seguida calcula-se quais valores de ajustes do PI-D fazem com que aqueles pólos se verifiquem. Como a equação característica (eq. 2) é de terceiro grau, o sistema possui três pólos. Sejam $(\lambda_1, \lambda_2$ e $\lambda_3)$ o conjunto de pólos desejados. Logo, a equação característica desejada pode ser escrita como :

$$\Delta(\lambda) = \lambda^3 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)\lambda^2 + (\lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3)\lambda - \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \quad (3)$$

Comparando as equações (2) e (3), tem-se que :

$$K_P = \frac{-(a_1 + b_0 K_D - a_2 + \lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3)}{b_0} \quad (4)$$

$$K_I = \frac{-(a_1 - b_0 K_D + 1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)}{b_0} - K_P \quad (5)$$

$$K_D = \frac{a_2 - (\lambda_1\lambda_2\lambda_3)}{b_0} \quad (6)$$

Através das equações 4, 5 e 6, calcula-se os valores dos ajustes do PI-D de forma a se obter pólos do sistema em malha fechada iguais a λ_1, λ_2 e λ_3 . Os ajustes da ação FF são feitos baseando-se na função de transferência que relaciona erro e o sinal de saída do sistema em malha fechada, a qual é obtida através da figura 5 :

$$E(z) = R(z) - Y(z) \quad (7)$$

O sinal de referência, $R(z)$, será uma rampa ou parábola, pois tais entradas compõem grande parte das possíveis trajetórias que um posicionador deve ser capaz de realizar. Aplicando o teorema do valor final na equação (7), obtém o valor do erro em regime permanente, isto é:

$$e_{SS} = \lim_{Z \rightarrow 1} (z - 1)E(z) \quad (8)$$

Para se obter e_{SS} nulo sem interferir na dinâmica do sistema, considera-se que o sistema de controle não possua ação integral e calcula-se os ganhos do FF que eliminam o erro de seguimento devido a entrada rampa e parábola. Portanto, para o controlador P-D+FF, aplicando o teorema do valor final, obtém-se o seguinte resultado para entrada rampa :

$$e_{SS} = \frac{T_S (1 - a_2 + b_0 K_D - b_0 K_{VV})}{b_0 K_I} \quad (9)$$

onde T_S é o tempo de amostragem do sistema de controle. Para se ter $e_{SS}=0$, tem-se que :

$$K_{VV} = \frac{1 - a_2 + b_0 K_D}{b_0} \quad (10)$$

Repetindo o procedimento para entrada parabólica, obtém-se :

$$K_{AA} = \frac{1}{b_0} \quad (11)$$

Em resumo, no procedimento adotado aqui, primeiro determina-se os ganhos do PI-D através da técnica de posicionamento de pólos (equações 4,5 e 6) e em seguida, determina-se os ganhos do FF que eliminam o erro devido à rampa e parábola (equações 10 e 11).

5. ENSAIOS DE POSICIONAMENTO

Inicialmente são apresentados os ensaios de posicionamento realizados no eixo Z. No ensaio mostrado na figura 6(a), o eixo Z se desloca 2 mm, permanece parado por alguns segundos e depois retorna ao ponto de partida. O gráfico mostrado na figura 6(b) mostra o erro (trajetória comandada menos a trajetória medida), o qual atinge o valor máximo de $\pm 4\mu\text{m}$. Analisando a curva de erro (figura 6(b)), nota-se que o sistema apresenta um comportamento oscilatório na partida do movimento (no tempo zero e no tempo próximo à 14 s). Tal comportamento é causado pelo ajuste inadequado do controlador PI-D+FF. A seguir são apresentados outros resultados com novos ajustes do controlador.

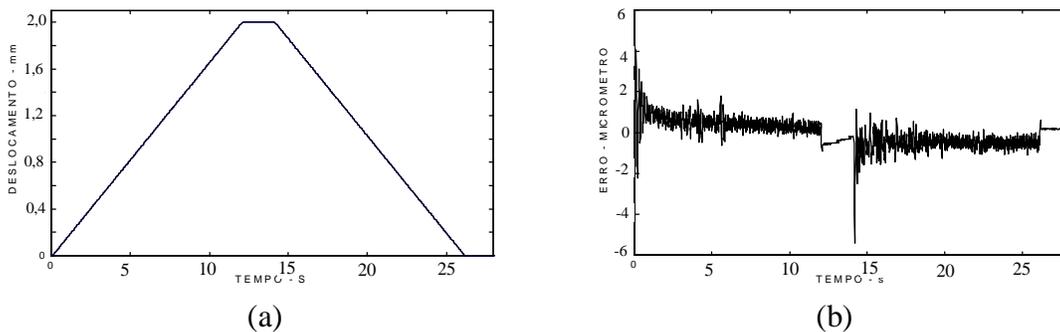


Figura 6 : Ensaio de posicionamento - Eixo Z - Velocidade de 10 mm/min

Sintonizando o controlador PI-D+FF conforme mostrado na seção 4 e repetindo o ensaio anterior, obteve-se um erro consideravelmente menor (figura 7). Os pólos são escolhidos baseado nos valores desejados de ζ (fator de amortecimento) e ω_N (frequência natural). Escolhendo o pólo dominante de tal forma que a frequência natural seja igual a 7 vezes a

frequência natural do sistema em malha aberta e ζ igual a 0,9 obteve-se um erro máximo de $\pm 0,4 \mu\text{m}$ (figura 7(b)).

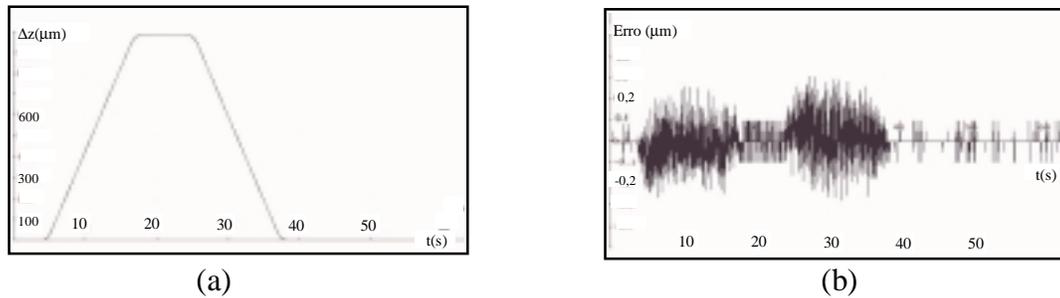


Figura 7 : Ensaio de posicionamento - Eixo Z - Velocidade de 10 mm/min

Os ensaios realizados no eixo X são apresentados na figura 8. A figura 8(a) mostra as curvas de deslocamento comandado sobreposta à curva de deslocamento medido (1) e também mostra o erro de seguimento (2). No ensaio mostrado na figura 8(a) não foi incluída a ação de controle FF (o controlador é somente PI-D) e nota-se a presença de erros elevados na partida e chegada. A figura 8(b) mostra o mesmo ensaio quando se inclui a ação de controle FF. Nota-se que o erro na partida e chegada foram reduzidos. E portanto, o erro máximo que atingia $\pm 100 \text{ nm}$, caiu para $\pm 30 \text{ nm}$ após a inclusão do FF. Nos dois casos, os pólos são escolhidos de tal forma que ζ seja igual a 0,9 e a frequência natural seja igual a 7 vezes a frequência natural do sistema em malha aberta.

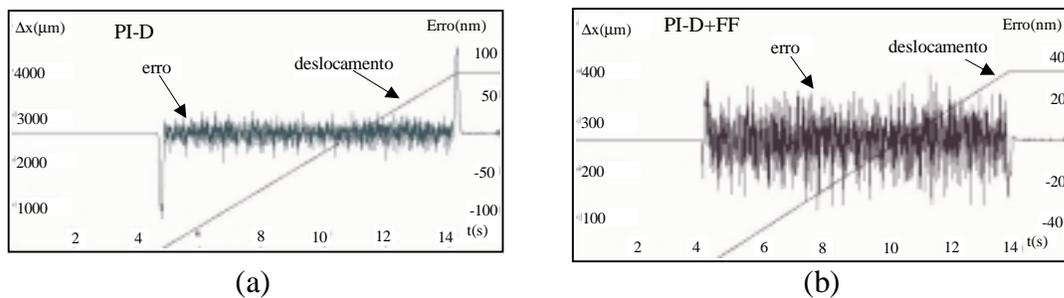


Figura 8 : Ensaio de posicionamento - Eixo X - Velocidade de 25 mm/min

6. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada a automação de itens de segurança de um sistema de posicionamento e o sistema de controle de posição do mesmo. Os ensaios apresentados foram realizados após a aplicação da teoria de controle clássico juntamente com a técnica de posicionamento de pólos na sintonia do controlador de posição tipo PI-D+FF. Utilizando este procedimento foi possível alcançar erros de posicionamento na ordem submicrométrica, além de permitir verificar, experimentalmente, o efeito de diferentes escolhas de pólos no erro de posicionamento.

7. REFERÊNCIAS

- Delta Tau Inc., “Programmable Motion Advanced Controller User’s Guide”, USA, 1991

- De Jesus, G. A. R., “Uma Contribuição para o Desenvolvimento e Controle de Sistemas de Posicionamento Submicrométricos.”, Tese de Doutorado, Depto. Eng. Mec., Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- Ljung L., “The Control Handbook “, - System Identification - Editor William S. Levine - CRC Press /IEEE Press - 1996.
- Ogata, K; “Discrete-Time Control Systems”- Prentice Hall International Editions – 1995.
- Purquério, B. M., Porto, A. J. V., Jasinevicius, R. G., “O Torneamento de Ultraprecisão já é possível também no Brasil” - Máquinas e Metais, 1994, pp 106-114.
- Rao, G. S., Ro, P. I., “Submicrometer Control of a traction drive using state feedback and estimation “, Precision Engineering, 17, pp 124-130, 1995.
- Santana, M.S.; Stubberud A.R.; Hostetter, G.H., “Design Methods for Discrete-Time, Linear Time-Invariant Systems “ - The Control Handbook - Editor William S. Levine - CRC Press /IEEE Press - 1996.
- Schei, T. S., “Automatic Tuning of PID Controllers Based on Transfer Function Estimation”, Automatica, Vol. 30, No.12, 1994.
- Schroeter, R. B.; “Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho” - Tese de Doutorado - UFSC - 1997.
- Slocum, A. H. . “Precision Machine Design”. Prentice Hall, 1992.
- Vásquez, J. A. R., “Desenvolvimento de um Posicionador de Ultra-Precisão”. Dissertação de Mestrado - UFSC - 1994.