



ALGORITMO HÍBRIDO “PI DIFUSO + D” PARA POSICIONADORES DE ULTRAPRECISÃO

Juan Carlos Campos Rubio

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antonio Carlos 6627, Belo Horizonte, MG.

Jaime G. Duduch & Arthur J. Viera Porto

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Eng. Mecânica
Av. do Trabalhador São Carlense 400, Cep: 13566-590, São Carlos, SP.

Resumo. *A crescente demanda de componentes com melhores características metrológicas e de acabamento, tais como lentes para raio x e infra vermelho, tem permitido o desenvolvimento de variados tipos sistemas de microposicionamento capazes de movimentar elementos de máquinas em distâncias muito pequenas com alto grau de precisão. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo híbrido para o controle de movimento de sistemas posicionadores de alta resolução. Entre as técnicas utilizadas para formar o algoritmo híbrido destaca-se a do tipo não-convencional desenvolvida a partir de técnicas baseadas no conhecimento (lógica difusa) e o filtro PID convencional. Como forma de validar o estudo são apresentados resultados experimentais obtidos em testes de um microposicionador acionado por atuador magnetoestrictivo, e feitas comparações com outros autores que demonstraram a validade da técnica permitindo posicionamentos da ordem de 100nm.*

Palavras-chave: *Controle, Algoritmos Híbridos, Precisão, Posicionamento..*

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de deslocamentos de alta precisão não faz parte apenas dos processos de usinagem de ultraprecisão. Sistemas de posicionamento de alta precisão são de fundamental importância em diversos instrumentos de medição e sistemas para montagens ópticas, dentre os quais podem-se destacar os instrumentos de medição de textura superficial (mecânicos ou ópticos), sistemas ópticos e de informática, entre outros. Pode-se notar, então, a existência de uma crescente necessidade de utilização de sistemas posicionadores de alta precisão.

Por outro lado, Ro & Hubbel (1992) demonstram que o comportamento dinâmico dos elementos mecânicos de conversão e transmissão de movimento, depende do nível de sinal de comando. Distinguindo desta forma, micro-dinâmica; correspondente à característica dominante em pequenos deslocamentos (i. e., sub-micrométricos) e macro-dinâmica; a qual corresponde à característica dominante na faixa de grandes deslocamentos.

Neste sentido, várias estratégias de controle podem ser propostas para o projeto de controladores de movimento adequados para uso em posicionadores de precisão, sejam eles do tipo convencional ou não-convencional. Podendo-se afirmar que o emprego da técnica de controle apropriada deverá possibilitar a atenuação das variações no entorno do sistema, assim como das não linearidades do próprio servo-sistema.

Assim sendo, dentro das técnicas não-convencionais, propõe-se a aplicação de controladores de movimento baseados em Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) devido às suas facilidades de projeto e também devido à não necessidade do conhecimento do modelo matemático da planta a ser controlada (Lee, 1990). Por motivos similares, controladores baseados em Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks*) serão igualmente estudados e testados (Freeman & Skapura, 1991).

Este trabalho apresenta a utilização de um algoritmo de controle projetado, que mescla na estrutura de um controlador PID convencional, um controlador difuso para a parcela PI cujo comportamento é mapeado por uma rede neural. Testes experimentais em um sistema protótipo mostraram a validade do uso desta técnica no controle submicrométrico.

2. SISTEMA MICROPOSICIONADOR

A maioria dos tornos de precisão comerciais não possuem características suficientes de exatidão e repetibilidade necessárias para usinagem de materiais frágeis. Desta forma, torna-se imprescindível a concepção de um sistema alternativo para posicionamento e/ou correção de erros no posicionamento do porta-ferramenta e, por sua vez, da ponta da ferramenta de diamante que efetivamente entra em contato com a peça e realiza a retirada de material, atuando de forma a alcançar as características desejadas de forma e acabamento, tanto superficial como subsuperficial. Variados equipamentos têm sido desenvolvidos com esta finalidade. Na Figura 1, é mostrando um tipo de porta-ferramenta modular que utiliza um sistema de guias de molas.

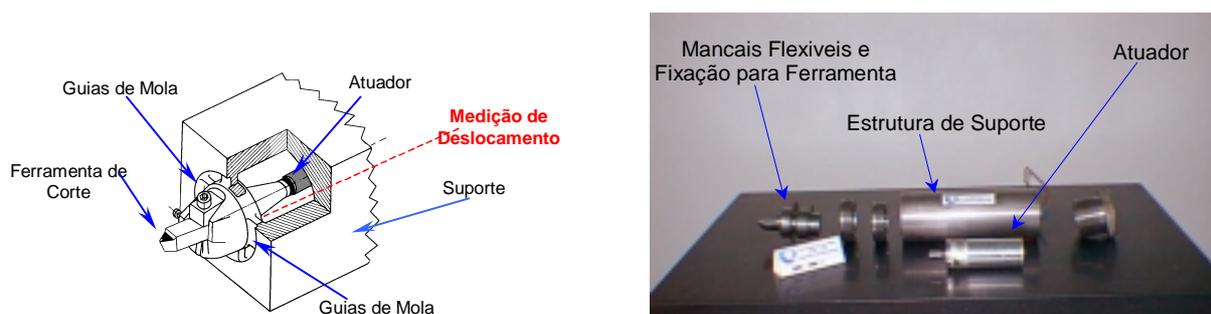


Figura 1 - Porta Ferramenta Ativo para Usinagem de Ultraprecisão.

A utilização de um elemento motor apropriado para posicionamento em mecânica de precisão é de extrema importância. Diversos tipos de atuadores translativos poderiam ser caracterizados para este fim (e. g. hidráulicos, pneumáticos etc.), porém pouco ou quase nada somariam às soluções procuradas para o problema de posicionamento sub-micrométrico de elevada rapidez e repetibilidade. Desta forma, para a realização deste trabalho foi escolhida a utilização dos atuadores de estado sólido baseados nos princípios magnetoestrutivos. Os materiais magnetoestrutivos trabalham de forma a transformar um sinal elétrico num movimento translativo linear na faixa de alguns micrometros. A capacidade de carga pode alcançar facilmente a ordem dos kN e podem trabalhar em frequências variando de zero a vários kHz. Devido a suas qualidades de precisão de posicionamento e estabilidade de velocidade, este tipo de atuador pode ser considerado uma escolha atraente no acionamento de posicionadores de pequeno curso e alta resolução (microposicionadores).

3. CONTROLADOR HÍBRIDO “PI DIFUSO + D”

Em controle de movimento de posicionadores devido à inércia do sistema dinâmico, o deslocamento do sistema continua aumentando mesmo após o corte da energia. Esta característica torna extremamente difícil o controle da planta (servomecanismo), o que fica mais evidente quando se pretende posicionar rapidamente e sem sobressinal [Yojo & Moraes, 1999].

Uma vez que controladores **PID** tradicionais não possuem comportamento adequado quando da variação dos parâmetros da planta, uma metodologia de projeto capaz de aliar a robustez dos controladores difusos e a rapidez de resposta dos controladores **PID** [Tao & Taur, 1995].

Desta forma, a inclusão de Lógica Difusa a um controlador **PID** tradicional têm como objetivo primordial reduzir a amplitude de sobressinal (*overshoot*) e diminuir o tempo de resposta. Neste sentido e conforme pode ser observado em resultados obtidos anteriormente [e.g., Campos Rubio et al., 1996], pode-se afirmar que:

- Controlador **PID** convencional caracteriza-se principalmente pela facilidade de implementação e a capacidade de permitir o controle com um desempenho adequado das mais diversas plantas, através da sintonização de alguns parâmetros.
- Controladores **PID** convencional possuem características como; rapidez de resposta elevada, porém com uma presença de sobressinal muitas vezes indesejado.
- Por se tratar de um algoritmo que trabalha em função de ganhos fixos, muitas vezes ao alcançar uma resposta em tempo e erros de regime muito reduzidos, torna a malha extremamente sensível o que pode causar instabilidade.
- Um controlador difuso, por sua vez, permite baixos erros de regime e tempos de resposta pouco superiores aos anteriores, tornando o sistema dinâmico como um todo, facilmente regulável e menos susceptível à variações na planta e perturbações externas.
- Desta forma, pode-se afirmar que algoritmos difusos são adaptativos e robustos. Isto devido principalmente, a sua arquitetura, formados através de uma base de conhecimento gerada com um certo grau de incerteza e um conjunto de regras que auxiliam (indiretamente) na escolha do valor de comando adequado para uma determinada situação.

Portanto, espera-se que exista uma relação ótima entre a utilização de controladores **PID** convencionais e algoritmos difusos, cuja característica de comando seja capaz de aliar as características vantajosas de ambas técnicas, obtendo um controlador que possua:

- Alta velocidade de resposta,
- Baixo erro de regime permanente,
- Baixo erro de seguimento de trajetórias,
- Atenuação de perturbações, entre outras.

3.1 Concepção do Controlador Híbrido

Como forma de simplificar ao máximo à implementação do algoritmo, foi escolhida uma disposição “em série” dos dois tipos de controladores. Desta forma, as características inicialmente previstas, e a necessidade de alterar (modificar) o tipo da resposta do sistema, através de um tipo de sintonização dos parâmetros do algoritmo projetado.

Conforme, é de conhecimento geral, cada fator do compensador **PID** tem uma função específica e atua de forma isolada ou conjunta em uma ou mais características da resposta [Miron, 1989], a saber:

- **Ganho Proporcional** (K_p) – atua de forma a aumentar a velocidade de resposta e diminuir o erro de regime.
- **Fator Integrativo** (K_i) – responsável principalmente pela redução do erro de regime, no caso do valor de subida se mantiver próximo do sinal de referência.
- **Fator Derivativo** (K_d) - responsável pela estabilidade do sistema e também pela suavidade da resposta.

Analogamente aos ganhos de sistema **PID** convencional, o fatores do controlador híbrido poderão ser determinados através da utilização de algum método para sintonização, como por exemplo o método Ziegler Nichols, o qual caracteriza-se principalmente pela facilidade de aplicação [VanDoren, 1998].

Após a sintonização do filtro **PID** a parte **PI** é substituída pelo sistema *Difuso*, resultando desta forma num controlador híbrido capaz de fornecer requisitos de desempenho necessários para sua utilização em posicionadores de ultraprecisão.

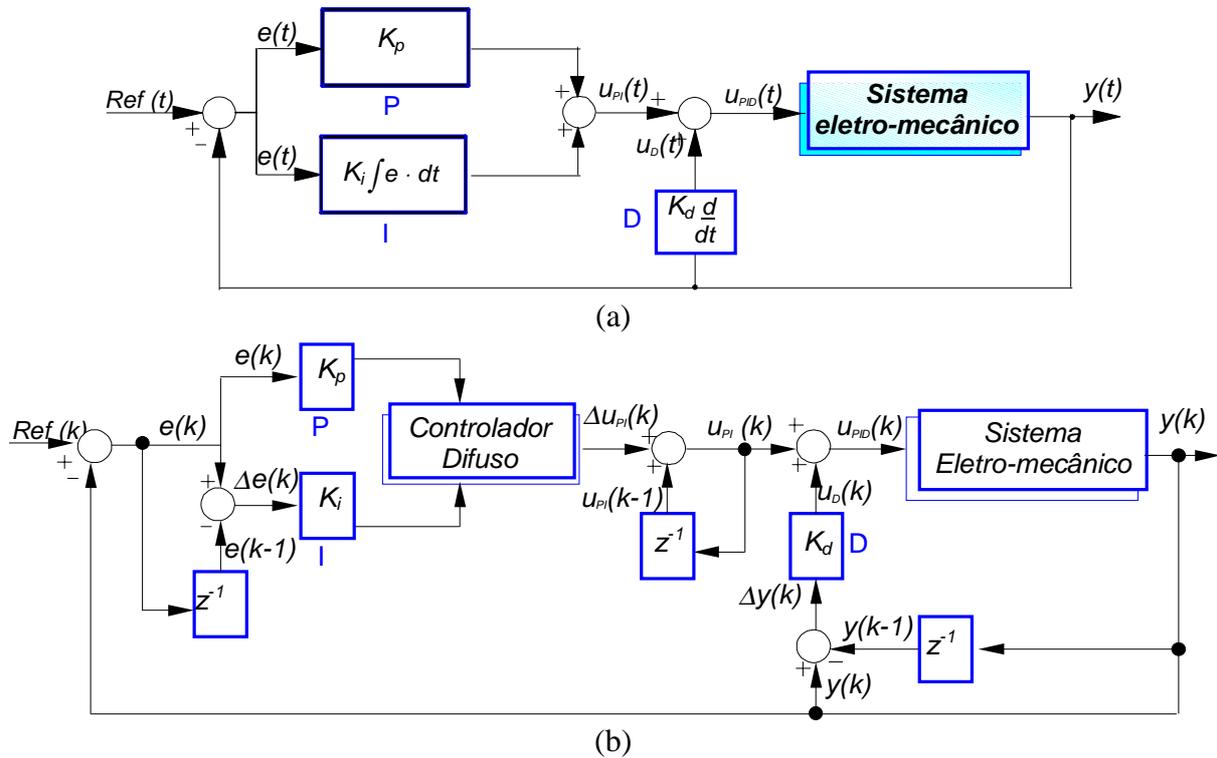


Figura 2 – Diagrama de blocos: (a) Controlador PID convencional; (b) Controlador Híbrido “PI difuso + D” discretizado.

3.2 Equacionamento do Controlador Híbrido

A Figura 2 (a) mostra o diagrama de blocos de um sistema dinâmico controlado através de um filtro PID. Em este tipo de sistema, o sinal de controle pode ser obtido combinando os termos proporcional, integral e derivativo, como segue:

$$u_{PID}(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) \cdot dt - K_d \cdot y(t) \quad (1)$$

onde K_p , K_i e K_d são os parâmetros do controlador **PID**, que na forma discretizada podem ser representados através da ação de um segurador de ordem zero (*zero-order-hold*) [Malki et al., 1994], como sendo:

$$u_{PID}(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T \sum_{n=0}^k e(n) - K_d \cdot \frac{(y(k) - y(k-1))}{T} \quad (2)$$

onde: T – é o período de amostragem; $e(k)$ a entrada do controlador correspondente ao erro do sistema, o qual pode ser expresso como sendo $e(k) = Ref(k) - y(k)$; e $u(k)$ a saída do controlador no tempo (kT).

Desta forma, para a forma incremental tem-se:

$$u_{PID}(k-1) = K_p \cdot e(k-1) + K_i \cdot T \cdot \sum_{n=0}^{k-1} e(n) - K_d \cdot \frac{(y(k-1) - y(k-2))}{T} \quad (3)$$

assim:

$$\Delta u_{PID}(k) = u_{PID}(k) - u_{PID}(k-1) \quad (4)$$

portanto:

$$\Delta u_{PID}(k) = K_p \cdot (e(k) - e(k-1)) + K_i \cdot T e(k) - K_d \cdot \frac{(y(k) - 2y(k-1) + y(k-2))}{T} \quad (5)$$

Que corresponde à forma adequada da entrada de controle para atuadores do tipo integrativos, como por exemplo sistemas eletro-mecânicos [Tzafestas & Papanikolopoulos, 1990].

Como citado anteriormente, uma das principais razões para a popularidade do controlador PID convencional reside na sua facilidade de projeto e ajuste, permitindo um desempenho aceitável para diversas aplicações. Portanto, um dos objetivos primordiais deste estudo é através da explorar as vantagens de um controlador deste tipo e suprir suas limitações de desempenho e robustez, por meio da utilização de um controlador que melhores estas características, a saber lógica difusa.

Assim sendo, é proposto o desenvolvimento de um controlador híbrido “PI difuso + D”, onde a ação integral e proporcional serão geradas a partir de um controlador difuso. A Figura 2 (b) mostra a arquitetura do sistema de controle proposto, onde o sinal de controle ($u_{PID}(k)$) pode ser expresso através da relação de variáveis:

$$u_{pid}(k) = u_{pi}(k) - u_d(k) \quad (6)$$

generalizando,

$$u_{pid}(k) = K_{pi} \cdot \Delta u_{pi}(k) + u_{pi}(k-1) - K_d \cdot \left[\frac{\Delta y(k)}{T} \right] \quad (7)$$

$$u_{pid}(k-1) = K_{pi} \cdot \Delta u_{pi}(k-1) + u_{pi}(k-2) - K_d \cdot \left[\frac{\Delta y(k-1)}{T} \right] \quad (8)$$

na forma incremental, tem-se que:

$$\Delta u_{pid}(k) = u_{pid}(k) - u_{pid}(k-1) \quad (9)$$

$$\Delta u_{pid}(k) = K_{pi} \cdot [\Delta u_{pi}(k) - \Delta u_{pi}(k-1)] + [u_{pi}(k-1) - u_{pi}(k-2)] - K_d \cdot \left[\frac{\Delta y(k) - \Delta y(k-1)}{T} \right] \quad (10)$$

Desta forma, o princípio matemático que define a lei de controle pode ser obtido em função da saída de um sistema de controle proporcional e integrativo (PI) do tipo incremental. Por sua vez, esta saída pode ser expressa igualmente, no domínio da frequência ($u_{PI}(s)$), como sendo:

$$U_{pi}(s) = K_p^c \cdot E(s) + K_i^c \cdot \frac{E(s)}{s} \quad (11)$$

Onde, K_p^c e K_i^c correspondem aos ganhos proporcional e integral do controlador **PI** e, $E(s)$ o sinal de erro de seguimento. Assim, para a forma discretizada tem-se que:

$$u_{pi}(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T \cdot \sum_{n=0}^k e(n) \quad (12)$$

ainda,

$$\Delta u_{pi}(k) = K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] + K_i \cdot T \cdot e(k) \quad (13)$$

sendo que:

$$\Delta u_{pid}(k) = \frac{u_{pi}(k) - u_{pi}(k-1)}{T} \quad (14)$$

ou ainda:

$$u_{pi}(k) = u_{pi}(k-1) + T \cdot \Delta u_{pi}(k) \quad (15)$$

Como mostrado por Malki et al. (1994), em relação a esta equação e pensando em termos de um sistema de controle difuso, pode-se substituir o termo " $T\Delta u_{pi}(k)$ " por um termo que represente uma ação de controle difusa do tipo incremental " $K_{PI} \Delta u_{PIfuzzy}(k)$ ", onde " K_{PI} " é o ganho do controlador difuso, de forma que:

$$u_{PI}(k) = u_{PI}(k-1) + K_{PI} \cdot \Delta u_{PIfuzzy}(k) \quad (16)$$

para $K_{PI}=1$, tem-se:

$$\Delta u_{PIfuzzy}(k) = u_{PI}(k) - u_{PI}(k-1) \quad (17)$$

O controlador baseado em lógica difusa descreve com o auxílio de um conjunto de regras do tipo IF-THEN, a relação entre o incremento da ação de controle $\Delta u_{PIfuzzy}(k)$, o desvio do valor desejado ou erro $e(k)$ no mesmo instante e sua variação " $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ ", assim:

$$\Delta u_{PIfuzzy}(k) = f\{e(k), \Delta e(k)\} \quad (18)$$

Pode-se observar claramente uma semelhança entre as equações 13 e 18, o que mostra a viabilidade do projeto de um controlador **PI** difuso de forma a substituir um controlador **PI** convencional. A equação 2, poderá ser re-escrita como sendo:

$$u_{PID}(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \Delta e(k) - K_d \cdot \Delta y(k) \quad (19)$$

assim,

$$\Delta u_{PIfuzzy}(k) \propto K_p \cdot e(k) + K_i \Delta e(k) \quad (20)$$

onde, K_p e K_i são os ganhos do controlador **PI** convencional. A diferença situa-se principalmente no tipo de relacionamento existente entre os fatores, no caso do “**PI** convencional” existe um relacionamento linear (fatores de ganho constante) enquanto no controlador “**PI** difuso” este relacionamento poderá ser não linear (fatores não constantes).

Para implementar o controlador difuso no controlador híbrido foi escolhida uma rede neural multi-camadas, treinada para emular o comportamento de um controlador difuso, isto é, mapear a superfície de decisão ou tabela de consulta gerada a partir das regras difusas (Figura 3 (a)) apresentada em Campos Rubio et al., (1998). Inicialmente foi implementada uma rede neural com 2 neurônios na camada de entrada, 18 neurônios na camada intermediária e um (1) neurônio na camada de (Figura 3 (b)). Posteriormente, e como forma de diminuir o tempo de processamento do algoritmo, foi utilizada uma rede com apenas 5 neurônios na camada intermediária (Figura 3 (c)), apresentando uma superfície de decisão mapeada com variação mais suave dos valores de controle a ser aplicados ao sistema eletro-mecânico.

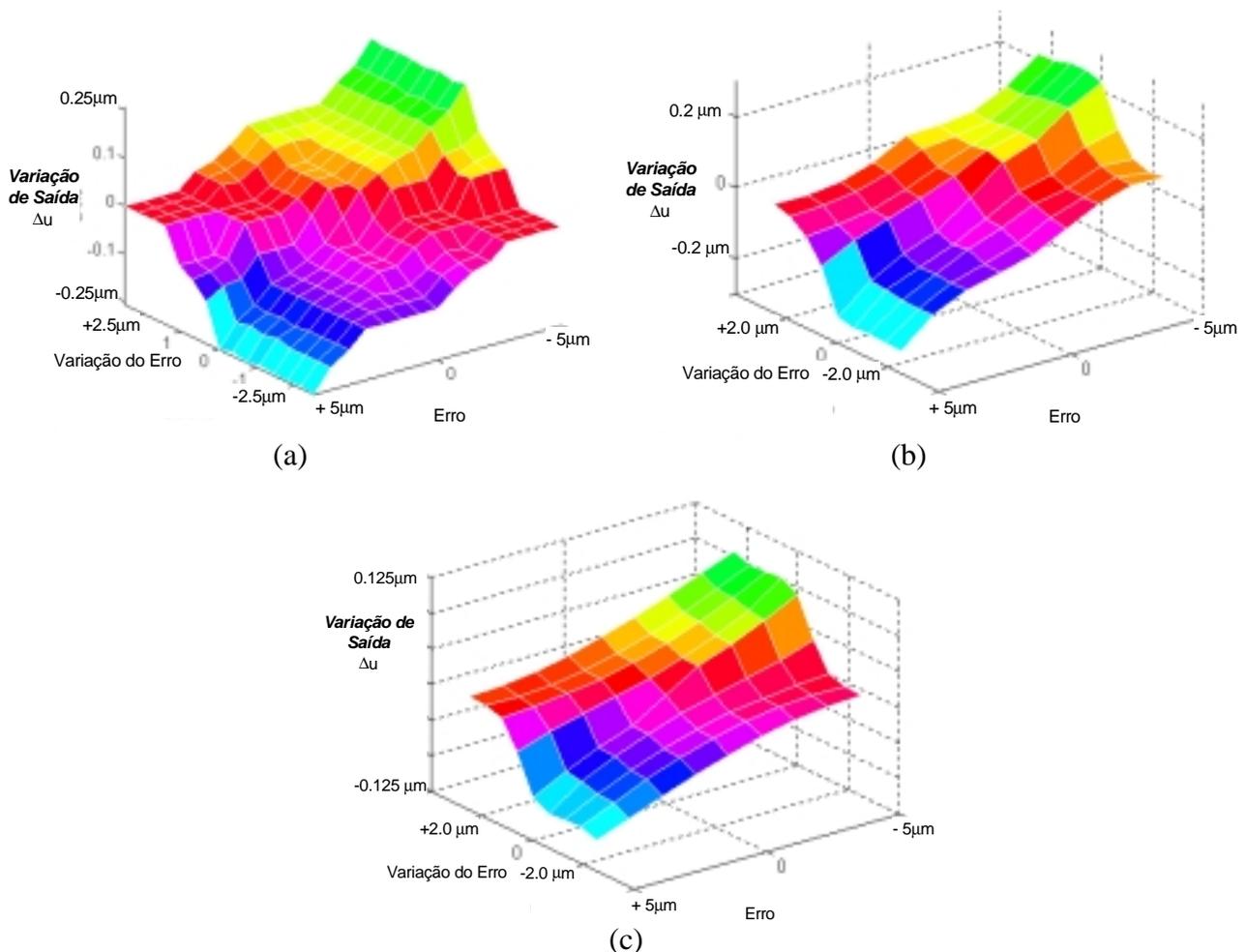


Figura 3 – Mapeamento do controlado PI; **(a)** Controlador difuso original [Campos Rubio et al., 1998]; **(b)** usando uma rede neural de duas camadas com 18 neurônios na camada intermediária; **(c)** usando uma rede neural de duas camadas com 5 neurônios na camada intermediária.

O controlador neural utilizado para mapear a tabela de consulta do controlador difuso (matriz 9x9 com dois vetores de entrada), foi uma rede com duas camadas (neurônios tangentes sigmoidais

na camada intermediária e lineares na de saída). Como algoritmo de treinamento foi escolhido o *back-propagation* implementado com o método de Levenberg-Marquardt que se mostrou extremamente rápido, permitindo alcançar erros extremamente baixos (ordem de 10^{-6}) [Campos Rubio et al., 1998].

4. TESTE EXPERIMENTAL

A avaliação do servocontrolador será realizada através de três características; resposta transitória tão rápida quanto possível e sem *overshot*, e da capacidade de eliminar perturbações como as ocorridas no processo de corte.

A amplitude de deslocamento alcançado através do controlador “PI difuso+D” é apresentada na Figura 10. Pode-se observar na figura a existência de um nível de ruído presente na resposta, o qual quando medido isoladamente apresentava-se superior aos 50 nm de amplitude. Este ruído corresponde à influência do ambiente onde o sistema foi instalado.

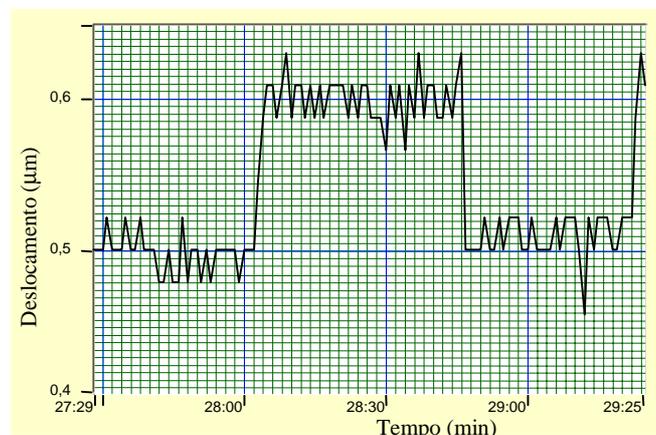


Figura 10 - Posicionamento de 100 nm obtido experimentalmente para o controlador híbrido “PI difuso+D”.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As respostas no tempo para o controlador híbrido “PI difuso +D”, foi extremamente satisfatório e com desempenho superior ao controle difuso “puro” e ao PID convencional.

Neste sentido, o comportamento do sistema pode-se explicar como fruto da melhor aproximação que o algoritmo neural produz quando da necessidade de interpolar valores dentro da tabela de consulta, procedimento este, feito no caso da lógica difusa “pura”, através de interpolação linear.

Por outro lado, o sistema de controle híbrido formado pela combinação de um controlador PID com um controlador difuso (“PI difuso + D”) surge como uma opção interessante, preservando a simplicidade da estrutura linear dos controladores PID convencionais e aumentando a robustez do controlador através da menor susceptibilidade a ruídos (maior estabilidade) dos algoritmos difusos. Neste sentido, a opção do controlador “PI difuso + D” permite aumentar a capacidade de controle através do auto-ajuste dos ganhos, uma vez que os fatores de ganho integral e proporcional tornam-se funções não lineares.

O desempenho adequado do algoritmo, mesmo na presença de um nível de ruído considerável, permite concluir que as observações feitas na etapa de projeto foram satisfeitas. Desta forma foi possível alcançar amplitudes reduzidas de deslocamento, atingindo um valor de 100 nm. Este valor preliminar, se comparado com os valores encontrados na literatura para sistemas similares (e.g., Eda et al., 1992, e Kanizar et al., 1995), representa um resultado extremamente alentador.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campos Rubio, J. C.; Duduch, J.; Gee, A. E.; Porto, A. & Lêdo, H. (1996); Comparison of control strategies for piezoelectric and magnetostrictive micropositioning. Proceeding ASPE, Monterrey. Vol. 14, pp 294-299
- Campos Rubio, J. C.; Santoro, F.; Duduch, J. & Porto, A. (1998); Algoritmo neural-fuzzy para controle de atuadores magnetostrictivos. VIII Congresso Chileno de Ingenieria Mecánica, Chile. pp. 475-480.
- Eda, H.; Ohmura, E.; Sahashi, M. & Kobayashi, T. (1992); Ultraprecise Machine Tool Equipped with a Giant Magnetostriction Actuator. Annals of the CIRP, Vol 41, No. 1. pp 421-224.
- Freeman, J. A. & Skapura, D. M.; Neural Networks. Algorithms, Applications, and Programming Techniques. Addison-Wesley Publishing Company Inc, Massachusetts, 1991.
- Kanizar, W.; Liu, D.; Moon, K. & Sutherland, S. (1996); Magnetostrictive actuator-based micro positioner and its applications in turning. Proceedings of SPIE. Vol. 2721, pp. 385-393.
- Lee, C. C. (1990); Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part II. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. 20. No. 2. pp 419-435
- Malki, H., Li, H. & Chen, G. (1994); New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 2, N° 4, november. pp. 245 – 254.
- Miron, D. (1989); Design of Feedback Control Systems, HBS Publishers.
- Ro, P. & Hubbel, P. (1992); Nonlinear micro-dynamic behavior of a ball-screw driven precision slide system. Precision Engineering, Vol. 14, N°4, pp. 20-25
- Tzafestas, S. & Papanikolopoulos, N. (1990); Incremental Fuzzy Expert PID Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, N° 5, pp. 365 – 371.
- Yojo, L. & Moraes, R. (1999); Avaliação de Controladores PID com Lógica Fuzzy. In Tech Brasil. Vol. 2, No 15 (maio). pp.53-58.

Hybrid Algorithm ‘PI Fuzzy + D’ for Ultra-Precision Positioning System

Juan Carlos Campos Rubio

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antonio Carlos 6627, Belo Horizonte, MG.

Jaime G. Duduch

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Eng. Mecânica
Av. do Trabalhador São Carlense 400, Cep: 13566-590, São Carlos, SP.

Abstract. *The increasing demand for components with better metrological and finishing characteristics such as x-ray and infra-red lenses, has prompted the development of a number of types of micropositioning systems that are able to move machine elements in very small displacements with high levels of accuracy. In this work it is proposed the application of digital control systems that uses a hybrid control algorithms based on fuzzy logic and PID strategy for ultra-precision positioning system. To test the controller, an micropositioning device using magnetostrictive actuators is employed. The performance results are compared with results obtained by other author, so that validate this study.*

Keywords: Control, Hybrid Algorithm, Precision, Positioning