



MATERIAIS INTELIGENTES NO POSICIONAMENTO DE ULTRAPRECISÃO

Juan C. Campos Rubio

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Eng. Mecânica,
Av. Antônio Carlos 6627, Campus Pampulha, 31270-901 Belo Horizonte, MG.
E-mail: juan@vesper.demec.ufmg.br

Jaime G. Duduch

Fernando G. Santoro

Luciana Montanari

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.
Departamento de Eng. Mecânica
Caixa Postal 356, 13560-970 São Carlos, SP.

***Resumo** De maneira geral, a necessidade de aumentar o desempenho e diminuir o tamanho dos sistemas mecatrônicos tem levado a indústria moderna a idealizar e desenvolver sistemas de posicionamento com boas características de aceleração e precisão de posicionamento. Por outro lado 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 exatidão, dentre os quais pode-se destacar os acionados por meio de atuadores piezoelétricos. Este trabalho propõe a utilização de um novo tipo de atuador baseado na propriedade de estrição eletromagnética de certas ligas metálicas (atuadores magnetoestrictivos) associado a um sistema de controle digital que utiliza um algoritmo de controle baseado em lógica difusa e redes neurais artificiais para o controle de microposicionamento*

***Palavras-chaves:** Atuadores, magnetoestrição, lógica fuzzy, redes neurais*

1. INTRODUÇÃO

A competitividade na indústria moderna exige cada vez mais produtos de alta qualidade, com tolerâncias apertadas e formas complexas. Nas últimas décadas, a necessidade de fabricação de componentes de precisão por parte das diversas áreas tecnológicas, tem provocado uma demanda cada vez maior por métodos e/ou processos de fabricação capazes de produzir superfícies funcionais de altíssima qualidade. Desenvolvimentos no campo da micro-eletrônica, computação, física do estado sólido, opto-eletrônica e metrologia, entre outros, tem estimulado e auxiliado no desenvolvimento e aplicação das denominadas tecnologias de fabricação de Ultraprecisão (Kim & Kim, 1996).

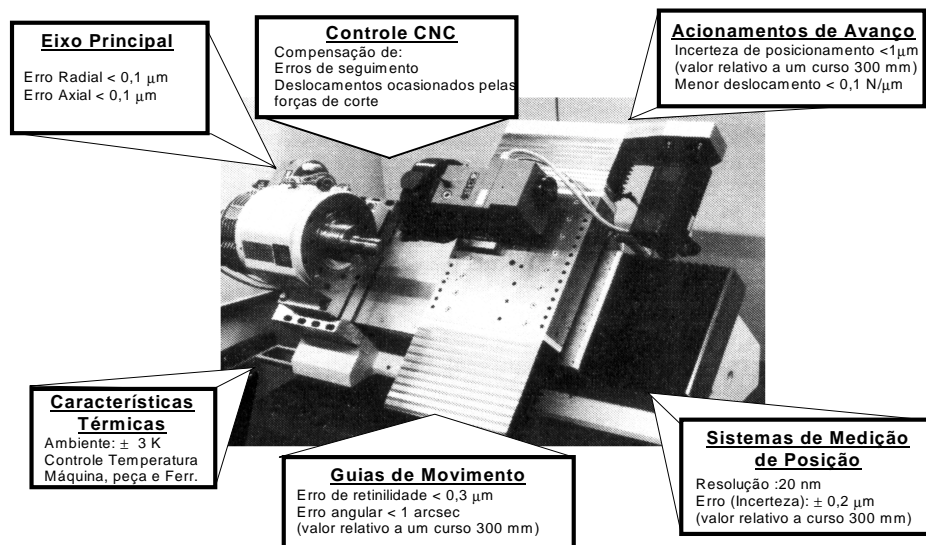


Figura 1 - Parâmetros de um torno de precisão

Na medida em que as características metrológicas e de acabamento tornam-se mais críticas, o desempenho da máquina de usinagem cresce em importância. Desta forma, quando ingressamos no campo da mecânica de precisão, o desempenho desejado de máquinas de usinagem destinadas à fabricação de componentes de elevada precisão de forma e rugosidade superficial na faixa de 10 nm Ra (e. g. moldes para lentes, discos de memória para computador, lentes e espelhos para sistemas ópticos, etc.) demanda a utilização de máquinas com melhor precisão de posicionamento, na ordem dos nanômetros (Dow et al, 1991).

Na Figura 1, é mostrado de forma esquemática algumas das características gerais de uma máquina de usinagem (torno) de Alta Precisão (Weck et al., 1992).

Atualmente tem-se vertido esforços que possibilitem a usinagem de materiais cerâmicos e vítreos com a utilização de ferramentas de diamante mono ou poli- cristalino, onde o material é removido sob determinadas condições de corte, as quais facilitam a remoção por deformação plástica, obtendo superfícies livres de trincas, melhorando com isto aspectos como a integridade superficial e subsuperficial. Este processo denominado de "regime dúctil" é alcançado via taxas de remoção otimizadas, nas quais a espessura de corte (função da geometria da ferramenta, profundidade de corte e avanço), torna-se uma variável de extrema importância.

Aliados à problemática do controle das variáveis envolvidas na remoção de material, soma-se a necessidade de corrigir erros sistemáticos e de atenuar distúrbios presentes no processo de corte. Isto pode ser conseguido pela correção de movimento diretamente na ponta cortante, através de controle em tempo real da posição da ferramenta via sinal de posição obtido mediante um sensor de posição, e acionando diretamente um porta-ferramenta antes e/ou durante o processo.

Desta forma, faz-se necessária a utilização de sistemas de microposicionamento servocontrolado, que permitam baixas amplitudes de movimento e seguimento de altas frequências de acionamento. Na Figura 2, são apresentados os diversos componentes constituintes de um sistema posicionador de alta precisão capaz de alcançar resoluções submicrométricas.

Um dos componentes básicos destes sistemas de microposicionamento é o elemento motor, que realiza a conversão do sinal elétrico em energia mecânica de movimento. Este componente eletro-mecânico, denominado de atuador, é o que transfere ao microposicionador as melhores características de rigidez e resposta. Na sua grande maioria são fabricados em tecnologia de estado sólido (Campos et al, 1997).

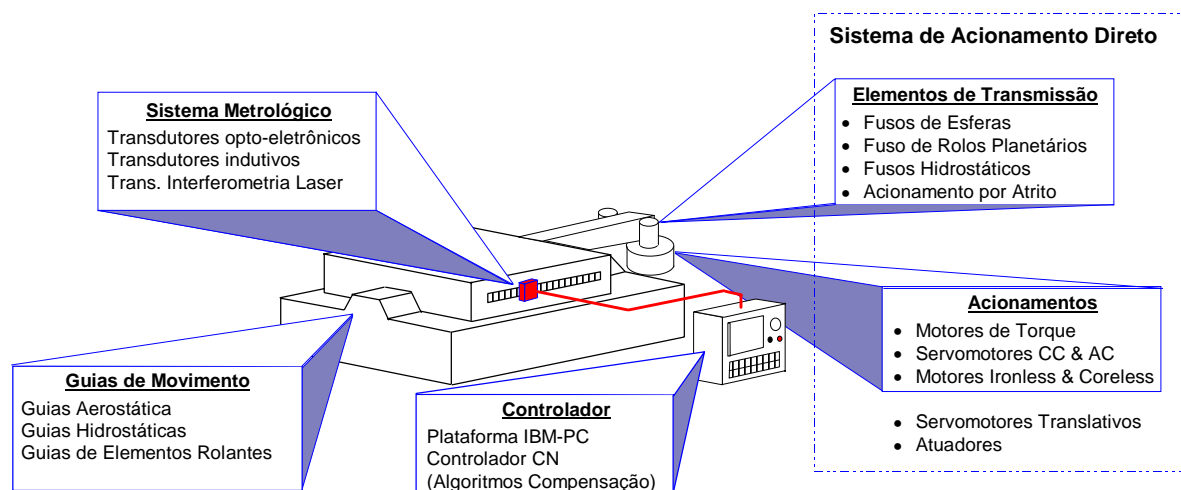


Figura 2. - Componentes de um Sistema Posicionador de Alta Precisão

Uma vez que, para alcançar os requerimentos aludidos anteriormente a próxima geração de máquinas-ferramenta deverá possuir melhores características de exatidão e repetibilidade, além de um desempenho dinâmico adequado, tornando possível a produção de peças de alta complexidade, características metrológicas superiores, em diversos materiais e em níveis de produtividade comercial. Para tanto, é de extrema importância a melhoria dos módulos de posicionamento nas máquinas-ferramenta. Neste estudo, propõe-se a utilização de sistemas de microposicionamento modulares, capazes de alcançar resoluções submicrométricas e que possam ser integrados em máquinas já existentes, assim como, fazer parte de máquinas novas como item alternativo, o qual é baseado na utilização de atuadores magnetostrictivo, dadas suas características de resolução e estabilidade.

Visto que os materiais magnetostrictivos apresentam não linearidades relativas a histerese, suas saídas dependem de entradas prévias. Com isto, seu posicionamento absoluto é somente conseguido com a adição de controle por realimentação. Neste sentido, são confrontados os desempenhos dinâmicos obtidos por estes sistemas quando da utilização de estratégias de controle digital em malha fechada, as quais são obtidas através de técnicas de simulação numérica.

Tendo em vista tratar-se de um sistema (atuador) que apresenta severas não linearidades, assim como incertezas na modelagem, este estudo propõe a utilização de duas estratégias de controle baseadas no conhecimento para o controle do microposicionador, a saber, Lógica Fuzzy e Redes Neurais.

No primeiro, propõe-se a aplicação de um controlador de movimento baseado em lógica fuzzy. Este tipo de controlador consiste em uma tabela de consulta com o erro e a variação do erro como entrada e um sinal de controle ou um incremento a ser dado a este, como saída. Para valores intermediários entre aqueles usados no universo de discurso, o procedimento usual é o cálculo da saída usando interpolação. Assim, usando o erro e a variação do erro para o correto direcionamento do atuador, pode-se calcular o incremento a ser introduzido na entrada de controle, de forma a direcionar o atuador como desejado.

No segundo, é proposto um mapeamento da tabela de consulta fuzzy usando uma rede neural com duas camadas e baseando-se no algoritmo backpropagation com a regra de aprendizagem de Levenberg-Marquardt. Com isto, busca-se otimizar o processo de interpolação necessária nos controladores fuzzy. O desempenho dinâmico do atuador magnetostrictivo com os controladores projetados, são apresentados através de simulação numérica de forma a demonstrar a efetividade das aproximações propostas e comparadas com os resultados obtidos por outros autores

2. POSICIONADORES DE ALTA PRECISÃO

O desenvolvimento de microposicionadores para máquinas e instrumentos de elevada precisão envolve a aplicação de diversas tecnologias, dentre as quais podemos destacar:

- Sistemas de Acionamento,
- Elementos Mecânicos,
- Sistemas de Medição,
- Sistemas de Controle.

2.1 Sistemas de acionamento

Como resposta ao grau de precisão dimensional e geometria exigida pelos produtos, as máquinas-ferramenta estão em permanente modificação. Uma vez que o sistema mais utilizado no acionamento de posicionadores nas máquinas operatrizes CNC é aquela constituída por um servomotor rotativo acoplado a um conjunto fuso/castanha de esferas recirculantes, através de um elemento flexível para absorção de desalinhamentos (Figura 3 (a)), uma análise mais detalhada deste tipo de arranjo deixa ao descoberto algumas desvantagens próprias deste tipo de configuração, como por exemplo: presença de folgas, adição massas inerciais, não linearidade (histerese, atrito), menor velocidade crítica, etc.

Dentro deste contexto, vários tipos de servomotores utilizados em máquinas controladas automaticamente podem ser enumerados. Porém, uma vez no campo da Engenharia de Precisão as dificuldades anteriormente enumeradas acentuam-se, para tanto, são estudadas alternativas que possam reduzir significativamente ditos inconvenientes, a saber, acionamento direto, como por exemplo os motores lineares (Figura 3 (b)).

Um grupo especial de acionamento direto é aquele constituído pelos atuadores de estado sólido ou também denominados de materiais inteligentes, cujo princípio de funcionamento é baseado em fenômenos de estrição eletrostática.

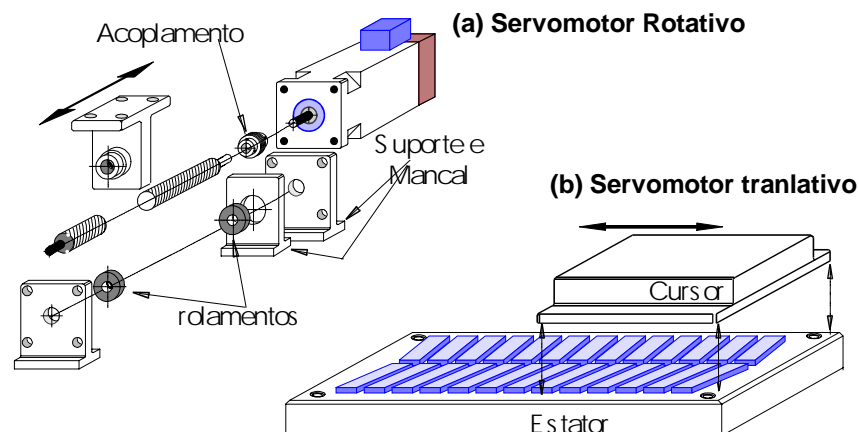


Figura. 3 - Sistema posicionador com acionamentos (a) Rotativos e (b) Translativos

2.2 Elementos mecânicos

A tomada de decisão em relação às características de maior importância na escolha do tipo de elementos mecânicos de transmissão, suporte e movimento, visa principalmente a otimização dinâmica do conjunto, o que possibilitará obter maior precisão e confiabilidade do posicionador.

Neste sentido, têm sido analisadas as diversas alternativas para elementos tais como guias e mancais, resultando numa base de conhecimento estruturada através da aplicação das técnicas de projeto conceptual (Montanari et al, 1998).

Desta forma, inicialmente foi idealizado um porta ferramenta ativo com apenas um grau de liberdade (translação), utilizando guias de molas. Posteriormente uma mesa para microposicionamento angular, baseada no mesmo princípio, esta sendo concebida.

2.3 Sistemas de medição

Como mostrado anteriormente, os atuadores de estado sólido têm sua repetibilidade limitada devido às não-linearidades que carregam, o que faz obrigatória a utilização de realimentação de posição para melhorar seu desempenho.

Sistemas microposicionadores têm utilizado elementos sensores de posição incorporados internamente, tais como sensores capacitivos (*capacitance micrometer*) e extensométricos (*strain gauges*), ambos disponíveis comercialmente.

Neste caso, foi escolhida a utilização de um sistema metrologico independente. Para tanto, foram propostas as alternativas de uso do Laser Interferométrico tipo Diodo (GaAlAs) baseado no princípio de Michelson e dos transdutores indutivos, como os LVDT.

A alternativo do Laser, nos fornece maiores facilidades de montagem, seguindo o princípio de Abbe, além da característica de alta resolução (1.5 nm, $\lambda/512$ com $\lambda = 780$ nm) obtendo um sistema de medição com estrutura metrológica independente (Gee et al., 1989). Por outro lado, a utilização dos LVDT, embora a desvantagem da medição com contato, torna o protótipo mais barato sem não entanto comprometer em demasia a resolução inicialmente esperada.

2.4 Sistemas de controle

Neste item são abordados diversos tipos de técnicas de controle e controladores, visando a escolha de um controlador apropriado para o controle dos sistemas dinâmicos aqui referido, isto é, capaz de atender às especificações de desempenho requeridas. Para tanto, foram considerados diversas alternativas, dentre as quais podemos destacar aquelas baseadas em Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) e Redes Neurais (*Neural Networks*).

Todavia, a necessidade de estratégias de controle mais complexas aumentam as exigências relativas à plataforma de desenvolvimento (Hardware). Neste sentido, dentre os novos desenvolvimentos nesta área, destacam-se os DSPs (Digital Signal Processors), os quais possuem características de arquitetura especiais, projetados para o processamento de sinais em tempo real, possuem um nível de desempenho que o fazem apropriado para aplicações de controle que exigem grande rapidez de processamento com alta precisão de cálculo (Tokhi & Hossain, 1995).

A placa controladora a ser utilizada para a realização da tarefa de fechamento da malha de controle digital do movimento, é baseada no DSP TMS320C51 da Texas Instruments. Dita placa, possui características que facilitam a comunicação com um computador central ou hospedeiro (IBM PC ou compatível), permitindo a aquisição de dados em tempo real para análise do desempenho do sistema.

Sua arquitetura, permite fácil implementação de diversos algoritmos de compensação. Possui um conjunto de entradas/saídas digitais/analógicas com resolução de 14 bits, permitindo sua conexão diretamente com amplificadores de potência.

3. MATERIAIS MAGNETOESTRITIVOS

A descoberta do efeito da magnetoestrição é geralmente atribuído ao físico inglês do século XIX, James Joule (Ashley, 1998). O termo Magnetoestrição refere-se ao fenômeno físico de variação dimensional que ocorre em materiais ferromagnéticos na presença de um

campo magnético imposto (efeito Guillemin), assim como, à mudança na magnetização do material ferromagnético quando submetido a tensões (esforços) mecânicas (efeito Villari).

Este fenômeno do estado sólido é resultado da rotação de pequenos volumes magnéticos chamados de “domains”, de forma a alinhar todos os momentos magnéticos atômicos envolvidos, ao campo magnético externo, provocando tensões internas no material, as que resultam na expansão positiva do material na direção do campo magnético (The International Nickel Comp. Inc., 1960).

Assim sendo, os materiais magnetoestritivos podem atuar de forma a transformar energia elétrica de baixa tensão numa ação mecânica. Da mesma forma, quando usados como sensor, convertem uma deformação mecânica num sinal elétrico equivalente.

Nos últimos anos este tipo de material tem sido objeto de diversos estudos na área militar, inicialmente desenvolvidos como parte de pesquisas em novos materiais para sonares, e mais recentemente na sua utilização como atuador, no direcionamento de armas teleguiadas e estruturas espaciais. Em sensores de posição sem contato, dotados de eletrônica apropriada, é possível alcançar resoluções inferiores a 1 µm (Machine Design, 1995). Embora, neste estudo, seja de interesse a qualificação deste tipo de material como parte de atuadores, as características dos sensores proporcionam um bom parâmetro dos resultados a serem obtidos com este tipo de atuadores.

A Figura 4 mostra a curva característica do desempenho típico de uma liga magnetoestritiva que pode ser encontrada comercialmente (Etrema Terfenol-D), assim como as suas propriedades físicas. Este atuador é constituído basicamente por uma liga de material ferroso contendo térbio, disprósio e ferro ($Tb_{.3} Dy_{.7} Fe_{1.35}$) fabricado pela Edge Technologies, Inc. (1994) Pode-se notar que a presença de pre-carregamento atua de forma a aumentar a capacidade de carga do material e em campos magnéticos menores, tende a produzir uma resposta mais linear. Através da montagem de ímãs permanentes ou pela inclusão de uma componente DC na corrente da bobina, um deslocamento do ponto de operação é provocado, gerando um semi-ciclo positivo de expansão e um semi-ciclo negativo de contração do material. Entre as características que fazem deste tipo de atuador uma solução a ser destacada, podem ser citadas à alta repetibilidade de expansão, capacidade de fornecer altas forças, ampla Largura de Banda, alta tolerância a variações ambientais, entre outras.

Seu elevado desempenho, fazem deste tipo de atuador uma excelente alternativa para microposicionadores, controle de vibrações, fontes sísmicas, “shakers”, entre outras das muitas aplicações possíveis.

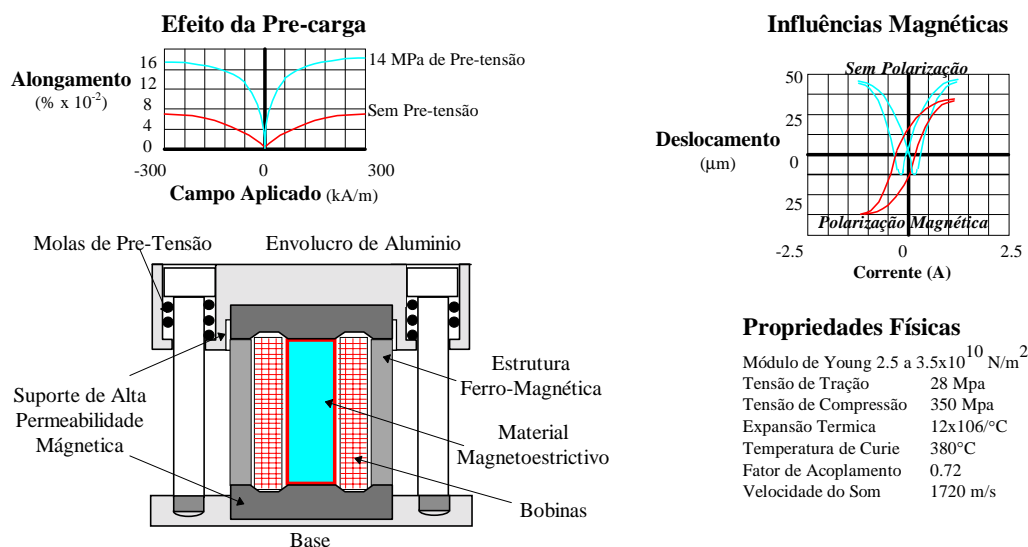


Figura 4 - Características técnicas de atuador magnetoestritivo (Edge, 1994)

Uma vez que atuadores magnetoestríctivos possuem alta repetibilidade, porém com presença de histerese, nos sistemas de posicionamento de precisão é necessário o uso de elementos sensores de posição para a realização de uma malha fechada de controle de posição, cuja unidade de processamento poderá ser um microcomputador.

Atualmente, posicionadores lineares baseados em magnetoestríctores vem sendo objeto de estudo na Europa e no Japão objetivando sua utilização em posicionadores (e.g., correção de ferramentas de corte, entre outros). Devido a sua alta velocidade de expansão (na ordem de 1 m/s), posicionamentos obtida pelo controle de corrente na bobina, aliada a sua maior densidade de energia, fazem deste tipo de atuador economicamente competitivo com piezoelétricos e *vice-coil*, especialmente em frequências de 150 a 2000 Hz.

4. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Neste trabalho são apresentadas duas metodologias de projeto de sistemas de controle, as quais podem ser aplicadas tanto a sistemas lineares como também a sistemas não lineares com parâmetros que podem ou não variar. A primeira baseia-se na utilização de lógica difusa (FL - *fuzzy logic*) e a segunda em redes neurais artificiais (ANN - *artificial neural networks*).

4.1 Lógica difusa

FL vem sendo largamente utilizada no projeto de controladores de sistemas que possuem não linearidades e parâmetros variáveis, e cuja modelagem é difícil de ser obtida analiticamente. Sua idéia básica é a de projetar um controlador que atue no sistema tomando suas próprias decisões a partir do conhecimento de determinadas variáveis, como faria um operador experiente no processo. Assim, os controladores difusos baseiam-se em regras de decisões heurísticas (ditadas pela experiência), cujo método de inferência consiste de regras lógicas do tipo “*if A then B*”. As variáveis de entrada e de saída podem ser consideradas através de termos lingüísticos como ‘grande’, ‘médio’, ‘pequeno’, e representadas em conjuntos difusos os quais exprimem o grau de importância de uma variável determinística em termos difusos. Esta base de conhecimento e seu mecanismo de inferência, são então combinados com os dados obtidos a partir dos sensores, afim de produzir uma saída desejada ou adequada de controle.

As variáveis do controlador podem ser o erro da variável a ser controlada e a sua variação com relação à variável no passo anterior. A variável de saída pode ser a saída do controlador ou o incremento a ser dado a este. Sua implementação é realizada ou utilizando diretamente a base de regras e o mecanismo de inferência, ou utilizando uma tabela de consulta bi-dimensional.

4.2 Redes neurais artificiais

ANN é conhecida hoje como uma das técnicas mais fascinantes para modelar o cérebro humano em todas as suas particularidades, como por exemplo, no processamento complexo de informações, em processamentos altamente não lineares e em paralelo, e tolerância a falhas. Este desafio foi estudado por vários projetistas de sistemas de controle e diversas aplicações têm sido propostas. Uma rede neural multi-camadas com arquitetura do tipo *feed-forward* é um sistema composto por entradas, saídas e muitos elementos de processamento simples e semelhantes, todos interconetados através de parâmetros internos chamados de pesos (Nguyen e Widrow, 1990). Após configurada com o número de camadas, número de neurônios por camada e suas funções de transferência, isto sendo determinado por um processo de tentativa e erro, o objetivo é treiná-la, isto é, ajustar os seus pesos, de forma a alcançar um comportamento desejado de entrada/saída. O treinamento, por sua vez, pode ser

realizado utilizando o algoritmo *back-propagation* do erro, originalmente criado para redes multi-camadas e funções de transferência não lineares diferenciáveis. Este método é normalmente baseado na diminuição de gradiente do erro (*steepest descent*) onde os parâmetros, tais como pesos e *biases*, são movidos na direção oposta ao gradiente do erro.

Outro processo de aprendizagem está baseado na aproximação de Levenberg-Marquardt. Este método é mais potente e apresenta melhor desempenho usando o método de Newton. A regra de aprendizagem para atualização dos pesos é dada por:

$$\Delta \mathbf{W} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{e} \quad (1)$$

onde \mathbf{J} é a matriz Jacobiana das derivadas de cada erro para cada peso, μ é um escalar e \mathbf{e} é um vetor erro. Se μ é pequeno, a equação (1) torna-se o método de Gauss-Newton que é mais rápido e preciso perto do erro mínimo (Matlab, 1995). Assim, o objetivo é alterar μ de forma a trabalhar ou com Gauss-Newton ou *steepest-descent* (quando o erro aumenta, μ aumenta e $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ torna-se desprezível e o treinamento é realizado usando $\mu^{-1} \mathbf{J}^T$ que é o *steepest-descent*. De outra forma, μ é diminuído).

No mapeamento de uma tabela de consulta de um controlador difuso, tem-se como objetivo utilizar uma ANN afim de evitar um processo de busca e interpolação. O objetivo é treinar a rede neural usando Levenberg-Marquardt de forma a encontrar um conjunto de pesos que minimizam um índice de desempenho dado por:

$$PI = E \left(\left\| E_{x,y}^{des} - E_{x,y}^k \right\|^2 \right) \quad (2)$$

onde E é o operador esperança estatístico

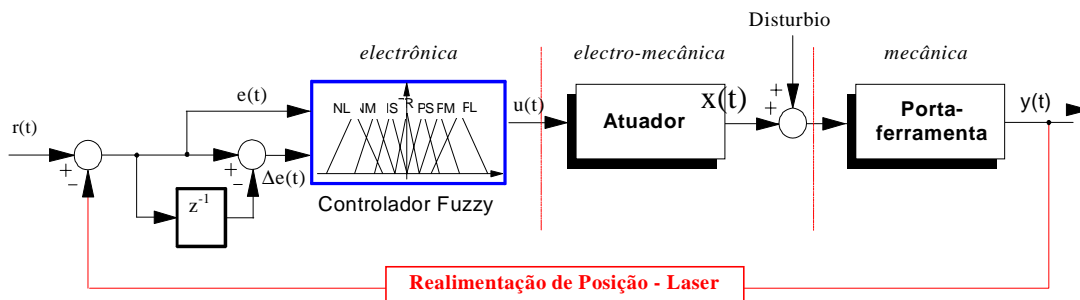


Figura 5. - Sistema de Controle de Posição Utilizando Controlador Difuso

5. DISCUSSÕES

O Diagrama de blocos da Figura 5 mostra a estrutura do sistema dinâmico. Este sistema pode ser dividido basicamente em duas partes: o controlador digital e a planta, a qual é formada pelos elementos restantes do sistema (sistema eletro-mecânico). Na planta duas partes podem ser diferenciadas claramente, uma correspondente ao atuador e a outra aos elementos mecânicos moveis, assim como o elemento sensor de posição.

Considerando o sistema regulador baseado em FL, as variáveis de entrada são **Error** e **Δerror**. As variáveis de saída são Δu . **Error** representa o afastamento do atuador com relação à posição desejada e **Δerror** representam **Error**(k) - **Error**(k-1), para cada tempo de amostragem. As funções de pertinência para estas variáveis foram adotadas como sendo triangulares, segundo (Santoro, 1997). Cinco variáveis lingüísticas foram consideradas para **Error**, **Δerror** e Δu , sendo definidas por **NG** (negativo grande), **NP** (negativo pequeno), **ZE** (zero), **PP** (positivo pequeno) e **PG** (positivo grande). A base de conhecimento definida para o controle do atuador foi então baseada em um conjunto de 25 regras.

Para o controlador neural baseado no mapeamento de uma tabela de consulta FL, a qual corresponde a uma matriz 9x9 com dois vetores de entrada 9x1. Inicialmente, utilizou-se uma rede com duas camadas (neurônios tangente sigmoidais na camada intermediária e lineares na de saída) e o algoritmo *back-propagation* implementado com *steepest-descent* (com *momentum* e taxa de aprendizagem variável). Este método, embora seja sensível a pequenos detalhes na superfície do erro, não alcançou o valor desejado do erro quadrático médio (SSE) em qualquer dos casos considerados. Foi utilizado então, o método de Levenberg-Marquardt que mostrou-se extremamente rápido alcançando erros extremamente baixos (ordem de 10^{-6}). Para alguns casos, dependendo das condições de inicialização, a rede perdeu por completo a capacidade de generalização. No presente caso, foram necessários 18 neurônios na camada intermediária, 130 épocas de treinamento, $\mu = 1.1e-7$ e SSE = 0,0001. Os resultados com numero menor de neurônios na camada intermediária não foram satisfatórios pois, apesar de atingir SSE pequenos, apresentou péssimas características de generalização apresentando respostas pouco satisfatórias.

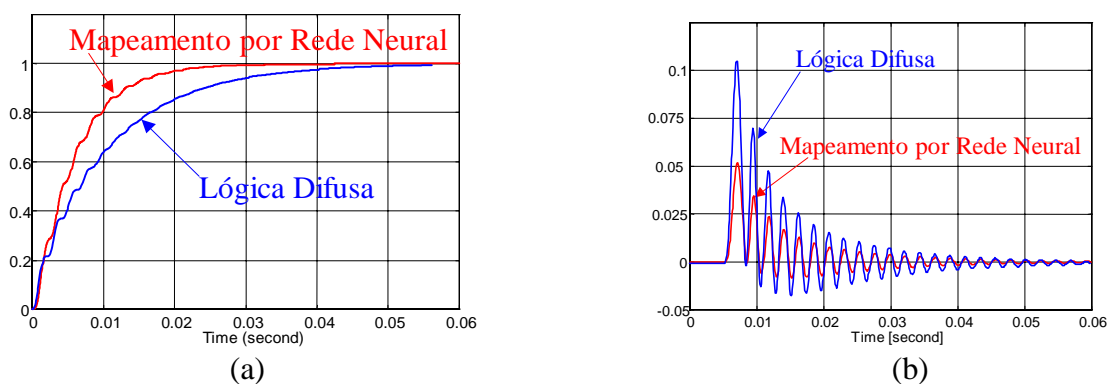


Figura 7 – (a) Resposta no tempo para uma excitação em degrau unitário e (b) Rejeição de perturbações tipo impulso unitário.

Nas Figuras 6 (a) e (b), pode-se notar que o comportamento dinâmico da planta foi satisfatório uma vez que as respostas foram extremamente rápidas e sem *overshoot*. Obtendo respostas semelhantes para um mesmo tipo de excitação. Por outro lado, as respostas no tempo para o controlador difuso foram satisfatórias, apesar da presença de um pequeno *erro de regime*. Alterações nas regras e nas funções de pertinência poderiam torná-las ainda mais rápidas. As respostas no tempo para o controlador neural baseado em FL, usando o método de Levenberg-Marquardt foi extremamente satisfatória e com desempenho superior ao FL puro.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho procurou mostrar o desenvolvimento de um sistema microposicionador para ser utilizado na usinagem com ferramenta de diamante, o qual utiliza as características de micro-deslocamento dos atuadores de estado sólido (atuadores magnetoestrictivos). Foram também apresentadas as aplicações de duas metodologias de projeto de sistemas de controle: lógica difusa (fuzzy logic - FL) e redes neurais artificiais (*artificial neural networks* - ANN). Com FL, as respostas foram satisfatórias, apesar do pequeno erro de regime. O que se destaca é que a metodologia de projeto é extremamente simples, principalmente quando se tem um programa de cálculo. O controlador neural foi apresentado de forma a ser utilizado no mapeamento de uma tabela de consulta FL. O regulador resultante parece ser muito conveniente e robusto atingindo os objetivos de resposta rápida, *overshoot* nulo e erro de regime desprezível. A flexibilidade oferecida foi adequada para a presente aplicação. Suas vantagens são: - a não necessidade de definir um modelo matemático da planta; o controlador

possui habilidade operacional satisfatória melhorando suas características de desempenho na presença de condições ambientais não propícias; e o processamento de informações é mais rápido quando comparado com controladores convencionais. O método de Levenberg-Marquardt mostrou-se mais potente e rápido do que *steepest-descent*.

6. REFERÊNCIAS

- Ashley, S., 1998, Magnetostrictive actuators, *Mechanical Engineering*, Vol. 120 (june), pp. 68-70.
- Campos Rubio, J. et al.; 1997, A Micropositioning Device Using Solid-State Actuators for Diamond Turning Machines. *Proceeding of the SPIE*, Vol. 3044. San Diego, pp.317-326.
- Dow, T.; Miller, M. & Falter, P., 1991, Application of fast tool servo for diamond turning of nonrotationally symmetric surfaces, *Precision Engineering*, Vol. 13, N°4, p. 243-249.
- Edge Technologies, Inc., 1995, *Extrema Terfenol-D Magnetostrictive Actuators* (catalog), Ames, IA.
- Gee, A. E.; Mccandlish, S. G. & Puttick, K. E., 1989, On-axis interferometric measurement for tool positioning in ultraprecision ... *Proceeding of the SPIE*, Vol. 1121. pp. 74-80.
- Kim, J-D. & Kim, D-S., 1996, Surface characteristics of magnetic-disk cutting using a single-crystal diamond ... *Journal of Materials Processing Technology*, No. 59, pp. 303-308.
- Machine Design Magazine*; 1995, *Basics of Design Engineering - Motion Control / Components*", Reference Volume, april.
- Montanari, L.; Campos Rubio, J.; Duduch, J. & Porto, A., 1998, Projeto de um posicionador angular para mecânica de precisão. *Anales del VIII Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica*, Universidad de Concepción, Concepcion, Chile. pp. 61-66.
- Nguyen, D. & Widrow, B., 1990, *Neural Networks for Self-Learning Control Systems*, *IEEE Control Systems Magazine*, April, pp.18-23.
- Neural Network Toolbox*, 1995, For use with MATLAB® - The MathWorks, Inc.
- Santoro, F. et al., 1997, A Comparison of Two Laser Tracking System Regulators Based on Eigenstructure Assignment and Fuzzy Logic, *Anais do VII DINAME*, Mar.
- The International Nickel Company, Inc., 1960; *Magnetostriction*. New York.
- Tokhi, M.O. & Hossain, M.A., 1995, CISC, RISC and DSP Processors in real-time signal processing and control. *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 19, N° 5. pp. 291-300.
- Weck, M.; Luderich, J. & Wieners, A., 1992, High precision turning of hardened steel. *Proceeding ASPE - Annual Meeting*, Grenelefe, FL. pp 207-210.

SMART MATERIALS IN ULTRA-PRECISION POSITIONING

Abstract— In a general form, actual requirements as high performance and small sizes for mechatronic systems, has lead modern industry to design positioning systems with good characteristics of acceleration and positioning accuracy. By other way, the increasing demand of components with better metrological and finishing characteristics, as x-ray and infra-red lens, has allow the development of a number of types of micropositioning systems that are able to move machine elements in very small displacements with high level of accuracy. In this work it is proposed the use of a new type of actuator that applies the properties of electromagnetic strain of certain metallic joining (magnetostrictive actuators). It is also proposed the application of a digital control system that use a control algorithm which is based on fuzzy logic and artificial neural networks for the micropositioning control.

Keywords— Magnetostrictive Actuator, Fuzzy logic, Neural network, Precision positioning.