



## UM NOVO CONTROLADOR FUZZY PID ADAPTATIVO APLICADO AO CONTROLE DE SISTEMAS MECÂNICOS

### **Patrick Magalhães Cardoso**

Laboratório de Sistemas Mecânicos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia  
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Cep 38400.089 - Uberlândia, MG, Brasil  
patrick@mecanica.ufu.br

### **José Francisco Ribeiro**

jribeiro@mecanica.ufu.br

### **Rafael Luís Teixeira**

rafael@mecanica.ufu.br

### **Israel Jorge Cárdenas Nuñez**

icardenas@mecanica.ufu.br

**Resumo.** Neste trabalho é apresentado um controlador fuzzy adaptativo do tipo PID, onde tanto o controlador quanto o mecanismo de adaptação são baseados em lógica “fuzzy”, sendo a adaptação responsável pela sintonização “on-line” dos parâmetros de proporção,  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$ . Esta metodologia é aplicada no controle experimental de uma mesa vibratória de um grau de liberdade, sendo o esforço de controle aplicado por um atuador eletromagnético. O desempenho do método proposto é avaliado comparando-se seus resultados experimentais com os de um controlador PID clássico projetado a partir do modelo analítico do sistema mecânico. Foram realizados ainda, alguns ensaios experimentais variando-se alguns parâmetros do controlador, o que possibilitou avaliar a robustez e aplicabilidade do método. Este controlador fuzzy PID adaptativo apresentou excelentes resultados face à sua facilidade de projeto.

**Palavras-chave:** Fuzzy, PID, adaptativo.

## 1. INTRODUÇÃO

Os controladores do tipo PID clássicos representam uma excelente ferramenta de controle de sistemas mecânicos, tendo sua eficiência e estabilidade comprovada ao longo dos tempos. Para sistemas relativamente simples, cuja modelagem se dá facilmente, os controladores do tipo PID clássicos são extremamente atrativos em função de seu ótimo desempenho. A maior dificuldade de se projetar um controlador PID clássico está em se estabelecer o modelo do sistema mecânico, uma vez que de posse deste, o projeto do controlador em si não envolve dificuldades maiores. A utilização de controladores PID clássicos também é tentadora ao se trabalhar com sistemas mecânicos complexos tendo-se em vista seu excelente desempenho como controlador. Porém à medida que a complexidade do sistema mecânico é elevada, o projeto do controlador clássico fica inviável devido à dificuldade em se obter um modelo matemático para o sistema, às não linearidades presentes, etc.

Com o intuito de se eliminar, ou minimizar, a importância da modelagem matemática de sistemas mecânicos no projeto de controladores, diversos métodos de controle têm sido propostos tendo como base a lógica fuzzy introduzida por Zadeh (1965). A grande vantagem da utilização de

controladores que se baseiam na lógica *fuzzy* está em substituir a necessidade de modelagem matemática pela experiência humana a respeito do sistema a ser controlado. Outra atraente vantagem dos controladores *fuzzy* frente aos métodos clássicos já existentes, está no tempo de projeto do controlador que é reduzido, contribuindo assim para uma redução no custo final do controlador. Assim os controladores *fuzzy* vêm ganhando cada vez mais espaço tanto no universo acadêmico quanto no universo comercial devido à sua rápida concepção, a um baixo custo atendendo satisfatoriamente os requisitos impostos (Uhrig e Tsoukalas, 1997).

Diversos mecanismos de adaptação têm surgido com o intuito de minimizar a influência da experiência humana no projeto dos controladores *fuzzy*. Tais mecanismos vão de simples adaptações de parâmetros do controlador, controladores auto-sintonizados (Nuñez e Ribeiro, 2001; Uhrig e Tsoukalas, 1997), até a uma concepção quase automática e *on-line* do controlador, controladores auto-organizados (Park et al, 1995; Uhrig e Tsoukalas, 1997).

Com o objetivo de se aliar as vantagens dos controladores clássicos já consagrados com as vantagens dos novos controladores *fuzzy*, têm surgido diversos controladores *fuzzy* que se assemelham aos clássicos com estruturas e desempenho equivalentes. Neste caminho estão os controladores *fuzzy* do tipo PID. Golob (2001), apresenta diversas estruturas para controladores *fuzzy* do tipo PID mostrando vantagens e desvantagens da utilização de uma ou outra estrutura. Tang et al (2001) descrevem o projeto de um controlador *fuzzy* do tipo PI para o controle de um braço de robô flexível. Qiao e Mizumoto (1996) apresentam uma estrutura para um controlador *fuzzy* PID, sendo que para incrementar o seu desempenho é desenvolvido um mecanismo de sintonização de parâmetros semelhante a se sintonizar os parâmetros de proporção de um controlador PID convencional. Misir et al (1996) apresentam o projeto e análise de um controlador *fuzzy* PI+D, mostrando inclusive uma análise de estabilidade juntamente com simulações computacionais. Ketata et al (1995) apresentam estruturas para controladores *fuzzy*, onde estes podem trabalhar em paralelo com um PID convencional, como um supervisor do PID convencional ou como os únicos controladores do sistema. Mudi e Pal (2000) fazem a comparação entre um controlador PI convencional e um controlador *fuzzy* do tipo PI, sendo este auto-sintonizado pela adaptação de fatores de escala. Woo et al (2000) apresentam um novo controlador *fuzzy* PID, onde o controlador é auto-sintonizado modificando-se os fatores de escala através de uma função matemática do erro. Ying (2000) apresenta e analisa, comparando com um controlador PID convencional, um novo controlador de propósito geral do tipo PID realizado via lógica *fuzzy* que usa uma simplificação do método Takagi-Sugeno. Carvajal et al (2000) mostram um novo controlador *fuzzy* PID realizando também uma análise de estabilidade sobre o controlador proposto, que se mostra vantajoso em relação ao PID convencional tanto em performance quanto a incertezas dos parâmetros do controlador, principalmente sobre sistemas não lineares.

Neste trabalho é apresentado um controlador *fuzzy* adaptativo do tipo PID, onde tanto o controlador quanto o mecanismo de adaptação são baseados em lógica *fuzzy*, sendo a adaptação responsável pela sintonização *on-line* dos parâmetros de proporção,  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$ . Este método é aplicado ao controle de uma mesa vibratória de um grau de liberdade, sendo o esforço de controle aplicado por um atuador eletromagnético. Comprovando o desempenho do controlador proposto frente à facilidade e simplicidade de projeto, este é comparado com um controlador PID convencional projetado a partir do modelo analítico do sistema mecânico. São mostrados resultados experimentais obtidos pelo controlador PID convencional e pelo controlador *fuzzy* proposto. São comentados ainda, os experimentos de robustez realizados sobre o controlador proposto.

## **2. O CONTROLADOR FUZZY PID ADAPTATIVO**

### **2.1. A Estrutura do Controlador Fuzzy PID**

Existem várias estruturas para se compor um controlador *fuzzy* PID (Golob, 2001), sendo umas mais complexas que outras. Pode-se ter um controlador *fuzzy* PID com três entradas – erro, derivada do erro e integral do erro – no entanto a concepção das regras deste controlador é de difícil

realização uma vez que se torna complexo analisar as três variáveis de entrada em conjunto. Contornando esta dificuldade o controlador proposto trata cada entrada separadamente com três controladores *fuzzy* independentes de apenas uma entrada e uma saída, Fig. (1). O sinal de controle de cada um destes três controladores independentes é então somado e ponderado pelos fatores de proporção  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$ , Eq. (1).

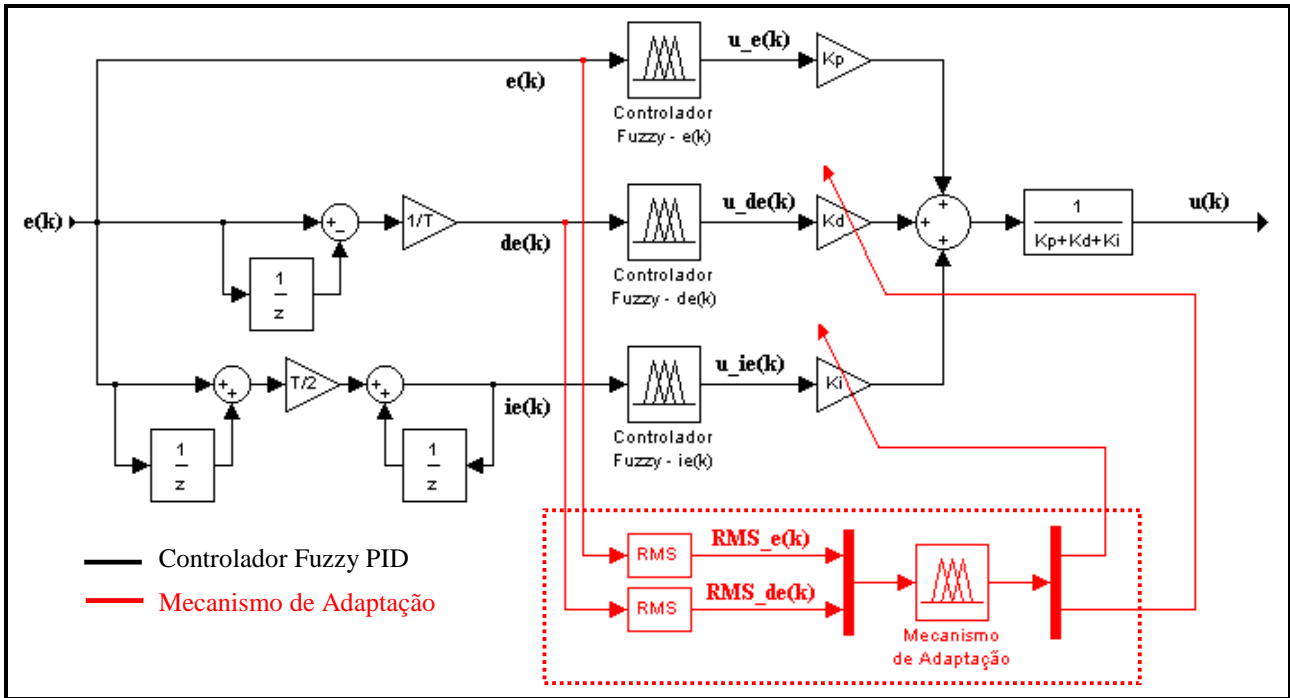


Figura 1. Estrutura do controlador *fuzzy* PID adaptativo.  
 Preto: controlador *fuzzy* PID – Vermelho: mecanismo de adaptação.

Para esta estrutura os universos de discurso, tanto de entrada como de saída, dos controladores *fuzzy* independentes são os próprios intervalos físicos que cada variável pode assumir dentro do processo de controle. Assim os fatores de proporção  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$  devem ser escolhidos adequadamente para que o controlador tenha um bom desempenho, uma vez que eles ditam a importância de cada variável em cada instante do controle.

Calculando-se o sinal de controle final através da média ponderada dos sinais de controle independentes, Eq. (1), o valor absoluto de cada fator de proporção perde a importância, tendo importância apenas a relação entre eles, o que ajuda muito ao se estabelecer o valor destes fatores. Além disto o sinal de controle final possui uma parcela referente ao erro, outra referente à derivada do erro e por fim uma referente à integral do erro, sendo que cada uma dá sua contribuição conforme o valor de seu respectivo fator de proporção.

$$u(k) = \frac{K_p \cdot u_e(k) + K_d(k) \cdot u_{de}(k) + K_i(k) \cdot u_{ie}(k)}{K_p + K_d(k) + K_i(k)} \quad (1)$$

Os controladores *fuzzy* independentes são do tipo *Sugeno* de ordem zero de apenas uma entrada e uma saída, com três funções de pertinência do tipo triangulares com centros igualmente espaçados para a entrada, e três parâmetros *Sugeno* para a saída. As entradas e saídas foram divididas em três conjuntos *fuzzy* cada: N – negativo; Z – zero; P – positivo. As funções de pertinência da entrada dos controladores podem ser visualizadas na Fig. (2), sendo que o universo do discurso se mostra normalizado no intervalo [-1,1] e os verdadeiros intervalos serão mostrados posteriormente. Os parâmetros *Sugeno* da saída dos controladores são -1.0, 0.0 e 1.0, também normalizados, representando as variáveis linguísticas N, Z e P, respectivamente. A base de regras também é

idêntica para os três controladores e pode ser visualizada na Tab. (1). Utilizando-se a estrutura mostrada na Fig. (1), a construção da base de regras se dá mais facilmente que em outras estruturas de controlador, visto que sua concepção consiste simplesmente em se verificar qual o sinal de controle a ser aplicado para um determinado sinal da entrada, como por exemplo, se o erro for negativo o sinal de controle deve ser positivo e assim por diante, conforme Tab. (1).

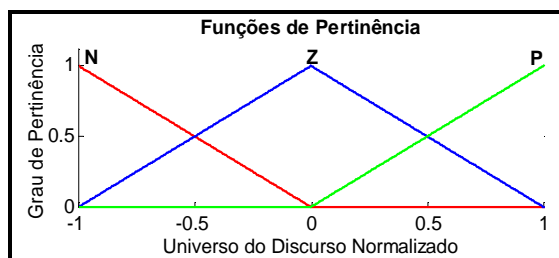


Figura 2. Funções de Pertinência da entrada dos controladores *fuzzy* independentes.

Tabela 1. Base de regras dos controladores *fuzzy* independentes.

Entrada (erro, derivada erro, integral erro)	Sinal de Controle
N	P
Z	Z
P	N

Maiores detalhes e informações sobre os controladores que utilizam lógica *fuzzy* podem ser encontrados em (Teixeira e Ribeiro, 2001; Nuñez e Ribeiro, 2001; Uhrig e Tsoukalas, 1997).

## 2.2. A Estrutura do Mecanismo de Adaptação

Ao se utilizar a estrutura do controlador *fuzzy* PID mostrada na Fig. (1) a principal dificuldade está em se estabelecer valores corretos para os parâmetros de proporção  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$ . Um mecanismo de adaptação, também baseado em lógica *fuzzy*, foi então criado visando eliminar esta dificuldade, embora seja perfeitamente possível a escolha destes parâmetros. Além de facilitar o projeto do controlador, o mecanismo de adaptação procura contornar variações dos parâmetros do sistema, sintonizando os fatores de proporção para se adequarem ao novo sistema modificado. A estrutura completa do controlador *fuzzy* PID adaptativo pode ser visualizada na Fig. (1), onde temos em destaque o mecanismo de monitoramento e adaptação.

O princípio básico do mecanismo de adaptação *fuzzy* proposto está em se monitorar algumas variáveis do sistema e a partir daí promover a modificação dos parâmetros de proporção. A modificação do parâmetro  $K_p$  não é muito significativa após o sistema ter iniciado o controle, e por isto ele não é adaptado, sendo mantido constante com valor igual à unidade.

O mecanismo de adaptação também é um sistema *fuzzy* do tipo Sugeno de ordem zero, sendo que as funções de pertinência de ambas as entradas do mecanismo de adaptação são do tipo triangulares igualmente espaçadas, definidas sobre um universo do discurso normalizado  $[0,1]$  apenas positivo, pois os valores RMS fornecerão apenas valores maiores ou iguais a zero. As variáveis de entrada foram divididas em três conjuntos *fuzzy* denominados P – pequeno, M – médio e G – grande e os parâmetros Sugeno de saída também receberam três denominações linguísticas, que são: D – diminui, M – mantém e A – aumenta, sendo que elas se referem a  $-1.0$ ,  $0.0$  e  $1.0$  no universo de discurso normalizado.

A lógica de sintonização se resume em avaliar o estado do sistema através dos valores RMS (“*root mean square*”) do erro e sua derivada calculados sobre os 10 últimos valores e impor uma adaptação dos fatores de proporção  $K_d$  e  $K_i$ , através dos fatores de adaptação  $KK_d$  e  $KK_i$ , respectivamente, fornecidos pelo mecanismo de adaptação. Como exemplo tem-se a seguinte regra *fuzzy*: *Se o RMS do erro é pequeno e o RMS da derivada do erro é grande então aumente  $K_d$  e diminua  $K_i$ .* A regra descrita anteriormente diz que caso a derivada esteja com um valor elevado e o erro esteja pequeno, então é necessário dar mais importância à parcela de  $u_{de}(k)$  – parcela derivativa e diminuir a importância da parcela  $u_{ie}(k)$  – parcela integral, Fig. (1).

O mecanismo de adaptação promove uma modificação nos parâmetros de proporção  $K_i$  e  $K_d$ , referentes à porção integral e à porção derivativa do controlador, enquanto são monitorados os

valores referente ao erro e à sua derivada. Isto é realizado desta maneira pois é mais fácil estabelecer um universo do discurso para o erro, que estabelecer um universo do discurso para a integral do erro. Além disto o sinal do erro promove uma previsão do que será o sinal de sua integral, de modo que é equivalente a utilização de uma ou outra entrada.

As saídas do mecanismo de adaptação,  $KK_d$  e  $KK_i$ , são fatores de adaptação que são somados ao fator de proporção adequado, promovendo a adaptação do PID. Os valores de  $KK_d$  e  $KK_i$  deverão ser relativamente pequenos, promovendo assim uma adaptação suave livre de mudanças muito bruscas nas constantes de proporção, o que poderia acarretar instabilidade ao sistema. Os valores iniciais das constantes de proporção bem como o universo do discurso de saída não influenciam muito no desempenho do sistema. Já o universo do discurso das entradas possui maior influência, pois é através dele que se define o quanto é *Grande*, *Médio* ou *Pequeno*. As fórmulas para a adaptação dos fatores de proporção são dadas pelas Eq. (2):

$$K_d(k) = |K_d(k-1) + KK_d(k)| \quad \text{e} \quad K_i(k) = |K_i(k-1) + KK_i(k)| \quad (2)$$

Toda a base de regras é construída intuitivamente apenas avaliando a quem se quer dar mais importância em determinado momento em função do estado do sistema. A base de regras do mecanismo *fuzzy* de adaptação pode ser vista na Tab. (2). Embora possua duas entradas e duas saídas, esta base de regras pode ser desacoplada em duas outras bases com duas entradas e uma saída cada.

Tabela 2. Base de regras do mecanismo de adaptação.

		Derivada do Erro					
		P		M		G	
Erro	P	$K_d - M$	$K_i - M$	$K_d - A$	$K_i - D$	$K_d - A$	$K_i - D$
	M	$K_d - D$	$K_i - A$	$K_d - M$	$K_i - M$	$K_d - A$	$K_i - D$
	G	$K_d - D$	$K_i - A$	$K_d - D$	$K_i - A$	$K_d - A$	$K_i - A$

### 3. O SISTEMA MESA VIBRATÓRIA

O sistema a ser controlado consiste de uma plataforma de alumínio montada sobre quatro lâminas metálicas flexíveis, configurando assim a mesa vibratória. Um sensor de proximidade fornece os sinais de deslocamento da mesa para um microcomputador através de uma placa de aquisição de sinais. Em função dos sinais adquiridos, o microcomputador envia através da placa de aquisição, um sinal de controle para o driver de corrente que, por sua vez, alimenta um atuador eletromagnético. Este atuador transforma os sinais de tensão em forças eletromagnéticas de controle aplicadas à mesa vibratória (Teixeira e Ribeiro, 2001; Ribeiro et al, 1996). Todo este ciclo de controle é realizado a cada 3 milissegundos. Na Figura (3) está representado o diagrama do processo de controle.

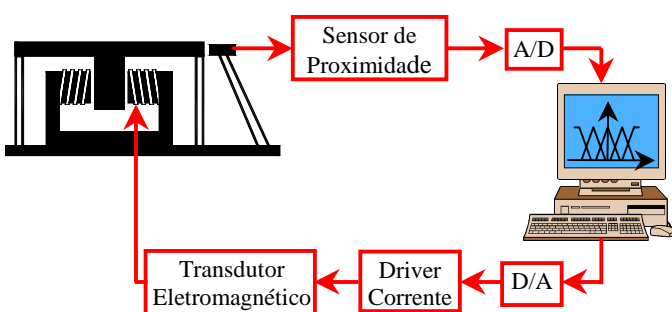


Figura 3. Diagrama do sistema de controle.

Tabela 3. Parâmetros físicos da mesa vibratória.

Frequência natural	77.5 [rad/s]
Amortecimento global	0.00707
Rigidez global	11377.882 [N/m]

Ribeiro et al (1996) desenvolveram o atuador eletromagnético e a sua eletrônica de acionamento, modelando todos os componentes do sistema eletromecânico. Posteriormente os parâmetros físicos da mesa vibratória foram novamente estimados experimentalmente por Abreu et al (1999) e são apresentados na Tab. (3).

#### 4. ANÁLISES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Vários ensaios experimentais foram realizados para comprovar a eficiência e aplicabilidade do método proposto. Alguns destes ensaios tiveram o objetivo de comparar o controlador *fuzzy* PID adaptativo com um controlador do tipo PID clássico projetado a partir do modelo analítico do sistema eletromecânico. Abaixo serão apresentados os resultados experimentais juntamente com os parâmetros utilizados no controlador *fuzzy*, que são os universos do discurso dos controladores independentes e do mecanismo de adaptação. Para simplificar a apresentação destes valores vamos adotar a seguinte simbologia mostrada na Tab. (4):

Tabela 4. Simbologia usada para os universos do discurso.

Notação	Universo do Discurso da Variável:
$range\_e$	de entrada “erro” do controlador independente referente ao erro
$range\_de$	de entrada “derivada do erro” do controlador independente referente à derivada do erro;
$range\_ie$	de entrada “integral do erro” do controlador independente referente à integral do erro;
$range\_u$	de saída de todos os controladores independentes (erro, derivada do erro e integral do erro);
$range\_RMS\_e$	de entrada “RMS do erro” do mecanismo de adaptação <i>fuzzy</i> ;
$range\_RMS\_de$	de entrada “RMS da derivada do erro” do mecanismo de adaptação <i>fuzzy</i> ;
$range\_KKd$	de saída “KKd” do mecanismo de adaptação <i>fuzzy</i> ;
$range\_KKi$	de saída “KKi” do mecanismo de adaptação <i>fuzzy</i> ;

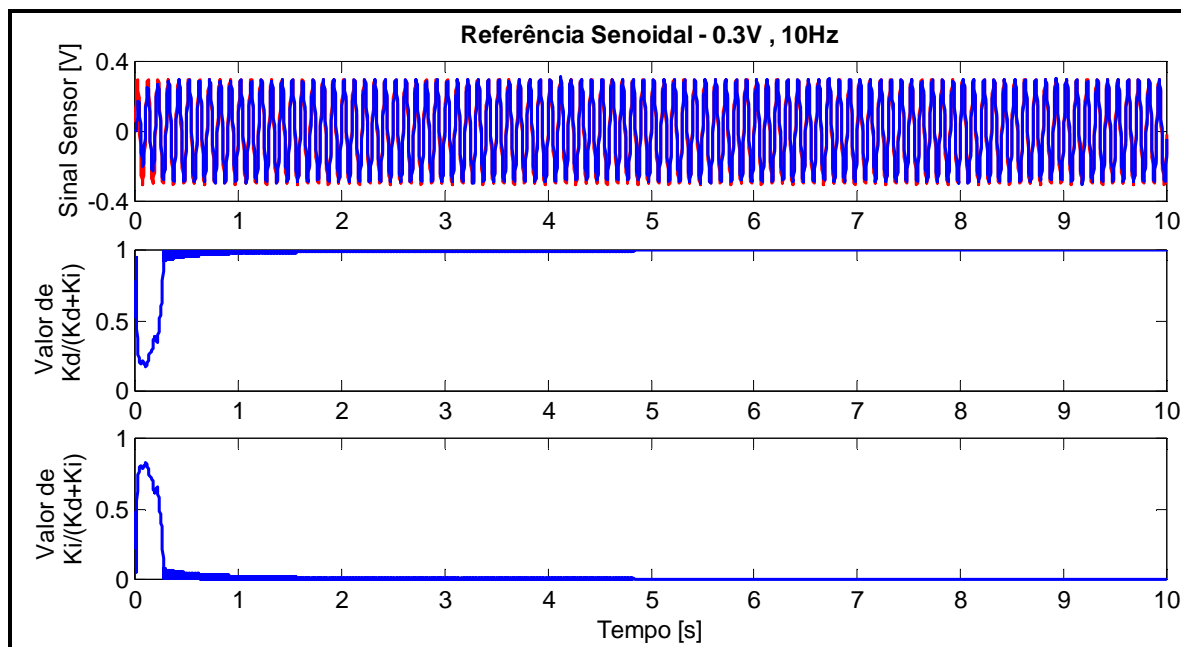


Figura 4. Controlador *fuzzy* PID adaptativo. Referência senoidal de amplitude 0.3V e frequência de 10Hz.

Na Figura (4) está mostrado o resultado experimental do controlador *fuzzy* PID adaptativo quando imposta uma referência senoidal de amplitude 0.3V (leitura do sensor de proximidade) e frequência de 10 Hz. Para este controlador tem-se os seguintes parâmetros:  $range\_e = [-0.3 \ 0.3]$  ,  $range\_de = [-10.0 \ 10.0]$  ,  $range\_ie = [-0.1 \ 0.1]$  ,  $range\_u = [-1.7 \ 1.7]$  ,  $range\_RMS\_e = [0 \ 0.06]$  ,



$range\_RMS\_de = [0 \ 0.1]$ ,  $range\_KKd = [-0.05 \ 0.05]$ ,  $range\_KKi = [-0.1 \ 0.1]$ . O controlador com estes parâmetros será denominado controlador 1.

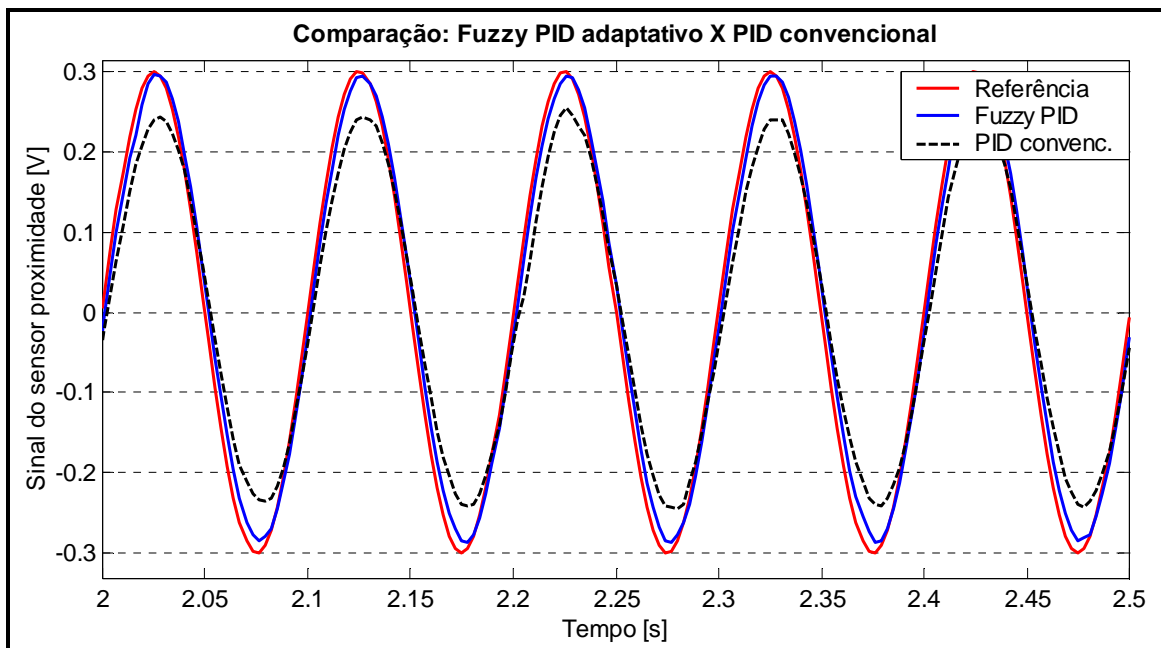


Figura 5. Comparação entre um controlador PID convencional e o controlador *fuzzy* PID adaptativo (controlador 1).

Para o controlador 1 todos os fatores de proporção,  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$ , tiveram valor inicial igual à unidade. Analisando a Fig. (4) pode-se perceber que este controlador *fuzzy* foi predominantemente derivativo, uma vez que o valor de ponderação de  $K_d$ , valor de  $K_d$  dividido pelo valor da soma de  $K_d$  e  $K_i$ , tende à unidade, enquanto o valor de ponderação de  $K_i$  tende a zero.

Na Figura (5) é mostrada uma comparação entre o controlador *fuzzy* PID adaptativo apresentado na Fig. (4), controlador 1, e um controlador PID convencional projetado a partir do modelo analítico do sistema, ambos acompanhando uma referência senoidal com amplitude de 0.3V e frequência de 10Hz. Para que possa ser realizada a comparação é mostrado apenas um intervalo de tempo de controle total que foi de 10 segundos.

Da Figura (5) nota-se que o controlador *fuzzy* PID adaptativo, controlador 1, teve uma melhor performance em relação ao PID convencional, uma vez que ele acompanha mais de perto a referência imposta além de apresentar uma menor defasagem em relação à referência.

Além da referência senoidal foi também imposta uma referência do tipo quadrada. Na Figura (6) pode-se visualizar o resultado experimental do controlador proposto ao se impor este outro tipo de referência. Para acompanhar esta referência foram realizadas modificações nos parâmetros do controlador *fuzzy*, uma vez que o intervalo físico das variáveis foi alterado. Este controlador será denominado controlador 2 e possui os seguintes parâmetros:  $range\_e = [-0.2 \ 0.2]$ ,  $range\_de = [-5.0 \ 5.0]$ ,  $range\_ie = [-0.01 \ 0.01]$ ,  $range\_u = [-1.7 \ 1.7]$ ,  $range\_RMS\_e = [0 \ 0.06]$ ,  $range\_RMS\_de = [0 \ 0.1]$ ,  $range\_KKd = [-0.05 \ 0.05]$ ,  $range\_KKi = [-0.1 \ 0.1]$ .

Para o controlador 2 todos os fatores de proporção,  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$ , tiveram valor inicial igual à unidade. Através da Fig. (6) pode-se perceber que o controlador proposto se comportou muito bem ao acompanhar a referência quadrada imposta, e que o valor de ponderação de  $K_d$  e de  $K_i$  convergem para um relação praticamente constante, sendo esta relação de 0.25 para o  $K_d$  e 0.75 para o  $K_i$ . Deve-se ressaltar aqui que a relação entre os valores de ponderação de  $K_i$  e  $K_d$  não é a mesma relação entre os universos do discurso de  $KKi$  e  $KKd$ . Esta relação entre os valores de ponderação está em torno de 3.0 e a relação entre os universos do discurso é de 2.0 (  $0.1/0.05$  ). Isto indica que o sistema tende a convergir para uma relação diferente da imposta pelo operador inicialmente.

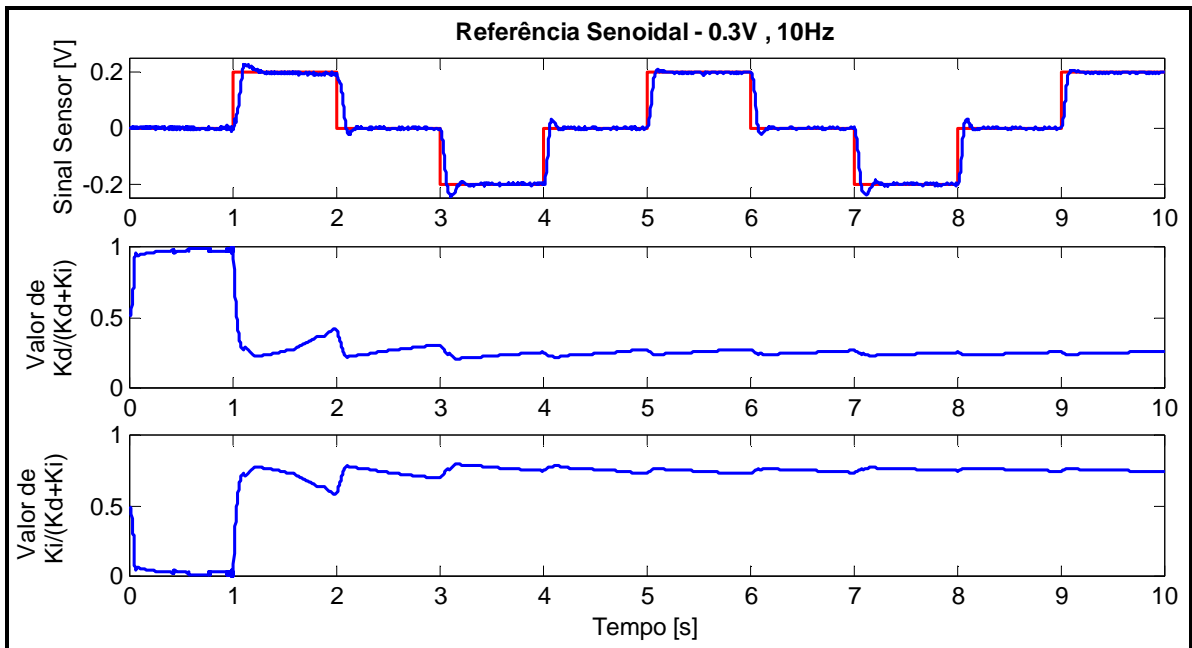


Figura 6. Controlador *fuzzy* PID adaptativo. Referência quadrada no intervalo  $[-0.2V, 0.2V]$ .

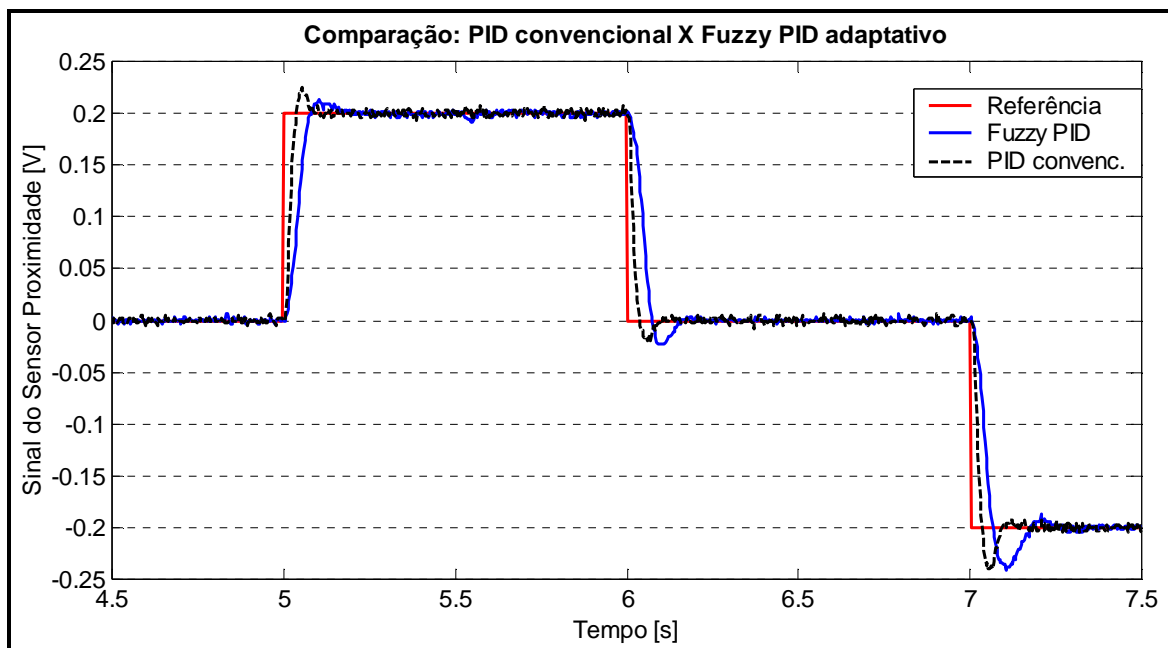


Figura 7. Comparação entre um controlador PID convencional e o controlador *fuzzy* PID adaptativo (controlador 2).

Na Figura (7) temos a comparação entre o PID convencional projetado a partir do modelo analítico do sistema e o controlador *fuzzy* PID adaptativo proposto, quando ambos estão submetidos a uma referência do tipo quadrada no intervalo  $[-0.2V, 0.2V]$ .

Observando-se a Fig. (7) nota-se que o desempenho do controlador PID convencional é ligeiramente superior ao controlador *fuzzy* PID adaptativo proposto, uma vez que ele apresenta um tempo de subida inferior e menor tempo de acomodação. No entanto em alguns casos o controlador *fuzzy* PID adaptativo apresentou menores valores de “overshoot”. Deve-se ressaltar aqui a facilidade de projeto do controlador proposto face ao PID convencional. Pode-se visualizar ainda uma pequena oscilação semelhante a um ruído no sinal do sensor de proximidade. Tal oscilação se deve exclusivamente à incapacidade da placa de aquisição fornecer uma boa resolução quando se



trabalha com sinais de tensão baixos como estes em torno de 200mV. Futuramente o sinal do sensor será amplificado antes de entrar na placa de aquisição para que este problema seja solucionado.

Foram realizados ainda ensaios experimentais de robustez sobre o controlador proposto, porém eles não serão mostrados aqui por questão de espaço. Foram variados os universos de discurso de saída do mecanismo de adaptação, intervalos de  $KK_d$  e  $KK_i$ , chegando a se impor um intervalo para  $KK_i$  10 vezes superior ao de  $KK_d$ , sendo que os demais intervalos permaneceram fixos e iguais aos do controlador 2. Mesmo neste novo intervalo o sistema se comportou semelhantemente ao mostrado na Fig.(6), inclusive com uma razão entre os valores de ponderação de  $K_i$  e  $K_d$  próxima à do controlador 2. Notou-se ainda nestes ensaios que o universo do discurso do fator de adaptação  $KK_d$  não poderia ser maior que o do fator  $KK_i$ , pois caso isto acontecesse o sistema divergia, provavelmente pelo fato de o valor da derivada do erro variar muito mais rapidamente que o valor do sinal do erro, e ao se permitir que o fator  $K_d$  mude mais rapidamente o sistema torna-se instável devido às mudanças bruscas em  $K_d$ .

O outro ensaio experimental de robustez realizado foi o de se variar o valor inicial dos parâmetros de proporção  $K_d$  e  $K_i$ . Mesmo variando-se fortemente os valores iniciais (indo de 0.01 a 100.0) o sistema convergia para uma relação entre os valores de ponderação de  $K_i$  e  $K_d$  próxima da obtida no controlador 2. Notou-se que o valor inicial de  $K_i$  não poderia ser muito superior ao de  $K_d$ , pois caso contrário o sistema divergia logo que o controle era ligado. Isto ocorre porque um alto valor de  $K_i$  em relação a  $K_d$  tende a levar o lugar das raízes para o semi-plano direito provocando a instabilidade do sistema.

## 5. CONCLUSÕES

O grande impasse de se projetar um controlador do tipo PID convencional está em se estabelecer o modelo analítico para o sistema a ser controlado. Com a utilização do método proposto esta etapa é eliminada e parte-se diretamente para o projeto do controlador, que se dá facilmente ao se conhecer o intervalo físico de variação das variáveis de projeto. Utilizando-se este controlador *fuzzy* PID adaptativo é possível se obter um controlador com um custo de projeto inferior ao do PID convencional, sendo que seu desempenho é semelhante e em alguns casos superior.

Quanto ao esforço computacional durante o processo de controle, o controlador *fuzzy* necessita de maior capacidade computacional que o PID convencional, que pode ser implementado digitalmente a partir da equação diferença do controlador. Porém os cálculos realizados pelo *fuzzy* adaptativo não requerem muito esforço computacional, uma vez que os controladores são do tipo Sugeno, as funções de pertinência do tipo triangulares e a base de regras sempre de ordem reduzida.

Outro aspecto atraente diz respeito quanto a incertezas assumidas pelas variáveis do controlador. Em um controlador PID convencional pequenas mudanças no valor das constantes de proporção podem levar o sistema ao caos, enquanto o controlador proposto se mostrou relativamente robusto sobre este aspecto, uma vez que suas variáveis de projeto podem assumir valores sobre um certo intervalo de incerteza enquanto o desempenho do controlador é pouco, ou nada, alterado.

## 7. REFERÊNCIAS

- Abreu, G. L. C. M., Ribeiro, J. F., 1999, “Amortecedores Ativos de Vibrações Baseados em Controladores Fuzzy”, 4º SBAI – Simpósio de Automação Inteligente, SP-Brasil, pp 376-381.
- Carvajal, J., Chen G. e Ogmen H., 2000, “Fuzzy PID Controller: Design, Performance, Evaluation, and Stability Analysis”, Information Sciences, Vol. 123, pp 249-270.
- Golob, M., 2001, “Decomposed Fuzzy Proportional-Integral-Derivative Controllers”, Applied Soft Computing, Vol. 18, pp 1-14.
- Ketata, R., Geest, D. e Titli, A., 1995, “Fuzzy Controller: Design, Evaluation, Parallel and Hierarchical Combination with a PID Controller”, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 71, pp 113-129.
- Mudi, R. K. e Pal, N. R., 2000, “A Self-Tuning Fuzzy PI Controller”, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 115, pp 327-338.

- Misir, D., Malki, H. A. e Chen, G., 1996, "Design and Analysis of a Fuzzy Proportional-Integral-Derivative Controller", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 79, pp 297-314.
- Núñez, I. J. C. e Ribeiro, J. F., 2001, "O Uso De Controladores Fuzzy Adaptativos, Implementados Em Microcontroladores, No Controle De Vibrações De Sistemas Mecânicos". Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.
- Park, Y. M., Moon, U. C. e Lee, K. Y., 1995, "A Self-Organizing Fuzzy Logic Controller for Dynamic Systems Using a Fuzzy Auto-Regressive Moving Average (FARMA) Model", IEEE Transactions on Fuzzy systems, Vol. 3, No. 1, pp 75-82.
- Qiao, W. Z. e Mizumoto, M., 1996, "PID Type Fuzzy Controller and Parameters Adaptive Method", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 78, pp 23-35.
- Ribeiro, J. F., Lépoire, F. P. e Ribeiro, P. E., 1996, "O Uso de Atuadores Magnéticos no Controle Ativo de Vibrações de Sistemas Mecânicos", IV CEM-NNE, Brasil, pp 439-444.
- Tang, W. Chen, G. e Lu, R., 2001, "A Modified Fuzzy PI Controller for a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 118, pp 109-119.
- Teixeira, R.L. e Ribeiro, J. F., 2001, "Uma Metodologia de Projeto de Controladores Híbridos Inteligentes com aplicações no Controle Ativo de Vibrações Mecânicas ". Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.
- Uhrig, R.E. and Tsoukalas, L.H. , 1997, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering". John Wiley & Sons, New York, USA.
- Woo, Z.W., Chung, H.Y. e Lin, J. J., 2000, "A PID Type Fuzzy Controller with Self-tuning Scaling Factors", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 115, pp 321-326.
- Ying, H., 2000, "Theory and Application of a Novel Fuzzy PID Controller Using a Simplified Takagi-Sugeno Rule Scheme", Information Sciences, Vol. 123, pp 281-293.

## **A NEW ADAPTIVE FUZZY PID CONTROLLER APPLIED TO MECHANICAL SYSTEMS CONTROL**

### **Patrick Magalhães Cardoso**

Laboratório de Sistemas Mecânicos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia  
Av. João Naves de Ávila, 2160 – Campus Santa Mônica – Cep 38400.089 - Uberlândia, MG, Brasil  
patrick@mecanica.ufu.br

### **José Francisco Ribeiro**

jribeiro@mecanica.ufu.br

### **Rafael Luís Teixeira**

rafael@mecanica.ufu.br

### **Israel Jorge Cárdenas Nuñez**

icardenas@mecanica.ufu.br

***Abstract.** In this paper a PID type adaptive fuzzy controller is presented. The controller is constituted by an adaptation mechanism based on fuzzy logic theory. This mechanism tunes the control parameters ( $K_p$ ,  $K_d$  and  $K_i$ ) on line and the presented methodology is applied in experimental control of a vibratory system of one degree of freedom actuated by electromagnetic forces. The performance of the proposed technique is evaluated through experimental results, and compared with the classical PID controller projected by the using analytical model of the system. A set of experimental tests is made and its robustness is evaluated. The work concludes presenting the discussion about the experimental results and the potential of the proposed control technique.*

**Keywords.** Fuzzy, PID, adaptive.