



The 4th International Congress University Industry Cooperation

Congreso Internacional de Cooperación Universidad-Industria
Congresso Internacional de Cooperação Universidade-Indústria



CONTROLE DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA UTILIZANDO A LÓGICA FUZZY

Carlos Felipe Osés Rodriguez

carlos.oses@siemens.com

Application Center, Factory Automation, Automation Systems, Industry Automation.
Siemens LTDA

Av. Mutinga, 3800, Pirituba, São Paulo, SP - Brazil.

Paloma Maria Silva Rocha Rizol

Leonardo Mesquita

paloma@feg.unesp.br

mesquita@feg.unesp.br

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Guaratingueta,
Sao Paulo State University (UNESP)

Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - 12516-410, Guaratingueta-SP - Brazil

Resumo. A utilização de transportes cada vez mais velozes, aliados a fontes não poluentes de energia, é uma tendência na sociedade contemporânea. Seguindo essa tendência, foi desenvolvida a tecnologia de trens de levitação magnética – os chamados Maglev. Esse meio de transporte pode ser uma alternativa para o trem de alta velocidade que se cogita atualmente no Brasil, trem este que ligaria as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. Para o controle de tais trens, encontram-se algumas dificuldades, uma vez que o modelo de levitação magnética é altamente não linear. Uma boa alternativa às técnicas de controle convencional é a utilização de controladores Fuzzy, apropriados para lidar com não-linearidades. Neste artigo desenvolve-se, na ferramenta de simulação Simulink, um modelo não linear de levitação magnética de uma pequena bola de metal, com uma faixa de oscilação de trinta centímetros. Em seguida, um controlador Fuzzy é utilizado para o controle de tal modelo, também na ferramenta de simulação. O objetivo é mostrar a eficácia e relativa simplicidade dos controladores Fuzzy no controle de plantas que apresentam altos graus de não-linearidade.

Palavras-chave: Controlador Fuzzy. Levitação Magnética. Maglev. Controle não linear.



The 4th International Congress University Industry Cooperation

Congreso Internacional de Cooperación Universidad-Industria
Congresso Internacional de Cooperação Universidade-Indústria



CONTROL OF A MAGNETIC LEVITATION SYSTEM APPLYING FUZZY LOGIC

Resumo. *The use of faster and faster means of transport, associated with clean energy sources, is a trend in the contemporary society. Following this trend, the technology of magnetic levitation trains – the so called Maglev – was developed. Such means of transport may be an alternative to the high speed train that is considered to be used in Brazil, connecting the cities of São Paulo and Rio de Janeiro. In order to control such trains, some difficulties are found, since the magnetic levitation model is highly nonlinear. A good alternative to the conventional control techniques is to use Fuzzy controllers, which are appropriate to deal with nonlinearities. In this work, by using the Simulink simulation tool, a nonlinear model of the magnetic levitation of a small metal ball is developed, with an oscillation range of thirty centimetres. After that, a Fuzzy controller is employed to control this model, using the simulation tool as well. The aim is to show the effectiveness and relative simplicity of the Fuzzy controllers in the task of controlling plants which show a high degree of nonlinearity.*

Palavras-chave: *Fuzzy controller. Magnetic levitation. Maglev. Nonlinear control.*



1. INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial modificou drasticamente os meios de transporte do Homem: o advento do automóvel e do trem permitiu aos veículos aumentarem significativamente sua velocidade, sendo esta associada a energia e eficiência.

Uma das características da sociedade atual, criada pela ciência moderna, é o grande volume de transporte de informação, e a grande velocidade para tal: um novo conceito de velocidade foi criado nas mentes das pessoas, tornando-se uma tendência global.

A partir desse desejo da humanidade em ter transportes mais velozes, foi desenvolvida a tecnologia de trens de levitação magnética, os chamados Maglev, que deve ser considerado como um exemplo de meio de transporte moderno (Shanghai Maglev Transportation, 2005).

Desse modo, entende-se que o estudo dessa tecnologia, aliada a técnicas modernas de controle, como controladores *fuzzy*, é fundamental para o constante progresso e desenvolvimento dos meios de transporte contemporâneos.

O principal fator que motiva a execução deste trabalho é a oportunidade de verificação do desempenho de um controlador *fuzzy* numa planta com um elevado grau de não-linearidade, atuando como única forma de controle (Omideh, 2003). Neste trabalho desenvolveu-se um modelo não linear de um levitador magnético com uma ampla faixa de deslocamento, utilizando-se a ferramenta de *software Simulink*. A partir do modelo desenvolvido, efetuou-se o controle da planta do levitador utilizando-se um controlador *fuzzy*.

Na primeira etapa deste artigo é apresentado um resumo sobre a Lógica *fuzzy*. A segunda etapa consiste no desenvolvimento da planta a ser controlada: a de um levitador magnético. Por se tratar de uma planta não linear, existem duas formas de modelagem: a primeira, efetuando-se uma linearização em torno de um determinado ponto, e a segunda, e mais complexa, que utiliza o modelo não linear. Optou-se pelo uso do modelo não linear. A modelagem se deu utilizando-se diagrama de blocos no *Simulink*, a partir das equações matemáticas que regem o sistema e de características lógicas associadas ao mesmo.

A terceira etapa consiste na implementação do controlador no Matlab e conseqüente simulação, utilizando-se o modelo do levitador desenvolvido.

2. LÓGICA FUZZY

A lógica *fuzzy* foi desenvolvida por L. A. Zadeh em 1965. Em 1973, Mamdani utilizou lógica *fuzzy* para controlar um processo pela primeira vez, o que conduziu ao desenvolvimento de controladores *fuzzy* (Siemens, 2003). A princípio, a importância do trabalho de Zadeh não foi reconhecida. Apenas depois de 1988, quando cientistas e engenheiros japoneses puseram em prática a teoria de conjuntos *fuzzy*, é que as ferramentas *fuzzy* se tornaram de interesse mundial. A partir de 1991, a lógica *fuzzy* foi utilizada em diversas aplicações na Europa e nos Estados Unidos, sendo considerada atualmente uma metodologia confiável para a solução de problemas (Siemens, 2003).

Para uma melhor compreensão dos controladores *fuzzy* é necessário, primeiramente, conhecer os elementos que compõem tais controladores. A Figura 1 ilustra de uma maneira simples uma planta sendo controlada por um controlador *fuzzy*.

Observa-se na Figura 1 que o controlador é composto de 4 blocos: Fuzzificador, Máquina de Inferência, Base de Regras e Defuzzificador. Cada bloco será explicado em detalhes a seguir.

A **base de regras** é um conjunto de regras do tipo se-então. Contém a quantificação, na forma de lógica *fuzzy*, de como conseguir um bom controle (Passino et al., 1998).

A forma geral das regras é a seguinte: se (condição) e/ou (condição), então (ação), sendo a parte relativa às condições chamada de antecedente, os elementos e/ou chamados de termos e a



parte relativa à ação chamada de conseqüente (Passino et al., 1998). Cada regra da base de regras é representada no controlador através de uma quantificação *fuzzy* das variáveis lingüísticas (Passino et al., 1998). Essa quantificação é realizada utilizando-se as funções de pertinência (Passino et al., 1998).

O **fuzzificador** é o bloco responsável pela etapa de fuzzificação. Esta etapa consiste em converter os valores de entrada, advindos de fora do controlador, em conjuntos *fuzzy*, visando torná-los compatíveis com os conjuntos *fuzzy* dos antecedentes da base de regras (Driankov et al., 1996).

A **máquina de inferência** é a parte responsável por efetuar as tomadas de decisões, atuando na interpretação e aplicação de conhecimento com respeito à melhor maneira de se controlar a planta (Passino et al., 1998). A máquina de inferência possui basicamente duas tarefas: a primeira, determinar qual o grau de relevância de uma determinada regra no momento atual, com base nos valores das entradas; a segunda, tirar conclusões baseadas nas variáveis de entrada e na base de regras (Passino et al., 1998).

O **defuzzificador** é o bloco responsável pela etapa de defuzzificação. Essa etapa é responsável por converter os dados advindos da máquina de inferência em dados a serem transmitidos à entrada da planta de controle (Passino et al., 1998).

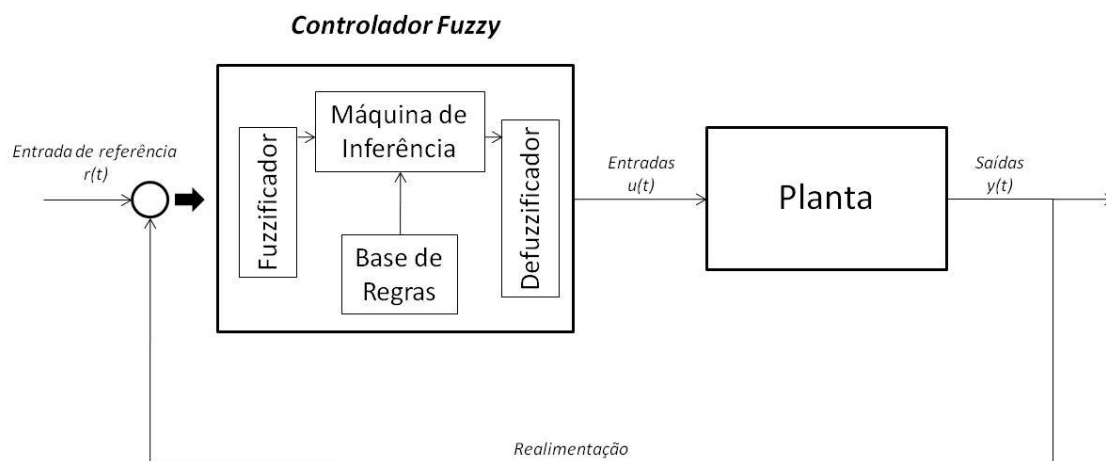


Figura 1- Planta controlada por controlador *fuzzy*.

3. MODELO DO LEVITADOR MAGNÉTICO

3.1 Descrição física

O modelo a ser controlado será, neste estudo, composto de:

- Uma bobina, que funcionará como um eletroímã, situada a 30 centímetros do chão.
- Uma bola de material ferromagnético, que será o objeto a ser levitado.
- Um conjunto fotoemissor/fotodetector, que servirá para fornecer a posição da bola.
- Um suporte, onde serão afixados o conjunto fotoemissor/fotodetector e a bobina.
- Um sistema de controle, que processará as informações e atuará na planta.

A Figura 2 apresenta o diagrama do corpo livre do levitador magnético.

As seguintes variáveis estarão envolvidas no controle:



- x , o vão de ar entre a bola e o eletroímã. A origem está no eletroímã.
- i , a corrente na bobina.
- m , a massa da bola.
- L_b , a indutância da bobina.

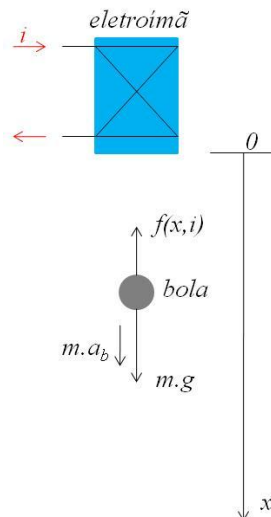


Figura 2- Diagrama de corpo livre para o sistema levitador magnético.

A bola, situada abaixo do eletroímã é separada deste por uma distância x e será atraída por ele, quando uma corrente i de intensidade apropriada passar pela bobina, através de uma força $f(x,i)$. Conforme o posicionamento da bola no espaço, um determinado fluxo de radiação infravermelha, advindo do foto-emissor, será bloqueado, o que será detectado pela cadeia de receptores. Essa informação será enviada ao sistema de comando, que atuará na planta conforme necessário.

Algumas considerações foram feitas na concepção deste modelo, visando sua simplificação. A primeira delas é que não se levou em consideração a resistência do ar. A segunda delas é que se considerou o ganho do conjunto sensor/detector como sendo igual a 1. Num caso real, esse ganho seria diferente de 1, o que faria necessária a compensação por parte de um amplificador ou dispositivo semelhante. A terceira delas é que se considerou que, no caso de a bola bater no chão ou no caso de a bola bater no eletroímã, a colisão seria totalmente inelástica, ou seja, a bola bateria e ficaria parada.

3.2 Modelo matemático do Levitador Magnético

De acordo com a Lei circuital de Ampère e a Lei de Faraday (Omideh, 2003), a magnitude da força $f(x,i)$ exercida em um material ferromagnético por um eletroímã por onde há circulação de uma corrente i é descrita por:

$$f_{x,i} = -\frac{i^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \quad (1)$$

Onde $L(x)$ é a indutância total do sistema, dada por:



$$L x = L_b + \frac{L_0 X_0}{x} \quad (2)$$

Onde L_b é a indutância da bobina, L_0 é a indutância acrescida pela presença do objeto flutuante e X_0 o ponto de equilíbrio. Tais parâmetros são determinados de acordo com a geometria e construção do eletroímã, e de acordo com o material flutuante. Esses parâmetros podem ser determinados experimentalmente.

Substituindo-se a Eq. (2) na Eq. (1), tem-se:

$$f_{x,i} = -\frac{i^2}{2} \frac{d}{dx} L_b + \frac{L_0 X_0}{x} \quad (3)$$

Realizando a derivada, resultará em:

$$f_{x,i} = \frac{i^2}{x} \frac{L_0 X_0}{2} \quad (4)$$

Este sistema é não linear, como mostra o termo quadrático da Equação (4).

Conforme mostra o diagrama de corpo livre da Figura 2, tem-se que a força da gravidade menos a força exercida pelo eletroímã será igual à força resultante na bola (que é regida pela 2ª Lei de Newton), o que em termos matemáticos vem a ser descrito através da seguinte equação:

$$mg - f_{x,i} = ma_b \quad (5)$$

Onde g é a força da gravidade, m a massa da bola e a_b é a aceleração da bola. Tem-se que:

$$a_b = \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (6)$$

Onde t é o tempo.

Assim, substituindo a Eq. (6) na (5) tem-se:

$$mg - f_{x,i} = m \frac{d^2(x)}{dt^2} \quad (7)$$

Substituindo-se a Eq. (4) na Eq. (7), tem-se:

$$mg - \frac{i^2}{x} \frac{L_0 X_0}{2} = m \frac{d^2(x)}{dt^2} \quad (8)$$

A Tabela 1 mostra os valores utilizados nesta modelagem. Considerou-se uma bobina distante 30 cm do chão, de modo a fazer com que o centro de massa da bola fique a 15 cm do chão. Os valores de m e de L_0 foram baseados no trabalho de Omideh (2003).

Tabela 1. Valores considerados na modelagem.

m	Massa da bola	0,050 kg (50 g)
g	Aceleração da gravidade	9,8 m/s ²
L_0	Indutância adicional devida à presença da bola	0,02 H (20 mH)
X_0	Ponto de equilíbrio	0,150 m (15 cm)



Substituindo os valores da Tabela 1 na Eq. (8), tem-se:

$$0,49 - 0,0015 \frac{i^2}{x} = 0,05 \frac{d^2(x)}{dt^2} \quad (9)$$

3.3 Implementação do modelo do levitador no Matlab

A implementação do modelo matemático se fez através de blocos lógicos, uma vez que uma função de transferência não se aplicaria no caso do modelo não linear.

Para a implementação do modelo, partiu-se, primeiramente, das equações matemáticas que regem o sistema. Essas equações forneceriam a resposta do sistema à entrada, advinda do controlador. Porém, as equações por si só não são suficientes para a implementação de um modelo que condiga com a realidade: alguns fatores de caráter lógico devem ser levados em consideração. No caso, por exemplo, de a bola atingir o chão, as equações não serão suficientes para distinguir a mudança no comportamento do sistema (isto é, que a velocidade e a aceleração da bola mudarão para zero): é necessária uma lógica adicional que faça com que, quando a bola chegue ao chão, a velocidade e a aceleração cheguem a zero.

A Figura 3 mostra o modelo implementado no *Simulink*. O modelo foi dividido em 7 setores. A seguir, serão explicados os blocos relativos às equações matemáticas, que descrevem o comportamento físico do sistema, de acordo com o diagrama de corpo livre da Figura 2. E também, serão explicados os blocos relativos à parte lógica do sistema, aos componentes que fazem com que o modelo se comporte de uma forma mais próxima à de um sistema real. E por fim, são apresentados o modelo completo da planta, com o controlador e o modelo do levitador magnético.

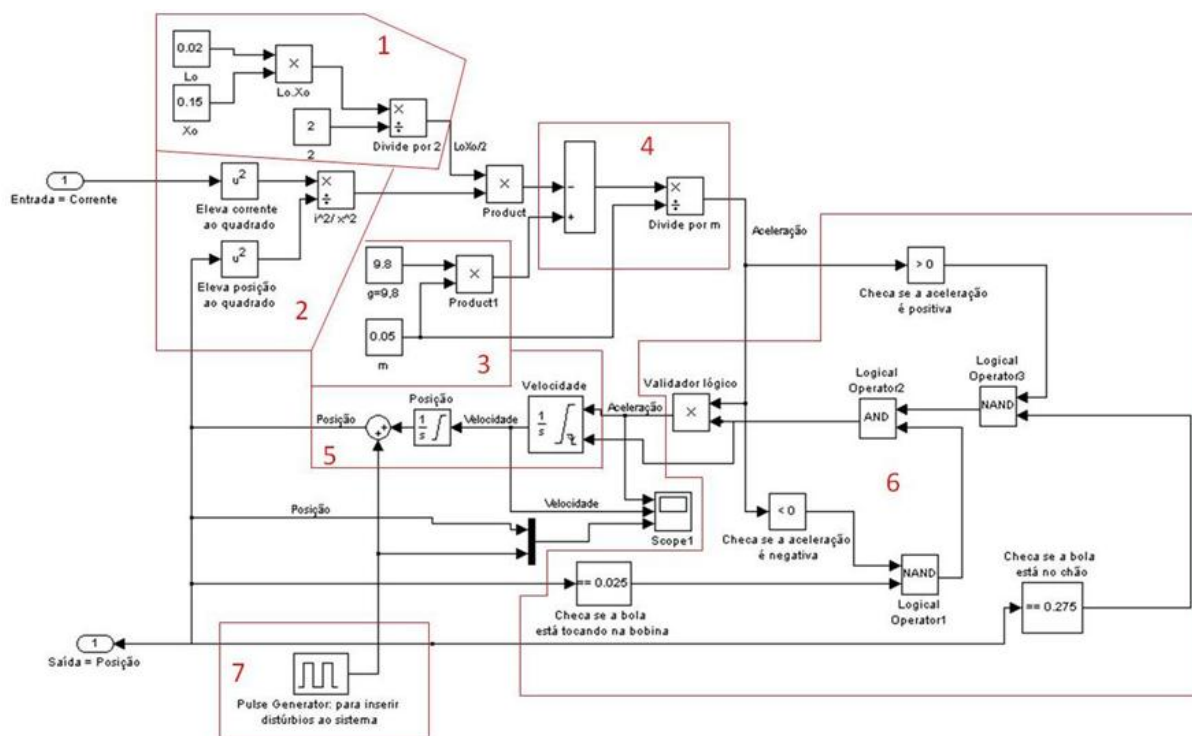


Figura 3- Modelo implementado no *Simulink* separado em setores.



Os blocos relativos às equações matemáticas são os blocos que correspondem àqueles dos setores de 1 a 5, da Figura 3.

O setor 1 corresponde ao termo $L_0 X_0/2$ da Equação (4), que é multiplicado pelo resultado do setor 2, que corresponde ao termo $(i/x)^2$ dessa mesma equação. Ao efetuar essa multiplicação, obtém-se por completo a equação (4), que corresponde à força gerada pelo eletroímã.

O setor 3 corresponde ao termo mg da Equação (8), isto é, a força que a gravidade exerce sobre a bola.

O setor 4 é responsável por obter na sua saída a aceleração da bola. Pode-se observar que na entrada do bloco somador temos o lado esquerdo da Equação (8), e na saída desse bloco, o lado direito. O bloco de divisão divide o termo resultante do bloco somador pela massa m da bola, fornecendo como saída a sua aceleração.

O setor 5 corresponde aos blocos integradores, que integram a aceleração 2 vezes, resultando na posição da bola, que é mandada para a saída e para o setor 2.

Os blocos relativos à lógica do comportamento do sistema são aqueles que se encontram nos setores 6 e 7 da Figura 3.

O setor 6 é responsável por fazer com que o sistema se comporte como um sistema real. Num sistema real, quando a bola atingir o chão, sua aceleração e sua velocidade irão a zero, ou seja, a bola não cairá mais, ficará parada. Analogamente, quando a bola atingir o eletroímã, a aceleração e a velocidade também irão a zero, ou seja, a bola não atravessará o eletroímã, ficará parada. Considerou-se, que a bola possui 5 cm de diâmetro, o que quer dizer que, quando a bola estiver no chão, seu centro de massa estará no ponto 0,275 m no sistema de coordenadas adotado, e a 0,025 m quando a bola estiver tocando o eletroímã.

Num sistema real, a bola estaria sujeita a perturbações externas de caráter diverso, como o vento, por exemplo, que resultariam em variações na posição da bola. O setor 7 corresponde a um gerador de sinais que simulará distúrbios na posição da bola.

O modelo do levitador magnético descrito foi utilizado na planta mostrada na Figura 4.

O valor de 0,15 é colocado como sendo o ponto de equilíbrio, e comparado com a saída do conjunto sensor de posição/amplificador, cujo ganho foi estabelecido como sendo 1. Essa comparação corresponde ao valor do erro.

No controlador *fuzzy*, são inseridos como entradas o erro e a variação do erro (que corresponde à velocidade da bola). Estes, antes de chegarem ao controlador, passam por blocos de normalização.

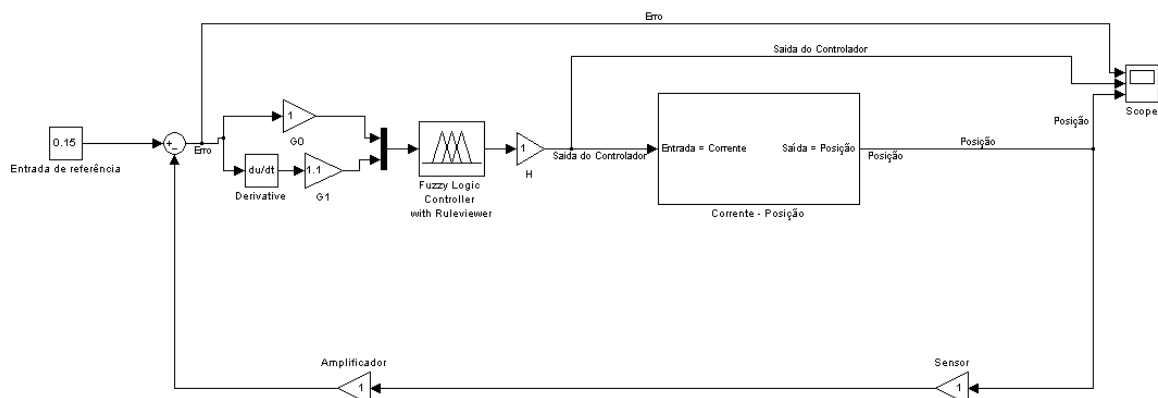


Figura 4- Modelo completo da planta de controle.



A saída do controlador *fuzzy* passa por um bloco de normalização, resultando na corrente a ser mandada para a bobina, e vai para a entrada do bloco do modelo do levitador, cuja saída é a posição da bola.

3.4 Implementação do controlador *fuzzy* no Matlab

Para implementar o controlador, foi utilizado o bloco de *fuzzy* do Matlab. Foi utilizado o tipo Takagi-Sugeno, com funções de pertinência triangulares na entrada e funções de pertinência de saída do tipo *singleton*. Foram utilizadas 2 entradas e uma saída: uma das entradas corresponde ao erro, ou seja, a diferença entre a posição desejada e a posição atual; a outra entrada, à variação do erro, isto é, à velocidade da bola; a saída, por sua vez, corresponde à corrente a ser enviada para a bobina do sistema de controle. A Figura 5 mostra a interface do aplicativo de *fuzzy* do Matlab.

Uma vez definidas as entradas e a saída, procedeu-se para a implementação das funções de pertinência de entrada e de saída. Foram utilizadas sete funções de pertinência para a variável *erro*, cinco para a variável *variação do erro* e sete para a saída. Esse alto número de funções de pertinência se deve ao fato da planta se tratar de um sistema altamente não linear, e com uma ampla faixa de posições possíveis para a bola. Tentou-se utilizar um controlador com 5 funções de pertinência para cada variável de entrada e 7 para a de saída, porém não foi possível efetuar um controle satisfatório da planta. As Figuras 5, 6 e 7 mostram as funções de pertinência das variáveis *erro*, *variação do erro* e *corrente de saída*, respectivamente, na interface do aplicativo *fuzzy* do Matlab. A forma de nomear tais funções de pertinência vem de abreviações de termos em inglês: *NB* (*Negative Big*) corresponde a um valor negativo de grande intensidade; *NM* (*Negative Medium*) corresponde a um valor negativo de intensidade média, *NS* (*Negative Small*) corresponde a um valor negativo de pequena intensidade; *ZO* (*Zero*) corresponde a um valor igual a zero, *PS* (*Positive Small*) corresponde a um valor positivo de pequena intensidade; *PM* (*Positive Medium*) corresponde a um valor positivo de intensidade média; *PB* (*Positive Big*) corresponde a um valor positivo de grande intensidade.

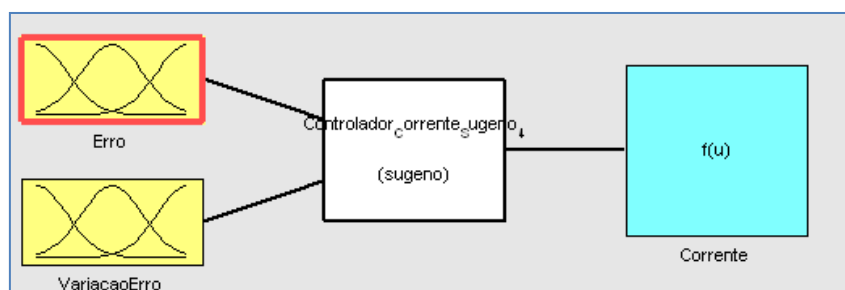


Figura 5- Interface do *toolbox fuzzy* do Matlab.



The 4th International Congress University Industry Cooperation

Congreso Internacional de Cooperación Universidad-Industria
Congresso Internacional de Cooperação Universidade-Indústria

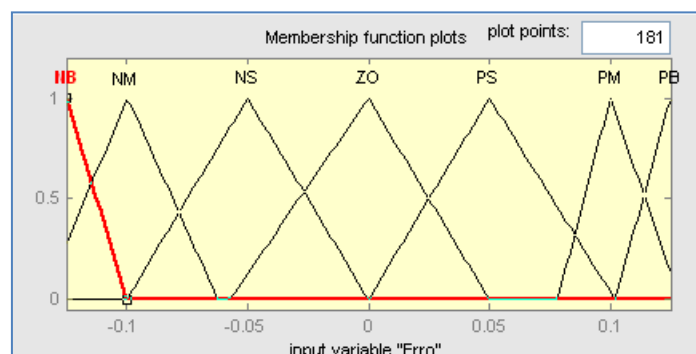


Figura 6- Funções de pertinência da variável erro no *toolbox fuzzy* do Matlab.

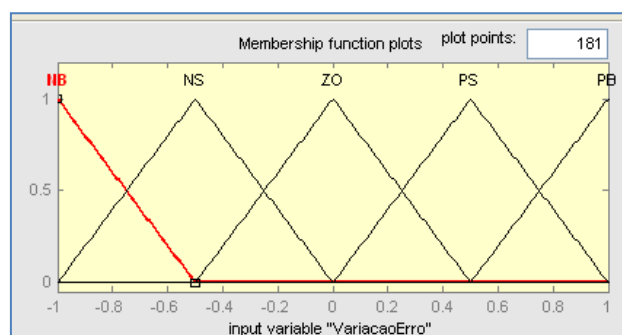


Figura 7- Funções de pertinência da variável variação do erro no *toolbox fuzzy* do Matlab.

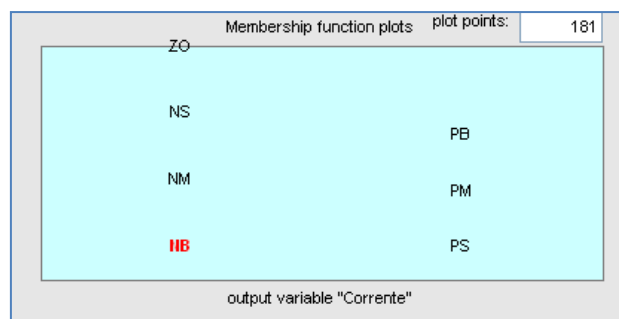


Figura 8- Funções de pertinência da variável corrente no *toolbox fuzzy* do Matlab.

Para a variável *erro*, a faixa de valores varia de -12,5 a + 12,5 cm (-0,125 a +0,125 metros), uma vez que a altura da bobina é 30 cm, o ponto de equilíbrio da bola está a 15 cm do chão e considerou-se que a bola possui 5 cm de diâmetro. Para a saída *corrente*, os valores utilizados são os apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. *Singletons* de saída para cada caso da variável *corrente*.

Variável	<i>Singleton</i> [A]
NB	0,000
NM	1,000
NS	1,420
ZO	2,711
PS	4,000
PM	4,500
PB	5,600



Para o caso da corrente, os valores foram obtidos da seguinte forma: para o caso *NB*, ou seja, de corrente mínima, o valor seria 0, uma vez que este seria o caso em que a bola estaria muito próxima à bobina; para o caso *ZO*, ou seja, o equilíbrio, utilizou-se a Equação (10), para o caso em que x é igual a 0,15 m e a bola está parada ($dx/dt = 0$):

$$0,49 - 0,0015 \frac{i^2}{0,15} = 0 \quad (10)$$

Onde encontrou-se o valor de i igual a 2,711 A. Para o caso de *PB*, utilizou-se novamente a Equação (10), para o caso do centro de massa da bola estar a 0,275 m da bobina (ou seja, no chão):

$$0,49 - 0,0015 \frac{i^2}{0,275} = 0 \quad (11)$$

E encontrou-se o valor de 4,970 A, que é o valor de corrente que iguala a força da bobina à força da gravidade para a situação em que a bola se encontra no chão. O valor utilizado, de 5,6 A, foi encontrado experimentalmente no *Simulink*, de modo a obter-se um melhor tempo de resposta sem *overshoot*.

Os demais valores (*PM*, *PS*, *NM* e *NS*) foram, a princípio, distribuídos de maneira uniforme entre *ZO* e os valores extremos respectivos. Os valores finais foram conseguidos após procedimentos experimentais no *Simulink*, de modo a obter-se um bom tempo de resposta sem *overshoot*.

Após a definição do número de funções de pertinência de entrada e de saída, o passo seguinte era a definição das regras. A Tabela 3 mostra as regras utilizadas na implementação do controlador, na forma matricial: cada combinação de valores de *erro* e *variação do erro* corresponde a um valor de corrente. Estas regras foram baseadas no comportamento do sistema, de acordo com a Figura 9.

Tabela 3. Regras utilizadas no controlador.

Var.erro/erro	NB	NM	NS	ZO	OS	PM	PB
NB	PB	PS	PS	PS	NM	NB	NB
NS	PB	PM	PS	PS	NS	NM	NB
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PB	PM	PS	NS	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	NS	NS	NS	NB

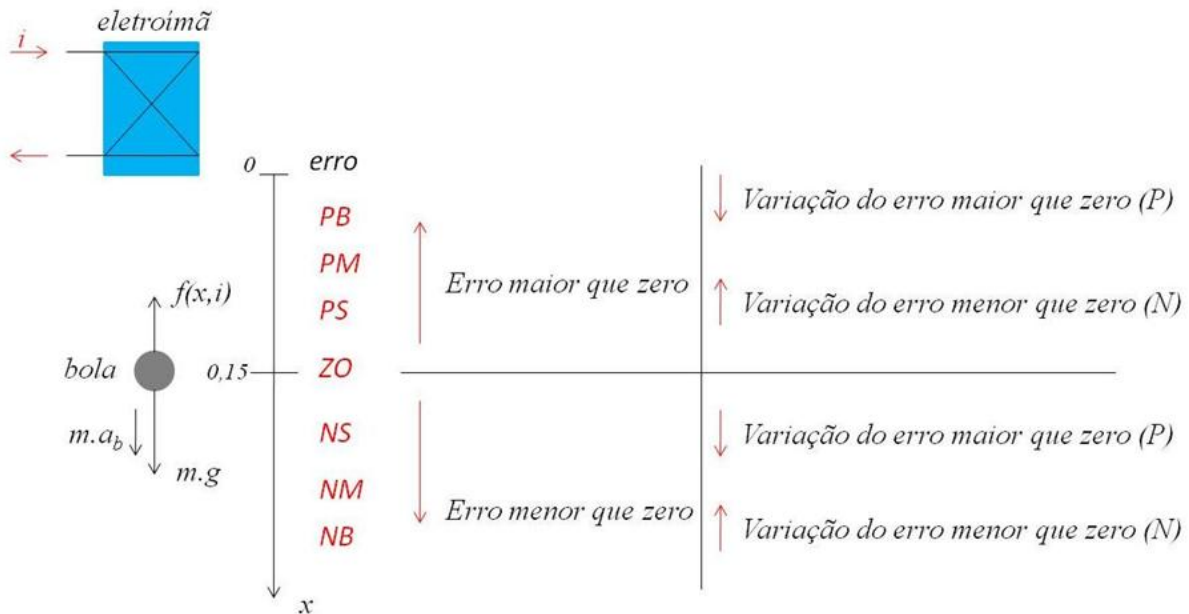


Figura 9- Comportamento do sistema.

Para os casos extremos, ou seja, quando o erro é *PB* ou *NB*, a ação do controlador independe da variação do erro. Para os demais casos, os valores de corrente dependerão de ambas as variáveis de entrada. Após implementado o controlador, obteve-se a superfície mostrada na Figura 10.

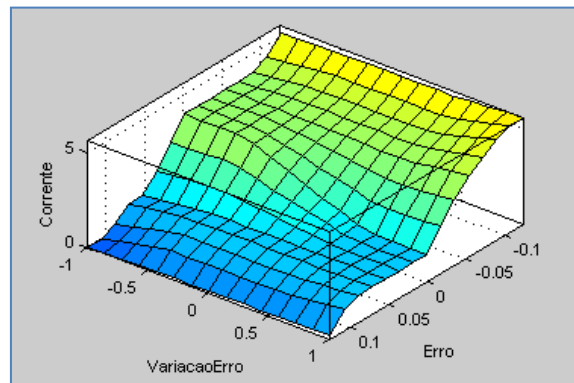


Figura 10- Superfície obtida do controlador.

A superfície obtida mostra que nos casos onde a bola está próxima a um dos extremos da faixa de atuação do controlador, a *variação do erro* pouco influencia na saída do controlador. Porém, quando a bola se encontra numa parte mais central da faixa, a influência da *variação do erro* na saída do controlador é significativa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico visa mostrar os resultados obtidos a partir da simulação do controlador *fuzzy* e do modelo não linear do levitador magnético da planta da Figura 4. Foram simuladas duas diferentes perturbações no centro de massa da bola: uma de 5 cm e outra de 12,5 cm, na planta. Essas



perturbações são provenientes do bloco gerador de sinais do setor 7, da Figura 3. No item 4.1, o controlador utilizado possuía 5 funções de pertinência para as variáveis de entrada, erro e variação do erro, e 7 para a variável de saída, corrente. O item 4.2 apresenta os resultados obtidos com um controlador com 7 funções de pertinência para as variáveis erro e corrente, e 5 para a variável variação do erro. Em todos os casos, a bola parte do chão, e a cada 1,5 segundos ocorre uma perturbação.

4.1 Controlador com 5 funções de pertinência para a variável erro

4.1.1 Controle com perturbação externa de 5 cm

Os resultados obtidos são mostrados a seguir. A Figura 11 mostra a variação do erro (metros) em função do tempo (s). A Figura 12 mostra a variação da posição (m) em função do tempo (s).

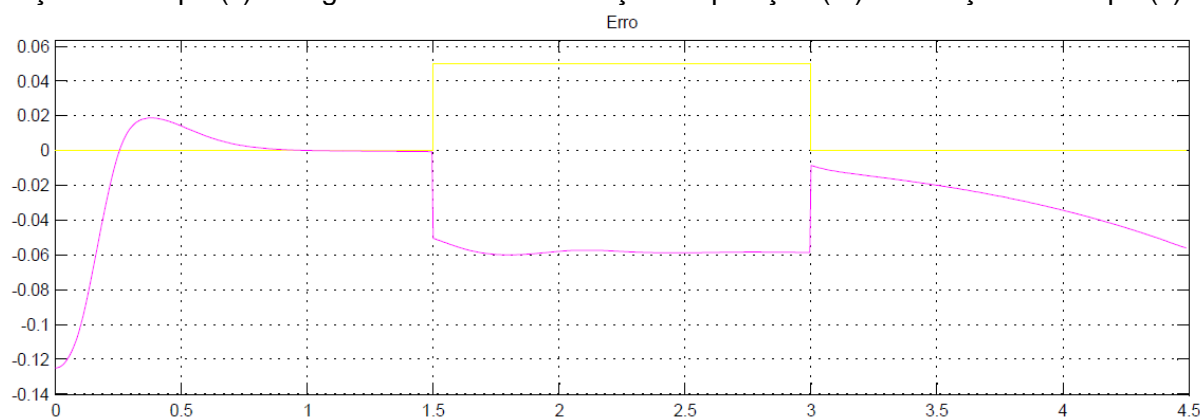


Figura 11- Erro (m) obtido para uma oscilação de 5,0 cm, com 5 funções de pertinência para a variável erro, em função do tempo (s).

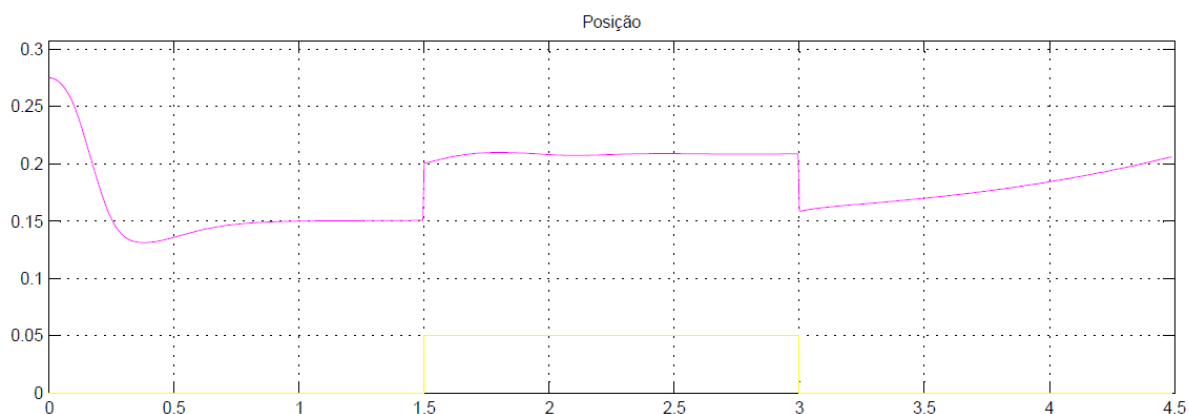


Figura 12- Posição da bola (m) obtida para uma oscilação de 5,0 cm, com 5 funções de pertinência para a variável erro, em função do tempo (s).

Pode-se notar que o controlador consegue tirar a bola do chão e levá-la para a posição de equilíbrio em pouco menos de um segundo, porém com ocorrência de *overshoot*. Já nos casos das perturbações, o controlador não consegue atuar de maneira satisfatória: a posição de equilíbrio não é atingida. Devido ao número de funções de pertinência da variável erro não ser suficiente, com a perturbação de 5 cm no tempo de 1,5 s, o controlador não consegue identificar a



necessidade de fornecer um maior valor de corrente, o qual seja apropriado para levar a bola para a posição de equilíbrio.

4.1.2 Controle com perturbação externa de 12,5 cm

Para uma perturbação de 12,5 cm, a faixa máxima de controle, tem-se os resultados mostrados a seguir. A Figura 13 mostra a variação do erro (metros) em função do tempo (s). A Figura 14 mostra a variação da posição (m) em função do tempo (s).

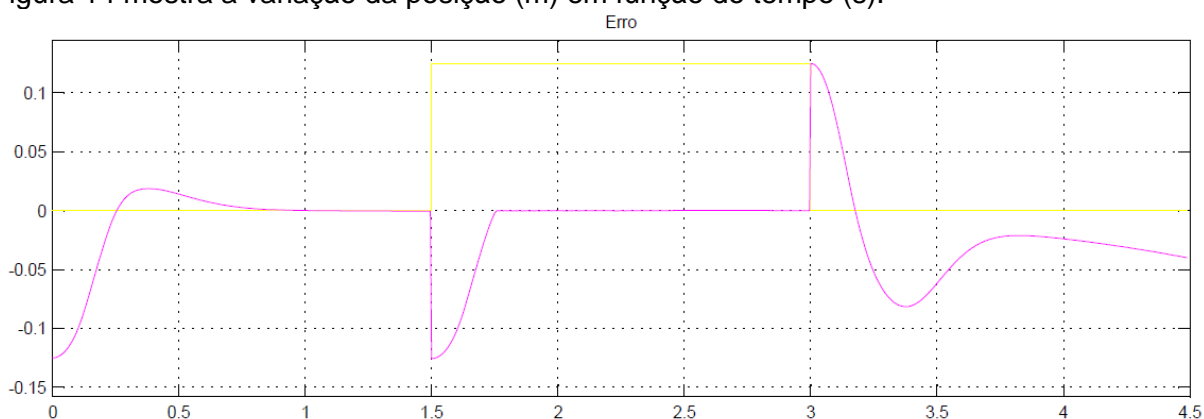


Figura 13- Erro (m) obtido para uma oscilação de 12,5 cm, com 5 funções de pertinência para a variável erro, em função do tempo (s).

Pode-se notar que o controlador consegue tirar a bola do chão e levá-la para a condição de equilíbrio, porém com a ocorrência de *overshoot*. No caso da perturbação para cima, o controlador já não atua de maneira satisfatória, não levando a bola para a posição de equilíbrio.

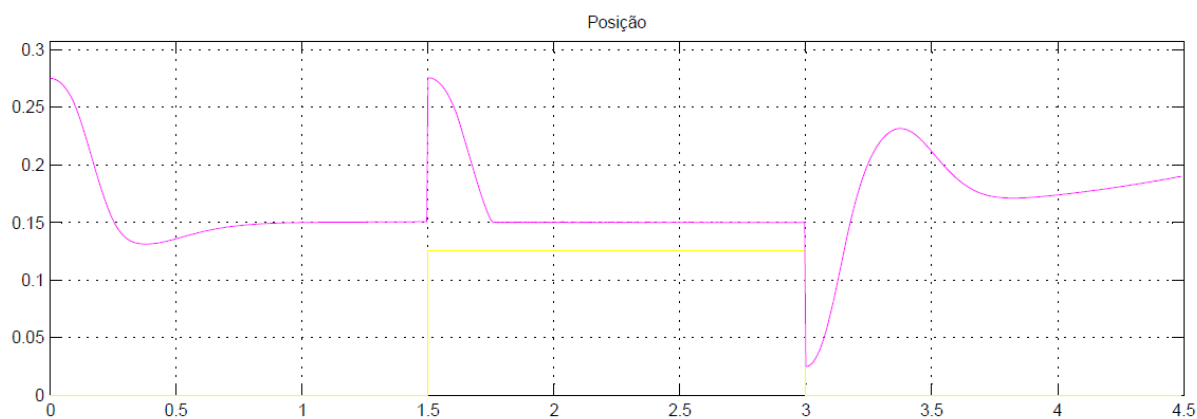


Figura 14- Posição da bola (m) obtida para uma oscilação de 12,5 cm, com 5 funções de pertinência para a variável erro, em função do tempo (s).

4.2 Controlador com 7 funções de pertinência para a variável erro

4.2.1 Controle com perturbação externa de 5 cm

Os resultados obtidos são mostrados a seguir. A Figura 15 mostra a variação do erro (metros) em função do tempo (s). A Figura 16 mostra a variação da posição (m) em função do tempo (s). É possível observar que o controlador levou a bola para o ponto desejado, a 15 cm do chão, nos 3



casos: quando a bola estava no chão, depois de uma interferência para baixo e depois de uma interferência para cima. No caso em que a bola estava no chão, o tempo para posicioná-la foi da ordem de 0,7 segundo. Nos casos de interferência externa, pode-se observar que o tempo de reposicionamento foi da ordem de 1,0 segundo. Pode-se observar também que em nenhum dos casos ocorreu *overshoot*, e o erro tendeu a zero em todos os casos.

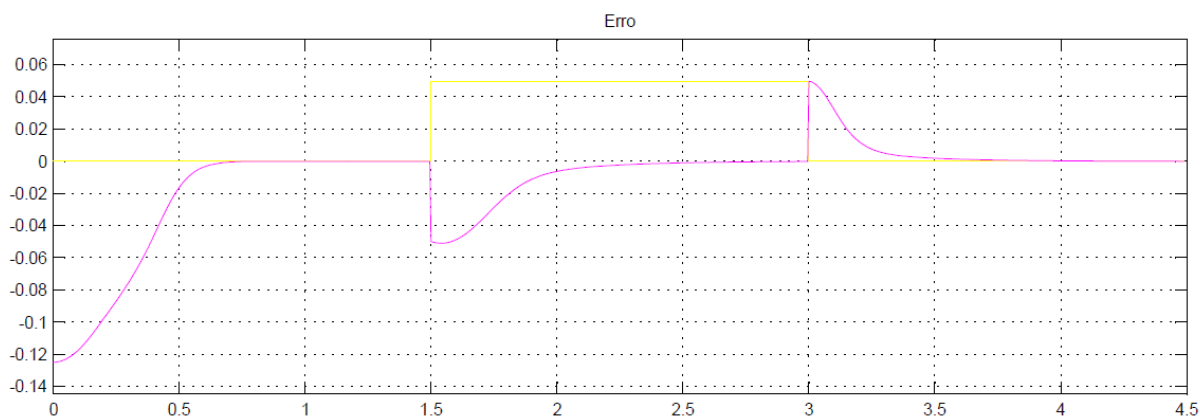


Figura 15- Erro (m) obtido para uma oscilação de 5,0 cm, com 7 funções de pertinência para a variável erro, em função do tempo (s).

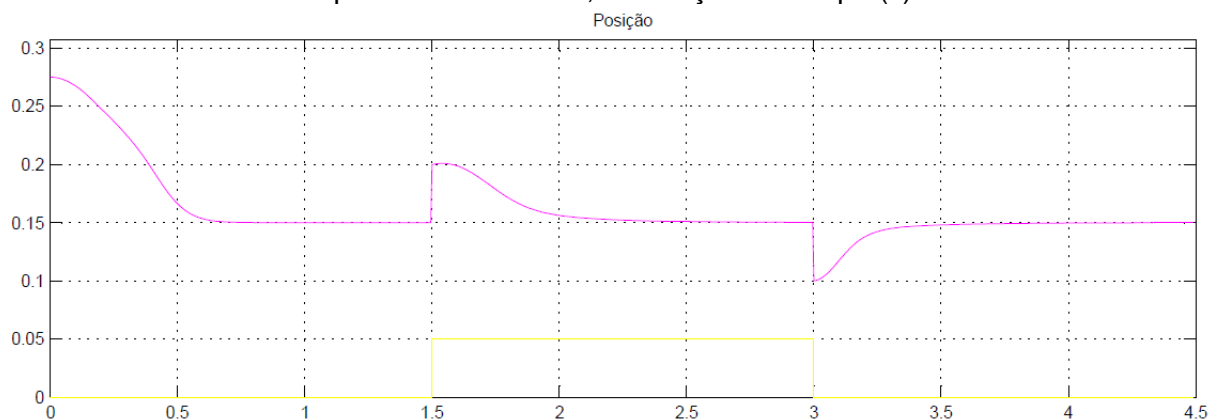


Figura 16- Posição da bola (m) obtida para uma oscilação de 5,0 cm, com 7 funções de pertinência para a variável erro, em função do tempo (s).

4.1.2 Controle com perturbação externa de 12,5 cm

Os resultados obtidos são mostrados a seguir. A Figura 17 mostra a variação do erro (metros) em função do tempo (s). A Figura 18 mostra a variação da posição (m) em função do tempo (s).

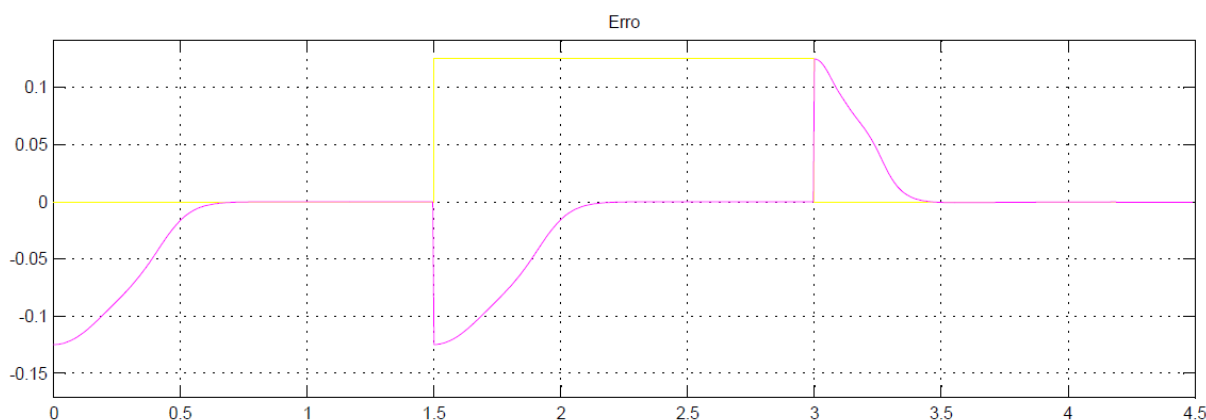


Figura 17- Erro (m) obtido para uma oscilação de 12,5 cm, com 7 funções de pertinência para a variável erro, em função do tempo (s).

Neste caso, nota-se pelas Figuras 17 e 18 que o controlador levou a bola do chão, a posição de repouso, até a posição de referência, em aproximadamente 0,7 segundo, sem ocorrência de *overshoot* com erro tendendo a zero. O mesmo ocorreu no caso em que se deu uma interferência para baixo. No caso em que a interferência foi para cima, o tempo que o controlador demorou para reposicionar a bola foi da ordem de 0,5 segundo, sem ocorrência de *overshoot*, e com o erro tendendo a zero.

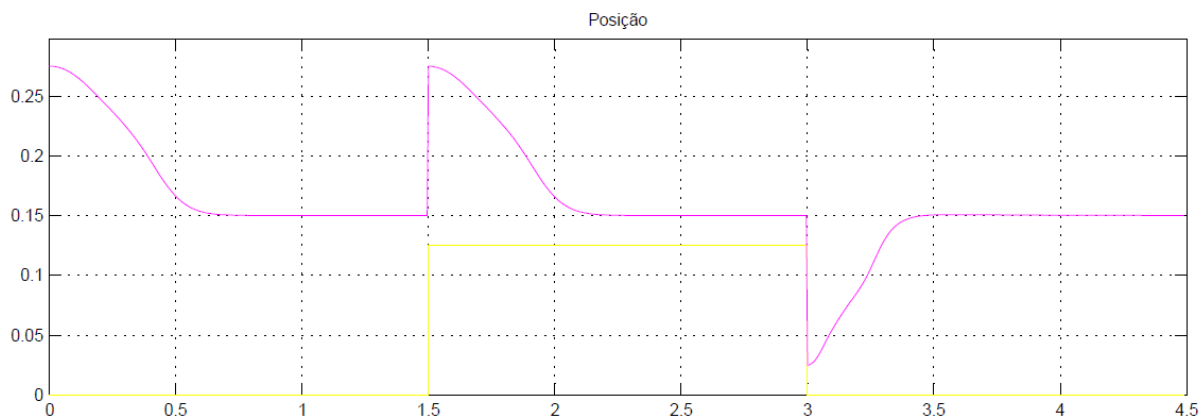


Figura 18- Posição da bola (m) obtida para uma oscilação de 12,5 cm, com 7 funções de pertinência para a variável erro, em função do tempo (s).

5. CONCLUSÃO

Com base no presente trabalho e nos resultados apresentados, foi possível observar a grande utilidade de controladores *fuzzy*, em especial em casos de controle de plantas não lineares, como a apresentada neste trabalho.

Além da relativa simplicidade no desenvolvimento (característica das ferramentas de controle *fuzzy*), o controlador desenvolvido para o controle do levitador magnético demonstrou grande robustez e exatidão, uma vez que atuou de maneira satisfatória em diferentes condições de perturbações externas, sempre com um bom tempo de resposta, considerando-se que se trata de um sistema mecânico, além de excelente exatidão: o erro tendeu a zero nas duas situações de perturbação, 5 cm e 12,5 cm.



The 4th International Congress University Industry Cooperation

Congreso Internacional de Cooperación Universidad-Industria
Congresso Internacional de Cooperação Universidade-Indústria



Tome-se por base o controlador utilizado no trabalho de Omideh (2003), onde o controlador *fuzzy* foi utilizado apenas para a eliminação do erro de uma planta (modelo linearizado do levitador magnético) controlada através de um controlador PID com bloco de compensação. Nele, o autor sugeriu a utilização apenas de um controlador *fuzzy* para o controle da planta, o que foi feito no presente trabalho. Ao comparar-se os resultados, pode-se ver a significativa diferença na faixa de aplicabilidade dos controladores: enquanto que no trabalho de Omideh (2003) o controle era realizado em uma oscilação de 1 mm, neste trabalho a faixa de oscilação do centro de massa da bola foi de 125 mm (12,5 cm), para cima e para baixo. Isso evidencia a vantagem da utilização de controladores *fuzzy* em plantas de complexa modelagem matemática e/ou alto grau de não linearidade.

Foi possível concluir, também, que com o aumento das funções de pertinência da variável erro, foi possível efetuar um controle mais eficiente e em toda a faixa de controle: com 5 funções de pertinência para a variável erro, o controlador conseguia levar a bola para a posição de equilíbrio apenas para os casos em que a bola estivesse em uma determinada região e ainda assim com a ocorrência de *overshoot*. Já com o uso de 7 funções de pertinência para a variável erro, o controle se deu em toda a faixa de controle, sem ocorrência de *overshoot* e com um bom tempo de resposta. Além disso, a corrente de saída do controlador com 7 funções de pertinência para a variável erro não apresentou variações abruptas consideráveis, o que nos leva à conclusão de que seria viável tecnicamente a confecção de um modelo real, uma vez que não haveria problemas de sobretensão nos terminais da bobina devidos a $dLi(t)/dt$.

Em síntese, pode-se concluir que, mesmo com um relativamente elevado número de regras e de funções de pertinência, o controlador desenvolvido mostrou-se uma solução relativamente simples e aparentemente viável tecnicamente para o problema do controle do modelo não linear, ao mesmo tempo em que os resultados por ele apresentados foram muito bons.

REFERÊNCIAS

- Driankov, D.; Hellendoorn, H.; Reinfrank, M. , 1996. *An introduction to fuzzy control*. Second Revised Edition. Berlin: Springer. 316 p.
- Omideh, Z.T. 2003. *Fuzzy Logic Control of a magnetic levitation system with hardware implementation*, Arlington. 111p.
- Passino, K. M.; Yurkovich, S. 1998. *Fuzzy Control*. Menlo Park: Addison Wesley Longman, Inc. 502 p.
- Shanghai Maglev Transportation Development Company Limited. *Principle of Magnetic Levitation*. 2005. Disponível em: <<http://www.smtdc.com/en/gycf3.asp>>. Acessado em novembro de 2010.
- Siemens AG, 2003. *FuzzyControl++ User's Manual*. Version 5.0. Erlangen. 191 p.