

CONTROLE EM TEMPO REAL DO SISTEMA PLATAFORMA-ESFERA, UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

WANDER FERREIRA MARTINS*, GERALDO MAGELA PINHEIRO GOMES*, ANTONIO EDUARDO
CARRILHO DA CUNHA*

*SE/3 - Instituto Militar de Engenharia
Praça General Tibúrcio, 80 CEP 22290-270
Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Emails: wander_fm@yahoo.com.br, gmpinheiro@ime.eb.br, carrilho@ime.eb.br

Abstract— This paper describes the use of fuzzy logic theory and techniques in the implementation of a controller for a ball-plate system. The work comprises the real-time implementation of the controller environments using C++, for only one dimension of the platform, presenting the study and analysis of three different control strategies.

Keywords— Control systems, Fuzzy logic, Nonlinear systems.

Resumo— Este artigo descreve o uso da teoria e técnicas da lógica fuzzy na implementação de um controlador para um sistema plataforma-esfera (ball-plate). O trabalho consiste na implementação em tempo real do controlador usando C++, para apenas uma dimensão da plataforma, apresentando o estudo e análise de três estratégias de controle diferentes.

Palavras-chave— Sistemas de controle, Lógica fuzzy, Sistemas não-lineares.

1 Introdução

O sistema plataforma-esfera do Instituto Militar de Engenharia (IME) foi desenvolvido para estudos acadêmicos e pesquisas em sistema de controle. Conhecimentos adquiridos neste tipo de estudo podem ser utilizados em diversas aplicações reais.

O aparato foi construído em 2004 e diversos controladores foram desenvolvidos para um modelo linear do sistema (Cainelli, 2005). A implementação desses controladores no sistema real encontrou diversas dificuldades, principalmente em função do caráter não linear da planta. Este artigo apresenta um trabalho desenvolvido durante o curso de mestrado e cujo objetivo foi desenvolver um controlador, com base na lógica fuzzy, capaz de controlar o sistema, superando as não-linearidades e os efeitos da zona morta. Para facilitar o controle, nesta etapa experimental, optouse por trabalhar com apenas uma direção de deslocamento da esfera (direção x).

Este artigo está assim organizado. O sistema está descrito na Seção 2, com suas características e detalhamento do hardware utilizado em sua construção. O controlador fuzzy é apresentado na Seção 3. Os ensaios e resultados obtidos durante a implementação em tempo real são discutidos na Seção 4, e a conclusão do trabalho é apresentada na Seção 5.

2 Sistema Plataforma-Esfera

2.1 Características do Sistema

O sistema plataforma-esfera (Figura 1) consiste numa plataforma apoiada sobre uma

junta universal com dois graus de liberdade que, por intermédio de motores, pode ser inclinada em duas direções. O objetivo é controlar a posição ou a trajetória de uma esfera que rola livremente na superfície da plataforma. A aquisição dos ângulos de inclinação da plataforma é feita por intermédio de medidas em potenciômetros acoplados aos motores. A aquisição da posição da esfera é feita pelo processamento de uma imagem oriunda de uma câmera instalada na parte superior.

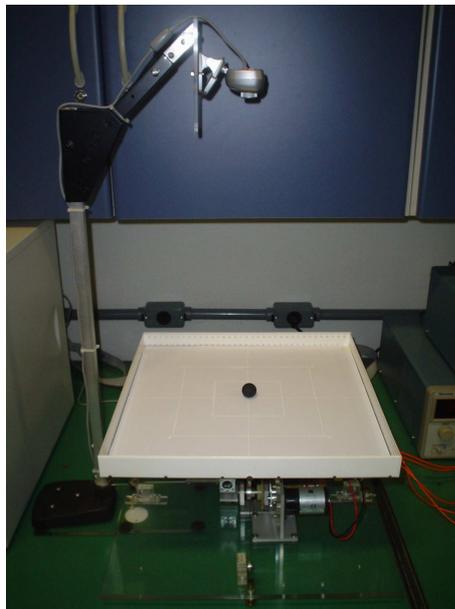


Figura 1: Sistema Plataforma-Esfera do IME

O objetivo de controle, nesta etapa, é levar uma esfera rolando sobre a plataforma, de determinada posição inicial (Pos_{in}) para uma posição

desejada (Pos_{fim}), tentando minimizar o erro da posição final.

Muito embora em Cainelli (2005) tenha sido constatado que o modelo linearizado representa bem o comportamento não-linear, a implementação dos controladores lineares não obteve bom resultado. O maior dos obstáculos foi a presença da zona morta do motor, que não inicia o movimento da plataforma com baixas tensões. O segundo foi um atraso de duração indeterminada da aquisição da imagem, em função dos softwares utilizados para captura da imagem pela câmera.

A faixa de tensão da zona morta do motor DC, levantada experimentalmente para este trabalho, é de $[-1, 25 \quad +1, 15](V)$.

Este trabalho, além de realizar o controle, propõe um método que possa compensar o efeito gerado pela zona morta.

2.2 Detalhamento do Hardware

Os controladores são implementados com uso de um microcomputador com *duas placas conversoras* ligadas em seus *slots ISA*.

As placas *PCL-812PG* e *PCL-726* são usadas na aquisição do ângulo de inclinação da plataforma e na atuação dos motores. Também é utilizada uma câmera modelo *CAMERA-II-IKM28SA da Sun* em conjunto com uma placa de captura de imagem *Pixelview Play TV Pro da Prolink*, para fazer a aquisição da posição da esfera.

Ainda consta do hardware da planta dois *potenciômetros multivoltas* que, em conjunto com a placa *PCL-812PG*, formam os sensores de ângulo de inclinação da plataforma.

Foram construídos por Cainelli (2005) dois dispositivos eletrônicos para interfacear os atuadores e sensores. O primeiro deles, denominado PLACA 01, utiliza dois *drivers amplificadores de potência RS 313-2122*, um para cada motor. O segundo, denominado PLACA 02, trata de um *driver PWM* desenvolvido por Cainelli (2005).

Para conseguir melhor eficiência nos controladores do Sistema Plataforma-Esfera foi preciso desenvolver um programa em *linguagem C++* que, executado em DOS no sistema operacional Windows XP, faz todo o processamento em tempo real.

3 Controlador Fuzzy

O controlador fuzzy aplicado neste trabalho é composto de um conjunto de regras de produção do tipo *Se <premissa> Então <conclusão>*, que definem ações de controle em função das diversas faixas de valores que as variáveis de saída da planta podem assumir (Tanscheit, 2004).

Nesses controladores, os conjuntos de regras expressam de forma qualitativa a experiência dos especialistas e o conhecimento das estratégias de controle (Leitão, 2000) e (Leitão et al., 2002).

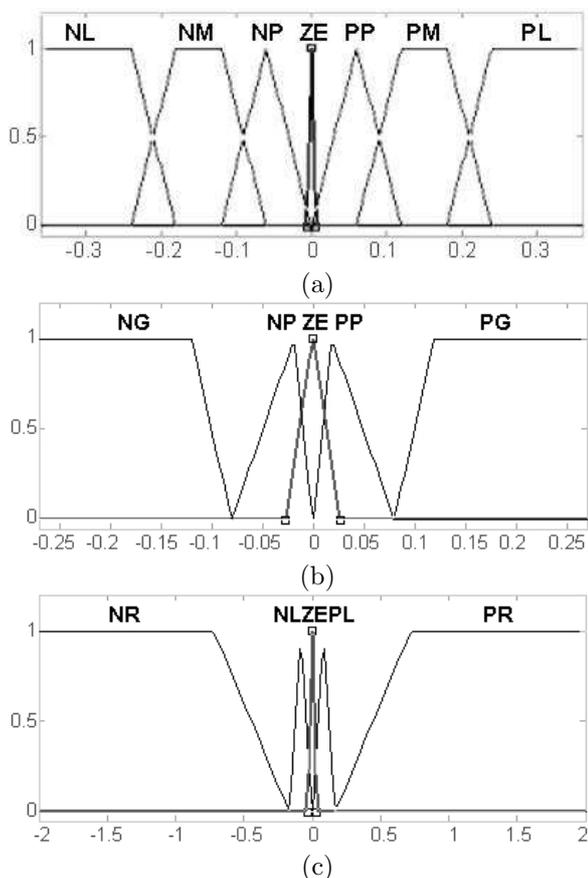
Os dois controladores fuzzy desacoplados apresentados a seguir, são baseados em Martins (2006) e Martins et al. (2006). Os mesmos, foram construídos no modelo Mamdani, para os cálculos usam a composição *max-min* e na defuzzificação usa o método do centróide, que faz a transformação do conjunto de saída para um valor preciso, através do cálculo do centro de gravidade (Tanscheit, 2003).

Os controladores utilizam três variáveis de entrada, que são extraídas da saída da planta: a distância da esfera até a posição desejada, o ângulo de inclinação da plataforma e a velocidade de translação da esfera, e utiliza como variável de saída a tensão de acionamento do motor.

Após várias tentativas de implementação em tempo real dos controladores apresentados por Martins (2006) e Martins et al. (2006), foram atribuídos universos para os conjuntos das variáveis linguísticas.

Os conjuntos, de forma triangular e trapezoidal, foram definidos de forma simétrica, conforme ilustrado na Figura 2, para as seguintes grandezas:

- (a) distância = $[-0, 36 \quad +0, 36](m)$;
- (b) ângulo = $[-0, 27 \quad +0, 27](rad)$;
- (c) velocidade = $[-2 \quad +2](m/s)$;
- (d) tensão (negativo) = $[-1, 46 \quad +0, 96](V)$;
- (e) tensão (positivo) = $[-0, 98 \quad +1, 44](V)$.



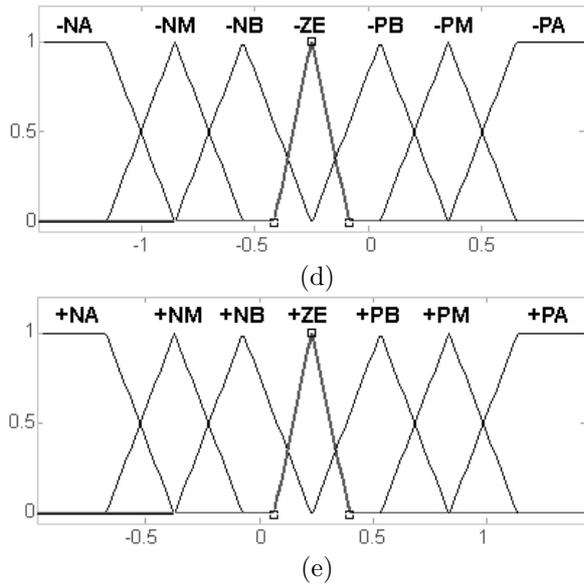


Figura 2: Definição das Variáveis: (a) Distância; (b) Ângulo; (c) Velocidade; (d) Tensão (Controlador Negativo); (e) Tensão (Controlador Positivo)

O conjunto de regras escritas para os controladores apresentados por Martins (2006) e Martins et al. (2006), foram modificados de forma que pudessem se adequar às modificações feitas nas variáveis de entrada e saída. A Tabela 1 define o conjunto de regras que compõem o algoritmo de controle, e explora todas as suas combinações físicas possíveis, apesar da possibilidade de gerar um total de 175 regras.

As 41 regras selecionadas e apresentadas na tabela devem ser lidas da seguinte forma: *Se Distância e Ângulo e Velocidade Então Tensão*.

Foram criadas 4 regras que exploram apenas os conjuntos *PG* e *NG* da variável ângulo, e os conjuntos *PR* e *NR* da variável velocidade, com o intuito de corrigir eventuais erros oriundos dos sensores utilizados na plataforma.

4 Resultados Experimentais

Os ensaios para a operação em tempo real foram obtidos com o objetivo de deslocar a esfera de uma das extremidades da plataforma para a posição $0,04\text{ m}$ em uma direção, denominada direção x .

A implementação é feita com auxílio de um programa desenvolvido em linguagem C++, que executa todas as rotinas de sensoriamento e atuação em tempo real.

As subseções a seguir apresentam três casos envolvendo estratégias de controle diferentes, escolhidas para obter o desempenho desejado de fazer a esfera rolar em linha reta, sobre uma canaleta, na plataforma, simplificando a ação de controle que atuará em apenas uma direção.

Os controladores usam a Placa 01, de interface entre o computador e a plataforma, bem como,

os amplificadores de potência RS 313-2122, como atuador no movimento da plataforma. O uso de amplificadores permitiu a redução da tensão na zona morta de $[-1, 25 + 1, 15](V)$, para $[-0, 25 + 0, 23](V)$.

Tabela 1: Regras do Controlador, para Implementação Física

Distância	Ângulo	Velocidade	Tensão
PP	ZE	ZE	PM
PP	PP	ZE	PB
PP	PP	NL	NB
PP	ZE	NL	NB
ZE	ZE	NL	NB
ZE	NP	NL	ZE
PP	NP	NL	ZE
PP	NP	ZE	PB
ZE	NP	ZE	PB
PM	ZE	ZE	PM
PM	PP	ZE	PB
PM	PP	NL	NB
PM	ZE	NL	NB
PL	ZE	ZE	PM
PL	PP	ZE	PB
PL	PP	NL	NB
PL	ZE	NL	NB
PM	NP	NL	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE
NP	ZE	ZE	NM
NP	NP	ZE	NB
NP	NP	PL	PB
NP	ZE	PL	PB
ZE	ZE	PL	PB
ZE	PP	PL	ZE
NP	PP	PL	ZE
NP	PP	ZE	NB
ZE	PP	ZE	NB
NM	ZE	ZE	NM
NM	NP	ZE	NB
NM	NP	PL	PB
NM	ZE	PL	PB
NL	ZE	ZE	NM
NL	NP	ZE	NB
NL	NP	PL	PB
NL	ZE	PL	PB
NM	PP	PL	ZE
	PG		NB
	NG		PB
		PR	PB
		NR	NB

Durante esta fase do trabalho foi constatada a presença de um atrito entre a esfera e a superfície da plataforma, que não havia sido modelado, dificultando a implementação física, mas que não comprometeu os resultados.

4.1 Caso 1: Implementação em Tempo Real, Utilizando Dois Controladores Desacoplados

O procedimento de operar com dois controladores desacoplados tem o objetivo de usar dois sistemas de inferência fuzzy que tenham valores de tensão de saída, um centrado no limite inferior da zona morta ($-0, 25\text{ V}$), e o outro centrado no limite superior ($0, 23\text{ V}$).

Foram criados dois grupos de conjuntos da variável tensão foram duplicados e para distinguí-los graficamente, os sinais de $+$ e $-$ foram acrescidos às designações das variáveis, conforme apresentado na Figura 2(d) e (e).

Os conjuntos foram deslocados de suas posições originais, de forma que o centro dos conjuntos

+ZE e -ZE fossem posicionados nos limites da região da zona morta, ou seja, somando-se $0,23\text{ V}$ a todos os elementos dos conjuntos do **Controlador Positivo**, e subtraindo $0,25\text{ V}$ de cada elemento dos conjuntos do **Controlador Negativo**.

A Figura 3 mostra o diagrama em blocos que representa o sistema implementado fisicamente nesta subseção, e a Figura 4 mostra o detalhe do bloco **Planta Externa Plataforma-Motor**.

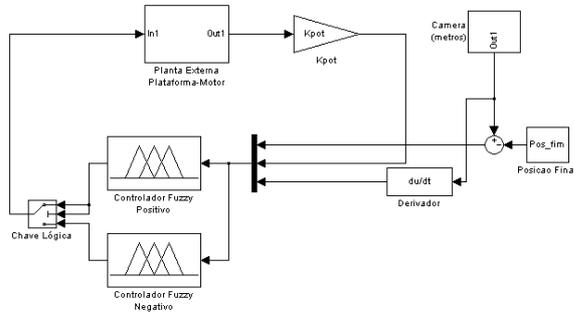


Figura 3: Diagrama em Blocos para o Caso 1

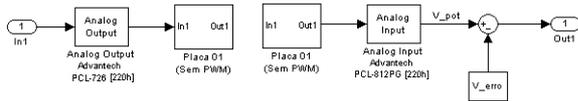


Figura 4: Detalhamento do Bloco Planta Externa Plataforma-Motor

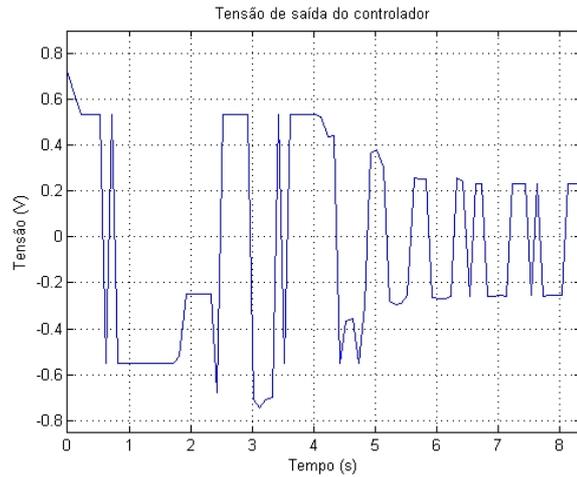
A Figura 5 apresenta a resposta temporal para este caso, mostrando o gráfico da tensão que sempre está oscilando entre valores fora da faixa de tensão da zona morta do motor.

Cabe ressaltar que os resultados das grandezas inclinação e velocidade, apresentaram amplitudes bem superior ao mesmo resultado obtido por simulação. O aumento aparece devido às mudanças feitas para a implementação em tempo real, e que foram capazes de superar os problemas do atrito entre a esfera e a superfície da plataforma, e o aumento do intervalo de tempo entre as amostras.

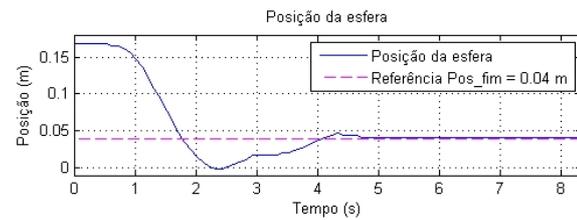
O expressivo aumento nestes sinais explica a redução no tempo de subida do gráfico de posição da esfera que caiu de 40 s na simulação, para $2,5\text{ s}$ em tempo real.

4.2 Caso 2: Implementação em Tempo Real, Utilizando Um Controlador com Limitador de Tensão

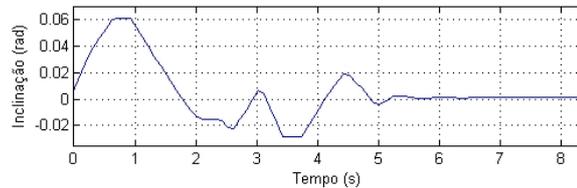
Nesta subseção é apresentado o resultado obtido com o uso de um Controlador Fuzzy, na mesma configuração usada na subseção 4.1, porém com a inserção de um limitador e tensão em sua saída. Esta modificação foi necessária para adaptar ao sistema o uso de apenas um controlador.



(a)



Inclinação da plataforma



Tempo (s)



(b)

Figura 5: Resposta Temporal para o Caso 1: (a) Tensão de Saída do Controlador; (b) Posição, Ângulo e Velocidade do Sistema

A Figura 6 contém a distribuição dos conjuntos da variável Tensão, com universo de excursão compreendido por $[-2,66 + 2,63]\text{ (V)}$. A escolha deste universo, foi feita de modo que o conjunto ZE ($[-0,377 + 0,35]\text{ (V)}$) ficasse limitado por uma faixa um pouco superior à faixa da zona morta do motor ($[-0,25 + 0,23]\text{ (V)}$).

O fator limitante foi escolhido de acordo com os valores resultantes do gráfico apresentado por meio da Figura 5(a), ficando compreendido por $\pm 0,8352\text{ V}$.

A Figura 7 mostra o diagrama em blocos que representa o sistema implementado fisicamente, nesta subseção.

Este controlador tem sua resposta apresentada pela Figura 8.

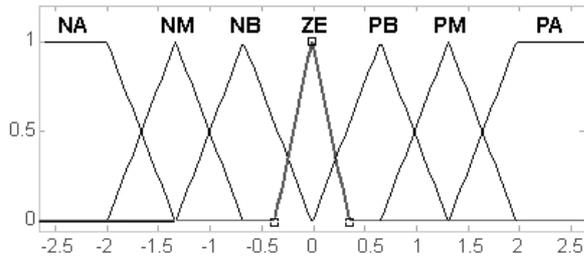


Figura 6: Definição dos Conjuntos da Variável Tensão, para a Implementação Física

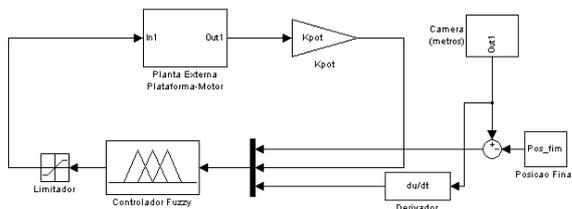


Figura 7: Diagrama em Blocos para o Caso 2

Neste ensaio, o limitador é determinante na partida do Controlador Fuzzy, fazendo com que o mesmo não tenha uma inclinação muito brusca que leve a esfera a atingir velocidades altas, inviabilizando o controle.

Um erro no sensor de velocidade causou um transitório indesejável na grandeza velocidade de -1 m/s , que pertence ao conjunto *NR*. Este exemplo mostra a importância do conjunto *NR*, que permitiu a partida do motor nesta situação.

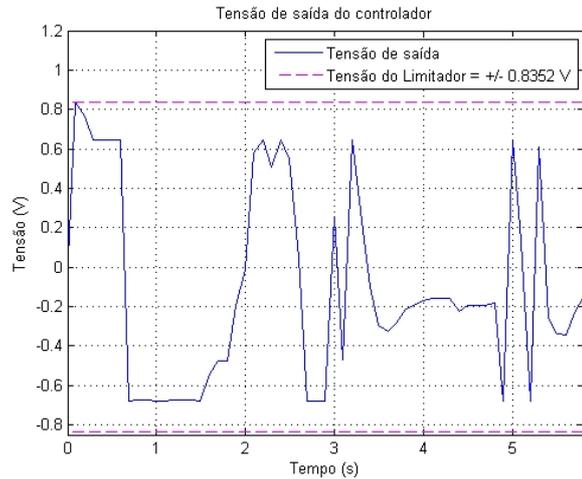
4.3 Caso 3: Implementação em Tempo Real, Utilizando Apenas Um Controlador

Este ensaio procurou resolver o problema do controle com apenas um controlador. Neste caso a variável tensão de saída foi modificada até que se conseguisse obter um resultado satisfatório, passando seu universo para $[-2, 4 + 2, 4] \text{ (V)}$, tendo suas funções de pertinência apresentadas na Figura 9.

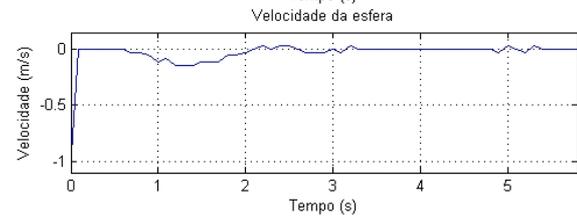
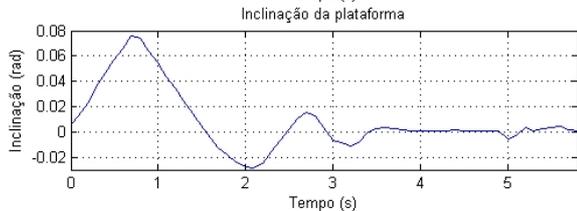
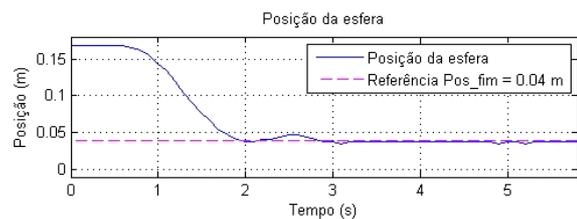
O diagrama em blocos, apresentado na Figura 10, é semelhante ao da Figura 7, mas não contém o *Limitador*, fazendo com que o sinal de saída do *Controlador Fuzzy* atue diretamente na planta sem sofrer qualquer tratamento.

Analisando o gráfico da tensão de saída do controlador, da Figura 11(a), percebe-se que este controlador atingiu valores de máximo e mínimo maiores que os atingidos pelos dois controladores apresentados nas subseções 4.1 e 4.2. No gráfico da Figura 11(a), os valores observados são de aproximadamente $1,2 \text{ V}$ e -1 V , enquanto que nos casos anteriores esses valores não ultrapassavam $\pm 0,84 \text{ V}$.

Com a amplitude da tensão de saída liberada, o desempenho não foi atendido a contento; nota-se a presença de um grande overshoot no gráfico da



(a)



(b)

Figura 8: Resposta Temporal para o Caso 2: (a) Tensão de Saída do Controlador; (b) Posição, Ângulo e Velocidade do Sistema

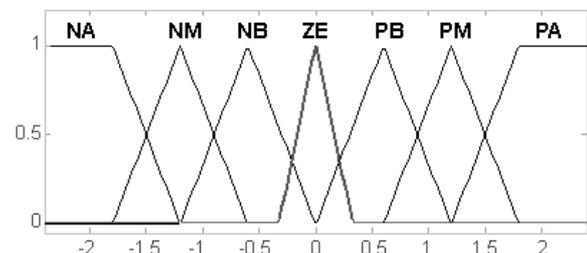


Figura 9: Definição dos Conjuntos da Variável Tensão, para a Implementação Física

posição da esfera (Figura 11(b)) e o aumento do tempo de subida para aproximadamente 3 s. Em outras palavras, a esfera passou muito da posição final, resultando no aumento do tempo necessário para corrigir esse erro.

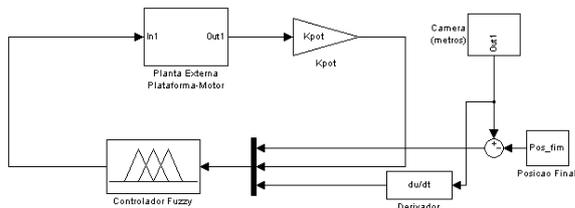


Figura 10: Diagrama em Blocos para o Caso 3

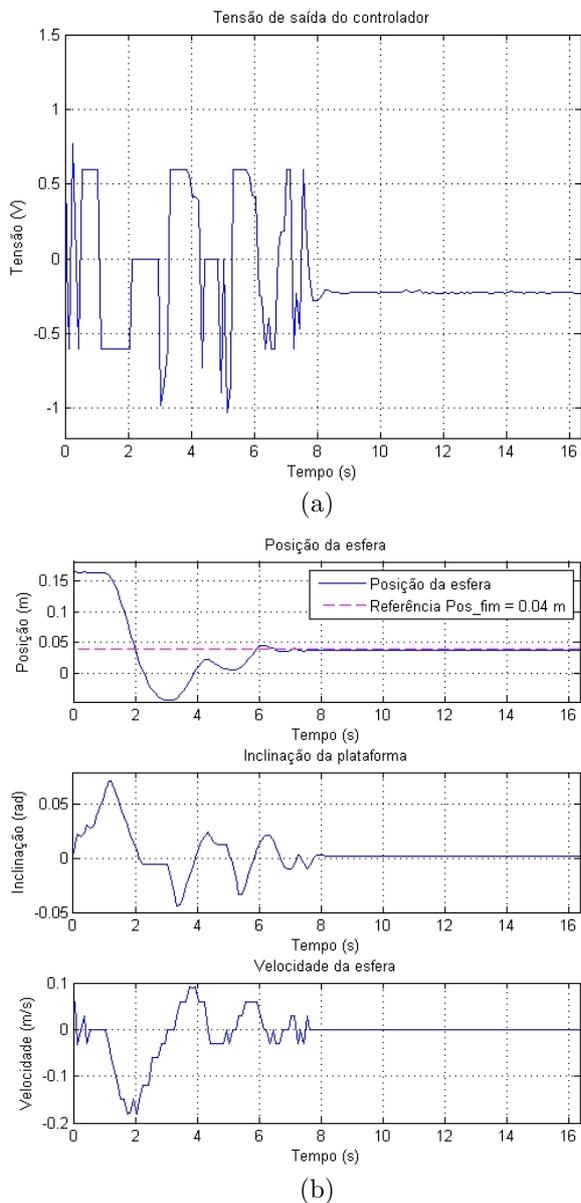


Figura 11: Resposta Temporal para o Caso 3: (a) Tensão de Saída do Controlador; (b) Posição, Ângulo e Velocidade do Sistema

5 Conclusão

O controlador fuzzy atingiu o resultado esperado, conseguindo deslocar a esfera para a posição desejada. A implementação em tempo real exigiu mudanças no controlador para atender a dinâmicas não modeladas e conseguir levar a esfera à po-

sição desejada.

O resultado do controlador pode ser considerado bom quando se leva em conta as grandes limitações presentes neste tipo de sistema, que são:

- os potenciômetros, usados como sensor, geram um erro na aquisição do ângulo;
- as engrenagens usadas no acoplamento do motor, além de causar o efeito da zona morta, dificultou a modelagem;
- a câmera ainda trabalha com uma taxa de aquisição muito inferior a taxa usada na simulação, dificultando o controle.

Para trabalhos futuros é proposta a implementação dos controladores considerando o deslocamento da esfera sobre os dois eixos da plataforma, ou seja, sobre o plano xy . Também sugere-se o uso de controladores neuro-fuzzy ou fuzzy-genético para melhor adequação das regras e dos conjuntos fuzzy.

Referências

- Cainelli, G. T. F. (2005). *Modelagem, Implementação e Controle com Vídeo-Sensoriamento de uma Esfera sobre Plataforma*, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia.
- Leitão, F. O. (2000). *Metodologia para Implementação de Controladores Fuzzy em Processos Petroquímicos Utilizando Redes Neurais*, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia.
- Leitão, F. O., Gomes, G. M. P. e de Campos, M. C. M. M. (2002). Aplicação de controladores neuro fuzzy para processos industriais, *XIV Congresso Brasileiro de Automática 1*: 371–376.
- Martins, W. F. (2006). *Lógica Nebulosa Aplicada no Controle de um Sistema Plataforma-Esfera*, Monografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Martins, W. F., Gomes, G. M. P. e da Cunha, A. E. C. (2006). Controlador nebuloso aplicado ao sistema plataforma-esfera, *XVI Congresso Brasileiro de Automática 1*: 1602–1607.
- Tanscheit, R. (2003). *Sistemas Fuzzy*, VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Bauru, SP.
- Tanscheit, R. (2004). Controladores fuzzy. [capturado em 12 set. 2005].
*<http://www.ica.ele.puc-rio.br/cursos>