



Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, Setembro de 2006.
ISBN 85-7515-371-4

UM CURSO DE LABORATÓRIO PARA O ENSINO DE CONTROLE FUZZY

Flavia Maria Guerra de Sousa Aranha Oliveira – flavia@ene.unb.br

João Miguel Ferreira Cunha – joaomfcunha@yahoo.com.br

Geovany Araújo Borges – gaborges@ene.unb.br

Laboratório de Controle e Visão Computacional - <http://www.ene.unb.br/lcvc/>
Grupo de Instrumentação, Controle e Automação
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
70910-970 Brasília – DF

Resumo: *Este artigo descreve a implementação de uma série de experimentos que buscam ensinar de modo efetivo e eficiente a utilização de técnicas fuzzy no desenvolvimento de sistemas de controle. Para o teste em um sistema real, foi implementado um sistema Barra-Esfera. Por possuir dinâmica não-linear, de fase não-mínima e instável em malha aberta, este tipo de processo possui excelentes características didáticas. O controle do sistema consiste no posicionamento automático da esfera sob a atuação direta na rotação do eixo da barra. Este sistema encontra-se no Laboratório de Controle e Visão Computacional (LCVC) da Universidade de Brasília (UnB), e é o resultado de um projeto de final de curso de graduação em Engenharia Elétrica. São descritos o modelamento matemático da bancada, sua instrumentação e sua operação. Encontra-se também implementado um ambiente de simulação para testes iniciais, que pode ser facilmente configurado pelo usuário. Os experimentos incluem a familiarização com a lógica fuzzy, o modelamento matemático do sistema Barra-Esfera, a familiarização com a operação da bancada experimental, a síntese de um controlador fuzzy, a simulação do sistema com o controlador fuzzy, a implementação do controlador fuzzy projetado na bancada experimental e a adição de ação integral ao controlador fuzzy.*

Palavras-chave: *Experimentos de laboratório, Controle fuzzy, Sistema barra-esfera, Ensino, Bancada experimental.*

1. INTRODUÇÃO

É consenso entre professores em diversas instituições de ensino que o trabalho em laboratório é essencial no ensino de ciências em geral e engenharia em particular (SMITH,

2005, FEISEL e PETERSON, 2002, FEISEL e ROSA, 2002, JURADO et. al., 2002, SANTOS et al., 2004, TVRZSKÁ DE GOUVÊA et al., 2004, YURKOVICH e PASSINO, 1999). Como comentam FEISEL e ROSA (2005), existem basicamente três tipos de laboratórios na engenharia: de desenvolvimento, de pesquisa e de ensino. Enquanto laboratórios de pesquisa e de desenvolvimento costumam envolver a extração de dados necessários para um projeto, para avaliar um novo dispositivo, ou para descobrir uma nova contribuição ao conhecimento na área, estudantes comparecem a laboratórios educacionais para aprender algo que é assumidamente já conhecido por engenheiros praticantes. Este “algo” deve ser bem definido por meio da determinação clara dos objetivos de aprendizagem para que o esforço e tempo despendidos no laboratório possam ser compensados por um benefício concomitante.

Em termos dos objetivos *do curso*, laboratórios são importantes para que o aluno: adquira habilidades práticas; adquira experiência no uso de equipamentos/ferramentas; participe da produção de um projeto; realize o planejamento de uma experiência; estabeleça ligações entre teoria e prática; colete dados; manipule e interprete estes dados; realize observações; formule e teste hipóteses; utilize julgamentos pertinentes; desenvolva habilidades na resolução de problemas; comunique dados e conceitos; desenvolva habilidades pessoais; desenvolva práticas de trabalho seguras; simule a prática profissional (FRY et. al, 2002).

Em termos dos objetivos *da aprendizagem*, como definidos por FEISEL e PETERSON (2002), pode-se destacar como habilidades e conhecimentos adquiridas pelo aluno ao completar um curso de laboratório: instrumentação, modelos (identificação das vantagens e limitações de modelos teóricos como preditores de comportamentos do sistema real), experimentação (planejamento da abordagem experimental, especificação de equipamentos e procedimentos apropriados, implementação destes experimentos e interpretação dos dados resultantes para caracterizar um material, componente ou sistema), análise de dados (demonstração da habilidade de coletar, analisar e interpretar dados, e formar e sustentar conclusões), projeto, aprendizagem pelo erro (reconhecimento de resultados insatisfatórios devido a equipamentos, partes, código, construção, processo ou projeto defeituosos, e então reprojeter soluções eficientes), criatividade (demonstração de níveis apropriados de pensamento independente, criatividade e capacidade na solução de problemas reais), comunicação (comunicação oral e escrita eficiente a respeito de trabalho em laboratório com um público específico, em níveis que vão de sumários executivos a relatórios técnicos compreensíveis), trabalho em equipe (habilidade de trabalhar eficientemente em equipes, designar papéis, responsabilidades e tarefas, etc) e ética no laboratório (comportamento segundo os mais elevados padrões éticos, incluindo o relato de informações de forma objetiva e a interação com integridade).

Diversas instituições utilizam, como plataforma de laboratório, bancadas experimentais voltadas para o ensino de engenharia de controle de sistemas. Dentro deste contexto, sistemas Barra-Esfera, cujo objetivo é controlar a posição de uma esfera livre que desliza em uma barra, têm sido comumente utilizados (JANTZEN, 2003; YURKOVICH e PASSINO, 1999) devido a características didáticas interessantes como bom apelo visual e intuitivo, dinâmica instável em malha aberta, propriedades não-lineares etc. Este conjunto de características torna este sistema bastante adequado para o ensino de controle fuzzy. Este tipo de equilíbrio é fundamental para realizar tarefas robóticas como o transporte de objetos em braços robóticos e no caminhar de robôs com locomoção por pernas (NG e TRIVEDI, 1995).

A proposta neste artigo é apresentar experimentos desenvolvidos para um laboratório de controle fuzzy baseados em uma bancada experimental Barra-Esfera montada no Laboratório de Controle e Visão Computacional (LCVC), no Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) da Universidade de Brasília (UnB). O objetivo destes experimentos é tornar a aprendizagem dos conceitos envolvidos mais efetiva e eficiente, introduzindo as etapas de projeto passo-a-

passo, de modo a sistematizar procedimentos no projeto de um sistema de controle fuzzy. Para tanto, a bancada experimental utiliza-se de uma abordagem para o problema de sistema de controle em uma configuração intuitiva, direta e em tempo real, com apenas um controlador fuzzy inserido na malha de controle, que favorece a apresentação didática de sistemas fuzzy (CUNHA, 2005).

Outras abordagens são propostas por HAUSER (1992) e YURKOVICH e PASSINO (1999), em que são implementadas, respectivamente, uma linearização aproximada entrada-saída prévia do sistema Barra-Esfera com o uso de realimentação de estados para estabilizar o sistema, e uma forma de controle cascata em que são utilizados dois controladores em malhas distintas do sistema para controlar tanto a posição da esfera como o ângulo da barra. GUO et al. (1996) propõem uma lei de controle global dada pela média ponderada de duas leis de controle locais definidas em diferentes subespaços, e mostra por simulação que se obtém uma região de estabilidade maior do que o método de aproximação linear entrada-saída proposto por HAUSER et al. (1992).

Com este enfoque direto adotado, espera-se que os alunos aprendam a definir e implementar as diversas especificações envolvidas no desenvolvimento de um sistema de controle fuzzy e compreendam como podem proceder para atender a especificações de projeto. É parte dos objetivos do experimento fazer com que os alunos entendam a lógica fuzzy como um modo sistemático de se introduzir o conhecimento humano de um processo em um sistema de controle e de se trabalhar com esta base de conhecimento, descrita a partir de variáveis lingüísticas, de modo a gerar um mapeamento apropriado entrada/saída que faça com que o sistema de controle se comporte segundo determinadas especificações de desempenho. Além disso, deseja-se que os alunos sejam capazes de avaliar quando é justificável (ou não) o uso desta técnica para o controle de processos.

A abordagem adotada busca preservar a inteligibilidade e a transparência do sistema, que são propriedades bastante atrativas de sistemas fuzzy. A transparência é definida como a propriedade que permite que a influência de cada parâmetro na saída do sistema seja compreendida e entendida pelo operador humano (BROWN e HARRIS, 1994). A transparência não é uma propriedade intrínseca de sistemas fuzzy (diferentemente da *interpretabilidade*, uma propriedade inerente de sistemas fuzzy, que é estabelecida com regras lingüísticas e conjuntos fuzzy associadas a estas regras) e deve ser interpretada como uma medida da validade ou confiabilidade da interpretação lingüística do sistema (RIID e RSTERN, 2001).

Na seção 2, a bancada experimental Barra-Esfera implementada é descrita, incluindo-se o seu modelamento matemático, sua instrumentação e sua operação. Nesta seção também está descrito o ambiente de simulação implementado para testes iniciais, que pode ser facilmente configurado pelo usuário. Na seção 3 estão descritos os experimentos que foram montados. Estes incluem a familiarização com a lógica fuzzy, o modelamento matemático do sistema Barra-Esfera, a familiarização com a operação da bancada experimental, a síntese de um controlador fuzzy, a simulação do sistema com o controlador fuzzy, a implementação do controlador fuzzy projetado na bancada experimental e a adição da ação integral ao controlador. Ao final desta seção, são propostos experimentos adicionais a serem implementados, que poderão ser incluídos no curso proposto. A seção 4 trata das considerações finais, seguida da seção de referências bibliográficas.

2. A BANCADA EXPERIMENTAL BARRA-ESFERA

A bancada experimental Barra-Esfera implementada é apresentada na Figura 1. Esta bancada foi construída a partir de componentes disponíveis nos laboratórios da Universidade de Brasília (UnB) tomando como base o esboço apresentado na Figura 2.

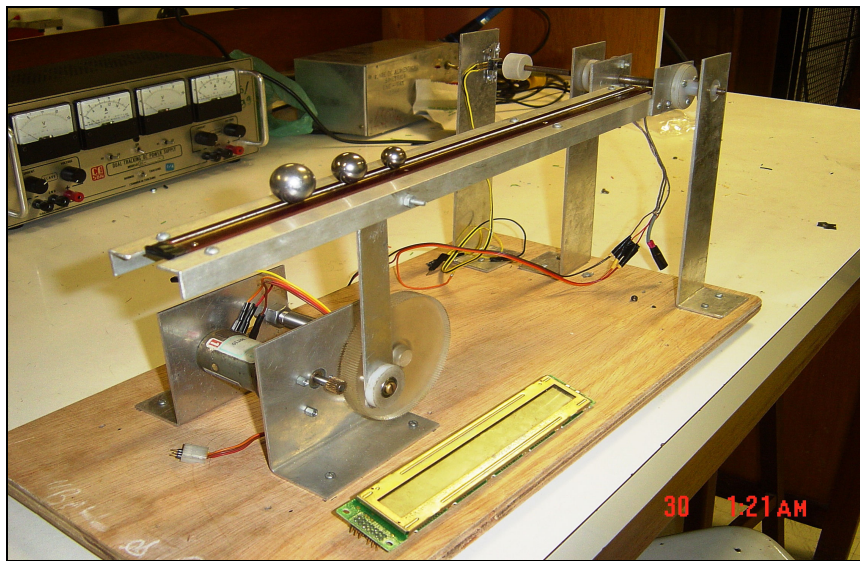


Figura 1: A bancada experimental Barra-Esfera

Este sistema possui um motor-reductor de corrente contínua para movimentar a barra, um trilho resistivo para medição de posição da esfera sobre o qual a esfera se desloca e um potenciômetro acoplado ao eixo da barra para medição de seu ângulo. A estrutura foi toda montada em alumínio.

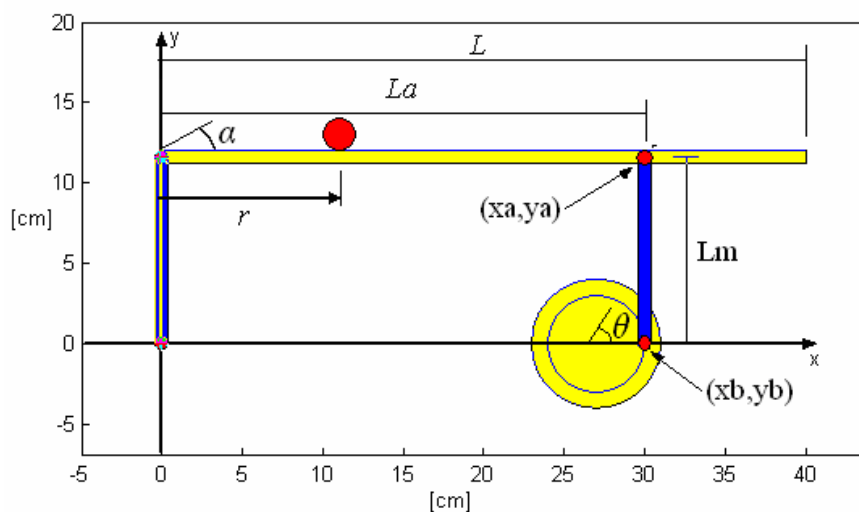


Figura 2: Esquema da bancada experimental (CUNHA, 2005)

2.1. Modelo Matemático

O sistema Barra-Esfera ideal é composto de uma barra que gira em torno de um eixo onde uma esfera desliza sem atrito (c.f. Figura 2). O objetivo do sistema de controle então é manter a esfera em uma determinada posição de referência sobre a barra.

Por meio da formulação de Lagrange, obtêm-se as seguintes equações diferenciais envolvendo a dinâmica da esfera e a dinâmica da barra (RODRIGUEZ, 2004):

$$(J_1 + mr^2) \cdot \ddot{\alpha} + 2mr\dot{r} + (mgr + \frac{L}{2}Mg) \cos \alpha = \tau \quad (1)$$

$$\frac{7}{5} \ddot{r} - r\ddot{\alpha} + g \cdot \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

Nestas equações J_1 , M e L são respectivamente o momento de inércia, a massa e o comprimento da barra, g é aceleração da gravidade local, m é a massa da esfera, α o ângulo da barra e r a posição da esfera sobre a barra.

Considerando apenas as equações (1) e (2), a representação em espaço de estados não-linear da dinâmica da esfera é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{5}{7}(x_1 \cdot x_4^2 - g \cdot \sin x_3) \\ x_4 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u \quad (3)$$

em que $[x_1, x_2, x_3, x_4] = [r, \dot{r}, \alpha, \dot{\alpha}]$, e $x_4 = u$. Como, no sistema em questão, a barra é apoiada em um de seus extremos (diferentemente dos modelos propostos por HAUSER et al. (1992) e WANG (1997), em que a barra está apoiada em seu centro), o peso da barra não pode ser desprezado e o ângulo α da barra e θ do motor não são iguais. A relação entre estes ângulos está discutida mais adiante.

As equações dinâmicas do motor são dadas por:

$$\frac{L_a}{n} \dot{i}_a + \frac{R_a}{n} i_a + K_3 \dot{\theta} = \frac{e_a}{n} \quad (4)$$

$$J_o \ddot{\theta} + b_o \dot{\theta} = \frac{K_2}{n} \cdot i_a - \frac{T_{\text{carga}}}{n^2} \quad (5)$$

em que L_a , R_a são a indutância e resistência do motor, K_3 e K_2 são a constante de força-eletromotriz e a constante de torque, J_o e b_o representam o momento de inércia e o coeficiente de atrito viscoso da combinação entre a carga e as engrenagens referidas ao eixo do motor. n é a relação de redução das engrenagens entre a carga e o eixo do motor.

Para a bancada experimental, a carga $\frac{T_{\text{carga}}}{n^2}$ à qual o motor está submetido pode ser desprezada quando comparada ao torque produzido $\frac{K_2}{n} \cdot i_a$ devido à alta a relação de engrenagens utilizada ($n \approx 50$). Considerando também a aproximação $L_a \approx 0$ H tem-se a seguinte representação em espaço de estados para o motor de corrente contínua:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -(b_o + K_2 \cdot K_3 / R_a) / J_o \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_2 / (J_o R_a n) \end{bmatrix} \cdot e_a \quad (6)$$

As equações dinâmicas do sistema Barra-Esfera e do motor estão geometricamente relacionadas por meio dos ângulos θ e α conforme a seguinte equação (CUNHA, 2005):

$$\alpha \approx 0.09 \cdot \theta \quad (7)$$

2.2. Instrumentação da Bancada

A bancada experimental possui os seguintes componentes:

- Um circuito para condicionamento dos sinais de ângulo e de posição para escalonar estas medidas e amenizar ruídos presentes;
- Uma ponte H comercial para acionar o motor de corrente contínua por meio de sinais de tensão modulados em largura de pulso, PWM;
- Uma placa de desenvolvimento contendo um microcontrolador da família PIC18F252, da Microchip Technology Inc., responsável, principalmente, por amostrar os sinais condicionados e implementar o controlador do sistema;
- Um módulo LCD para visualização, durante o experimento, do tempo transcorrido e dos sinais de posição e ângulo do sistema;
- Um computador compatível IBM-PC, conectado ao microcontrolador por meio de uma interface serial RS232, baseado em microprocessador Pentium III 500 MHz, para armazenagem em disco e avaliação *a posteriori* dos resultados.

A operação da bancada é iniciada pelo computador, onde o usuário deve fornecer os seguintes parâmetros do experimento: duração, período de amostragem utilizado, sinal de referência para o sistema de controle, parâmetros do controlador e outros *flags* que condicionam a utilização de filtros digitais e o acréscimo de ação integral. A Figura 3 ilustra de forma esquemática a operação da bancada.

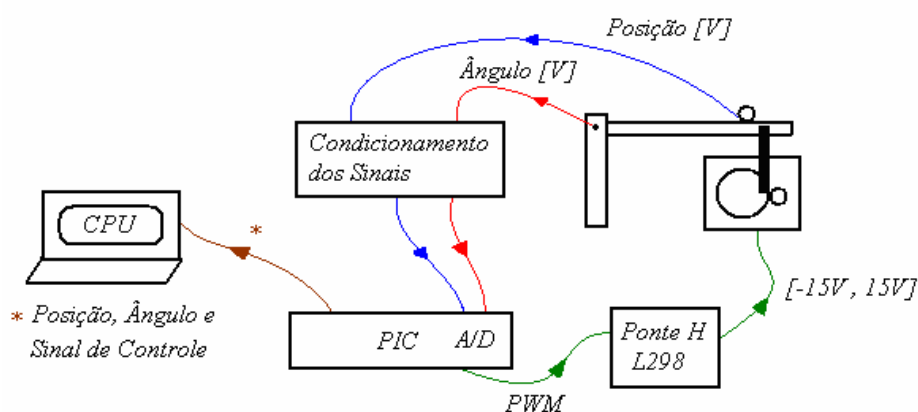


Figura 3: Operação da bancada experimental (CUNHA, 2005)

2.3. Ambiente de Simulação

A simulação do sistema Barra-Esfera foi implementada no software Matlab utilizando as equações (3), (6) e (11). A estrutura da simulação é baseada em 5 módulos como ilustra a Figura 4, todos implementados em arquivos “.m”.

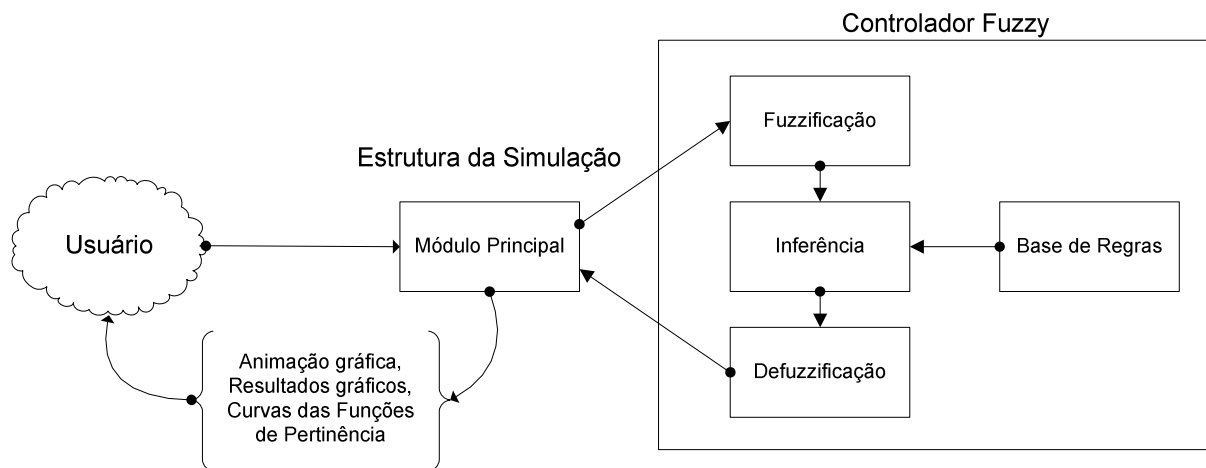


Figura 4: Simulação do sistema barra-esfera

A modularização da simulação foi feita para que a estrutura convencional de um controlador fuzzy (WANG, 1997) pudesse ser facilmente configurada pelo usuário. Este formato permite que a alteração de parâmetros do sistema fuzzy seja bastante flexível. Ainda, outros controladores (PID, realimentação de estados, etc.) podem ser testados em simulação para posterior comparação de resultados. A seguir é apresentado o conteúdo dos módulos indicados:

- i. Módulo Principal: a simulação do sistema é conduzida pelo usuário a partir deste módulo, que contém o modelo matemático do sistema, a configuração da simulação, entre outros parâmetros. Os módulos restantes são utilizados pelo módulo principal para a completa execução da simulação. O usuário pode editá-lo, alterando a configuração da simulação como, por exemplo, sua duração, seu período de amostragem, o sinal de referência do sistema de controle entre outros parâmetros. Ainda, *flags* que condicionam a utilização de animação gráfica do sistema, o acréscimo de ruídos, a disponibilização gráfica dos resultados, e outras características podem ser manipulados dentro deste módulo.
- ii. Fuzzificação: este módulo possui o processo de fuzzificação do controlador fuzzy e as funções de pertinência utilizadas. A configuração *default* destes termos são funções de pertinência triangulares e fuzzificação singleton, no entanto o usuário pode alterá-la para implementar diferentes funções de pertinência e processos de fuzzificação.
- iii. Base de Regras: este módulo contém a base de regras do controlador fuzzy utilizado, podendo esta ser editada pelo usuário.
- iv. Inferência: contém o processo de inferência do controlador fuzzy. As características associadas à inferência de sistemas fuzzy, como a definição das operações t-norma e s-norma e a implicação das regras, podem ser editadas pelo usuário.
- v. Defuzzificação: o método de defuzzificação do controlador fuzzy é definido neste módulo. A alteração do método pode ser realizada pelo usuário, sendo inicialmente configurado o método de defuzzificação por centro médio.

3. ROTEIRO PARA UTILIZAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A seguir os experimentos desenvolvidos para o ensino da utilização de técnicas fuzzy no desenvolvimento de sistemas de controle são apresentados. A seqüência dos experimentos é feita de forma que, inicialmente, o aluno se familiarize com a lógica fuzzy e com os conceitos envolvidos na aplicação em sistemas de controle. Em seguida, o aluno deve adquirir conhecimento sobre o sistema Barra-Esfera, que será o objeto de aplicação, e sobre a operação da bancada experimental onde será validado o projeto dos controladores. Depois de formada a base de conhecimento sobre o sistema e sobre a bancada experimental, o aluno deve propor controladores fuzzy para o sistema e implementá-los, primeiramente em simulação para se familiarizar com a programação de controladores fuzzy, e em seguida sobre a bancada experimental. Ao final, é sugerido ao aluno que utilize técnicas de controle complementares para que o sistema atinja melhor desempenho.

3.1. Familiarização com a Lógica Fuzzy

Neste primeiro experimento são introduzidos conceitos básicos da lógica fuzzy. É mostrado ao aluno que a lógica fuzzy é capaz de representar o significado de proposições expressas em uma linguagem natural, mesmo quando o significado é impreciso, e possui um mecanismo para realizar a inferência a partir destas representações (ZADEH, 1988). Neste contexto, são apresentados os conceitos básicos de um sistema fuzzy: variáveis linguísticas, universo de discurso, conjuntos fuzzy, base de regras com variáveis linguísticas, fuzzificação, inferência e defuzzificação. Procura-se mostrar que uma importante contribuição da teoria de sistemas fuzzy é o fato de fornecer um procedimento sistemático para a transformação de uma base de conhecimento em um mapeamento não-linear. É esta transformação que torna possível o uso do sistema fuzzy baseado no conhecimento em aplicações de engenharia, do mesmo modo que se utilizam modelos matemáticos e medições de sensores. Como consequência, a análise e o projeto de sistemas contendo controladores fuzzy, por exemplo, pode ser realizada de modo matematicamente rigoroso (WANG, 1997). Neste primeiro experimento, os alunos deverão responder a questões propostas relativas ao conteúdo de leituras indicadas.

3.2. Sistema Barra-Esfera: Modelo matemático

No segundo experimento, pede-se que o aluno estude o modelo matemático do processo Barra-Esfera obtido a partir de princípios físicos (em particular, a partir da formulação de Lagrange) e da estrutura geométrica do sistema. Mostra-se a importância do modelamento matemático como primeiro passo no projeto de sistemas de controle, uma vez que, a partir de um modelo, é possível identificar as características dinâmicas do sistema, como a presença de não-linearidades e sua estabilidade, entre outras. Nesta etapa, deseja-se que o aluno tenha um primeiro contato com o desenvolvimento do modelo matemático do sistema Barra-Esfera, considerando ainda as características não-lineares que este apresenta. Este modelamento ajuda no entendimento do comportamento do sistema, além de ser uma etapa essencial para se realizar a simulação do sistema em um ambiente computacional (DÁVALOS, 2001).

3.3. Familiarização com a operação da bancada experimental

Após a familiarização com os conceitos da lógica fuzzy seguido do entendimento do modelo barra-esfera, é proposto ao aluno que aprenda a utilizar as funcionalidades da bancada experimental. Dentro deste contexto, assuntos como a conversão A/D, o condicionamento de

sinal, a comunicação serial entre computador e microcontrolador e a visualização dos dados em tempo real no display LCD são apresentados, devendo o aluno explorar todas estas funcionalidades da bancada. Ao final desta etapa, espera-se que o aluno adquira o conhecimento necessário envolvendo a programação do microcontrolador para utilização da bancada.

3.4. Síntese de controladores fuzzy

Neste experimento, o aluno é apresentado ao problema de controle do sistema barra-esfera. Para tanto, são mostradas as etapas envolvidas no projeto de um controlador baseado na lógica fuzzy e pede-se que o aluno as desenvolva. São elas: a especificação da base de regras e a escolha dos métodos para a fuzzificação, a inferência e o processo de defuzzificação. Ao trabalhar com cada especificação do controlador, o aluno deverá considerar como implementá-la computacionalmente no microcontrolador da bancada experimental.

É solicitado ao aluno que utilize o seu conhecimento heurístico sobre o comportamento do processo (ou seja, que assuma o papel de “especialista” do sistema) a fim de especificar a base de regras nas quais o controle estará baseado. Ao final do experimento, o aluno deverá propor pelo menos dois controladores fuzzy que envolvam diferentes funções de pertinência e processos de inferência e de defuzzificação, para que se verifique a influência destas escolhas sobre o sistema. As especificações destes dois controladores deverão ser armazenadas e trazidas para a prática seguinte, onde serão implementadas no processo simulado para avaliação e comparação.

Ao final do roteiro, é comentado que dentre as vantagens de um controlador baseado na lógica difusa destacam-se sua elevada tolerância a ruídos, sua portabilidade a bancadas similares em outras escalas (como uma barra mais curta ou uma bola mais pesada, uma vez que não há a necessidade de se re-projetar as leis de controle, bastando aplicar as escalas necessárias aos parâmetros de entrada e saída) e o modo sistemático de se incorporar no controlador o conhecimento heurístico do processo (PASSINO e YURKOVICH, 1998; WANG, 1997; DRIANKOV et al, 1993).

3.5. Simulação de controlador Fuzzy

Antes de se implementar o controlador especificado no experimento anterior na bancada experimental, é proposto que o aluno utilize a simulação do sistema Barra-Esfera. O aluno inicialmente deverá se familiarizar com um controlador fuzzy previamente implementado em simulação, de modo a compreender os aspectos de ajuste de seus parâmetros. A animação gráfica e a disposição dos gráficos das variáveis da simulação (vide Figura 5) são ferramentas de auxílio nesta etapa para um melhor entendimento das conseqüências deste ajuste.

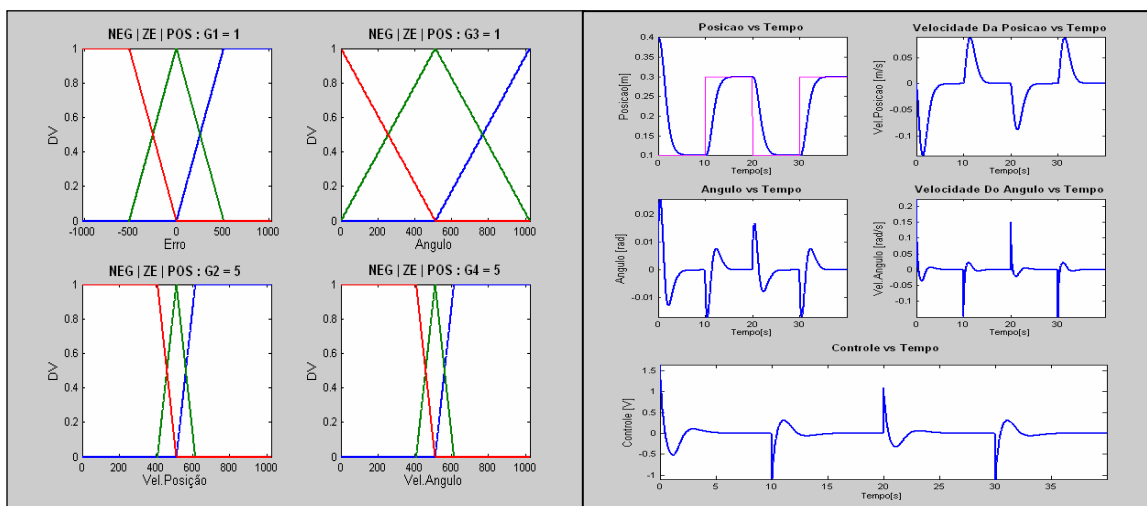


Figura 5: Curvas obtidas em simulação - funções de pertinência e gráfico das variáveis

Na seqüência do experimento, o aluno deverá implementar os controladores especificados anteriormente, editando os módulos descritos na seção 2.3. Com isso, o aluno estará preparado para implementar e validar na bancada experimental os controladores simulados.

Para a simulação, utiliza-se o *software* Matlab™. Como mostra DÁVALOS (2001), o uso de pacotes específicos de simulação, devido a sua interface gráfica, recursos de animação e facilidade de modelagem de sistemas, se traduz em uma maior motivação dos alunos em aprender esta ferramenta em sistemas que são estudados no curso.

3.6. Implementação do controlador Fuzzy na bancada experimental

De posse do conhecimento adquirido com a simulação dos controladores fuzzy e com a familiarização da bancada experimental, o aluno deverá implementar os controladores fuzzy na bancada propriamente dita. Este processo, assim como o desenvolvimento da simulação, é baseado em módulos previamente definidos (vide seção 2.3), que devem ser editados pelos alunos a partir das especificações obtidas como resultado dos experimentos anteriores. Após a programação do microcontrolador com as especificações projetadas, deve-se colocar o processo em operação. Nesta etapa de experimentação prática, os dados do sistema – ângulo da barra, posição do pêndulo e sinal de controle (ciclo de trabalho PWM) – são armazenados à medida que o experimento é realizado. Ao final da experimentação, o aluno deverá utilizar estes dados para traçar os gráficos destas variáveis, analisar os resultados da reposta do sistema com o controlador para entradas de teste e compará-los com os resultados obtidos em simulação para estas mesmas entradas especificadas. A figura 6 apresenta uma curva comparativa com dados experimentais e dados obtidos em simulação.

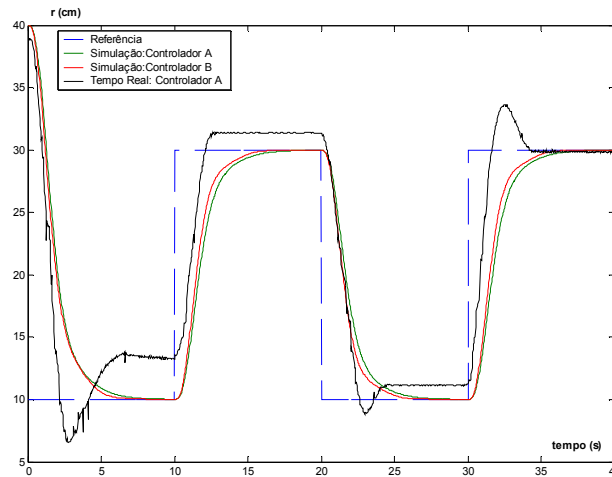


Figura 6: Curvas obtidas em simulação e sobre a bancada experimental.

3.7. Adicionando ação integral ao controlador fuzzy

Nesta etapa, o aluno deverá considerar formas de compensar efeitos indesejados sobre a resposta do sistema. Um destes efeitos é a presença de erro em regime permanente na resposta devido ao atrito entre a esfera e a barra. Uma forma de abordar este problema, que deverá ser implementada pelos alunos neste experimento, se resume à adição de ação integral sobre o sistema. Do mesmo modo que no experimento anterior, este controlador com ação integral deverá ser programado no microcontrolador e deve-se coletar os dados experimentais obtidos para posterior análise e comparação com resultados anteriores, tanto de simulação quanto no sistema real.

3.8. Propostas futuras

Como propostas de outros experimentos a serem realizados utilizando-se a bancada experimental Barra-Esfera implementada, estão a identificação não-linear do sistema de modo a melhorar o desempenho do controlador, a geração automática de regras e dos conjuntos fuzzy a partir de dados experimentais de entrada/saída e o controle do processo a partir de uma abordagem adaptativa neuro-fuzzy (ANFIS).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aulas práticas, como as de laboratório, podem ser classificadas como grupos de aprendizagem cooperativa, onde *aprendizagem cooperativa* pode ser definida como uma instrução que envolve pessoas trabalhando em grupos de modo a atingir um objetivo em comum, sob condições que envolvem tanto uma *interdependência positiva* (todos os membros devem cooperar de modo a completar a tarefa) e *responsabilidade individual e do grupo* (cada membro é responsável pelo resultado final completo obtido) (JOHNSON et al, 1991; SMITH, 2005). A utilização de aulas de laboratório em engenharia é fundamental para que o aluno adquira uma maior familiaridade com os conceitos aprendidos e com suas aplicações em um sistema real, além de contribuir significativamente para a retenção e um melhor entendimento destes conceitos e de suas conseqüências e interdependências.

Os experimentos implementados neste trabalho são adequados para um curso com carga horária de 30 horas, com uma aula por semana. Os laboratórios são divididos em trabalhos

realizados em ambientes computacionais (experimentos descritos nas seções 3.1, 3.2, 3.4, 3.5) e tarefas realizadas sobre a bancada experimental (seções 3.3, 3.6, 3.7 e futuramente seção 3.8).

A construção, instrumentação e controle via técnicas fuzzy da bancada experimental Barra-Esfera citada neste trabalho foi desenvolvida por um aluno de Engenharia Mecatrônica da UnB durante o seu projeto de conclusão de curso (CUNHA, 2005). Este projeto teve como objetivo o desenvolvimento da bancada experimental para o ensino e a aplicação de técnicas de controle, em particular as técnicas de controle fuzzy. Dessa forma, os experimentos desenvolvidos tomaram como base o processo de aprendizagem utilizado pelo aluno e os resultados obtidos com a conclusão do projeto.

Além dos fins didáticos em que é utilizada, a bancada é também plataforma para o desenvolvimento de outros projetos de conclusão de curso para alunos dos cursos de engenharia elétrica e mecatrônica na Universidade de Brasília (UnB). Atualmente, dois alunos estão desenvolvendo trabalhos relacionados à identificação de sistemas e aplicação de técnicas fuzzy mais avançadas sobre a bancada experimental.

A fim de facilitar a manipulação da bancada experimental, existe uma proposta de se implementar uma interface gráfica para a operação do usuário, facilitando a implementação dos controladores fuzzy projetados no microcontrolador da bancada e a aquisição e o armazenamento dos dados experimentais de entrada e saída do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROWN, M. e HARRIS, C.J. **Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control**, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994.

CUNHA, J.M.F. **Construção de uma bancada experimental barra-esfera e aplicação de controle fuzzy**, 2005. Monografia Final de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil. Disponível em <http://www.ene.unb.br/~gaborges/orientacoes/tg/pf/joao.miguel.2005.1.pdf>

DÁVALOS, R. V. O uso da simulação no desenvolvimento de projetos de conclusão de curso. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ensino em Engenharia, COBENGE 2001, Porto Alegre, RS. **Anais**. 2001. p. MTE-38 – MTE-46.

DRIANKOV, D., HELLENDORF, H., REINFRANK, M. **An Introduction to Fuzzy Control**, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1993.

FEISEL, L. D., ROSA, A. J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. **Journal of Engineering Education**, v. 94, n. 2, p. 121-130, 2005.

FEISEL, L.D.; PETERSON, G.D.; ARNAS, O.; Carter, L.; ROSA, A.; WOREK, W. Learning objectives for engineering education laboratories. In: 32nd ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, Nov. 6 – 9, 2002, Boston, MA. **Proceedings**. 2002. v. 2, p. F1D-1 vol.2.

FEISEL, L. D. e PETERSON, G. D. A colloquy on learning objectives for engineering education laboratories. In: 2002 ASEE Education Annual Conference & Exposition, Junho 16-19, 2002, Montreal, Ontario, Canada. **Proceedings**. American Society for Engineering Education, 2002.

FRY, Heather; KETTERIDGE, Steve; MARSHALL, Stephaine (eds.). **A handbook for teaching & learning in higher education: enhancing academic practice**. 2nd ed. Londres, ING: RoutledgeFalmer, 2002..

- GUO, Y., HILL, D. J. e JIANG, Z. P. Global nonlinear control of the Ball and Beam system. In: 35th IEEE Conference on Decision and Control, Kobe, Japan, December. **Proceedings**. 1996. p. 2818-2823
- HAUSER, J., SASTRY, S. e KOKOTOVIC, P. Nonlinear control via approximate input-output linearization: the ball and beam example. **IEEE Trans. Autom. Control**, vol.37, nº3, p. 392-398.,1992.
- JANTZEN, J. Internet Learning In Control Engineering: A Fuzzy Control Course, Prepr. 6th IFAC Symposium on Advances in Control Education, ACE 2003, Oulu, 2003. **Proceedings**. 2003. p 27-35.
- JOHNSON, D. W., Johnson, R. T., Smith, K. A. **Active learning: cooperation in the college classroom**. Edina, Minnisota: Interaction Book Company, 1991.
- JURADO, F., CASTRO, M., CARPIO, J. Experiences with fuzzy logic and neural networks in a control course. **IEEE Transactions on Education**, v. 45, n. 2, pp. 161 – 167, May 2002.
- NG, K. C. e TRIVEDI, M. M. (1995), “Fuzzy logic controller and real-time implementation of a ball balancing beam”. In SPIE, Orlando, Florida, Apr. 1995. **Proceedings**. p. 261–272.
- PASSINO, K.M. e YURKOVICH, S. (1998), **Fuzzy Control**, 1ªed. Califórnia,EUA: Addison Wesley Longman Inc.
- RAMSDEN, Paul. **Learning to teach in higher education**, 2nd ed. Nova Iorque, EUA: RoutledgeFalmer, 2003.
- RIID, A. e RSTERN, E. (2003), “Transparent Fuzzy Systems in Modeling and Control”, in **Interpretability Issues in Fuzzy Modeling**, Jorge Casillas, Oscar Cordon, Francisco Herrera, Luis Magdalena (editors), Springer, 2001, pp. 452-476.
- RODRIGUEZ, F.O. (2004), “**Modelado y control PD-difuso em tempo real para el sistema barra-esfera**,” 2004, 141 pg., Dissertação (Mestrado em Controle Automático) – Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico nacional, México, D.F.
- SANTOS, R. J., BAUCHSPIESS, A., BORGES, G. A. Laboratório remoto de automação predial. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ensino da Engenharia, COBENGE 2004 , Brasília, DF, 14 – 17 setembro, 2004. **Anais**. Brasília: UnB, 2004.
- SMITH, K. A., SHEPPARD, S. D., JOHNSON, D. W., JOHNSON, Roger T. Pedagogies of Engagement: Classroom-Based Practices, **Journal of Engineering Education**, v. 94, n. 1, Jan. 2005. p. 87-101.
- TVRZSKÁ de Gouvêa, M.; CASELLA, E.L.; JORGE, R.M. A importância da realização de experimentos para a construção de conceitos na formação de um engenheiro autônomo. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ensino da Engenharia, COBENGE 2004, Brasília, DF. 14-17, setembro, 2004. **Anais**. Brasília: UnB, 2004.
- WANG, Li-Xin. **A course in fuzzy systems and control**. Upper Sadle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1997.
- YURKOVICH, S., PASSINO, K. M. A laboratoy course on fuzzy control. **IEEE Transactions on Education**, vol.42, no.1, Feb. 1999. p. 15-21.
- ZADEH, Lofti A. Fuzzy logic. **Computer**. v. 21, n. 4, April 1988. p. 83-93.

A LABORATORY COURSE FOR TEACHING FUZZY CONTROL

Abstract: *This paper describes the implementation of a series of laboratory exercises for teaching the use of fuzzy techniques in control systems in an effective and efficient manner. The testbed is a fully instrumented ball and beam platform. Because of its non-linear dynamics, non-minimum phase and open-loop instability, this process has excellent educational features. The control problem consists on the automatic positioning of the ball in a groove by direct actuation on the rotation angle of the beam. This process was built in-house at the Laboratory of Control and Computational Vision (LCVC, in its portuguese acronym) at the University of Brasilia (UnB), as an undergraduate research project. The system's mathematical model, instrumentation, and operation are described. A simulation environment for prototyping was also implemented. The laboratory experiments include familiarization with fuzzy logic, mathematical modeling of the ball and beam system, familiarization with the operation of the platform, synthesis of a fuzzy controller, simulation of the system with fuzzy control, implementation of the designed fuzzy controller on the platform and inclusion of an integral action to the fuzzy controller.*

Keywords: *Laboratory, Fuzzy Control, Ball and Beam, Testbed, Education*