

# CONTROLE FUZZY PARA SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDOS

FERNANDO DE MELO LUNA FILHO, HUGO LEONARDO GOSMANN, ADOLFO BAUCHSPIESS

*Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade de Brasília*

*<http://www.ene.unb.br/~lavsi> e-mail: [luna,gosmann,bauchspiess@ene.unb.br](mailto:luna,gosmann,bauchspiess@ene.unb.br)*

**Resumo**— Através do estudo de sistemas não-lineares, tendo como exemplo um tanque com escoamento turbulento em sua saída, será realizada uma comparação entre técnicas de controle: *Fuzzy* e PI. O sistema construído para o controle de nível de líquido possui os seguintes componentes: bomba hidráulica, atuador; sensor de nível; tanques; computador e controlador implementado em software. Os resultados obtidos experimentalmente e em simulação auxiliam a análise do sistema, fornecendo base qualitativa e quantitativa para comparação entre as duas técnicas de controle utilizadas.

**Abstract**— With the study of nonlinear systems, using as example a tank with turbulent flow at its output, a comparison between control techniques, such as Fuzzy and PI, will be realized. The system was built for fluid level control and has the following components: hydraulic pump, actuator; level sensor; tanks; computer and software implemented controller. Experimental results obtained and simulated help the analysis of the system, giving qualitative and quantitative resource for comparison between the two control techniques used.

**Keywords**— Fuzzy Logic, Fluid Level Control, Control Techniques, Artificial Intelligence.

## 1 Introdução

O interesse por técnicas de controle multivariável tem crescido nos últimos anos [8]. Entretanto, nem sempre é fácil determinar quando esses métodos compensam o maior esforço computacional e trazem, de fato, melhor desempenho que estruturas mais simples de controle.

Este trabalho descreve um processo de tanques acoplados, em escala de laboratório, construído para servir de plataforma para a implementação e avaliação de diferentes estratégias de controle em um processo multivariável não-linear.

O processo de tanques acoplados é bastante adequado para ser utilizado neste tipo de estudo, basicamente por dois motivos: primeiro, porque é bastante comum em escala industrial, principalmente nos ramos químico, petroquímico, de celulose e de alimentos [7]; e segundo, porque é de fácil construção e modelagem relativamente simples, permitindo que diferentes controladores possam ser projetados, implementados e testados de forma rápida e eficiente.

## 2 Estado da Arte

Diversos processos envolvendo tanques acoplados são apresentados na literatura, todos eles com construções e aplicações bastante particulares. A seguir os trabalhos mais relevantes são revisados.

Gambier e Unbehauen [9] apresentam resultados da utilização de um controlador preditivo adaptativo generalizado em um sistema multivariável com 3 tanques interconectados. A técnica foi testada em uma planta piloto. A abordagem adaptativa é

avaliada para o problema de seguimento de trajetória nos casos em que mudanças de referência levam o sistema para pontos de operação onde o modelo nominal não é válido.

Johansson [8] descreve um sistema com quatro tanques utilizado para ilustrar as limitações de controladores para sistemas de realimentação multivariáveis, especialmente o efeito de zeros em malha fechada. O sistema foi concebido de forma que a sua dinâmica possa passar de fase mínima à fase não-mínima através do ajuste de uma válvula.

Ko et. al. [10] descrevem um sistema com dois tanques acoplados, para fins de ensino e pesquisa, utilizados em um laboratório virtual de controle. Quatro estratégias de controle são implementadas: controle manual (em malha aberta), também usado para coletar dados para a identificação do sistema físico, controle PID, controle no espaço-de-estados e controle *fuzzy*.

## 3 Sistemas Inteligentes

Lógica “*Fuzzy*”, Redes Neurais, Sistemas Especialistas e algoritmos genéticos fazem parte de um novo paradigma conhecido por *sistemas inteligentes*. Estes sistemas procuram fornecer respostas que solucionam problemas, de forma apropriada às situações específicas destes problemas, mesmo sendo novas ou inesperadas [1].

A operação destes sistemas inspira-se, em geral, em sistemas biológicos. A capacidade criativa dos seres humanos, de raciocinar de maneira incerta ou difusa contrasta com a forma de operar de computadores e máquinas, regidos por raciocínio binário e preciso [4]. No momento em que estas máquinas transcendessem a esta restrição, tornar-se-iam inteligentes, podendo raciocinar de forma difusa. Esta

forma de raciocínio é conhecida em inglês por “*Fuzzy*”, tendo como tradução em português nebuloso, difuso.

O Controle “*Fuzzy*”, então, procura incorporar a forma humana de pensar em sistemas de controle. Os controladores obtidos têm uso em sistemas dinâmicos complexos, de comportamento não-linear.

### 3.1 Lógica “*Fuzzy*”

Lógica “*Fuzzy*” é uma técnica de Inteligência artificial, disciplina que procura maneiras de máquinas simularem o raciocínio humano na solução de problemas diversos. Esta abordagem procura mimetizar a forma humana atuar.

Um sistema baseado em “Lógica *Fuzzy*” pode ter sua ação esquematizada pelos seguintes elementos constituintes:

- Fuzzificador,
- Regras, ou base de conhecimento,
- Inferência, ou lógica de tomada de decisões,
- Defuzzificador.

O “fuzzificador” é responsável pelo mapeamento das entradas numéricas em conjuntos *fuzzy*, variáveis lingüísticas.

A “inferência” é realizada mapeando-se valores lingüísticos de entrada em valores lingüísticos de saída com o uso das regras. Esta usa implicações “*Fuzzy*” para simulação de decisões humanas, gerando ações de controle, chamados de consequentes, partindo-se de um conjunto de condições de entrada, chamada de antecedentes.

Esta base de conhecimento representa o modelo do sistema a ser controlado, consistindo numa base de dados e uma base de *regras fuzzy lingüísticas*. A base de dados fornece definições numéricas e a base de regras caracteriza os objetivos do controlador e sua estratégia usada, geralmente fornecida por pessoas especialistas no sistema.

O “defuzzificador” mapeia valores lingüísticos em valores numéricos de saída. Esta função é realizada por uma interface de defuzzificação, obtendo-se um valor discreto que possa ser usado numa ação de controle no mundo real.

A base dos sistemas “*Fuzzy*” é a teoria dos conjuntos “*Fuzzy*”. Estes conjuntos são uma extensão dos conjuntos convencionais, que permitem somente que elementos sejam verdadeiros ou falsos (lógica booleana, bivalente). Conjuntos “*Fuzzy*” permitem que seus elementos possuam um certo “grau de pertinência” associado, sendo esta propriedade conhecida como “multivalência”. Isto permite a aproximação com o mundo real que não é bivalente, é na realidade multivalente com um vasto número de opções ao invés de somente duas. A lógica *Fuzzy*, então, permite trabalhar com tais incertezas de fenômenos naturais de forma rigorosa e sistemática.

A determinação do grau de pertinência, para conjuntos “*Fuzzy*” contínuos, se dá pela análise de “funções de pertinência”. Estas funções possibilitam o cálculo do grau de pertinência de acordo com o valor assumido pela variável [1]. Elas representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas “*Fuzzy*”.

## 4 O sistema de nível de líquidos

A Fig. 1 a seguir mostra um esquema do sistema proposto.

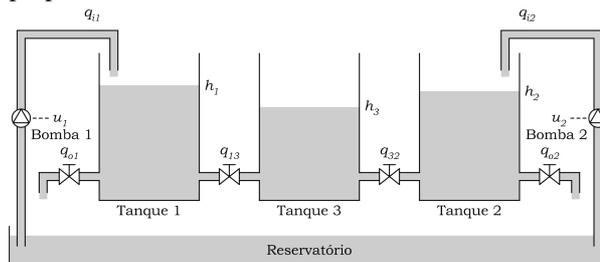


Figura 1 - Esquema do sistema hidráulico proposto

Conforme mostrado na Fig. 1, o sistema de tanques proposto é constituído de três tanques acoplados. As bombas hidráulicas colocadas próximas aos tanques 1 e 3 permitem bombear água do reservatório para os respectivos tanques. Os sensores de nível 1, 2 e 3 medem os níveis de líquido nos tanques. Através de válvulas os tanques são conectados entre si e também permitem a saída da água para o reservatório.

Para uma certa configuração de válvulas o problema de controle consiste em manter o nível de líquido em valores pré-estabelecidos para cada um dos tanques.

A vazão de saída dos tanques varia com a raiz quadrada da altura da coluna de água, considerando o fluxo de saída como sendo turbulento. Isto torna o sistema não-linear. Além disto, o acoplamento entre os tanques faz com que um nível de tanque seja uma perturbação para o tanque vizinho.

O sistema construído utilizou os seguintes materiais:

- Bombas hidráulicas;
- Três potenciômetros;
- Chapa de acrílico de 1m<sup>2</sup> e 5mm de espessura;
- Placa de aquisição de dados AD/DA de 12 bits, com 16 canais de entrada e 2 canais de saída.

Os tanques foram construídos em acrílico transparente, para facilitar a visualização do nível de água nos mesmos. Para construí-los, a chapa de acrílico foi cortada em pedaços de tal maneira que cada tanque, em forma de paralelepípedo, possuísse as seguintes dimensões:

- 350 mm de altura;
- 250 mm x 60 mm de base.

Isto resulta nas seguintes propriedades para cada tanque:

- Área da seção transversal de 150 cm<sup>2</sup>;
- Capacidade volumétrica de 5.25 litros.

O sensor de nível usado é feito acoplando-se um potenciômetro a uma haste de alumínio. Esta haste possui uma bóia na sua outra extremidade que entra em contato direto com a água, fazendo o eixo do potenciômetro girar conforme o nível de água no tanque varia.

A placa AD/DA é instalada num PC Pentium-100, com sua saída ligada a uma régua de bornes.

#### 4.1 Modelo Matemático do Sistema Multi-tanques

Para a modelagem do sistema multi-tanques, leva-se em conta as seguintes variáveis do sistema:

- $Q_{i1}$  e  $Q_{i2}$ : vazão de entrada nos tanques 1 e 2 fornecida pela bomba de esguicho [cm<sup>3</sup>/s];
- $Q_{13}$  e  $Q_{32}$ : vazões entre os tanques 1/3 e 3/2, respectivamente; [cm<sup>3</sup>/s];
- $Q_{o1}$  e  $Q_{o2}$ : vazões de saída dos tanques 1 e 2 para o reservatório [cm<sup>3</sup>/s];
- $H_1, H_2$  e  $H_3$ : nível de líquido nos tanques 1, 2 e 3. [cm]

Usa-se, então, uma analogia com um sistema elétrico, relacionando os parâmetros do sistema hidráulico com os parâmetros “R” e “C” de um circuito elétrico [6]. A resistência (R) é a capacitância (C) são calculadas da seguinte maneira:

$$R = \frac{dH}{dQ_o} \quad (1)$$

$$C = \frac{dV}{dH} \quad (2)$$

A capacitância (C) representa a área do tanque e a resistência (R) a perda de carga que o fluido sofre até chegar ao reservatório. Este valor de resistência é também usado para determinação da influência de um tanque sobre o outro, através de seus respectivos dutos de comunicação.

Com estes parâmetros do sistema linearizado em torno de um ponto de operação, pode-se demonstrar que (sistema mono-tanque) [6]:

$$\frac{H_1(s)}{Q_{i1}(s)} = \frac{R_1}{R_1Cs + 1} \quad (3)$$

Para o sistema de dois tanques acoplados, também pode ser demonstrada a seguinte equação:

$$\frac{H_3(s)}{Q_{i2}(s)} = \frac{R_2}{R_{32}R_2s^2 + C(R_{32} + 2R_2)s + 1} \quad (4)$$

As equações apresentadas servem como modelo linearizado do processo, possibilitando o projeto de controladores lineares para este sistema.

Os parâmetros “R” do sistema são determinados experimentalmente, enquanto que o valor da capacitância dos tanques é determinado pela área da seção transversal do tanque.

## 5 Controladores “Fuzzy” e PI

Inicialmente, foi simulado um sistema Multi-tanque, representado pelo esquema da figura 2:

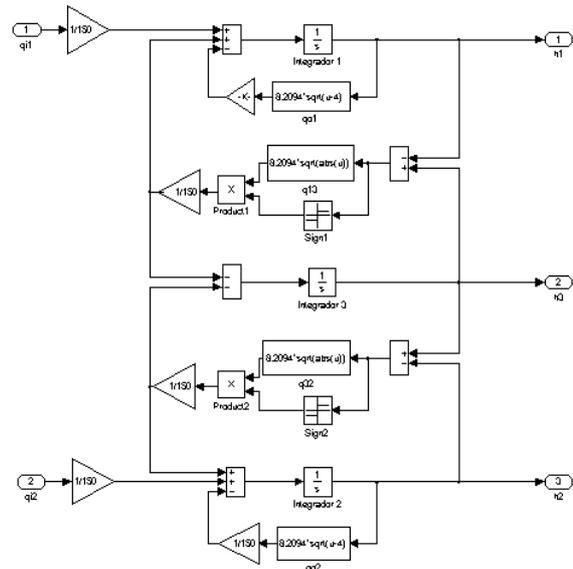


Figura 2 – Multi-tanque em malha aberta

O sistema é testado usando-se um controlador “Fuzzy”, como mostrado na figura 3:

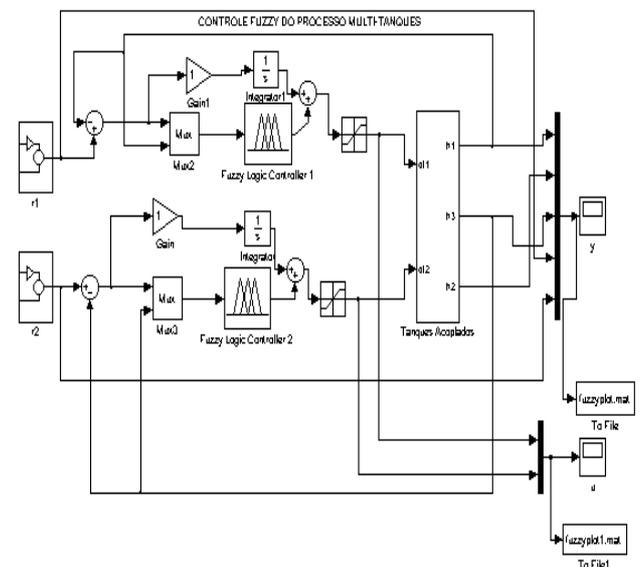


Figura 3 - Simulação do sistema com controlador Fuzzy

O controlador “Fuzzy” projetado segue os seguintes princípios de funcionamento: para valores de erro positivos, a vazão da bomba deve ser máxima e para valores de negativos a vazão deve ser mínima, qualquer que seja a altura de referência. Para alguns níveis, a vazão de entrada, quando o erro for nulo, deve igualar a vazão de saída, resultando num controlador não-linear.

Visando a posterior comparação entre o controle fuzzy e a técnica de controle convencional PI, um canal integral é usado em paralelo ao controlador fuzzy, fato observado na figura 4.

As funções de pertinência das variáveis de entrada, erro e altura, e da variável de saída, vazão da bomba hidráulica, estão representadas pelas figuras 4, 5 e 6. Estas funções de pertinência foram obtidas experimentalmente, sendo ajustadas de forma empírica, de acordo com o sistema analisado.

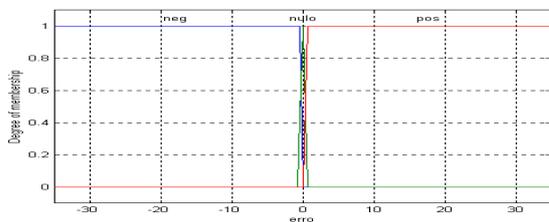


Figura 4 - Funções de pertinência para variável de entrada Erro

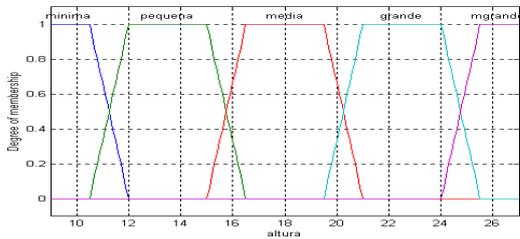


Figura 5 - Funções de pertinência para variável de entrada Altura

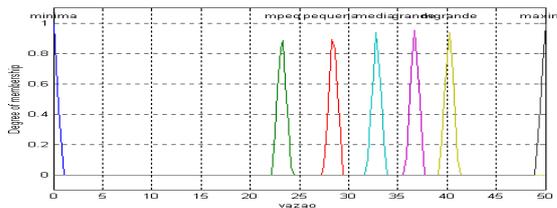


Figura 6 - Funções de pertinência para a saída vazão da bomba

As regras de inferência para este controlador são as seguintes:

1. If (erro is neg) then (vazao is minima) (1)
2. If (erro is pos) then (vazao is maxima) (1)
3. If (erro is nulo) and (altura is minima) then (vazao is mpeq) (1)
4. If (erro is nulo) and (altura is pequena) then (vazao is pequena) (1)
5. If (erro is nulo) and (altura is media) then (vazao is media) (1)
6. If (erro is nulo) and (altura is grande) then (vazao is grande) (1)
7. If (erro is nulo) and (altura is mgrande) then (vazao is mgrande) (1)

Figura 7 - Base de regras

Alguns dados sobre o sistema de inferência “Fuzzy” adotado:

- Método de cálculo de AND: mínimo;
- Método de cálculo de OR: máximo;
- Método de cálculo de Implcação: mínimo;
- Método de cálculo de Agregação: máximo;
- Método de Defuzzificação: centróide.

### 5.1-Projeto do Controlador PI

Controladores PID possuem larga aplicação em processos industriais. Isto se deve, em grande parte, ao seu bom desempenho observado, em malha fechada, quando usado em processos com dinâmica conhecida [5]. Sua simplicidade ajuda na sua implementação em malhas de controle.

Para obtenção do controlador PI, o canal derivativo é anulado pelo uso de uma constante de derivação nula.

Aplicando a transformada de Laplace em ambos os lados da equação do controlador PI, a função de transferência do mesmo é obtida:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p \cdot (T_i \cdot s + 1)}{T_i \cdot s} \quad (5)$$

Com a equação acima e a equação da função de transferência do processo mono-tanque, a função de transferência de malha aberta do sistema é obtida. Fixando-se um valor da constante de integração  $T_i=100s$ , tendo em mãos os parâmetros do processo linearizado (resistência e capacitância), o método LGR, lugar geométrico das raízes, pode ser usado para a determinação do ganho  $K_p$ . Isto é feito partindo-se das especificações de desempenho do controlador PI. Para o presente trabalho, as especificações são as seguintes:

- $M_p=0\%$  (sobrepasso);
- $T_s=20s$  (tempo de subida).

O valor de sobrepasso é escolhido para evitar problemas de transbordo de líquido.

Considerando o ponto de operação em 20cm, o “lugar geométrico das raízes” deste sistema é traçado, sendo representado pela figura 8:

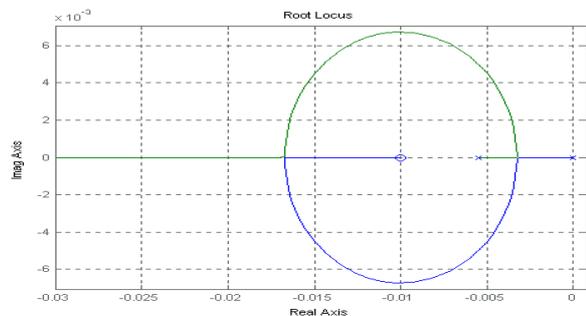


Figura 8 – LGR para o sistema com controlador PI

Através deste gráfico, o ganho proporcional do controlador PI é determinado para as especificações de desempenho citadas.

## 6 Resultados Experimentais

### 6.1 Implementação dos Controladores

Os controladores simulados são implementados via *software*, através de um programa escrito em linguagem C++. Este programa recebe o sinal de tensão correspondente à altura de líquido no tanque e retorna a tensão a ser enviada ao *driver* de potência para acionamento da bomba hidráulica.

A interface entre o programa executado no computador digital e os sinais analógicos do sistema é feita através da placa AD/DA. Todos estes programas foram desenvolvidos em ambiente do compilador Borland C++.

A foto ilustrativa da figura 9 representa o sistema multi-tanque construído. As figuras 10, e 12 representam as respostas aos sinais de teste simulados e as figuras 11 e 13 as respostas aos sinais de teste aplicados diretamente sobre o sistema real. O sinal de teste escolhido é uma onda quadrada de período de 100s, e amplitude de 1cm, sendo aplicada em diversos pontos de operação, 16cm, 20cm e 24cm, para observação do desempenho das estratégias de controle implementadas.

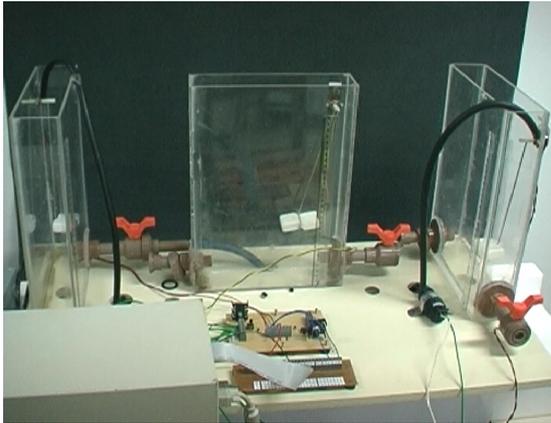


Figura 9 - Sistema Multi-tanque implementado

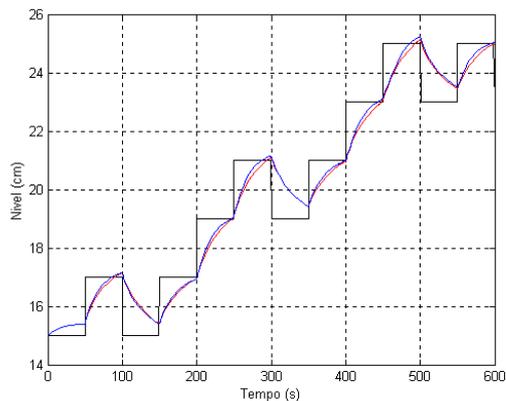


Figura 10 – Resposta simulada dos níveis dos tanques 1 e 2 ao sinal de teste, controlador PI.

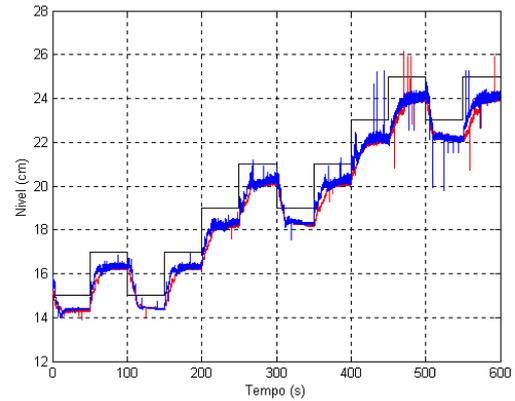


Figura 11 - Resposta obtida pelo sistema dos níveis dos tanques 1 e 2 ao sinal de teste, controlador PI.

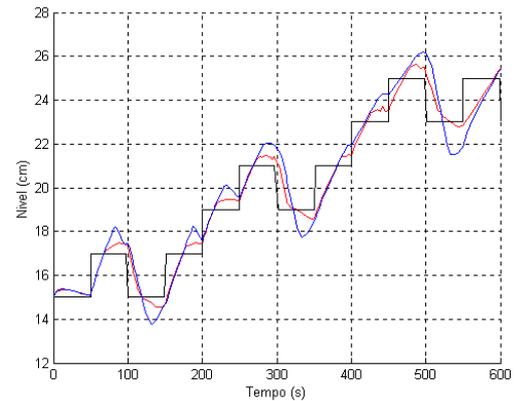


Figura 12 - Resposta simulada dos níveis dos tanques 1 e 2 ao sinal de teste, controlador Fuzzy.

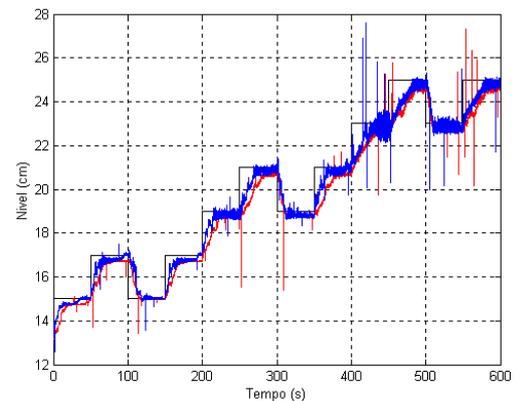


Figura 13 - Resposta obtida pelo sistema dos níveis dos tanques 1 e 2 ao sinal de teste, controlador Fuzzy.

A similaridade entre os gráficos obtidos em simulação e os gráficos obtidos no sistema real valida a técnica de modelagem empregada.

Para a resposta ao degrau, o controlador apresenta pouco ou nenhum sobrepasso, para os testes representados pela figura 13, com tempo de subida minimizado pela própria característica dos controladores “Fuzzy” projetados.

A comparação entre os gráficos das figuras 11 e 13 mostra a melhora no desempenho do sistema usando-se um controlador nebuloso. O controlador

PI apresentou erro de regime em torno de  $0.8\text{cm}$  e tempo de subida mínimo de  $20\text{s}$ . Entretanto, o tempo de subida do sistema com controlador difuso fora de  $15\text{s}$  com erro de regime máximo de  $0.2\text{cm}$ .

A taxa de amostragem, cerca de  $50\text{ms}$  foi compatível com as constantes de tempo do sistema. Os controladores implementados apresentaram boa precisão com pequeno erro de regime permanente e nenhum sobrepasso. O tempo de subida do sistema em malha fechada é reduzido pelas regras utilizadas.

A presença de ruído, percebida pelos picos de tensão observados nas figuras 11 e 13, poderia ser evitada com filtros passa-baixa. Estes ruídos inviabilizaram o uso do canal derivativo de um controlador PID. Isto gerou uma resposta com elevado tempo de acomodação. O principal efeito disto é m controlador PI cuja atuação não consegue *zerar* o erro de regime dentro do período da onda quadrada.

## 7 Conclusões

Os resultados das diversas simulações realizadas permitiram a avaliação prévia do comportamento do sistema quando operando com o controlador projetado. A ferramenta de simulação usada, o ambiente Matlab-Simulink, foi muito útil para o projeto dos controladores e avaliação do desempenho dos mesmos.

O projeto de controladores “Fuzzy” foi implementado com a “Fuzzy Logic Toolbox”, parte integrante do *software* MATLAB, e permitiu a avaliação do desempenho do controlador com diversas combinações de configurações possíveis. Isto consiste no uso de diferentes: métodos de defuzzificação, número de regras, número de funções de pertinência, entre outros.

O sensor usado, consistindo de um potenciômetro logarítmico com acionamento conectado a uma haste com bóia, apresentou comportamento suave e boa precisão.

A disponibilidade de programas escritos em linguagem C++ facilitou a implementação dos controladores “Fuzzy” no sistema objeto de análise [4]. Com o código fonte destes programas em mãos, torna-se possível o teste de diversas combinações de controladores (de acordo com métodos de defuzzificação, implicação, etc.) para avaliação de desempenho dos mesmos.

A técnica de inteligência artificial “Lógica Fuzzy” mostra-se bastante útil para controle de plantas comprovadamente não-lineares. A observação dos gráficos de resposta, tanto os simulados quanto os reais, mostram sua adequação para o tratamento de problemas não-lineares. A sua associação com outras técnicas de controle inteligente, como Redes Neurais (sistema Neurofuzzy), poderia apresentar ganhos significativos em termos de desempenho do sistema em malha fechada.

## Agradecimentos

Agradecemos à FINATEC e ao CNPq pelo suporte financeiro prestado.

## Referências Bibliográficas

- [1] Shaw, I. S., Simões, M. G., (1999) Controle e Modelagem Fuzzy, Edgard Blücher, São Paulo.
- [2] Kasabov, N. K., (1996) Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering, MIT Press.
- [3] Harris, C. J., Moore, C. G., Brown, M., (1993). Intelligent Control – Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets, World Scientific Publishing Co., Singapore, v.2, 380p.
- [4] Bauchspiess, A., (1995) Servocontrole preditivo de robôs guiados por sensores, *Universität Erlangen-Nürnberg*
- [5] Normey-Rico, J. E., (2001) Projeto de Controladores PID industriais, Santa Catarina.
- [6] Gosmann, H. L., (2002) Um sistema Multivariável de tanques acoplados para avaliação de técnicas de controle, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília.
- [7] Garcia, C., (1997) Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [8] Johansson, K. H., (2000) The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*,8(3):456–465.
- [9] Gambier, A. e Unbehauen, H. Adaptive predictive state-space control of a multivariable 3-tank system. Em *38th Conference on Decision & Control*, páginas 1234–1239, Phoenix, Arizona, dezembro de 1999.
- [10] Ko, C. C., Chen, B. M., Chen, J., Zhuang, Y., e Tan, K. C. Development of a web-based laboratory for control experiments on a coupled tank apparatus. *IEEE Transactions on Education*, 44(1):76–86, fevereiro de 2001.