

UMA ABORDAGEM CLÁSSICA E UMA INTELIGENTE APLICADAS À MODELAGEM E CONTROLE DE UM SISTEMA DE NÍVEL DE LÍQUIDO

REBOUÇAS, RAFAEL, R.

*Dept. de Sistemas e Controle, Div. de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Pça Marechal Eduardo Gomes, 50. Vila das Acácias, CEP 12228-900, S. J. Campos-SP
E-mails: rafaelrr@ita.br*

SCHNITMAN, LEIZER

*Dept. de Engenharia Química, Escola Politécnica da UFBA
Rua Aristides Novis N° 2, Federação, Laboratório de Automação - 2o andar, CEP 40210-630, Salvador- BA
E-mails: leizer@ufba.br*

Abstract— This paper shows a classical and an intelligent approach for treat the problem of modeling and control of a liquid level system. A prototype was done to obtain practical results. Two models were used, one based on differential equations and another based on Artificial Neural Networks. The Artificial Neural Network was trained using experimental data. The obtained models were validated, and then used to design the proposed controllers based on classical and intelligent technical's. The paper describes the controller's design and shows their simulated and experimental performance.

Keywords— Modeling, Classical Control, Intelligent Control

Resumo— Este trabalho mostra uma abordagem clássica e uma inteligente para tratar o problema de modelagem e controle aplicados a um sistema de nível de líquido. Um protótipo deste sistema foi construído para realização de ensaios práticos e comprovação de resultados. Deste sistema foram obtidos dois modelos: um por equações diferenciais e outro estimado por Redes Neurais Artificiais, treinadas através dos dados experimentais. Os modelos foram validados com base nos dados experimentais e utilizados para o projeto de controladores. O artigo também detalha o projeto dos controladores e ilustra os resultados obtidos quando estes são aplicados em ambiente real e simulado.

Palavras-chave— Modelagem, Controle Clássico, Controle Inteligente.

1 Introdução

Este trabalho descreve técnicas de modelagem e controle, clássico e inteligente aplicados em um sistema de nível de líquido. Este sistema, foco deste trabalho, foi escolhido por apresentar aspectos práticos e didáticos interessantes, como fácil entendimento da sua dinâmica e processo de modelagem e construção de um protótipo relativamente fácil. Além de exibir um forte apelo didático, este sistema tem sua aplicabilidade também bastante difundida em meios industriais, principalmente na indústria petroquímica [5].

O modelo linearizado deste sistema é bastante difundido na literatura clássica de controle de sistemas [2],[7],[8], contudo, neste trabalho mostra-se que o seu modelo é não-linear, tornando este sistema mais atraente para aplicação de técnicas de modelagem e controle propostas.

O sistema de nível de líquido foi construído em pequena escala para realização de ensaios práticos, no sentido de implementar e analisar as técnicas abordadas neste trabalho. Diante da disponibilidade de dados experimentais extraídos do protótipo, foram propostas duas abordagens para modelagem: uma clássica utilizando um modelo de equação diferencial não-linear, e outra inteligente utilizando um modelo estimado por Redes Neurais Artificiais (RNA). Tais

modelos foram simulados e comparados a fim de avaliar o desempenho de ambos.

Diante dos modelos validados do sistema, foram propostos dois controladores, um controlador por linearização exata, e outro controlador inteligente, o controlador *Fuzzy*. O controle por linearização exata descrito em [4],[10], tem sua lei de controle baseada no modelo de equações diferenciais do sistema, e ilustra bem sua aplicabilidade e o seu desempenho. Já o controlador *Fuzzy*, o qual tem sua lei de controle baseada em heurísticas [6],[9], foi projetado de maneira empírica, ou seja, sua base de regras e funções de pertinência foram obtidos através do conhecimento especialista a respeito da dinâmica do sistema de nível de líquido.

Nas duas estratégias de controle propostas, foram realizadas simulações em ambiente MATLAB® para o projeto e ajuste destes. Estes controladores foram implementados ao protótipo, onde os resultados obtidos em ensaios experimentais validaram a metodologia e técnicas utilizadas.

2 O Sistema de Nível de Líquido

O sistema de nível de líquido tratado neste trabalho é semelhante ao sistema *SISO* (*single input, single output*) amplamente difundido em livros de controle clássicos [2],[8], os quais adotam um modelo linear

para este sistema, contudo, em livros de identificação de sistemas como [1], este modelo é tratado como não-linear. O sistema de nível de líquido discutido nestas literaturas, pode ser composto por um recipiente ou tanque de diversos tipos, a depender do formato deste, o grau de não-linearidade deste sistema pode aumentar no caso de um reservatório onde sua seção não é constante, como em um cone [9]. Neste trabalho foi utilizado um reservatório cilíndrico, onde a variável de entrada (q_i) é um fluxo de vazão determinado pelo atuador, e a variável de saída é representada pela coluna (h) de água, formada pela diferença entre as vazões de entrada e saída (q_o), conforme ilustrado na Figura 1.

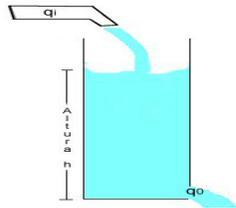


Figura 1. Sistema de Nível de Líquido

2.2 O Protótipo do Sistema de Nível de Líquido

Para protótipo do sistema de nível de líquido, foi utilizada uma bomba de combustível automotiva como atuador, a qual provê vazão de entrada (q_i) a entrada do cilindro. Como sensor foi utilizado uma balança comercial modelo Urano UD-Mini TMS, posicionada logo abaixo do cilindro, com o objetivo de fornecer o peso da coluna de água de nível (h). A este protótipo também foi incorporado um reservatório a fim de fornecer água à bomba e ao mesmo tempo receber o líquido escoado pelo orifício de saída do cilindro. A foto do protótipo utilizado neste trabalho está ilustrada na figura 2.

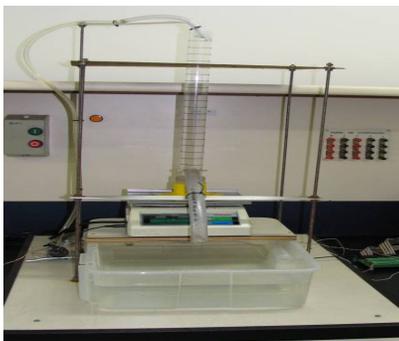


Figura 2. Foto do Sistema de Nível de Líquido

3 Hardware e Software Utilizados

Para operar o protótipo do sistema proposto, ou seja, enviar sinais de comandos ao atuador e interpretar os sinais do sensor, foi utilizado um computador com uma Placa de Aquisição de Dados Advantech PCL-812PG.

Dois circuitos eletrônicos foram incorporados ao protótipo, os quais serviram como acopladores de sinais entre a placa de aquisição de dados, atuador e sensor. Para o sinal de saída da placa de aquisição de dados, foi implementado um Driver de Corrente a fim de fornecer potência suficiente para que a bomba pudesse ser acionada. Já para o sinal de entrada, ou seja, o sinal proveniente da balança, foi acoplado um pequeno circuito a sua célula de carga. A função deste circuito é fornecer um sinal de tensão amplificado, limpo e proporcional ao peso da coluna de água do cilindro.

Para operar a Placa de Aquisição de Dados, foi utilizado o *Real-Time-Workshop* e o *Real-Time-Windows-Target*, dois dos *Toolbox* do MATLAB®. Através destes, foi possível trabalhar no próprio ambiente do *Simulink* enviando e recebendo dados do sistema (via entrada e saída analógica da placa) em tempo real. Os sinais de tensão provenientes da placa de aquisição foram tratados no próprio ambiente *Simulink/MATLAB*®, a fim de que a tensão enviada ao atuador representasse a vazão (q_i), e a tensão recebida do sensor representasse a altura (h). A Figura 3 ilustra o digrama da interação do sistema dinâmico com o software e hardware utilizados.

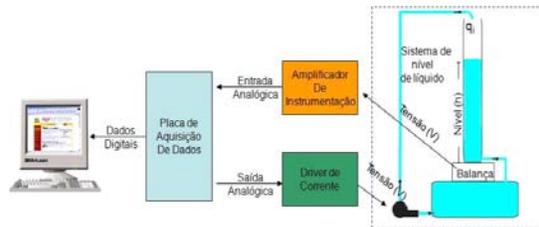


Figura 3. Diagrama do Hardware do Sistema

4 Modelos Propostos para o Sistema de Nível de Líquido

Nesta seção são apresentadas uma abordagem clássica e uma inteligente para modelar o sistema de nível de líquido. A primeira abordagem se refere ao modelo de equações diferenciais, e a segunda ao modelo estimado por uma Rede Neural Artificial. Esta sessão mostra também, uma comparação entre os resultados obtidos com os dois modelos e entre os resultados dos ensaios experimentais.

4.1 Modelo de Equação Diferencial Não-Linear

A equação diferencial que representa o modelo do sistema de nível de líquido foi fundamentada em princípios de mecânica dos fluidos, na qual uma das relações que compõe o modelo final do sistema foi obtida através da equação de Bernoulli apresentada pela equação (1).

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g h_2 \quad (1)$$

Onde P representa a pressão, V a velocidade de escoamento do líquido, h a altura, g a gravidade local e ρ a densidade do líquido. Os índices subscritos das

variáveis descritas, representam os pontos onde são obtidas as medidas, para o caso do sistema de nível de líquido o índice 1 representa as variáveis pertinentes a seção do cilindro, e o índice 2 ao fluxo de saída (q_o). Simplificando a equação (1) foi obtida a equação (2), que representa a velocidade de saída do líquido do cilindro.

$$V_2 = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

Desse modo a vazão de saída q_o pode ser descrita por (3), onde qual A_s representa a área transversal do cilindro.

$$q_o = A_s V_2 \quad (3)$$

Utilizando a equação de continuidade descrita em (4).

$$q_i - q_o = A_t \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

Onde q_i é a vazão de entrada e A_t é a área transversal do cilindro, e substituindo (3) em (4) é obtida a equação (5).

$$q_i - A_s \sqrt{2gh} = A_t \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

No intuito de simplificar (5), é adotada uma constante K descrita em (6), onde R_s representa o raio do orifício de saída do cilindro.

$$K = R_s^2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad (6)$$

Desse modo, é então obtida a equação (7), a qual descreve a dinâmica do sistema de nível de líquido.

$$\dot{h} = \frac{1}{A_t} (q_i - K \sqrt{h}) \quad (7)$$

4.2 O Modelo Estimado por Redes Neurais Artificiais

Uma das Redes Neurais Artificiais (RNA) que torna a modelagem de um sistema dinâmico possível é a RNA Time-Delay-Neural-Network (TDNN). Este tipo de rede permite representação de estados, o que a torna uma ferramenta apropriada para este tipo de aplicação, além de outras diversas, tais como: processamento de voz, diagnósticos de equipamentos como motores elétricos, e previsão não-linear [3],[6].

4.3 Treinamento da RNA

O treinamento da RNA TDNN foi realizado através dos históricos dos dados de entrada e saída do sistema. De modo que o vetor de entrada foi representado pela vazão fornecida pelo atuador (q_i), e o vetor de saída foi adotado como o nível da coluna de líquido (h). Esses pares de dados foram adquiridos durante 1600s utilizando uma taxa de amostragem de 10Hz.

O algoritmo de treinamento utilizado foi o *Levenberg-Marquardt*, e todo o treinamento da RNA foi realizado em ambiente MATLAB[®] utilizando os recursos do *Neural-Network Toolbox*. Para obter melhores resultados, foram treinadas diversas

topologias de RNA's, variando número de Regressores Exógenos, Autoregressores, e número de Neurônios na camada escondida. Em todas as redes treinadas foi utilizada uma camada escondida, onde foi adotada a Tangente Hiperbólica como função de ativação. Já na camada de saída, foi utilizada uma função de ativação linear. O índice de desempenho adotado foi o erro médio quadrático.

Após o treinamento de diversas topologias de RNA's, a que apresentou o melhor desempenho estatístico, estava configurada com 4 Autoregressores, 3 Regressores Exógenos e 4 Neurônios da Camada Escondida. De posse destes resultados, novas RNA's foram treinadas utilizando este tipo de topologia, até que o índice de desempenho desejado fosse atingido.

4.4 Resultados Experimentais

Para validar os dois modelos propostos foram realizados ensaios com o protótipo. O método de validação adotado constituiu-se em comparar o comportamento simulado do modelo de equações diferenciais (ED) e modelo por RNA, com os dados obtidos em ensaios do protótipo. Os resultados desta análise estão ilustrados na Figura 4.

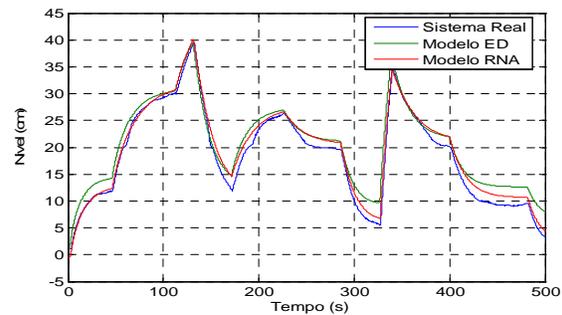


Figura 4. Gráfico comparativo entre os modelos e sistema real.

Como esperado, o modelo estimado por RNA apresentou o comportamento dinâmico mais próximo do sistema real do que o modelo de equações diferenciais. Isto se deve a capacidade da RNA em modelar todas as dinâmicas ou não-linearidades, os quais não foram inseridos ou modelados ao sistema de equações diferenciais [3]. Assim, por mostrar um comportamento próximo do sistema real, este modelo será utilizado para simulação e projeto dos controladores propostos.

5 Controle por Linearização Exata

O Controle por Linearização Exata é baseado no modelo de equações diferenciais do sistema ao qual se deseja controlar. Sua aplicação tem como objetivo formular uma lei de controle, tal que, o sistema controlado se comporte de maneira linear [4] e [10]. Este método é bastante apropriado para sistemas não-lineares onde o modelo é conhecido [9] e [11], como no caso do sistema abordado neste trabalho.

Dado um determinado sistema não-linear, e supondo que seu modelo de equações diferenciais possa ser escrito da seguinte maneira.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (8)$$

Considerando que o sistema de nível de líquido tem um modelo que pode ser escrito da forma da equação (8), então são obtidas as relações descritas em (9).

$$f(x) = \frac{-k\sqrt{x}}{A_T} \quad g(x) = \frac{1}{A_T} \quad x = h \quad (9)$$

Adotando a lei de controle por linearização exata, é utilizado o método de linearização por entrada e saída [4], [10], apresentado pela equação (10), onde u é o sinal de controle enviado ao sistema.

$$u = \frac{1}{g(x)}(-f(x) + \gamma(x_{ref} - x)) \quad (10)$$

Substituindo (9) em (10), é então obtida a lei de controle desejada descrita pela equação (11).

$$u = K\sqrt{x} + \alpha(x_{ref} - x) \quad (11)$$

Onde $K = A_T\gamma$ e α é uma constante que atua como um ganho do controlador.

5.1 Simulação da Lei de Controle

Para analisar o comportamento do controlador proposto, foram realizadas simulações no ambiente Simulink/MATLAB®. O modelo estimado por RNA por representar o sistema com mais fidelidade do que o modelo de equações diferenciais foi utilizado como o modelo da simulação, o diagrama de blocos do sistema controlado é apresentado pela Figura 5.

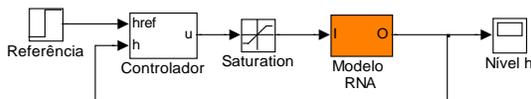


Figura 5. Diagrama de Blocos do Sistema de Controle

Na simulação ilustrada pela Figura 5, o bloco saturador atuou de forma a restringir o sinal de controle entre os valores limites do atuador, de modo a representar as limitações físicas deste. O resultado da resposta simulada do sistema controlado está ilustrado na Figura 6.

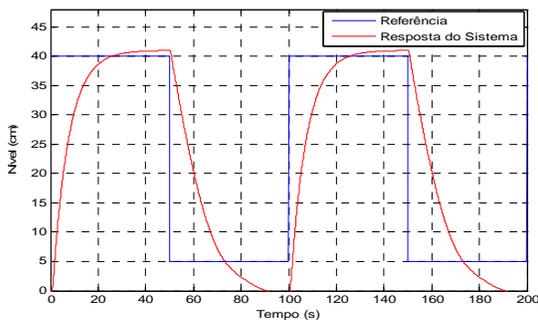


Figura 6. Simulação do Controle por Linearização Exata

Pelo fato do controle por linearização exata ter sido projetado com base no modelo de equações diferenciais, o seu desempenho também está

vinculado a este, de modo que o erro de regime apresentado pelo gráfico da Figura 6, ilustra bem a relação direta entre desempenho e o modelo no qual o controlador foi baseado.

5.2 Resultados Experimentais

Após obtidos resultados satisfatórios com a simulação do controle por linearização exata, este controlador foi testado no protótipo para ser validado. A Figura 7 compara os resultados obtidos com a simulação e com o ensaio experimental.

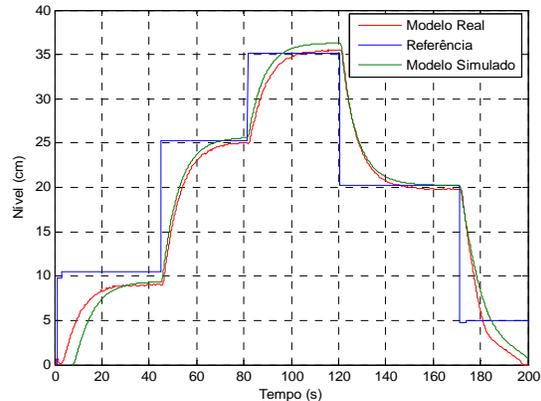


Figura 7. Gráfico comparativo entre o sistema de controle simulado e o sistema real.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais mostraram que o desempenho do controlador foi satisfatório. Seu regime transitório foi isento de *overshoots*, todavia, foi constatado erro de regime para referências menores que 15 cm. Tal comportamento foi observado em simulações, sendo perfeitamente previsível que a resposta do protótipo desempenhasse um comportamento semelhante.

Uma possível solução para o problema de erro de regime do controle por linearização exata seria determinar um modelo de equações diferenciais mais preciso. Esta solução não é abordada neste trabalho, este resultado apenas pretende demonstrar a relação de desempenho entre controlador e o modelo no qual foi baseado o seu projeto.

6 Controle Fuzzy

O controlador *Fuzzy* proposto para o sistema de nível de líquido foi projetado de maneira empírica, ou seja, a sua estrutura, base de regras, e funções de pertinência, foram definidas baseadas no conhecimento especialista do sistema dinâmico [8],[6]. Basicamente, o projeto deste controlador foi constituído em três etapas: Definição das entradas e saídas do controlador; definição das funções de pertinência e elaboração da base de regras [8]. Essas três etapas mostradas nas seções subsequentes foram formuladas de modo a obter um sistema de controle obviamente estável, e que apresentasse um desempenho satisfatório tanto para o erro de regime, quanto para o transiente do sistema, além de respeitar os limites físicos do atuador.

6.1 Definição das Entradas e Saídas do Controlador

As variáveis de entrada escolhidas para o controlador *Fuzzy* foram: a referência e o erro. A derivada do erro foi testada como sinal de entrada, mas como o sistema tem uma dinâmica lenta, um desempenho melhor foi obtido utilizando-se apenas o erro, tais variáveis de entrada também foram adotadas em um trabalho com um sistema semelhante [5]. A variável de saída foi definida como a vazão de entrada do sistema (q_i).

6.2 Base de Regras

Erro	Nível	Negativo	Nulo	Positivo
Muito Baixo		Vazão Mínima	Vazão Muito Pequena	Vazão Máxima
Baixo		Vazão Mínima	Vazão Pequena	Vazão Máxima
Médio		Vazão Mínima	Vazão Média	Vazão Máxima
Alto		Vazão Mínima	Vazão Alta	Vazão Máxima
Muito Alto		Vazão Mínima	Vazão Muito Grande	Vazão Máxima

6.3 Funções de Pertinência

A escolha e o ajuste das funções de pertinência foram obtidas de maneira empírica. Entre as opções testadas, a melhor escolha está apresentada pelas Figura 8, 9 e 10, as quais representam as variáveis de entrada, erro e saída respectivamente.

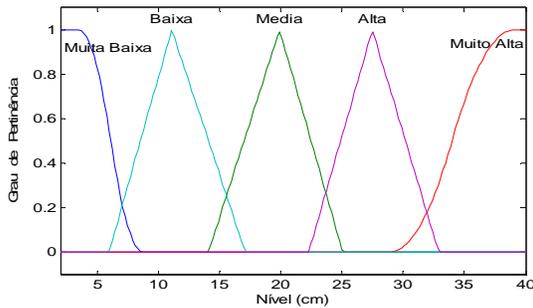


Figura 8. Função de Pertinência da variável Referência.

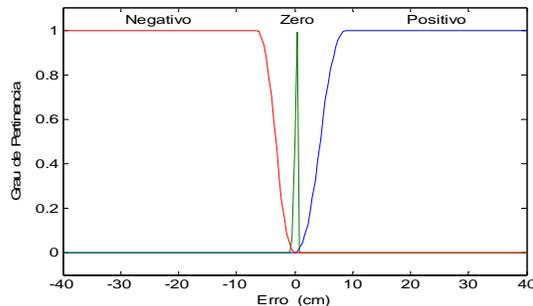


Figura 9. Função de Pertinência da variável Erro.

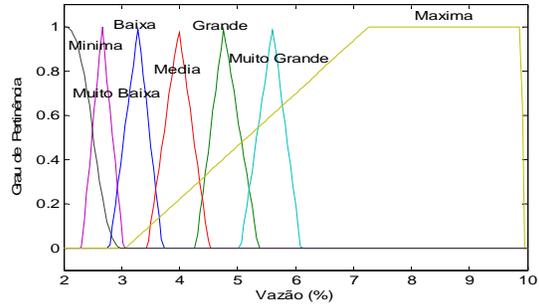


Figura 10. Função de Pertinência da variável de saída vazão.

6.4 Simulação do Controlador

A simulação do controlador *Fuzzy* também foi realizada no ambiente Simulink/MATLAB®, onde foram utilizados os recursos do *Fuzzy Logic Toolbox*, o qual facilitou a etapa de projeto e implementação. O resultado da simulação está ilustrado na Figura 11.

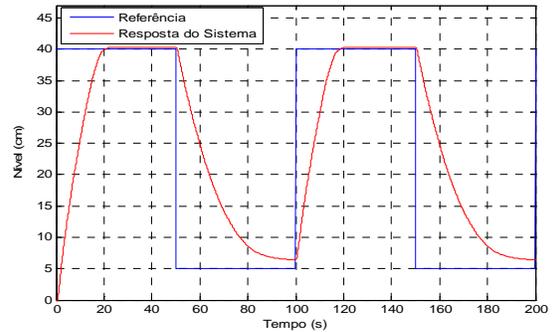


Figura 11. Gráfico de resposta do sistema.

6.5 Resultados Experimentais

Dado ao sucesso obtido com a simulação do Controlador *Fuzzy*, utilizando as especificações propostas nas subseções (6.1), (6.2) e (6.3), este foi implementado. Na Figura 12 está ilustrado o gráfico que valida os resultados obtidos com a simulação do modelo, nele está contido os resultados do sistema simulado e do ensaio com o protótipo.

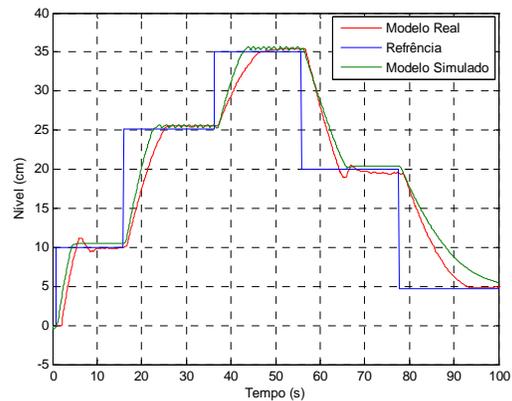


Figura 12. Gráfico com a comparação entre o sistema de controle simulado e o sistema real.

De acordo com o gráfico da Figura 12. O desempenho do controlador para todas as referências pode ser considerado adequado, já que apresentou regime transitório com pequenos *overshoots*, e pequenos erros de regime.

Assim, conforme apresentado nesta seção, um dos principais aspectos favoráveis do controlador *Fuzzy*, é que o seu projeto pode ser baseado apenas em conhecimentos heurísticos a respeito do sistema. Como desvantagens de seu uso, podem-se citar a impossibilidade de demonstração para casos gerais, e a impossibilidade de comprovação de estabilidade para todas as regiões e situações possíveis.

7 Desempenho dos Controladores

De modo a apresentar um quadro comparativo entre os resultados obtidos com os controladores propostos, é apresentado na Figura 13 um gráfico que mostra o comportamento de ambos para uma mesma referência.

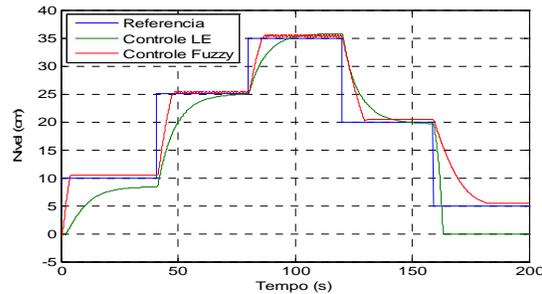


Figura 13. Gráfico comparativo entre os controladores propostos.

De forma a medir de maneira quantitativa o desempenho dos controladores, é apresentado na Tabela 1 os índices de desempenho normalizados.

Tabela 1. Índice de desempenho dos controladores propostos.

Índice de Desempenho Normalizado	Controle <i>Fuzzy</i>	Controle Por Linearização Exata
ISE	0.6213	1
IAE	0.5377	1
ITAE	0.6102	1
ITSE	0.7674	1

8 Conclusão

Este trabalho pretendeu mostrar alguns aspectos teóricos e práticos envolvidos na modelagem e controle propostos ao sistema de nível de líquido.

No aspecto da modelagem, as Redes Neurais Artificiais se sobressaíram como uma ferramenta muito útil no intuito de representar sistemas dinâmicos com modelos matemáticos desconhecidos, ou em substituição a modelos imprecisos, como o modelo de equações diferenciais discutido neste trabalho.

Para tratar o problema do controle de sistemas não-lineares de maneira analítica, foi proposto o Controle por Linearização Exata. Foi observado erros de regime insatisfatório para regiões em que o

modelo de equações diferenciais divergia em relação ao comportamento real do sistema dinâmico.

Finalizando esse trabalho, foi proposto o controlador *Fuzzy*. Foi mostrado que a partir do conhecimento especialista a respeito do sistema dinâmico, foi possível projetar um sistema de controle bastante adequado à aplicação proposta.

De maneira geral, o desempenho dos controladores foi satisfatório para o sistema dinâmico abordado. Os resultados práticos validaram a metodologia utilizada, onde foi apresentada a possibilidade de projetar e aplicar técnicas de controle, fazendo-se o uso de um modelo estimado por RNA e utilizando ferramentas computacionais como MATLAB® e Simulink®.

Agradecimentos

À FAPESB pelo suporte financeiro em forma de bolsa concedida.

Referências Bibliográficas

- [1] Aguirre, Luis A. (2001). *Introdução À Identificação de Sistemas, Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, 2ª Edição, Editora UFMG.
- [2] Dorf, Richard C. e Bishop H. (1998). *Sistemas de Controle Modernos*, 8ª edição, LTC.
- [3] Haykin, S. (2001). *Redes Neurais – Princípios e Prática*, Bookman.
- [4] Khalil, Hassan K. (1995). *Nonlinear Systems*, Prentice Hall.
- [5] Luna Filho, Fernando M., Gosmann, Hugo L., Bauchspiess, Adolfo. (2002). *Controle Fuzzy para um Sistema de Nível de Líquido*, CBA.
- [6] Nascimento, Cairo L. e Yoneyama, T. (2000). *Inteligência Artificial em Controle e Automação*, 1ª edição, FAPESP.
- [7] Ogata, K. (2000), *Engenharia de Controle Moderno*, 2ª edição, LTC.
- [8] Shaw, Ian S. e Simões, Marcelo G. (2001). *Controle e Modelagem Fuzzy*, 1ª edição, FAPESP.
- [9] Schnitman, L. (2001). *Intelligent Controllers For Dynamic Systems With State and Input Constraints and Subjected to Model Uncertainties*, ITA.
- [10] Sontang, Eduardo D. (1998). *Mathematical Control Theory Deterministic Finite Dimensional Systems*, Springer.