

ONLINE NEUROFUZZY CONTROLLER: APLICAÇÃO EM TANQUES ACOPLADOS

CELSON J. F. DE ARAÚJO^{1,2}, WALMIR M. CAMINHAS¹, BENJAMIM R. MENEZES¹, HORÁCIO B. POLLI²

¹Laboratório de Inteligência Computacional, Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Estado de Minas Gerais - UFMG

Av Pres. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte – MG, CEP 31270-901

²Laboratório de Controle de Processos, Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Campus Universitário Bom Retiro, Joinville – SC, CEP 89223-100

E-mails: celso@cpdee.ufmg.br, caminhas@cpdee.ufmg.br, brm@cpdee.ufmg.br,
dee6hbp@joinville.udesc.br

Abstract— In this paper, controllers for coupled liquid tanks are introduced with the objective of studying the advantages and possibilities of an *Online Neurofuzzy Controller* comparing with classic controllers: *PI* and *Mamdani*. The system built for liquid level control is composed by: hydraulic pumps, actuators, level sensors, valved coupled tanks, computer, and Simulink® (MATLAB®) software implemented and simulated controller. This is a non-linear and multivariable system. The objective's analysis will be done considering the controller project stages and experimental results.

Keywords— Fuzzy Control, intelligent control, control systems, level control.

Resumo— Neste artigo, controles para tanques acoplados serão introduzidos com o objetivo de estudar as vantagens e a possibilidade de um controlador *ONFC (Online Neurofuzzy Controller)* comparando com os controladores *PI* e *Mamdani*. O sistema de controle de nível de líquido é composto de bombas hidráulicas, atuadores, sensores de nível, válvulas, computador e o programa Simulink® (MATLAB®) com placa de aquisição de dados. Trata-se de um sistema não-linear e multivariável. A análise e comparação serão feitas considerando os estágios do projeto e dos resultados experimentais obtidos.

Palavras-chave— Controle *Fuzzy*, controle inteligente, sistemas de controle, controle de nível

1 Introdução

Nos últimos anos o potencial de manuseio de incertezas e de controle de sistemas complexos tornados possíveis pela Lógica *Fuzzy* estão sendo combinados com Redes Neurais Artificiais, que por sua vez, possuem características de adaptação e aprendizagem. A palavra normalmente empregada é simbiose que vem gerando novas classes de sistemas e de controladores *Neurofuzzy (NFC)*, combinando características individuais em sistemas adaptativos e inteligentes.

Seguindo-se a linha de raciocínio das redes *Neurofuzzy (NFN)*, os controladores que se baseiam neste tipo de rede se propõem a agregar as características positivas dos controladores *Fuzzy* e dos controladores neurais. Assim, a possibilidade de utilização de conhecimento prévio, bem como a capacidade de adaptação de sua estrutura, possibilita ao controlador *Neurofuzzy* grande apelo na sua aplicação em sistemas de controle.

Por outro lado, as redes *NFN* têm sido utilizadas com sucesso em diversas aplicações, destacando-se trabalhos na área de identificação e previsão de falhas em sistemas dinâmicos, identificação e previsão de sistemas (Yamakawa, 1992), (Caminhas et al., 1996 e 1998), (Landim et al., 2000). Observa-se, porém, uma lacuna em relação à aplicação das redes *NFC* na função de controladores.

O controlador *Online Neurofuzzy (ONFC)* apresentado por Gouvêa et al. (2005), tem como

principal característica, além da simplicidade de sua estrutura, a utilização do erro da saída desejada do sistema como entrada e para a correção *online* de seus pesos (parâmetros livres). Esta característica difere de diversas outras estruturas de controladores neurais e *neurofuzzy*, que só utilizam este erro para a adaptação de seus pesos (Jang et al., 1997).

Com o intuito de se verificar o desempenho da estrutura do controle *ONFC*, o mesmo é aplicado no controle de nível de tanques acoplados. Os resultados são comparados com os obtidos a partir de controladores *PI* e *Mamdani* (Mamdani, 1975).

A escolha do sistema de controle para níveis de tanques acoplados, além de ser um caso bastante comum em industriais químicas, petroquímicas, celulose e de alimentos, possibilita a averiguação e análise da grande maioria dos objetivos geralmente estabelecidos em sistemas de controle. Como a planta do controle proposto é do tipo não linear e multivariável e de fácil manipulação pode-se estabelecer objetivos diversos utilizando as mais variadas técnicas e estratégias de controle (Ko et al., 2001), (Filho et al., 2002) e (Araújo et al., 2005).

Uma estratégia de controle tal como o controle *Fuzzy* é muito apropriado para tais sistemas visto que pode utilizar conhecimentos práticos e empíricos que são incorporados no controle através de variáveis lingüísticas e de regras de inferência (Mamdani, 1977).

2 Sistema de controle de nível de líquidos

O problema de controle consiste em manter o nível de líquidos dos tanques 1 e 2 em valores definidos por referência, limitadas entre 17cm e 25cm. Figura 1.

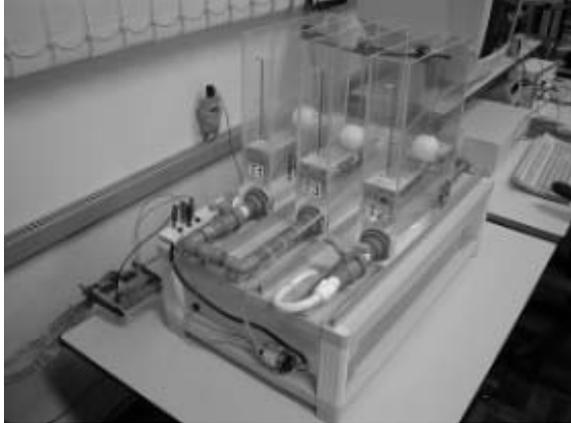


Figura 1 – Sistema de nível de líquido implementado.

O sistema de tanques proposto é composto por três tanques acoplados. A comunicação entre os tanques é feita por válvulas configuradas na posição aberto. As válvulas de saída relacionadas aos tanques 1 e 2, possibilitam o escoamento da água para o reservatório. As bombas hidráulicas permitem bombear água do reservatório para os tanques 1 e 2. Os sensores de nível 1, 2 e 3 medem os níveis de líquido dos tanques, respectivamente.

Os tanques foram construídos em chapas de acrílico transparente em forma de paralelepípedo com as seguintes dimensões: 35cm de altura e 25cm x 6cm de base. Cada tanque possui: área de seção transversal de 150cm² e capacidade volumétrica de 5,25 litros.

3 Modelamento do sistema de tanques acoplados

As variáveis utilizadas para descrever o sistema de tanques acoplados são apresentadas a seguir e indicadas na Figura 2.

- q_{ij} – vazão nos tanques (cm³/s);
- h_1 , h_2 e h_3 : nível dos líquidos nos tanques 1, 2 e 3 (cm);
- u_{c1} e u_{c2} : tensões de controle aplicado nas bombas de esguicho 1 e 2, respectivamente (V).
- A : área de seção transversal de 150cm²

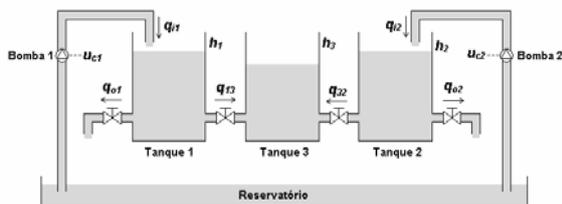


Figura 2– Esquema do sistema de nível proposto.

Após aplicar o balanço de massas para cada um dos tanques, têm-se as seguintes equações relacionadas à vazão:

$$q_{o1} = \alpha\sqrt{h_1} \quad (1)$$

$$q_{o2} = \alpha\sqrt{h_2} \quad (2)$$

$$q_{13} = \alpha\sqrt{|h_1 - h_3|} \cdot \text{sinal}(h_1 - h_3) \quad (3)$$

$$q_{32} = \alpha\sqrt{|h_2 - h_3|} \cdot \text{sinal}(h_2 - h_3) \quad (4)$$

onde α é a constante de vazão definida pelas válvulas.

As vazões de entrada q_{i1} e q_{i2} estão relacionadas à tensão de controle u_{c1} e u_{c2} aplicada nas bombas 1 e 2 respectivamente, e podem ser aproximadas pelas seguintes equações:

$$q_{i1} = k_1 u_{c1} + c_1 \quad (5)$$

$$q_{i2} = k_2 u_{c2} + c_2 \quad (6)$$

onde k_1 , c_1 e k_2 , c_2 são as constantes associadas as bombas.

Utilizando um controle com pré-alimentação:

$$u_{c1} = u_1 + u'_1 \quad (7)$$

$$u_{c2} = u_2 + u'_2 \quad (8)$$

onde u_1 , u_2 são as tensões de controle dos controladores 1 e 2, e u'_1 , u'_2 são as tensões de controle geradas por dois modelos matemáticos, equacionadas por:

$$u'_1 = \frac{1}{k_1} \left(\alpha\sqrt{|h_1 - h_3|} \text{sinal}(h_1 - h_3) + \alpha\sqrt{h_1} - c_1 \right) \quad (9)$$

$$u'_2 = \frac{1}{k_2} \left(\alpha\sqrt{|h_2 - h_3|} \text{sinal}(h_2 - h_3) + \alpha\sqrt{h_2} - c_2 \right) \quad (10)$$

Um modelo simplificado (desacoplado da variável h_3) e linearizado através de realimentação foi obtido:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{k_1}{A} u_1 \quad (11)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{k_2}{A} u_2 \quad (12)$$

3.1 Obtenção dos Parâmetros do Sistema

Para apresentar o modelo matemático do sistema foi necessário fazer o levantamento dos parâmetros das bombas hidráulicas e dos tanques. Através de ensaios e simulações, foram obtidos todos os parâmetros necessários: $k_1=6,8\text{cm}^3/\text{Vs}$; $c_1=-4,3\text{cm}^3/\text{s}$; $k_2=5,8\text{cm}^3/\text{Vs}$; $c_2=-3,32\text{cm}^3/\text{s}$ e a constante de vazão $\alpha=3,05\text{cm}^{2,5}/\text{s}$

Os parâmetros obtidos foram analisados e melhor ajustados em simulação (Simulink[®]), comparando-se a resposta simulada (nível e tempo) com resposta real.

4 Controladores

Foram projetados três diferentes tipos de controladores que serão descritos a seguir. Para o controle *Fuzzy*, foi adotada a estratégia de utilizar dois controladores no sistema considerando que os tanques estejam desacoplados.

4.2 Controlador PI

A maioria dos controladores presentes nos processos industriais emprega estruturas de controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Sua larga aplicação pode ser justificada devido ao seu bom desempenho em malha fechada. Os parâmetros dos controladores, que impõem as especificações do regime transitório e permanente do sistema, são projetados baseados no modelo matemático da planta (Ogata, 2003).

Neste trabalho foi implementado o controlador PI. A função de transferência do mesmo é dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \frac{(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (13)$$

Aplicando transformada de Laplace nas equações (11) e (12), têm-se:

$$\frac{H_1(s)}{U_1(s)} = \frac{k_1}{A s} \quad (14)$$

$$\frac{H_2(s)}{U_2(s)} = \frac{k_2}{A s} \quad (15)$$

Com as três equações acima se obtém a função de transferência de malha aberta para cada um dos sistemas desacoplados. Definindo um tempo de integração $T_i = 100s$ e utilizando os parâmetros do processo obtidos numa etapa anterior, aplicou-se o método do lugar das raízes (LGR) para a determinação do ganho K_p . A escolha do ganho K_p foi feita considerando as especificações de desempenho do controlador PI:

$$M_p \leq 10\% \text{ (máximo sobre-sinal);}$$

$$t_s \leq 25s \text{ (tempo de subida).}$$

4.3 Controladores Fuzzy

Os controladores *Fuzzy* utilizam técnicas de inteligência computacional e incorporam a forma humana de pensar em sistemas de controle. Está baseado na teoria de conjuntos *Fuzzy* cujas variáveis possuem graus de pertinência, diferente dos conjuntos convencionais bivalentes onde os elementos são verdadeiros ou falsos (Mamdani, 1997). É dessa forma, com a propriedade de multivalência, que a lógica *Fuzzy* trabalha com as incertezas e verdades parciais dos fenômenos naturais de maneira rigorosa e sistemática.

O controlador *Fuzzy* tem como configuração básica os seguintes blocos funcionais:

- *Interface de fuzzificação*: converte os valores reais de entrada para o domínio *fuzzy*;
- *Base de conhecimento*: representa o modelo do sistema a ser controlado e é composto por uma base de dados e uma base de regras *fuzzy* lingüísticas. A base de dados fornece definições numéricas às funções de pertinências e a base de regras caracteriza os objetivos e estratégias do controlador;
- *Interface de defuzzificação*: traduz o valor da variável lingüística de saída em um valor discreto utilizável numa ação de controle no mundo real.

É importante ressaltar, que nem todos os controladores *Fuzzy* seguem exatamente o que foi descrito anteriormente. Todos apresentam uma etapa de *fuzzificação*, porém nem todos necessitam fazer a *defuzzificação*. Os controladores mais conhecidos são os de *Mamdani* e *Sugeno*¹ (Takagi e Sugeno, 1985). O controlador *Mamdani* segue um *framework* mais ortodoxo no sentido da lógica *Fuzzy*. O controlador *Sugeno* apresenta um processo muito simples para fazer o treinamento e ajuste de seus parâmetros. O controlador *ONFC* (Gouvêa et al., 2005), é um controlador que tem as vantagens do controlador *Sugeno*, além de apresentar uma interessante característica quanto ao tempo de resposta na sua aplicação devido a sua eficiência computacional.

Foram implementados dois tipos de controladores *Fuzzy*: *Mamdani* e *ONFC* (Marlon¹). Todos foram projetados sem levar em consideração o modelo matemático do sistema (planta).

a) Mamdani

Para este controlador optou-se por utilizar duas variáveis de entrada: o *erro* e a *variação da altura*, e uma variável de saída: *variação de tensão* na bomba hidráulica. Cada variável possui cinco funções de pertinência. Essas variáveis foram normalizadas numa escala de -1 a 1, e ajustadas externamente ao controlador por blocos de ganhos nas entradas e saídas de cada controlador, o que facilitou a etapa de projeto.

As regras de inferência foram definidas de forma intuitiva, onde se utilizou:

- Método de cálculo de AND: *mínimo*
- Método de cálculo de OR: *máximo*
- Método de cálculo de Implicação: *mínimo*
- Método de cálculo de Agregação: *máximo*
- Método de *defuzzificação*: *centróide*

A distribuição das funções de pertinência de cada variável foi acertada empiricamente mediante observação do comportamento do sistema. As funções de pertinência de cada variável são apresentadas a seguir.

¹ Deve-se ao nome de seu idealizador.

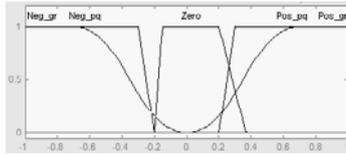


Figura 3 - Funções de pertinência do erro.

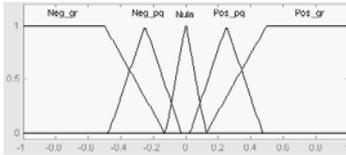


Figura 4 - Funções de pertinência da variação da altura.

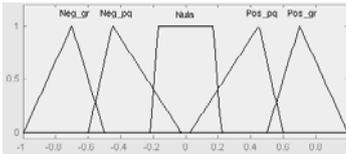


Figura 5 - Funções de pertinência da variação de tensão.

As regras de inferência utilizadas no controlador são as seguintes:

1. If (erro is Pos_gr) then (var_tensao is Pos_gr) (1)
2. If (erro is Neg_gr) then (var_tensao is Neg_gr) (1)
3. If (erro is Zero) and (Variacao is Neg_pq) then (var_tensao is Pos_pq) (1)
4. If (erro is Zero) and (Variacao is Pos_pq) then (var_tensao is Neg_pq) (1)
5. If (erro is Zero) and (Variacao is Neg_gr) then (var_tensao is Pos_pq) (1)
6. If (erro is Zero) and (Variacao is Pos_gr) then (var_tensao is Neg_pq) (1)
7. If (erro is Neg_pq) and (Variacao is Nula) then (var_tensao is Neg_pq) (0.3)
8. If (erro is Neg_pq) and (Variacao is Pos_pq) then (var_tensao is Neg_pq) (0.3)
9. If (erro is Neg_pq) and (Variacao is Pos_gr) then (var_tensao is Neg_gr) (0.3)
10. If (erro is Neg_pq) and (Variacao is Neg_pq) then (var_tensao is Pos_pq) (0.3)
11. If (erro is Neg_pq) and (Variacao is Neg_gr) then (var_tensao is Pos_gr) (0.3)
12. If (erro is Pos_pq) and (Variacao is Nula) then (var_tensao is Pos_pq) (0.3)
13. If (erro is Pos_pq) and (Variacao is Neg_pq) then (var_tensao is Pos_pq) (0.3)
14. If (erro is Pos_pq) and (Variacao is Neg_gr) then (var_tensao is Pos_gr) (0.3)
15. If (erro is Pos_pq) and (Variacao is Pos_pq) then (var_tensao is Neg_pq) (0.3)
16. If (erro is Pos_pq) and (Variacao is Pos_gr) then (var_tensao is Neg_gr) (0.3)
17. If (erro is Zero) and (Variacao is Nula) then (var_tensao is Nula) (1)
18. If (erro is Zero) and (Variacao is Pos_gr) then (var_tensao is Neg_pq) (1)
19. If (erro is Zero) and (Variacao is Neg_gr) then (var_tensao is Pos_pq) (1)

Figura 6 - Base de regras.

b) Marlon (ONFC)

O controlador *Marlon* pode ser entendido utilizando o diagrama de blocos da Figura 7. Ele usa o sinal de erro para fazer intermitentemente o ajuste de seus parâmetros. Ou seja, não existe fase de treinamento para este tipo de controlador. Seus parâmetros só não sofrerão ajustes, quando o erro na entrada, depois de inicializado, for zero. Para o sinal erro existem apenas duas partições para as funções de pertinência. Logo para um controlador SISO (única entrada – única saída) só haverá dois parâmetros, além dos graus de pertinências, em sua estrutura interna para ser ajustado. Para um melhor entendimento, veja a Figura 8. Com duas partições na variável erro e com funções do tipo semi-triangular complementares, apenas é feito um pequeno cálculo para fazer a *fuzzificação* do erro, seguido por um ajuste nos seus dois parâmetros, computado a saída com o auxílio de um bloco limitador.

Como as funções de pertinências são complementares, a saída pode ser calculada como

$$u = w_1 q_1 + w_2 q_2 \quad (16)$$

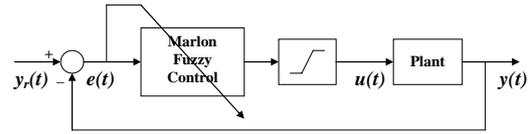


Figura 7 - Diagrama de Bloco do Controlador

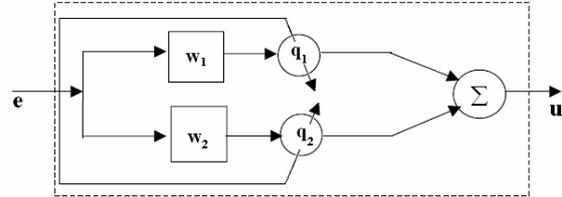


Figura 8 - Diagrama de Bloco do Controlador Interno

O algoritmo para sua aplicação será como segue:

- 1) Entrar com o sinal erro e .
- 2) Calculam-se os dois graus de pertinência de suas funções

$$w_1 = \frac{e - e_{\min}}{\Delta}, \quad (17)$$

onde $\Delta = e_{\max} - e_{\min}$.

Se $w_1 > 1$ então $w_1 = 1$, se $w_1 < 0$ então $w_1 = 0$. Ou seja, aplica-se um limitador no resultado do cálculo.

$$w_2 = 1 - w_1 \quad (18)$$

- 3) Fazem-se os ajustes nos parâmetros q_1 e q_2 da seguinte maneira:

$$q_i(t) = q_i(t-1) + \alpha e(t) w_i(t) \quad \text{para } i=1,2; \quad (19)$$

onde α deve ser escolhido de tal forma a obter um desempenho adequado à aplicação considerada, ressaltando-se que α deve ser positivo para plantas que apresentem uma dinâmica direta, ou seja, aumentado o sinal atuador u a saída aumentará por sua vez. Caso contrário, o α deve ser negativo. No caso aqui apresentado, seu valor será positivo.

- 4) Computa-se a saída com a utilização de (16) e em seguida aplica-se um limitador em sua saída.

4.4 Implementação dos Controladores

Os controladores foram implementados no ambiente do Simulink® (MATLAB®) com o uso do *Real-Time Windows Target*, responsável pela comunicação do computador com a planta e vice-versa. A simulação em tempo real acontece no modo de simulação *External*.

Os blocos de entrada e saída analógicas fazem a conexão com a placa de aquisição de dados *Advantech PLC-812PG* que trabalha com uma taxa de amostragem de $10ms$, com as constantes de tempo do sistema.

Para corrigir um problema de configuração nos blocos de saída, cuja tensão de controle equivaleria ao dobro da correta, foi adicionado antes um bloco de ganho de 0,5.

A condição inicial do nível de cada tanque foi fixada em 17 cm.

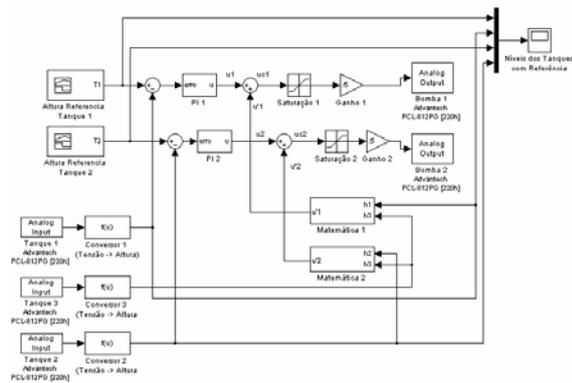


Figura 9 - Sistema com os controladores PI.

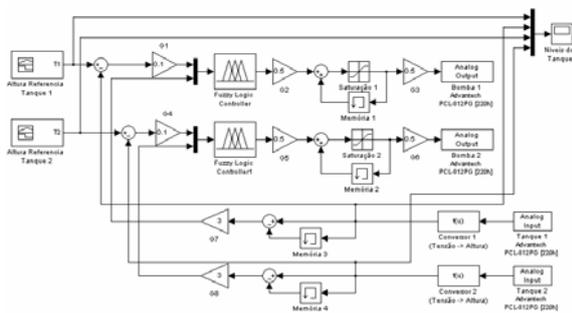


Figura 10 - Sistema com os controladores Mamdani.

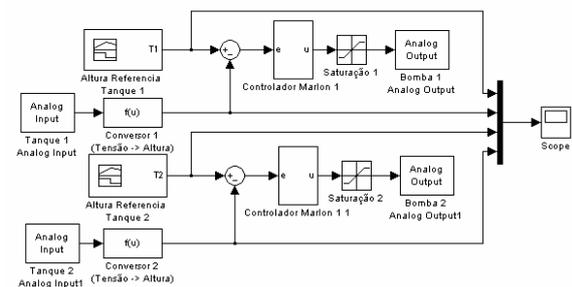


Figura 11 - Sistema com os controladores Marlon

5 Resultados

Os gráficos a seguir mostram as respostas reais dos níveis dos tanques 1 e 2 ao sinal de referência para os três controles analisados e estudados. As respostas obtidas nas simulações serão omitidas aqui. Para critério de comparação dos controladores, foi utilizado o parâmetro ITAE (*Integral-of-time-multiplied absolute-error*). Este parâmetro foi obtido levando em consideração todos os erros nas variações das referências ao longo de todo o tempo (900 segundos). Os resultados se encontram na Tabela 1.

As medições das alturas foram um pouco prejudicadas pela influência das bombas, que provocam pequenas alterações nas tensões de referências dos sensores.

Tabela 1. Parâmetro ITAE para comparação.

	PID	Mamdani	Marlon
Tanque 1	153326,82	92576,54	92528.89
Tanque 2	58599,79	29558,66	23424.13

5.2 O Controle PI

A similaridade entre os resultados simulados e real valida de forma geral o modelo matemático utilizado.

O sistema, com os controladores PI, apresentou para os níveis de referências testados: máximo sobre-sinal em torno de 15%; e tempo de subida abaixo de 20s.

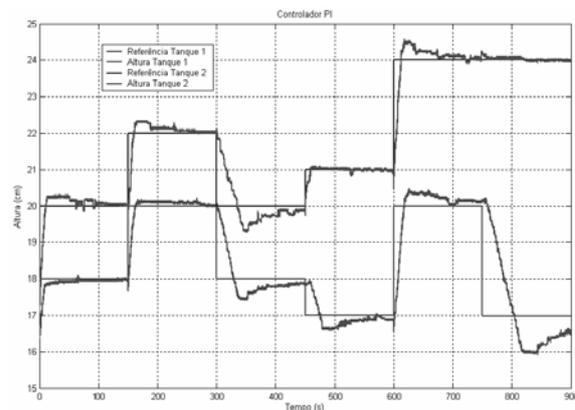


Figura 12 - Resposta PI.

A parte derivativa do controle PID não foi utilizada devido à presença de ruídos na leitura dos sensores. Dessa forma o sistema tem um elevado tempo de acomodação, e somente o controle PI não consegue anular o erro dentro do período do degrau para todos os níveis de referências testados.

5.3 O Controle Mamdani

Conseguiu-se desenvolver um controle baseado na experiência prática do processo (observação). A base de regras utilizada no controlador Fuzzy se mostrou adequada, apresentando um bom desempenho frente ao sistema multivariável e não-linear.

A atuação do controle Fuzzy na descida do nível no ajuste da referência se mostrou suave.

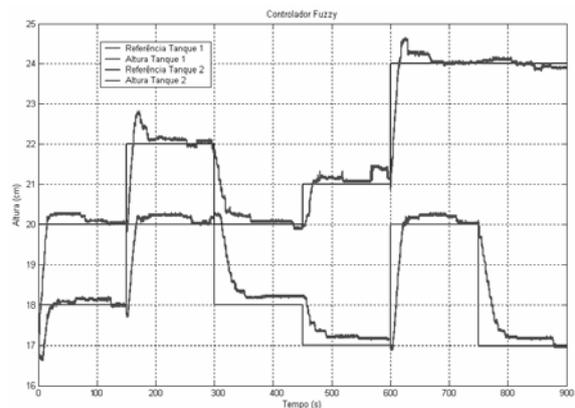


Figura 13 - Resposta Mamdani.

5.3 O Controle Marlon

Com o controle *Marlon* o sistema não apresentou grandes sobressinais nas saídas. Considerou-se o tempo de subida bastante adequado. Observa-se a suavidade da resposta quando o nível está se estabilizando na descida. Verificar os resultados apresentados na Figura 14 a seguir.

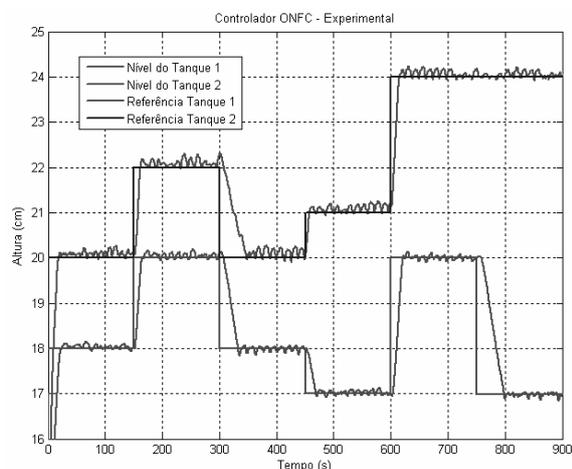


Figura 14 – Resposta *Marlon*

6 Conclusões

Em termos de desempenho os controladores *PI* e *Fuzzy* foram considerados bons. Porém para o projeto do controlador *PI* foi necessário o levantamento dos parâmetros e modelamento matemático do sistema. Já para o projeto do controlador *Fuzzy* isso não foi necessário. No caso do controle *Mamdani*, seu projeto foi obtido da experimentação e observação prática do comportamento do sistema. Não houve também a necessidade de um controle preliminar (realimentação) como o usado para a linearização do modelo. Isso mostra que os controladores *Fuzzy* se adaptam muito bem em sistemas não-lineares e atendem a uma demanda genérica.

Enfim, o uso da lógica *Fuzzy* em controladores possibilita características desejáveis em controladores como facilidade de projeto: o controlador é projetado de maneira simples e intuitiva, utilizando expressões lingüísticas e a experiência prática do operador. Não é necessário o uso de um modelo matemático, o que é muito útil em sistemas complexos ou pobremente compreendidos. Apresentam uma boa flexibilidade no projeto, pois pode ser projetado de várias maneiras, utilizando diferentes variáveis de controle

Analisando os gráficos dos resultados apresentados nota-se que o controlador *Marlon* supera todos os outros em vários aspectos: resposta ao degrau (ITAE); poucos parâmetros para ajustar; aprendizagem *online* e pouco esforço computacional.

7 Referências Bibliográficas

- Caminhas, W.M.; Tavares, H.M.F. & Gomide, F.A.C. *A Neurofuzzy Approach for Fault Diagnosis in Dynamic System*, Proc IEEE International Conference on Fuzzy Systems'FUZZY_IEEE'96, Vol 3, pp 2032-2037, New Orleans, USA. 1996.
- Yamakwa, T.; Uchino, E.; Miki, T. & Kusanagi, A. *Neo Fuzzy Neuron and its Applications to System Identification and Predictions to System Behavior*. Proc. Of the 2nd IIZUKA, Iizuka-Japan, pp. 477-483. 1992.
- Caminhas, W.M.; Pereira, G. A. S.; ATavares, H.M.F. & Gomide, F.A.C. *Identificação de Sistemas Dinâmicos: Abordagem Baseada em Neurônio Nebuloso*. SBRN, 1998.
- Landim, Régis P.; Menezes, Benjamim R.; Silva, Selênio R.; Caminhas, Walmir M.; *On-Line Neo-Fuzzy-Neuron State Observer*, IEEE, 2000.
- Gouvêa, M.R., Figueiredo, E.S., Menezes, B.R., Baccarini, L.M.R., Pires, A.V., Caminhas, W.M.. *A New Neurofuzzy Controller Applied to Vector Control of Induction Motors*, Proceedings of the IASTED International Conference on Computational Intelligence 2005, pp. 73-78 – 2005
- Jang, J. S. R.; C. T. Sun, E. Mizutani. *Neurofuzzy and Soft Computing*. Prentice Hall, 1997.
- Mamdani, E. H., Assilian, S., *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. International Journal of Man-Machine Studies, 7(1): 1-13, 1975.
- Mamdani, E. H., *Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis*. IEEE Transactions on Computers, Vol. C-26, No. 12, pp 1182-1191. Dezembro de 1977.
- 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.
- Filho, F. M. L., Gosmann, H. L., Bauchspiess, A. *Controle Fuzzy para Sistema de Nível de Líquidos*, XIV – Congresso Brasileiro de Automática: 3017-3022, setembro de 2002, Natal – RN.
- Araújo, C.J.F.; Prado Júnior, A.; Kintzel, W.R.; Schiavo, R.B. *Desenvolvimento e Implementação de Sistemas de Controle de Tanques Acoplados*. - XV SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UDESC, Joinville – 2005.
- Takagi, M., Sugeno, M. *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control* - IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985.