

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE *FUZZY* APLICADAS A UM PROCESSO MULTIVARIÁVEL DE TEMPERATURA E NÍVEL

JOÃO PAULO LIMA SILVA DE ALMEIDA*, BRUNO AUGUSTO ANGÉLICO†, ALESSANDRO GOEDEL‡

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná & Instituto Federal do Paraná - Campus Jacarezinho
Avenida Sete de Setembro, 3165, Rebouças & Av. Dr. Tito, s/n, Jardim Panorama
Curitiba, Paraná, Brasil & Jacarezinho, Paraná, Brasil

†Depto. de Eng. de Telecomunicações e Controle - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
São Paulo - SP, Brasil

‡Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Avenida Alberto Carazzai, 1640
Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Emails: joao.almeida@ifpr.edu.br, angelico@lac.usp.br, agoedel@utfpr.edu.br

Abstract— This work presents practical results from application of two multivariable fuzzy control strategies considered in a TITO process. The process was developed in order to establish the level and temperature control of a fluid in a mixer tank by insertion of heated water and water at ambient temperature. The strategies consist in the application of controllers of type Fuzzy-PD and Fuzzy-PD+I with anti-windup filter. It is presented the decoupling method utilized, as well the diagram of implementation of each strategy. Control strategies were implemented through CompactRIO hardware with the development software LabVIEW. Practical results are presented for the purpose of strategies validation.

Keywords— Fuzzy Control, Intelligent Control, Process Control, Intelligent Systems Applications

Resumo— Este trabalho apresenta resultados práticos advindos da aplicação de duas estratégias de controle *fuzzy* multivariável consideradas em um processo do tipo TITO. O processo foi desenvolvido com o objetivo de estabelecer o controle de nível e de temperatura de fluido em um reservatório de mistura por meio da inserção de água aquecida e de água em temperatura ambiente. As estratégias consistem na aplicação de controladores *Fuzzy-PD* e *Fuzzy-PD+I* com filtro *anti-windup*. É apresentado o método de desacoplamento utilizado, assim como o diagrama de implementação de cada estratégia. As estratégias de controle foram implementadas por meio do *hardware* CompactRIO em conjunto com o *software* de desenvolvimento LabVIEW. Resultados práticos são apresentados com a finalidade de validar as estratégias de controle.

Palavras-chave— Controle *fuzzy*, Controle inteligente, Controle de processos, Aplicações de sistemas inteligentes.

1 Introdução

Sistemas do tipo “*Two Inputs - Two Outputs*” (TITO) representam uma área bastante difundida do grupo dos sistemas do tipo “*Multiple Inputs - Multiple Outputs*” (MIMO), pois é possível contemplar diversas aplicações reais dos mesmos. Além disso, diversas técnicas de desacoplamento, que são apresentadas em pesquisas da área, mostram que sistemas que possuem uma complexidade elevada podem ser decompostos em sistemas do tipo TITO, de forma a ter um tratamento específico para esta ocasião (Hägglund, 2013; Maghade e Patre, 2014; Mokadam e Patre, 2013; Nordfeldt e Hägglund, 2006).

Uma abordagem propícia para o projeto de controladores aplicados em processos TITO é por meio da estratégia descentralizada, a qual objetiva-se o desacoplamento entre as variáveis com a finalidade de tratar o processo como subsistemas do tipo “*Single Input - Single Output*” (SISO), e então utilizar técnicas de controle direcionadas para estes tipos de sistemas (Astrom et al., 2002). Em alguns casos, a interação entre as malhas de um sistema MIMO pode ser sig-

nificadamente reduzida por meio da escolha de variáveis manipuladas e controladas alternativas (Seborg et al., 2010), como é a ocasião apresentada por Lanas et al. (2007).

Alguns fatores podem comprometer negativamente o projeto de controladores descentralizados, pois o forte acoplamento entre as variáveis ou não-linearidades dificultam o levantamento do modelo matemático do sistema. Nestes casos, os sistemas inteligentes se caracterizam como uma estratégia de controle válida, principalmente quando se trata de sistemas *fuzzy*, em que a estratégia de controle é fundamentada a partir de variáveis linguísticas e conhecimentos heurísticos do processo a ser controlado (Passino e Yurkovich, 1998).

Muitas aplicações de estratégias de controle *fuzzy* podem ser evidenciadas em pesquisas da área. Os autores Chen e Shih (2013) expõem a aplicação de um controlador *Fuzzy-PD* para realizar o controle de um manipulador pneumático de um microscópio, a fim de controlar a distância entre o corpo de prova e o equipamento. Nas contribuições de Gil et al. (2013), propõe-se uma metodologia para a sintonia de ganhos de um controlador *Fuzzy-PI* para realizar um controle de tempe-

ratura. De forma similar, o trabalho apresentado pelos autores Karasakal et al. (2013) apresentam um método de sintonia *on-line* de controladores *Fuzzy*-PID. Savran (2013) apresenta uma estratégia de controle preditivo que considera um controlador *Fuzzy*-PID multivariável, enquanto que Pornpatkul e Suksri (2009) abordam uma estratégia de controle *fuzzy* descentralizada para um processo do tipo TITO. Lanas et al. (2007) apresentam a aplicação de um controle *fuzzy* em uma planta TITO de mistura de fluido e também é proposto um método alternativo de se obter controladores descentralizados. Já, Lygouras et al. (2007) apresentam uma outra forma de diminuir a interação de variáveis acopladas, a qual considera controladores *fuzzy* para tal finalidade, denominados de *fuzzy* compensadores.

Com base nas informações expostas, neste trabalho é apresentada a implementação, validação e comparação de duas estratégias de controle descentralizadas utilizando sistemas *fuzzy*, mais especificamente utilizando controladores *Fuzzy*-PD e *Fuzzy*-PD+I. Para a validação experimental, foi utilizada uma planta industrial didática adaptada, que compreende em um processo do tipo TITO para o controle de nível e temperatura de fluido em um reservatório de mistura. O método utilizado foi inspirado na proposta apresentada por Lanas et al. (2007), a qual consiste em simulações computacionais.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: na Seção 2 é descrita a malha de controle TITO desenvolvida e o procedimento efetuado para o desacoplamento da mesma. Na Seção 3 é apresentada uma abordagem acerca das estratégias de controle consideradas neste trabalho. Resultados práticos são apresentados na Seção 4, enquanto que as principais conclusões do trabalho são expostas na Seção 5.

2 Processo TITO desenvolvido

O processo TITO desenvolvido para este trabalho consiste em três reservatórios de acrílico (c_0 , c_1 e c_2), duas bombas centrífugas (B_1 e B_2), uma resistência de aquecimento (220 V / 1000 W), um sensor de temperatura do tipo PT100 (I-1), um sensor de nível do tipo ultrassônico (I-2), válvula manual (q_0), tubulações e conectores. O diagrama que representa o processo considerado é exposto na Figura 1, enquanto que na Figura 2 é apresentada uma imagem real do processo considerado, o qual foi adaptado de uma planta didática da fabricante Festo. As regiões destacadas na Figura 2 (A, B e C) correspondem aos reservatórios c_1 , c_2 e c_0 , respectivamente.

Para o aquecimento do fluido é considerada a resistência de aquecimento citada, a qual é localizada inserida no reservatório c_1 , enquanto o fluido contido no reservatório c_2 é considerado em tem-

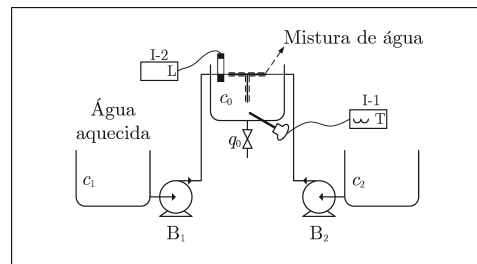


Figura 1: Diagrama do processo TITO desenvolvido.

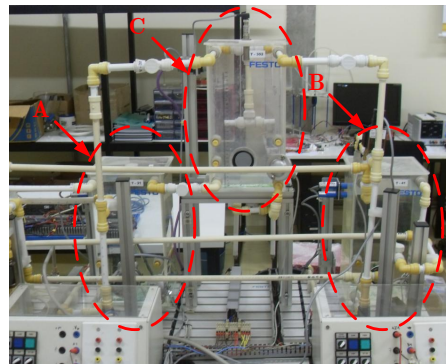


Figura 2: Processo TITO desenvolvido.

peratura ambiente ($\approx 25^\circ \text{C}$). O controle de nível e de temperatura do fluido é efetuado no reservatório de mistura, em que o sensor PT100 é utilizado para a medição de temperatura enquanto que o nível é medido pelo sensor do tipo ultrassônico.

As duas variáveis de entrada do processo são aplicações de tensão com níveis de 0 – 10 V nos *drivers* das bombas centrífugas, que refletem na entrada de água fria e aquecida no reservatório de mistura, enquanto que as variáveis de saída são as medidas de nível e de temperatura do fluido.

As estratégias de controle são implementadas por meio do *hardware* de controle CompactRIO, em conjunto com o *software* de desenvolvimento LabVIEW, da fabricante *National Instruments*. Uma frequência de amostragem de 30 Hz é considerada.

2.1 Desacoplamento do processo TITO

O método utilizado para o desacoplamento foi baseado nas contribuições de Lanas et al. (2007) e complementado com as informações tratadas por Seborg et al. (2010). Assim, foram escolhidas variáveis manipuladas e controladas alternativas para o processo TITO deste trabalho. O procedimento é descrito conforme segue.

Inicialmente, assumiu-se que a vazão de entrada q no reservatório de mistura é composta pela soma das vazões de fluido aquecido e à temperatura ambiente, q_1 e q_2 , respectivamente, conforme é mostrado na Equação (1).

$$q = q_1 + q_2. \quad (1)$$

O processo TITO foi desacoplado em um subsistema que considera a vazão total q e um outro subsistema que contemple a inserção de fluido aquecido na vazão total. Como resultado, pôde-se considerar um controlador *fuzzy* para cada subsistema apresentado, ou seja, a saída de um controlador foi associada à vazão q , enquanto outro controlador teve como saída a inserção de fluido aquecido q_r , como apresentado na Equação (2).

$$q_r = \frac{q_1}{q_1 + q_2}. \quad (2)$$

Embora as variáveis citadas representem as variáveis manipuladas alternativas, vale relembrar que as bombas proporcionam as vazões q_1 e q_2 , que são as variáveis manipuladas originais do processo. Dessa forma, foi necessário verificar q_1 e q_2 em termos de q e q_r . Assim, sabendo-se que $q = q_1 + q_2$, pode-se concluir que:

$$q_1 = q_r \cdot q. \quad (3)$$

Substituindo (3) em (1), tem-se a resolução para q_2 :

$$q_2 = (1 - q_r) \cdot q. \quad (4)$$

Finalmente, pôde-se relacionar um controlador *fuzzy* para o controle da vazão total q , representando a malha de controle de nível, enquanto um outro controlador para o controle da inserção de fluido aquecido, o que representa a malha de controle de temperatura.

3 Estratégias fuzzy aplicadas ao controle multivariável de processos

De uma forma geral, a aplicação de estratégias de controle *fuzzy* descentralizadas em processos multivariável proporciona resultados promissores, pois é possível considerar um número reduzido de regras para os controladores, quando comparados com uma estratégia centralizada, uma vez que os mesmos estão são tratados para problemas do tipo SISO (Pratumsuwan e Junchangpood, 2013; Lygouras et al., 2007).

A aplicação de controladores *fuzzy* pode ser consolidada em função de algumas estruturas específicas (Jantzen, 2007). As estruturas exploradas por estes autores são inspiradas em controladores PID convencionais e suas principais variações PI e PD. As principais estruturas são definidas pelas seguintes denominações: *Fuzzy-P*, *Fuzzy-PD*, *Fuzzy-PD Incremental* e *Fuzzy-PD+I*, uma vez que as duas últimas são analogias aos controladores PI e PID convencionais.

Neste trabalho, são tratadas as estruturas PD e PD+I, que são exemplificadas por meio das Figuras 3 e 4, em que: $E(n)$ é o erro $e(n)$ multiplicado pelo ganho GE ; $\Delta E(n)$ é a variação do erro $\Delta e(n)$ multiplicado pelo ganho GCE ; $U(n)$

é a saída do controlador $u(n)$ multiplicada pelo ganho GU ; $\sum_{j=1}^n e(j)Ts$ é o acúmulo do erro multiplicado pelo período de amostragem Ts ; $IE(n)$ é o acúmulo do erro multiplicado pelo ganho GIE .

Vale salientar que, ao considerar a variação do erro, evidencia-se no controlador a desvantagem de apresentar o *kick-derivativo*. Para contornar este problema, a variação do erro foi substituída pela variação da própria saída do processo. Uma outra observação importante é o fato da estrutura PD+I apresentar a desvantagem do *windup* devido ao termo integrativo. Este efeito foi amenizado com a aplicação de um filtro *anti-windup* na estrutura *Back Calculation* (Scottedward, 2001; Visioli, 2003).

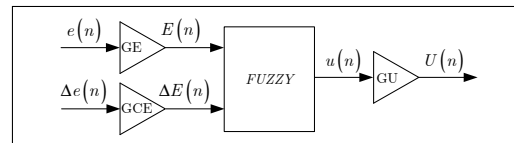


Figura 3: Diagrama de blocos de um controlador *Fuzzy-PD* discretizado.

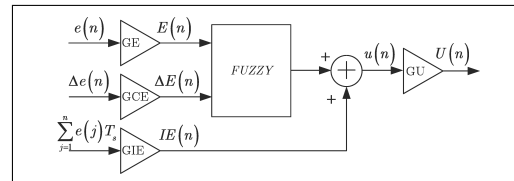


Figura 4: Diagrama de blocos de um controlador *Fuzzy-PD+I* discretizado.

3.1 Estratégia de Controle Fuzzy Descentralizada Aplicada ao Processo TITO Considerado

Nesta Seção são apresentados os principais aspectos de implementação dos controladores *Fuzzy-PD* e *Fuzzy-PD+I* com filtro *anti-windup*, conforme já descritos anteriormente. Vale salientar que para ambas as estratégias, foi considerado o procedimento de desacoplamento abordado na Seção 2.1.

Para cada estrutura citada, foi considerado um controlador para cada malha de controle (nível e temperatura).

Os diagramas apresentados por meio das Figuras 5 e 6 representam, respectivamente a implementação dos controladores *Fuzzy-PD* e dos controladores *Fuzzy-PD+I* com filtro *anti-windup*, em que: r_1 é a referência de nível, r_2 é a referência de temperatura, y_1 é o sinal de nível medido e y_2 é o sinal de temperatura medido.

É importante salientar que, em ambos os casos, devido a influências externas na medição de nível, tais como regime turbulento do fluido e a

presença de vapor, a diferença entre o valor medido e uma média móvel foi considerada para estabelecer a variação da saída. Cinco amostras atrasadas foram utilizadas, ou seja, $d_1 = 10$, $d_2 = 20$, ..., $d_5 = 50$ e $GD = 0,2$. Já, para a variável de temperatura, devido esta variável apresentar uma dinâmica lenta, quando comparada com a frequência de amostragem ($30Hz$), a variação da saída foi estabelecida como a diferença entre o valor atual e o valor atrasado $d_6 = 40$ amostras.

As funções de pertinência utilizadas no projeto dos controladores *Fuzzy*-PD foram definidas conforme observações experimentais e são apresentadas mediante a Figura 7. Nota-se que o universo de discurso utilizado para a saída dos controladores consiste num intervalo de 0 a 1, representando uma ação de controle de 0 % a 100 %. As variáveis linguísticas consideradas e suas respectivas definições são: PG: positivo grande, PM: positivo médio, P: positivo, Z: zero, N: negativo, NM: negativo médio, NG: negativo grande, G: grande, M: médio e PQ: pequeno.

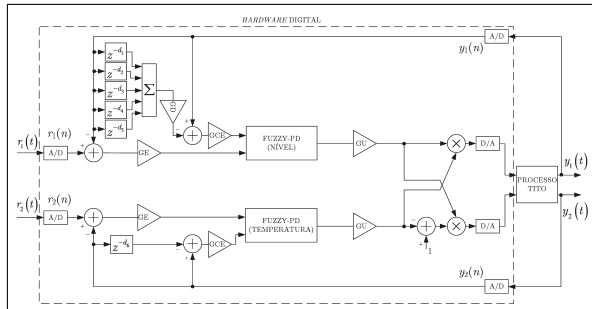


Figura 5: Diagrama de implementação da estratégia de controle *Fuzzy*-PD.

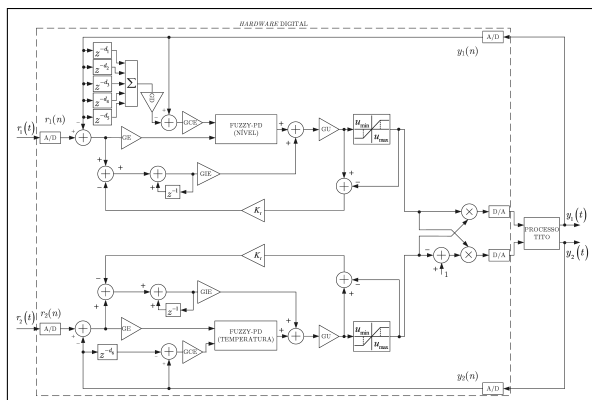


Figura 6: Diagrama de implementação da estratégia de controle *Fuzzy*-PD+I com filtro *anti-windup*.

As regras são apresentadas na tabela 1. Vale salientar que, para a implementação da estratégia com os controladores *Fuzzy*-PD+I, foram utilizadas as mesmas funções de pertinência e regras consideradas nos controladores *Fuzzy*-PD.

Os ganhos utilizados para a variável de ní-

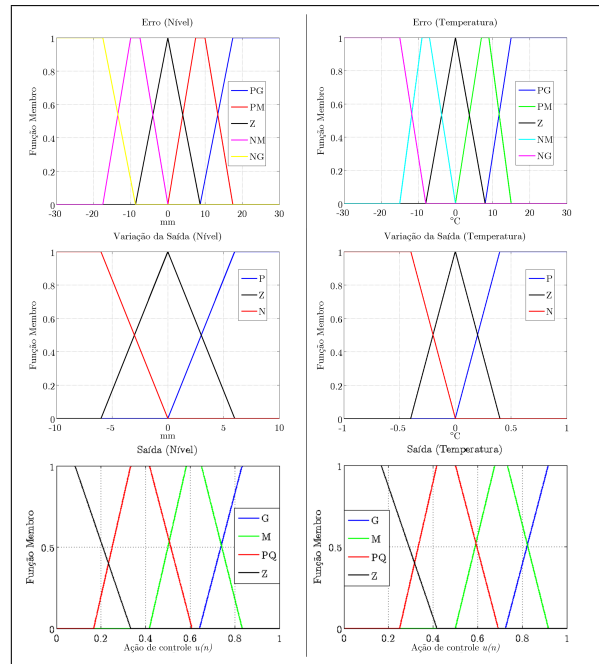


Figura 7: Funções de pertinência dos controladores *Fuzzy*-PD.

vel foram: $GE = 1,3$, $GCE = 1$, $GU = 1$, $GIE = 0,03$. Para a variável de temperatura foram: $GE = 2,3$, $GCE = 1$, $GU = 1$, $GIE = 0,0005$.

Tabela 1: Regras dos controladores.

<i>Fuzzy</i>-PD (nível)					
$\Delta y \setminus \text{Erro}$	PG	PM	Z	NM	NG
P	G	M	M	S	Z
Z	G	G	M	Z	Z
N	G	G	M	Z	Z
<i>Fuzzy</i>-PD (temperatura)					
P	G	PQ	Z	Z	Z
Z	G	PQ	P	Z	Z
N	G	PQ	P	PQ	Z

4 Resultados práticos

Nesta seção são apresentados os resultados práticos de implementação das estruturas de controle contempladas na Seção 3.1.

Algumas condições iniciais foram consideradas para os experimentos, conforme seguem: temperatura da água no reservatório c_1 de $\approx 50^\circ\text{C}$ e de $\approx 25^\circ\text{C}$ em c_2 .

Foram considerados dois experimentos para cada estrutura. No primeiro, aplicou-se uma variação na referência de temperatura, enquanto que no segundo caso, considerou-se uma variação na referência da variável de nível, de tal forma a demonstrar a atuação satisfatória em cada uma das variáveis controladas.

Inicialmente, considerou-se a implementação

dos controladores *Fuzzy*-PD. Na Figura 8 é apresentada a resposta do sistema e a ação de controle para uma variação na referência da variável de temperatura. Para isso, foi considerado $r_1 = 100$ mm, enquanto que r_2 variou de $r_2 = 30$ °C para $r_2 = 35$ °C. Observa-se que as variáveis alcançaram seus respectivos valores de referência, porém com a presença de um erro estacionário médio de, aproximadamente, 2,77 mm para a variável de nível. Também é notada uma mínima influência no nível medido após a variação de referência da variável de temperatura.

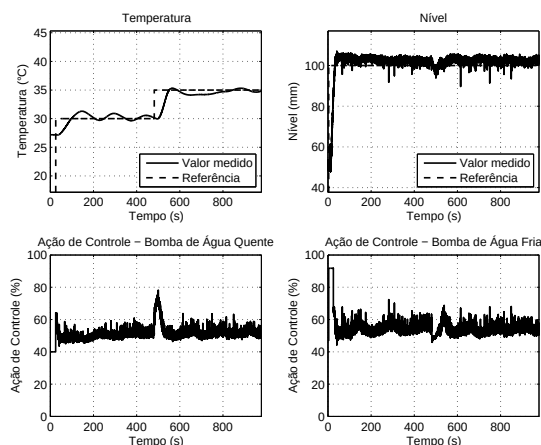


Figura 8: Experimento 1: variação na referência de temperatura - *Fuzzy*-PD.

Na Figura 9 é apresentado o desempenho do controlador para uma variação na referência da variável de nível. Neste experimento, foi considerada uma temperatura fixa de $r_2 = 30$ °C, e uma variação de $r_1 = 100$ mm para $r_2 = 120$ mm. O sistema apresentou uma resposta satisfatória, porém, principalmente para a variável de nível, ainda há um pequeno erro médio em regime quando submetido às duas referências de, aproximadamente, 2,72 mm e 1,99 mm.

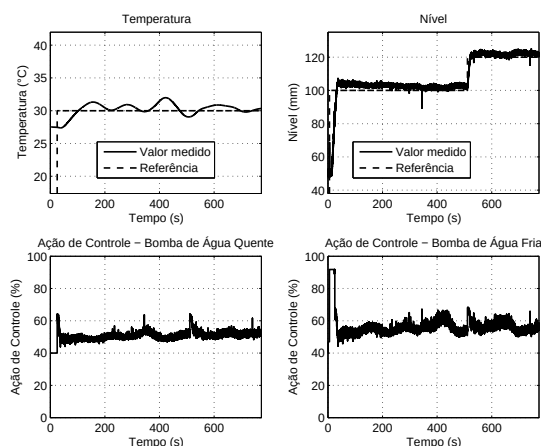


Figura 9: Experimento 2: variação na referência de nível - *Fuzzy*-PD.

Na sequência, foi considerada a aplicação dos

controladores *Fuzzy*-PD+I. Na Figura 10 é exposto o resultado advindo da aplicação das mesmas referências consideradas no primeiro caso de aplicação dos controladores *Fuzzy*-PD. Observa-se que o erro em regime foi eliminado, devido a inserção do termo integrativo.

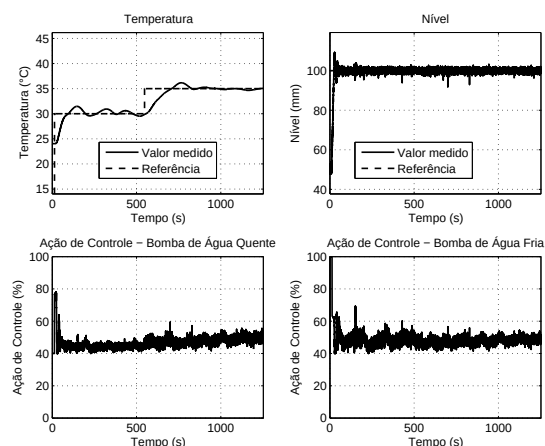


Figura 10: Experimento 3: variação na referência de temperatura - *Fuzzy*-PD+I.

Os resultados do último experimento, conforme exposto na Figura 11, demonstra o desempenho dos controladores mediante a variação na referência da variável de nível, que são as mesmas utilizadas no experimento 2. É possível notar que o sistema de controle propiciou um desempenho satisfatório, em que destaca-se a diminuição do erro em regime, porém com a presença de um sobressinal na variável de nível.

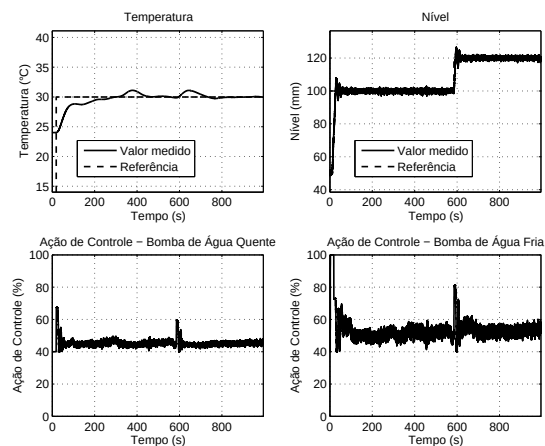


Figura 11: Experimento 4: variação na referência de nível - *Fuzzy*-PD+I.

5 Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas duas estratégias de controle *fuzzy* multivariável aplicadas em um processo TITO didático. O objetivo da planta desenvolvida consiste em controlar a temperatura

e o nível de fluido em um reservatório de mistura. Para isso, foi necessário controlar o fluxo de fluido aquecido e fluxo de fluido em temperatura ambiente.

Duas estratégias de controle foram consideradas, em que envolveram controladores *Fuzzy*-PD e *Fuzzy*-PD+I com filtro *anti-windup*. Ambas estratégias proporcionaram desempenhos satisfatórios, além de representarem soluções viáveis para processos industriais do tipo TITO.

Resultados práticos mostraram que os controladores *Fuzzy*-PD+I atuaram de forma eficiente em relação a correção do erro estacionário e desacoplamento das variáveis. Entretanto apresentou um pequeno sobressinal quando comparado com a aplicação dos controladores *Fuzzy*-PD.

Referências

- Astrom, K. J., Johansson, K. H. e Wang, Q.-G. (2002). Design of decoupled PI controllers for two-by-two systems, *IEE Proceedings - Control Theory and Applications* **149**(1): 74–81.
- Chen, H. I. e Shih, M. C. (2013). Visual control of an automatic manipulation system by microscope and pneumatic actuator, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* **10**: 215–218.
- Gil, P., Lucena, C. e Cardoso, A. (2013). Fuzzy controllers gains tuning: a constrained nonlinear optimization approach, *Neural Comput & Applic - Springer-Verlag* **23**: 617–624.
- Hägglund, T. (2013). A unified discussion on signal filtering in PID control, *Control Engineering Practice* **21**: 994–1006.
- Jantzen, J. (2007). *Foundations of fuzzy control*, John Wiley & Sons, England.
- Karasakal, O., Guzelkaya, M., Eksin, I., Yesil, E. e Kumbasar, T. (2013). Online tuning of fuzzy pid controllers via rule weighing based on normalized acceleration, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **26**: 184–197.
- Lanas, A. I., Mota, G. L. A., Tanscheit, R., Vellasco, M. M. e Barreto, J. M. (2007). Fuzzy control of a multivariable nonlinear process, *Proceedings of The Eighth International Fuzzy Systems Association World Congress* pp. 660–664.
- Lygouras, J. N., Kodogiannis, V. S., Pachidis, T., Tarchanidis, K. N. e Koukourlis, C. S. (2007). Variable structure TITO fuzzy-logic controller implementation for a solar air-conditioning system, *Applied Energy* pp. 190–203.
- Maghade, D. K. e Patre, B. M. (2014). Pole placement by PID controllers to achieve time domain specifications for TITO systems, *Transactions of the Institute of Measurement and Control* **36**: 506–522.
- Mokadam, H. R. e Patre, B. M. (2013). Tuning of multivariable PI/PID controllers for TITO processes using dominant pole placement approach, *Int. J. Automation and Control* **7**: 21–41.
- Nordfeldt, P. e Hägglund, T. (2006). Decoupler and PID controller design of TITO systems, *Journal of Process Control* **16**(9): 923 – 936.
- Passino, K. M. e Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy control*, Addison-Wesley, California, USA.
- Pornpatkul, C. e Suksri, T. (2009). Decentralized fuzzy logic controller for TITO coupled-tank process, *ICROS-SICE International Joint Conference* pp. 2862–2866.
- Pratumsuwan, P. e Junchangpood, A. (2013). Force and position control in the electrohydraulic system by using a MIMO fuzzy controller, *8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* pp. 1462–1467.
- Savran, A. (2013). A multivariable predictive fuzzy PID control system, *Applied Soft Computing* pp. 2658–2667.
- Scottedward, A. (2001). Variable-structure PID control to prevent integrator windup, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **48**: 442–451.
- Seborg, D. E., Mellichamp, D. A., Edgar, T. F. e Doyle, F. J. (2010). *Process Dynamics and Control*, 3 edn, John Wiley & Sons, England.
- Visioli, A. (2003). Modified anti-windup scheme for PID controllers, *IEEE Proc. Control Theory Applications* **150**: 49–54.