

# CONTROLE DE NÍVEL USANDO FUZZY PID NÃO LINEAR

Bruno Gomes Dutra <sup>1</sup>, Rodrigo Gomes Dutra<sup>1</sup>, Maryson da Silva Araújo <sup>1</sup>, Antonio da Silva Silveira <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Controle de Sistemas, Universidade Federal do Pará  
Belém, Pará, Brasil  
{brunodutra, maryson, asilveira}@ufpa.br, dutra.rgd@gmail.com

**Resumo.** Este trabalho está voltado para o controle Fuzzy proporcional, integral e derivativo (PID) de um modelo de tanque. O modelo não linear abordado do sistema permite analisar e simular o comportamento físico do nível de líquido em determinadas situações para fins de testes e a aplicação topologia de controle Fuzzy PID proposto. A aplicação do controle Fuzzy PID consegue realizar um mapeamento não linear da planta através das bases de regras e serve para impor estabilidade robusta, garantir rastreamento e regulação do nível na altura desejada, com o objetivo de controlar o nível para qualquer referência desejada objetivando o melhor desempenho do sistema. Utiliza-se o MATLAB® 2015 com a ferramenta Simulink para simular o comportamento da planta e a toolbox Fuzzy do MATLAB® para projetar o controlador Fuzzy PID.

**Keywords** – Controle Fuzzy, PID, Simulação, controle nível.

## 1 Introdução

Para fins de menor desperdício, e maior aproveitamento em algumas partes de produção nas indústrias brasileiras é necessário ter um sistema de controle realmente efetivo.

Um dos processos de controle mais importantes nas unidades industriais é o de níveis de líquidos em tanques [6]. Sistemas de nível de líquidos têm destaque em diversos ramos da atividade industrial, dentre eles o da petroquímica, nuclear e de celulose [2].

Com o conhecimento do processo de produção, um preciso controle de nível acarretará economia de material e tempo que se traduzem diretamente em dinheiro, lucro e eficiência. Com isso, pode-se afirmar que a modelagem do sistema é essencial, principalmente nas indústrias, pelo fato de não poder ser realizados testes exaustivos nas plantas com a possibilidade de acontecer imprevistos e acidentes. Com o modelo do sistema pode-se realizar vários diagnósticos e testar variados tipos de controladores.

Nesse artigo utiliza-se um modelo de tanque com o intuito de simular comportamento físico do mesmo através de equações diferenciais e entender a

dinâmica do sistema, de forma que o projetista possa reproduzir na indústria a modelagem e simulação para vários tanques com a mesma dinâmica física. O modelo proposto foi simulado através do Simulink do MATLAB.

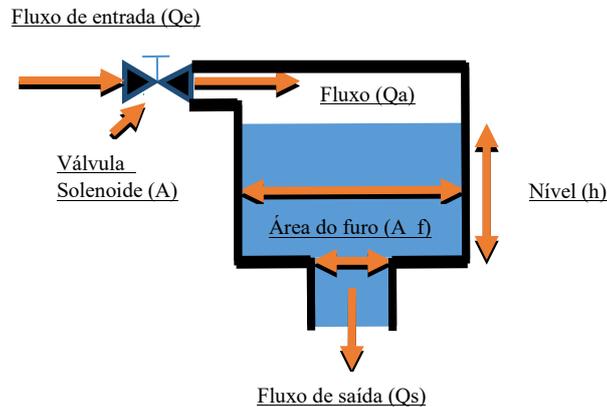
Com o modelo do sistema, busca-se aplicar um controle Fuzzy proporcional, integral e derivativo (PID), com a topologia formada pela estrutura Fuzzy PI mais o Fuzzy PD, para atuar no controle de nível, objetivando um controle robusto á perturbações de cargas indesejáveis, ruído, e com perdas mínimas.

A modelagem matemática do comportamento físico do tanque é essencial devido ao fato de seu comportamento ser não linear, com isso as relações de entrada e saída são diferentes ao longo do tempo para referências de níveis diferentes, sendo necessário ter um controle não linear ou adaptativo para atuar de forma eficiente na planta. A estratégia de controle utilizada nesse artigo é fundamentada em um menor custo computacional pois utiliza o Fuzzy PD mais o fuzzy PI para se obter a estrutura Fuzzy PID, com isso acarretando em um número menor de regras comparada com a estrutura clássica Fuzzy PID abordada em [11]. A utilização do controle nebuloso foi escolhida pelo fato que o controle Fuzzy pode ser aplicado a sistemas lineares e não-lineares, é de fácil implementação, possui facilidades quanto à adequação de estratégia de controle humano, ao protocolo de controle, à simplicidade das leis de controle e à flexibilidade das variáveis linguísticas, além de apresentar características de robustez [10]. Esta última está relacionada com a sensibilidade do controle diante de algum comportamento anômalo não modelado ou ruído [5]. Sendo assim o objetivo deste artigo é utilizar a topologia bidimensional de controle Fuzzy PID aplicado a uma planta de nível de tanque, de forma bem intuitiva e de fácil implementação para que possa ser reproduzida e simulada por qualquer projetista.

O artigo está organizado da seguinte forma. Inicialmente, na Seção 2 apresenta-se a descrição e modelagem do processo estudado. Na seção 3, é descrito o fundamento do controle Fuzzy, em seguida nas subseções 3.1 e 3.2 são apresentadas as topologias Fuzzy PI e Fuzzy PD respectivamente e na subseção 3.3 é apresentada a estrutura de controle Fuzzy PID abordada. Na seção 4, são apresentados os resultados pela planta controlada para testes de regulação, rastreamento de referências, recuperação quando existe perturbações de cargas e robustez quando há presença de ruído no sensoriamento do sistema. Finalizando, com a conclusão na seção 5.

## **2 Modelagem do Sistema**

Modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais [3]. Considerando um sistema de mono tanque, pretende-se realizar a modelagem matemática analisando a física do sistema, utilizando o mesmo como caixa branca, no qual se conhece as suas leis fenomenológicas. Assim, para considerações iniciais do projeto foi pensado em um tanque no qual a altura do fluido seria controlada por uma válvula solenoide proporcional 12V DC. Mostrado na Figura 1.



**Figura. 1.** Modelo gráfico do tanque.

O tanque da Figura 1 apresenta uma entrada e uma saída de líquido, sendo que a entrada é variável pela válvula solenoide controlada por voltagem. A saída é dependente da quantidade de água no tanque. Quanto mais água no tanque mais rápido será o fluxo de saída.

No sistema proposto entra um fluxo  $Q_e$  de entrada e sai um fluxo  $Q_s$  de saída, tal que o  $Q_s$  é influenciado pelo peso do fluido o qual é influenciado pela altura do fluido. Assim o  $Q_e$  e o  $Q_s$  não serão iguais e por conta dessa diferença ocorrerá um acúmulo ou um decréscimo de fluido no tanque, por conta disso o nível do fluido irá variar de forma não linear. É importante destacar que a perda de carga nos dutos que transportam a água é nula.

Dessa forma, utilizando da equação de Torricelli e usando exemplos contidos em [9] foi possível chegar na equação que compõe o sistema no domínio do tempo.

$$V_a \frac{Q_a}{A_b} - \sqrt{h} \frac{\sqrt{(2gh)} A_f}{A_b} = \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

Sendo  $V_a$  a tensão aplicada no solenoide  $A$ .

Com isso pode-se representar a equação diferencial do sistema em forma de diagrama de blocos no Simulink, para isso é necessário determinar as constantes do mesmo.

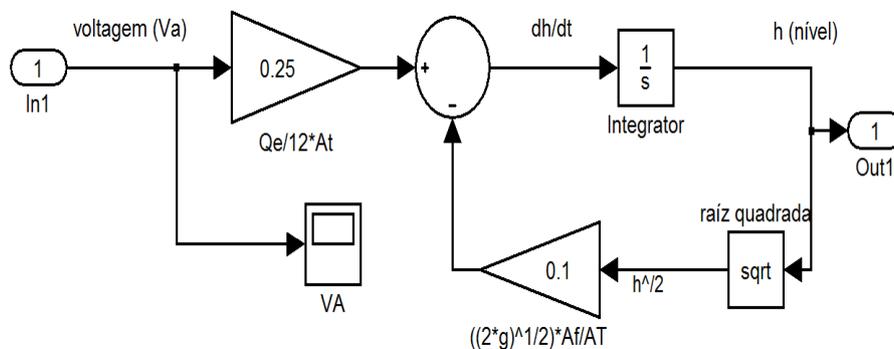
Dessa maneira foram escolhidos valores para as constantes, as quais estão na Tabela 1.

**Tabela 1.** Valores das constantes do sistema.

Qa	Ab	Af	g
0,01m <sup>3</sup> /s	0.0033m <sup>2</sup>	6.77*10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup>	9.8m/s <sup>2</sup>

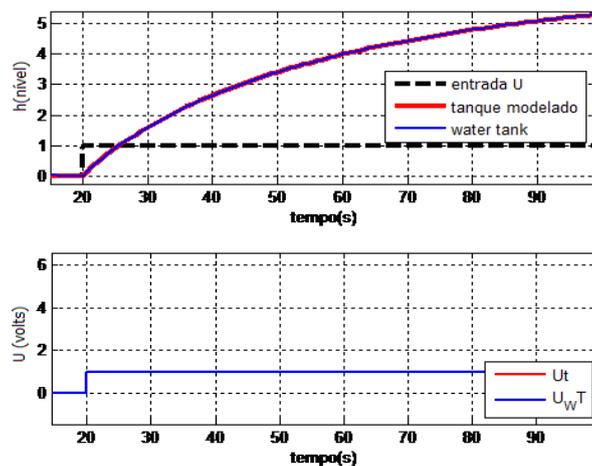
Os valores que constam na Tabela 1 foram escolhidos baseados no exemplo *watertank* do MATLAB utilizado por [7], pois apresenta dados consolidados de um sistema de tanque.

Assim tendo os valores das constantes do sistema podemos relacionar a equação diferencial do sistema em um diagrama de blocos no Simulink o qual consta na Figura 2.



**Figura. 2.** Diagrama de blocos da equação diferencial.

Com isso é possível simular a resposta física equivalente à altura de nível do sistema, pois depois de obter a modelagem representada em um diagrama de blocos com a equação diferencial do sistema é possível observar a saída de acordo com a entrada inserida no mesmo. Assim tem-se na Figura 3 o gráfico de resposta do sistema para um degrau unitário, comparando o mesmo com a resposta do sistema *watertank*.



**Figura. 3.** Resposta ao degrau em malha aberta.

Percebe-se na Figura 3 que a medida que a válvula se matem aberta a vazão de água no tanque se matem e que as respostas do tanque modelado e do *watertank* se sobrepõem. Com isso, a equação (1) representa de forma correta o comportamento do sistema proposto.

### 3 Controle Fuzzy

A ideia básica do controle Fuzzy é modelar as ações a partir de conhecimento especialista, diferindo dos métodos convencionais de controle [10]. Os controladores Fuzzy são robustos e de grande adaptabilidade, incorporando conhecimento que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar [4].

Neste trabalho foi utilizado o controlador Fuzzy PID do tipo Mamdani, como proposto por Li and Gatland [8]. O controle Fuzzy PID tem por finalidade realizar um mapeamento não linear da planta, a partir de base de regras tabeladas, e atuar tomando como entradas crisp o erro  $e(k)$ , a variação do erro  $\Delta e(k)$  e sua diferença de segunda ordem  $\Delta^2 e(k)$ . A saída defuzzyficada do sistema Fuzzy é o sinal de controle  $u(k)$  a ser aplicado à planta. O Comportamento do controlador é caracterizado por meio de termos linguísticos utilizados nas funções de pertinência, sendo eles representados por GN (Grande negativo), MN (Médio Negativo), ZR (Zero), PN (Pequeno Negativo), PP (Pequeno positivo), MP (Médio Positivo) e GP (Grande Positivo).

Visto que a topologia do controle Fuzzy PID utiliza uma base de regras tridimensional e exige um número grande de regras, pois para cada entrada se tem 7 conjuntos de termos linguísticos, o total de regras seria  $7 \times 7 \times 7 = 343$ . Então para o projeto desse controlador Fuzzy optou-se por se ter a topologia de um controlador

Fuzzy PD bidimensional em paralelo com um controlador Fuzzy PI bidimensional. Sendo assim, o total de regras de cada controlador será de  $7 \times 7 = 49$  regras, contabilizando 98 regras com os dois em paralelo e somando suas saídas para formar o Fuzzy PID proposto.

### 3.1 Controle Fuzzy PD

O controle Fuzzy-PD bidimensional utiliza as variáveis  $e(k)$  e  $\Delta e(k)$  [1], a sua saída defuzificada é representada por  $u_{pd}(k)$ .

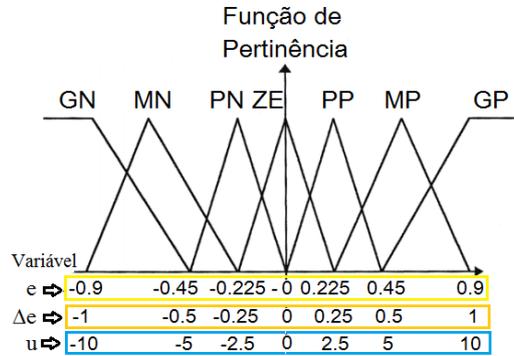
$$u_{pd} = \frac{\sum_{j=1}^N \mu_j \mu_{OUT}(\mu_j)}{\sum_{j=1}^N \mu_{OUT}(\mu_j)} \quad (2)$$

A sua base de regras está presente na Tabela 2 proposta por Li and Gatland [8].

**Tabela 2.** Regras de Mandani [8].

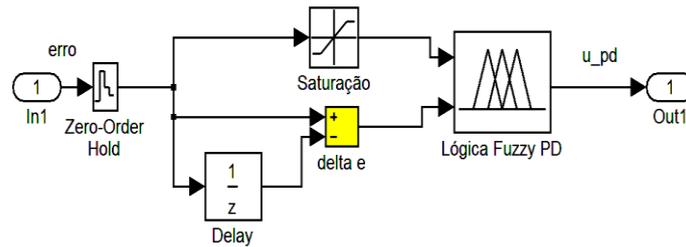
ERRO (e)	$\Delta$ ERRO ( $\Delta e$ )						
	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
GP	ZR	PP	MP	GP	GP	GP	GP
MP	PN	ZR	PP	MP	GP	GP	GP
PP	MN	PN	ZR	PP	MP	GP	GP
ZR	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
PN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP	MP
MN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP
GN	GN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR

Para fins de projeto, deseja-se que este controlador atue na planta e faça com que a variável de processo tenha tempo de subida desejado, overshoot menor possível e convergência assintótica. O controlador Fuzzy PD foi projetado utilizando-se toolbox FUZZY do MATLAB 2015 e de forma heurística, especificada por um especialista, foi escolhido o range para o erro de  $[-0.9 \ 0.9]$ , para a variação do erro de  $[-1 \ 1]$  e para o sinal de controle de  $[-10 \ 10]$ , presentes na Figura 4.



**Figura. 4.** Funções de pertinência para entrada erro (e), variação do erro (Δe) e saída de controle u.

A topologia do controle Fuzzy PD abordada é representada na Figura 5, em forma de blocos do SIMULINK.



**Figura. 5.** Estrutura do controlador Fuzzy-PD .

O bloco de saturação utilizado na Figura 5 é definido pelos limites máximo e mínimo de variação da entrada erro para o bloco do toolbox FUZZY.

### 3.2 Controle Fuzzy PI

O controle Fuzzy PI bidimensional utiliza as mesmas variáveis  $e(k)$  e  $\Delta e(k)$  que o controle Fuzzy PD, mas a sua saída é incremental e é representada por  $\Delta u_{pi}(k)$ .

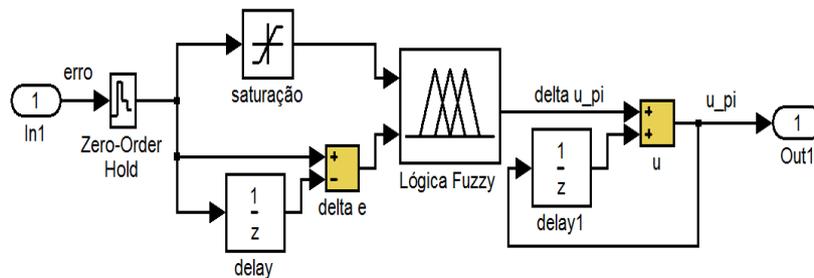
$$\Delta u_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^N \mu_j \mu_{OUT}(\mu_j)}{\sum_{j=1}^N \mu_{OUT}(\mu_j)} \quad (3)$$

O bloco de saturação utilizado na Figura 5 é definido pelos limites máximo e mínimo de variação da entrada erro para o bloco do toolbox FUZZY.

Sendo necessário integrar a saída para se ter o sinal de controle  $u_{pi}(k)$  [10], o total de regras é de  $7 \times 7 = 49$ , sendo representada pela mesma tabela proposta por [8], utilizada pela parte derivativa na Tabela 2.

As funções de pertinência para o Fuzzy PI podem ter a mesma estrutura apresentada para o Fuzzy PD, presentes nas Figuras 4. Para fins de projeto, deseja-se que este controlador atue apenas para amortecer pequenas oscilações em torno do regime permanente. Assim, de forma semelhante ao Fuzzy PD foi escolhido o range para o erro de  $[-0.27 \ 0.27]$ , para a variação do erro de  $[-0.035 \ 0.053]$  e para o sinal de controle incremental de  $[-1 \ 1]$ .

A topologia do controle Fuzzy PI abordada é representada na Figura 6, em blocos do SIMULINK.



**Figura. 6.** Estrutura do controlador Fuzzy-PI.

A topologia do controle Fuzzy PD abordada é representada na Figura 5, em forma de blocos do SIMULINK.

### 3.3 Controle Fuzzy PID (PI+PD)

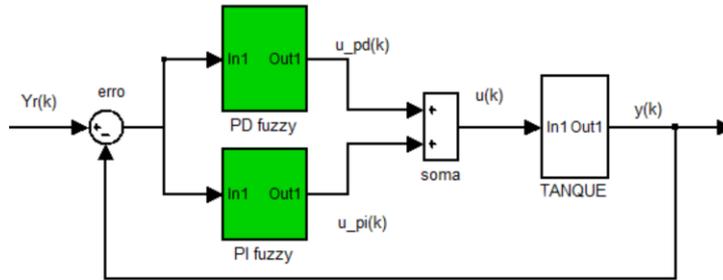
O controle Fuzzy PI bidimensional utiliza as mesmas variáveis  $e(k)$  e  $\Delta e(k)$  que o controle Fuzzy PD, mas a sua saída é incremental e é representada por  $\Delta u_{pi}(k)$ .

A topologia de controle abordada tem um controlador Fuzzy PD em paralelo com um controlador Fuzzy PI, ao somar a saída de suas leis de controle, sendo assim chamado de controle Fuzzy PID.

Para o projeto foi utilizado um período de amostragem de 0.1, adotada a estratégia MISO, múltiplas entradas e uma saída, e como critério de defuzzificação, para o sinal de controle, centro de gravidade, presentes nas equações (2) e (3).

A topologia do controle Fuzzy PID abordada em conjunto com a planta é representada na Figura 7.

A topologia do controle Fuzzy PI abordada é representada na Figura 6, em blocos do SIMULINK.

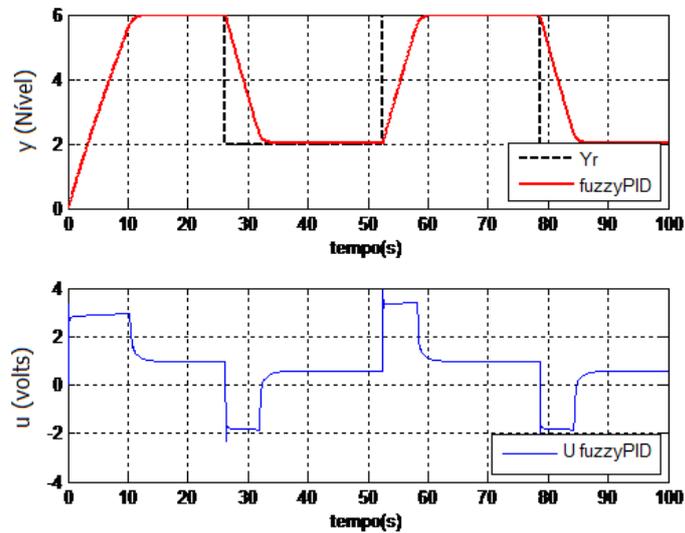


**Figura. 7.** Estrutura do controlador Fuzzy PID em série com a planta modelada.

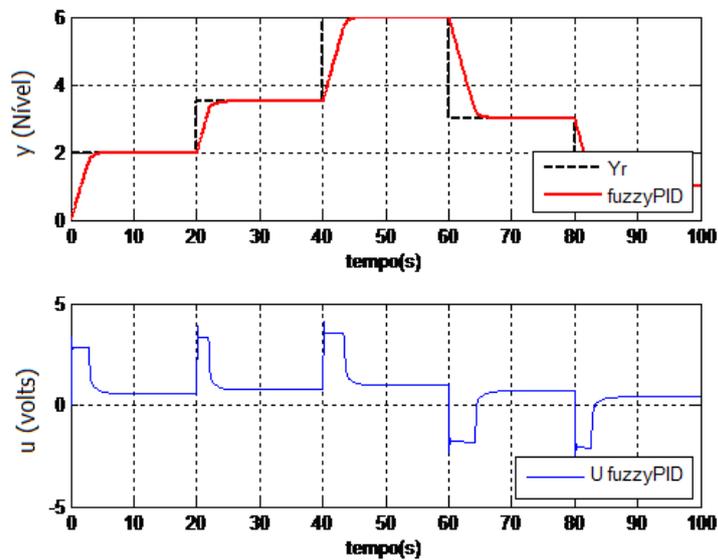
O sinal de controle é obtido com a soma dos sinais de controle gerados pela ação integral e pela ação derivativa, que por sua vez são calculados através do método do centro das áreas.

#### 4 Resultados

Pode-se analisar por meio das Figuras 8, 9 e 10 a resposta da planta em nível e o sinal de controle em volts aplicado no solenoide do tanque.



**Figura. 8.** Controle de nível PID Fuzzy para uma referência periódica.

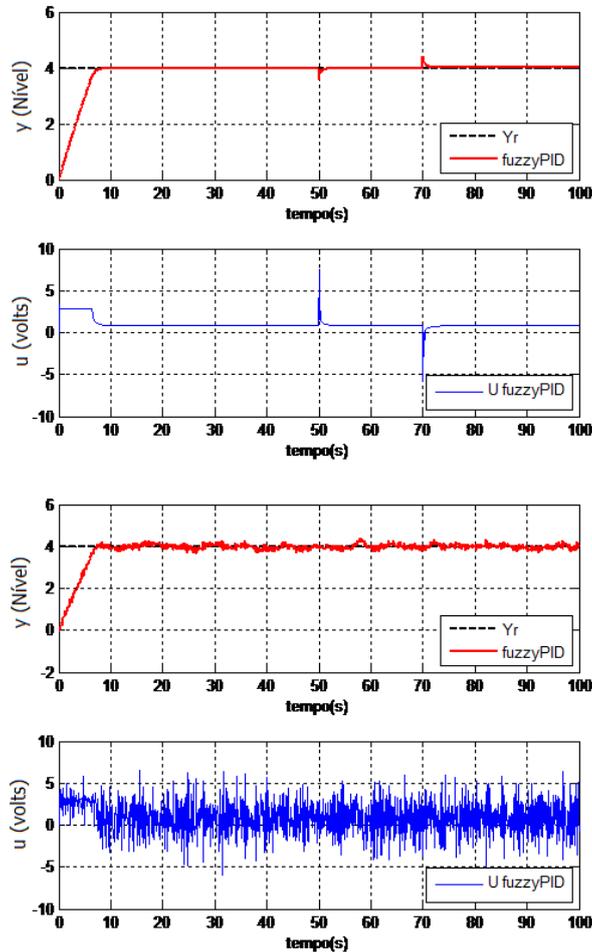


**Figura. 9.** Controle de nível PID Fuzzy para várias referências.

A Figura 8 do apresenta a resposta da planta com o controle PID-Fuzzy seguindo uma referência periódica de 0.12 radianos/segundos, variando entre 2 e 6.

A Figura 9 apresenta a resposta da planta para as referências em nível de 2, 3.5, 6 e,3 e 1.5 litros. Apresenta também o sinal de controle  $u$  aplicado pelo PID-Fuzzy.

A Figura 10 na parte de cima apresenta a resposta da planta com o controlador para uma referência de 4 litros e sofre uma perturbação de carga negativa de 10% do valor da referência no intervalo de 50 segundos e uma perturbação de carga positiva de 10% do valor da referência no intervalo de 70 segundos.



**Figura. 10.** Controle de nível PID Fuzzy com perturbação de carga (cima) e com ruído gaussiano (baixo).

A Figura 10 na parte de baixo apresenta a resposta do sistema para uma referência de 4 litros e com ruído gaussiano de variância 0.005, na saída do sistema, simulando um sensor ruidoso.

Os resultados para os testes foram satisfatórios e como o esperado, pois a planta em conjunto com o controlador apresenta um tempo de subida rápido, menor que 10 segundos, não apresenta overshoot, não apresenta erro em regime permanente, segue variadas referências, corrigindo as não linearidades da planta, como visto na Figura 9, consegue corrigir perturbações de carga como visto na Figura 10(cima) e consegue se manter sobre a referência mesmo com a presença de ruído. Percebe-se a robustez e eficiência do controlador nebuloso com esses resultados.

## 5 Conclusão

Foi realizada a modelagem conforme as naturezas físicas de um tanque industrial com comportamento não linear e percebe-se que o controle Fuzzy PID abordado neste artigo, com a topologia Fuzzy PI mais o Fuzzy PD, consegue suprir as não linearidades e mantém o nível do tanque de forma eficiente para variadas situações abordadas. Com isso tem-se um controlador de nível industrial que tem como objetivo evitar perdas do líquido do tanque, manter o nível na altura certa e realizar o processo com um menor tempo possível e ser robusto a ruídos causados pelo sensor de nível. Assim aumentando a eficiência do sistema por completo e implicando diretamente no desempenho e lucro da indústria.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Pará (UFPA), ao programa de pós-graduação de engenharia elétrica (PPGE), a fundação amazônica de amparo a estudos e pesquisas (FAPESPA) e ao laboratório de controle e sistemas (LACOS), que dão suporte e apoio para as pesquisas serem desenvolvidas.

## Referências Bibliográficas

1. Campos, A. L. D. S. I., & Campos, L. D. E. S. F. I, Identificação e Controle Fuzzy de uma Planta Didática de Nível. VII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (2010).
2. Campos, M. C. M. M. de; Teixeira, H. C. G, Controle típicos de equipamentos e processos industriais. São Paulo: Editora Blucher (2006).
3. Castanho, M, Modelagem matemática como método de pesquisa e estudo em outras áreas do conhecimento. III EPMEM Unicentro (2008).
4. Guerra, R, Projeto e simulação do controle de atitude autônomo de satélites usando lógica nebulosa, São José dos Campos: (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1998) 190.
5. Gomide, Fernando Antonio Campos; Gudwin, Ricardo Ribeiro, Modelagem, controle, sistemas e lógica Fuzzy, SBA Controle & Automação, v. 4, n. 3 (1994) 97-115.
6. Gosmann, H. L. Um sistema multivariável de tanques acoplados para avaliação de técnicas de controle. Brasília: Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília (2002)
7. Jang, J.R., MATLAB: Fuzzy logic toolbox user's guide: Version 1. Math Works, ( 1997)
8. Li, H. e Gatland, H.D, Conventional Fuzzy control and its enhancement. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics\_ part B: Cybernetics, 26(5) (1996) 791-797.
9. OGATA, K, Engenharia de Controle Moderno. 4. ed. [S.l.]: Prentice Hall, Tradução: Paulo Alvaro Maya. Revisão técnica: Fabrizio Leonardi. ISBN 85-87918-23-0( 2003).
10. Shaw, I. S. and Simões, M. G, Controle e modelagem Fuzzy. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, (1999).
11. Yesil, E., Guzelkaya, M., & Eksin, I. Fuzzy PID controllers: An overview. In The Third Triennial ETAI International Conference on Applied Automatic Systems, Skopje, Macedonia (2003) 105-112.