

LÓGICA FUZZY PARA CONTROLE DE VASO SEPARADOR TRIFÁSICO EM PLANTAS DE PROCESSAMENTO PRIMÁRIO DE PETRÓLEO

JOSÉ ILTON SARMENTO SILVEIRA JÚNIOR*, LEANDRO LUTTIANE DA SILVA LINHARES*, PEDRO KLISLEY FERREIRA DA SILVA*, FÁBIO MENEGHETTI UGULINO DE ARAÚJO*

**Departamento de Engenharia de Computação e Automação
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal, RN, Brasil*

Emails: jissjunior@gmail.com, luttiane@dca.ufrn.br, p_klisley@hotmail.com, meneghet@dca.ufrn.br

Abstract— In petroleum industry, the primary processing plants receive the mixture from the oil wells and safely perform the separation of its different phases - oil, natural gas and water -, besides removing salts and other impurities. In this paper, some equipments used in a separation unit were simulated in Simulink® using mathematical models found in the literature. In addition to the three-phase separator vessel and a set of hydrocyclones, three artificial lift systems using the gas lift method were also inserted in the simulated system. The aim of this work is to use fuzzy controllers to replace the PI controllers that are traditionally applied in the regulatory control of the separator vessels. The results presented in this work have considered the presence of the casing heading phenomenon, which causes oscillating flow in the process in study.

Keywords— Fuzzy Control, PI Controller, Oil Production, Three Phase Separator Vessel.

Resumo— Na indústria do petróleo, as plantas de processamento primário são responsáveis por receber a mistura proveniente dos poços de extração e realizar com segurança a separação de suas diferentes fases - óleo, gás natural e água -, além de remover sais e outras impurezas. Neste trabalho, alguns equipamentos que compõem uma unidade de separação foram simulados no Simulink® a partir de modelos encontrados na literatura. Além do vaso separador trifásico e de uma bateria de hidrociclones, também estão presentes na simulação três sistemas de elevação artificial do tipo gás lift. O objetivo deste trabalho consiste em utilizar controladores *fuzzy* para substituir os controladores PI que são tradicionalmente utilizados no controle regulatório de vasos separadores. As comparações realizadas entre estes dois tipos de controladores levaram em conta a presença de severas variações, ou golfadas, no fluxo de carga do processo em estudo.

Palavras-chave— Controle *Fuzzy*, Controlador PI, Produção de Petróleo, Vaso Separador Trifásico.

1 Introdução

O petróleo é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho escuro (Filgueiras, 2005). Esse óleo de origem fóssil é, na atualidade, a fonte de energia mais utilizada no mundo, além de também dar origem aos chamados produtos petroquímicos.

O fluido armazenado nos reservatórios *offshore* de petróleo, à medida que vai sendo extraído, é encaminhado para as plantas de processamento primário situadas nas plataformas marítimas. Neste estágio da produção, são realizados a separação da mistura multifásica constituída pelas fases oleosa, aquosa e gasosa, além de outras impurezas; o tratamento ou condicionamento do óleo para que possa ser transferido para as refinarias e o tratamento da água para reinjeção no poço ou para descarte no mar (Silveira, 2006).

Na indústria do petróleo, o vaso separador é considerado o equipamento mais importante em uma planta de processamento primário, sendo responsável por realizar a separação, por meio de ação gravitacional, das fases aquosa, oleosa e gasosa dos fluidos provenientes dos reservatórios. A separação desta mistura se faz necessária devido

ao importante papel econômico do óleo e do gás e pelo fato da água ser um dos contaminantes mais indesejados no processo de produção do petróleo. O vaso separador também tem como função absorver as flutuações de carga (golfadas) decorrentes das características de escoamento multifásico advindo dos reservatórios (Filgueiras, 2005).

Neste trabalho, é utilizado um sistema simulado baseado em modelos matemáticos de equipamentos presentes em plantas de processamento primário de petróleo, tais como o vaso separador trifásico e o hidrociclone. Também é adicionado à simulação, o processo de elevação artificial do tipo gás lift. Desta forma, pretende-se trabalhar em um ambiente com relações dinâmicas similares às encontradas em sistemas reais e que permita analisar com segurança a aplicação de estratégias de controle em variáveis relevantes do vaso separador trifásico. Os estudos realizados por Júnior et al. (2010), Silveira (2006) e Nunes (2001) são exemplos de trabalhos que abordam o problema do controle em vasos separadores trifásicos.

O objetivo deste trabalho é substituir os tradicionais controladores PI, comumente utilizados no controle regulatório de vasos separadores, por controladores *fuzzy*. Desta forma, pretende-se tornar a separação realizada por este equipamento mais eficiente e menos sensível ao efeito das gol-

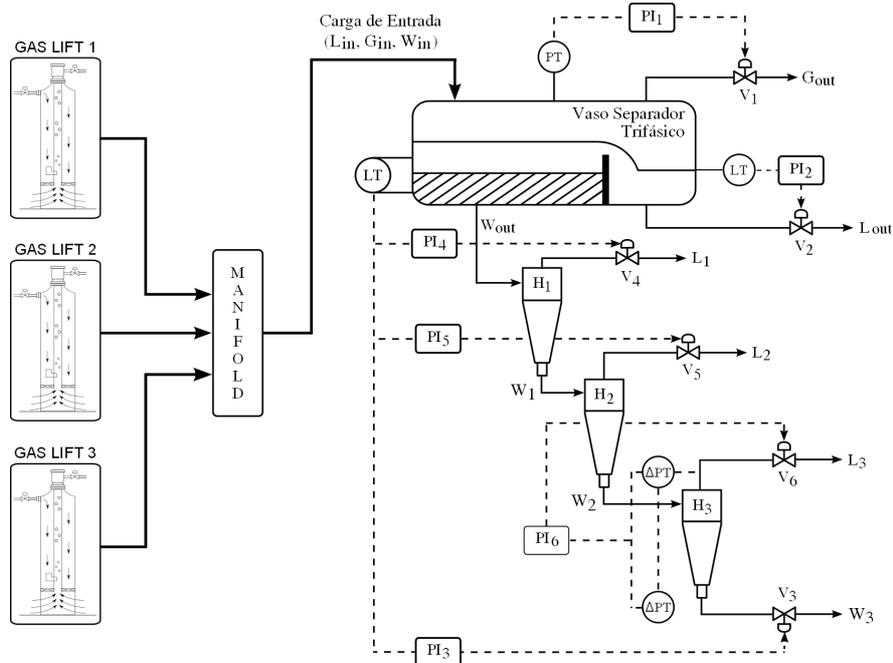


Figura 1: Diagrama esquemático do sistema simulado do processo de separação.

fadas. Estudos como os realizados por Araújo Júnior (2007), Coeyman and Bowles (1996), Prasad et al. (2011), entre outros, comprovam a eficiência deste tipo de controlador.

Os controladores *fuzzy* tiveram origem no trabalho de Mamdani (1976), tendo como base a teoria de conjuntos nebulosos proposta por Zadeh (1965). Nesse tipo de controlador, regras lógicas são utilizadas com a intenção de descrever a experiência e intuição humana para controlar um processo. A lógica *fuzzy* expressa as leis operacionais de um sistema de controle por termos linguísticos, ao invés de equações matemáticas, como ocorre na metodologia clássica (Araújo Júnior, 2007).

Os controladores *fuzzy* são sistemas robustos, de grande adaptabilidade e bastante versáteis (Guerra, 2007). Em geral, apresentam maior utilidade em sistemas não lineares, sendo capazes de lidar com perturbações e altos níveis de ruído (Sandri and Correa, 1999). A análise de algumas destas características fogem do escopo deste trabalho, uma vez que na comparação entre o clássico PID e o controle *fuzzy* foram utilizados apenas critérios que avaliam aspectos de rastreamento, tais como o a integral do erro quadrático (ISE), a integral do erro absoluto (IAE) e a integral do tempo multiplicado pelo erro absoluto (ITAE).

2 Simulação de Processamento Primário

Neste trabalho foi utilizado um sistema simulado desenvolvido a partir de modelos de equipamentos e/ou processos presentes na indústria do petróleo. Este sistema engloba as etapas de elevação dos fluidos do reservatório e a etapa de processa-

mento primário. Conforme ilustrado no diagrama da Fig. 1, a simulação é composta por três unidades de elevação artificial do tipo gás lift, um manifold, um vaso de separação trifásico e três módulos de hidrociclones dispostos em série. A implementação e simulação dos modelos de cada um dos componentes citados foram realizadas no Simulink[®], ambiente integrado do MATLAB[®].

Na indústria do petróleo, o termo elevação é utilizado para designar o processo no qual os fluidos armazenados em um reservatório de petróleo são transportados do fundo do poço até a superfície, vencendo a força da gravidade (Thomas, 2001). A simulação utilizada neste trabalho considera a existência de três reservatórios, em que seus fluidos são levados à superfície através do método gás lift contínuo.

O método gás lift contínuo baseia-se na injeção contínua de gás à alta pressão na coluna de produção com o objetivo de gaseificar o fluido desde o ponto de injeção até a superfície. Para a simulação deste processo foi utilizado como base o modelo apresentado por Eikrem et al. (2004).

No sistema simulado, os fluidos extraídos pelos sistemas de gás lift são encaminhados para um manifold e, em seguida, por meio de uma única ligação, alimentam o vaso separador trifásico. Observando a Fig. 1, nota-se que a carga de entrada do modelo deste equipamento é composta pelas vazões de entrada das fases gasosa (G_{in}), oleosa (L_{in}) e aquosa (W_{in}).

Neste trabalho, a simulação do vaso separador trifásico teve como base o modelo apresentado por Nunes (2007). Na Fig. 1, observa-se que as saídas deste modelo, ou resultados da separação, foram

definidas como sendo G_{out} , L_{out} e W_{out} , que correspondem, respectivamente, às vazões de saída de gás, óleo e água do vaso separador.

A saída de água do vaso separador não pode ser jogada diretamente ao mar, pois esta contém um residual de óleo acima dos padrões especificados. Desta maneira, esta saída precisa passar por uma etapa de tratamento para que parte do óleo nela presente possa ser recuperada e que a água possa vir a ser descartada ou, até mesmo, reinjetada nos reservatórios. Este tratamento pode ser realizado por uma bateria de hidrociclones (Filgueiras, 2005). Para simular este procedimento foram implementados três hidrociclones posicionados em série na simulação utilizada neste trabalho, tendo como base o modelo apresentado em Moraes (1994).

A fase líquida que deixa a parte superior do hidrociclone contém óleo em maior proporção. Na parte inferior do equipamento é situada a saída de água, contendo certa quantidade de óleo residual (Filgueiras, 2005). No diagrama apresentado na Fig. 1, L_1 , L_2 e L_3 são as saídas de óleo dos hidrociclones, respectivamente, enquanto W_1 , W_2 e W_3 são as suas saídas de água. Desta forma, W_3 corresponde ao fluxo final de água do sistema após o tratamento de W_{out} pelos hidrociclones.

Os modelos que compõem o sistema simulado utilizado neste trabalho possuem parâmetros, que na prática, costumam variar muito de uma planta para outra, dependendo de especificações de projeto, equipamentos utilizados, localização da planta, características do reservatório e do óleo, entre outras tantas variantes. As informações necessárias para as definições dos valores dos parâmetros utilizados nos modelos neste artigo foram obtidos por intermédio do projeto REDIC_ADAP realizado em regime de parceria entre a Petrobras e as Universidades UFRN, UFPA, UFBA e UFRGS.

É interessante que para se ter uma melhor ideia da complexidade do sistema, sejam consultadas as referências de onde foram obtidos os modelos dos equipamentos que compõem a simulação deste trabalho, uma vez que é inviável a apresentação de suas inúmeras equações neste documento.

Em relação às estratégias de controle, nota-se a presença de seis controladores PI no diagrama apresentado pela Fig. 1. No vaso separador, as variáveis controladas são o nível de água na camada de separação, o nível de óleo na câmara de óleo e a pressão interna. Segundo Filgueiras (2005), o controle destas variáveis é de fundamental importância, uma vez que possuem relação direta com a qualidade de separação da mistura.

Entre os controladores presentes na simulação, o controlador PI_1 regula a pressão interna do vaso separador, ajustando a abertura da válvula V_1 na linha de saída de gás. O controlador PI_2 é responsável por controlar o nível de óleo

através do ajuste da abertura da válvula V_2 presente na linha de saída de óleo. O nível da água na câmara de separação é regulada pelo controlador PI_3 por meio do ajuste da válvula V_3 na saída da corrente aquosa do hidrociclone H_3 . Os controladores PI_4 , PI_5 e PI_6 controlam a saída de óleo dos hidrociclones H_1 , H_2 e H_3 , respectivamente. Neste trabalho, o que se pretende é analisar o uso de controladores *fuzzy* (FZ_1 , FZ_2 e FZ_3) para substituir os controladores PI_1 , PI_2 e PI_3 .

3 Projeto dos Controladores *Fuzzy*

De acordo com Simões and Shaw (2007), um controlador *fuzzy* é composto pelos seguintes blocos funcionais: Fuzzificação, Base de conhecimento, Lógica de tomada de decisões e Defuzzificação. A fuzzificação é o processo de mapeamento das variáveis de entrada em conjuntos de funções de pertinência. A base de conhecimento é constituída pela base de regras e a base de dados. A base de regras é um conjunto de regras que especificam a estratégia utilizada para o controle do sistema e a base de dados fornece os valores numéricos às funções de pertinência utilizadas na base de regras.

A lógica de tomada de decisões, também chamada de máquina de inferência, infere as ações de controle através da base de regras, fazendo a simulação das decisões de um ser humano, controlando o sistema. Neste trabalho é utilizado o método de inferência concebido por Takagi and Sugeno (1985). A defuzzificação consiste na obtenção de um único valor para ser utilizado na ação de controle, a partir das várias saídas *fuzzy* obtidas. O cálculo da saída é feita utilizando funções de defuzzificação, no caso deste trabalho foi utilizada a média ponderada.

O projeto dos controladores *fuzzy* foi realizado da seguinte maneira: (i) obter os parâmetros dos controladores PI que já atuam satisfatoriamente no sistema; (ii) substituir os controladores PI por controladores *fuzzy* lineares equivalentes, a partir dos parâmetros dos controladores anteriores e (iii) adicionar não linearidades aos controladores *fuzzy* a partir da adição e ajuste de funções de pertinência e regras.

Para controlar a pressão interna do vaso separador e o nível da água e do óleo no interior do tanque separador, foram utilizados três controladores *fuzzy* PI do tipo Sugeno. As variáveis de entrada utilizadas foram o erro (e) e a variação do erro (Δe).

Como as funções de saída de um controlador *fuzzy* sugeno são lineares, é possível fazê-lo trabalhar como um controlador PI apenas colocando seus parâmetros de acordo com a Eq. (1). O diagrama de blocos de um controlador *fuzzy* PI típico é mostrado na Fig. 2.

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k). \quad (1)$$

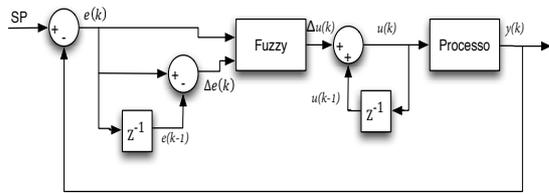


Figura 2: Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* PI.

Com um controlador *fuzzy* seguindo o modelo mencionado anteriormente, a sintonia dos seus parâmetros se torna fácil, podendo ser feita utilizando os parâmetros K_p e K_i de controladores PI convencionais. Neste trabalho, os valores desses parâmetros foram obtidos heurísticamente através de testes, tentando minimizar os efeitos das perturbações e o tempo de estabilização.

Na elaboração dos controladores foram utilizadas três funções de pertinência para o erro (e) (erro negativo - NG, erro zero - EZ e erro positivo - EP) e três para a variação do erro (Δe) (variação negativa - ΔEN , variação zero - ΔEZ e variação positiva - ΔEP). Os limites de cada função de pertinência foram definidos a partir de dados experimentais das simulações do processo. As funções de pertinência do controlador *fuzzy* FZ_2 são mostradas nas Figs. 3 e 4. As funções de pertinência dos controladores FZ_1 e FZ_3 são bastante similares às mostradas nestas figuras. Neste trabalho, procurou-se projetar controladores *fuzzy* bastante simplificados, com poucas funções de pertinência e uma pequena base de regras, permitindo que os controladores possam ser facilmente implementados até mesmo em sistemas embarcados com baixos recursos de processamento e de memória.

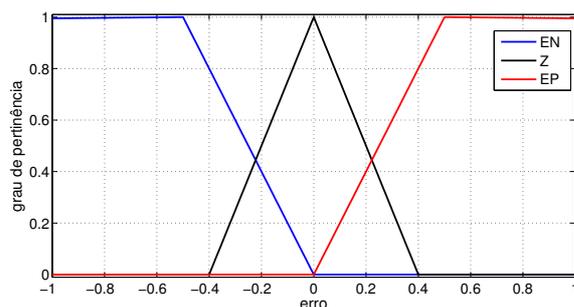


Figura 3: Funções de pertinência do erro de FZ_2 .

A base de regras de cada controlador foi definida para que dependendo do erro e da variação do erro, o comportamento do controlador mude, respondendo da melhor forma à condição atual do sistema. A mudança de comportamento a partir das base de regras se mostra bem eficaz comparados com controladores PI ou PID convencionais. As regras utilizadas pelos controladores são mostradas na Tabela 1, apresentando três saídas dife-

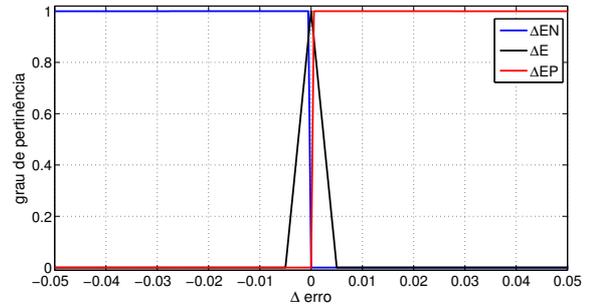


Figura 4: Funções de pertinência da variação do erro de FZ_2 .

Δ Erro	Erro		
	Negativo	Zero	Positivo
Negativo	$\pi 2$	$\pi 1$	$\pi 3$
Zero	$\pi 1$	$\pi 1$	$\pi 1$
Positivo	$\pi 3$	$\pi 1$	$\pi 2$

Tabela 1: Base de regras dos controladores *fuzzy*.

rentes: $\pi 1$, $\pi 2$ e $\pi 3$, onde cada uma dessas saídas representam um par de parâmetros K_p e K_i .

4 Resultados

Para efeito de comparação de resultados, nas simulações realizadas neste trabalho, foram feitos testes com controladores PI e controladores *fuzzy* PI com seus parâmetros ajustados heurísticamente. Os parâmetros iniciais dos controladores PI foram obtidos a partir do método de sintonia CHR (Chien et al., 1952). Em seguida, um cuidadoso ajuste fino de seus parâmetros foi “manualmente” realizado com o objetivo de se obter o melhor desempenho possível. Os parâmetros dos controladores PI encontrados e utilizados nas simulações que geraram os resultados apresentados nesta seção são mostrados na Tabela 2.

Parâmetro	PI ₁ (pressão)	PI ₂ (óleo)	PI ₃ (água)
K_p	-0,0960	-0,5155	-2,7749
K_i	-0,0115	-0,0028	-0,0150

Tabela 2: Base de regras dos controladores *fuzzy*.

Na Fig. 5 é possível observar a vazão da mistura multifásica composta por água, óleo e gás que alimenta o modelo do vaso separador trifásico utilizado neste trabalho. Nesta figura, pode-se notar a presença de severas oscilações no fluxo da mistura em decorrência das golfadas, que podem prejudicar o processamento do petróleo.

O objetivo dos controladores *fuzzy* projetados, como já foi dito anteriormente, é o de reduzir o efeito das golfadas sobre o sistema e o tempo de estabilização. A comparação do controle regulatório realizado pelos controladores PI e *fuzzy* são apresentados nas Figs. 6, 7 e 8. Pode-se notar

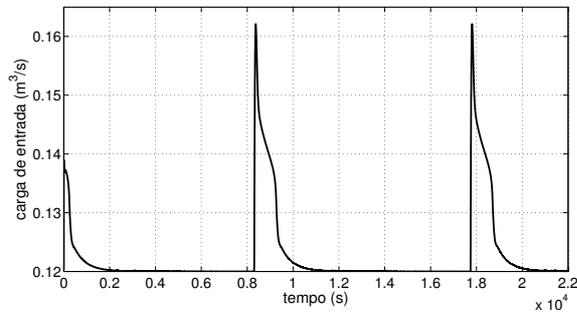


Figura 5: Vazão da carga de entrada do vaso separador trifásico sob efeito de golfadas.

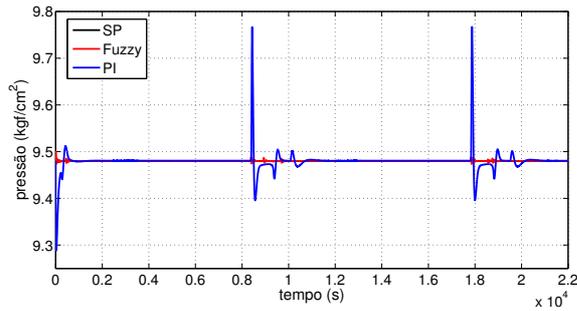


Figura 6: Pressão interna no vaso separador.

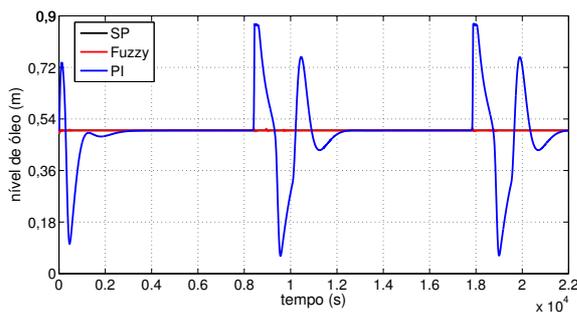


Figura 7: Nível de óleo no vaso separador.

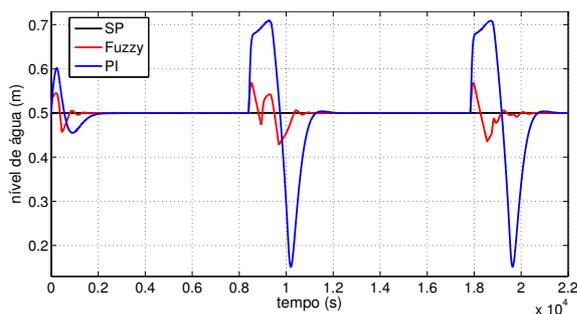


Figura 8: Nível de água no vaso separador.

que os controladores *fuzzy* foram mais efetivos que os controladores PI, atingido melhor os objetivos especificados.

Nas Figs. 9, 10 e 11 são mostrados os sinais de controle que são enviados aos atuadores (válvulas V_1 , V_2 e V_3). É possível perceber que com os controladores *fuzzy* o sistema reage mais rapidamente na presença de golfadas, entretanto, em al-

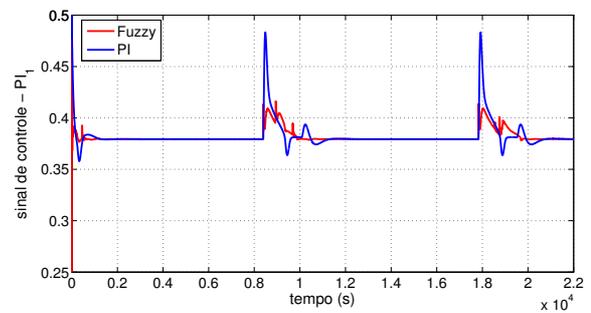


Figura 9: Sinal de controle na válvula de gás.

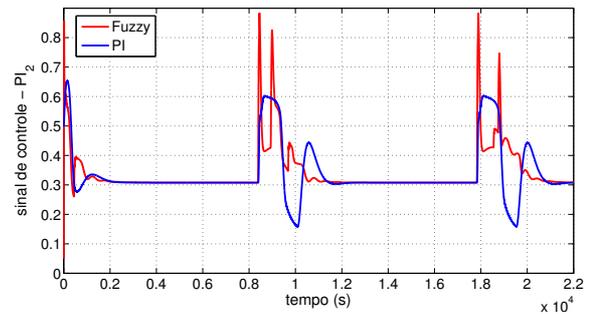


Figura 10: Sinal de controle na válvula de óleo.

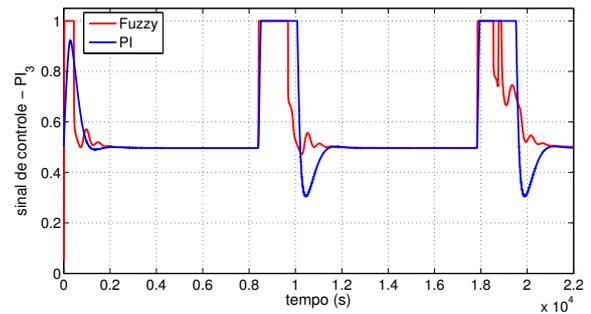


Figura 11: Sinal de controle na válvula de água.

guns casos, o controlador PI age mais suavemente, podendo causar menos desgaste nos atuadores.

Para facilitar a análise dos resultados, na Tabela 3 são apresentados alguns dos índices de desempenho para os controladores PI e *fuzzy*. Os índices utilizados na comparação são: a ISE, IAE e ITAE. Pode-se observar nesta tabela que os controladores *fuzzy* obtiveram melhores resultados em todos os índices.

5 Conclusões

Neste trabalho, foram projetados controladores *fuzzy* para substituir alguns dos controladores PI que são tradicionalmente utilizados no controle de importantes variáveis dos vasos separadores trifásicos encontrados em plantas de processamento primário de petróleo. O estudo comparativo entre estas duas técnicas de controle foi realizado a partir de um complexo sistema simulado contendo modelos de componentes presentes em uma estação primária de tratamento de petróleo. Os

Índices	Controladores PI			Controladores <i>Fuzzy</i>		
	Pressão	Óleo	Água	Pressão	Óleo	Água
ISE	12,12	340,52	137,23	0,006	0,008	3,988
IAE	133,55	1187,34	727,67	2,076	1,875	95,381
ITAE	$1,66 \times 10^6$	$1,56 \times 10^7$	$1,01 \times 10^7$	$2,066 \times 10^4$	$1,805 \times 10^4$	$1,046 \times 10^6$

Tabela 3: Índices de desempenho dos controladores PI e *fuzzy*.

resultados obtidos demonstraram que mesmo com uma estrutura bastante simples, os controladores *fuzzy* projetados apresentaram desempenho bastante superior aos controladores PI, sendo capazes de lidar com as perturbações causadas pelas golfadas com maior eficiência. Em trabalhos futuros, pretende-se avaliar a utilização de algoritmos metaheurísticos para realizar o ajuste dos parâmetros destes controladores, aliado ao aumento do número de funções de pertinência. Outras perspectivas de estudo são a análise do controle do sistema na presença de golfadas de diferentes comportamentos dinâmicos e a avaliação das características de robustez e de rejeição de ruído dos controladores *fuzzy* no sistema dinâmico utilizado por este trabalho.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e a Petrobras pelo apoio financeiro e aos companheiros de pesquisa do projeto REDIC_ADAP pela valiosa troca de conhecimentos.

Referências

- Araújo Júnior, J. M. (2007). *Técnicas de inteligência artificial para geração dinâmica de set points para uma coluna de destilação*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, RN.
- Chien, I. L., Hrones, J. A. and Reswick, J. B. (1952). On the automatic control of generalized passive systems, *Trans. of the ASME* **74**: 175–185.
- Coeyman, B. and Bowles, J. B. (1996). Fuzzy logic applied to reboiler temperature control, *5th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, Barcelona, Espanha, pp. 511–516.
- Eikrem, G. O., Aamo, O. M., Siahhaan, H. B. and Foss, B. (2004). Anti-slug control of gas-lift wells - experimental results, *6th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, Stuttgart, Alemanha.
- Filgueiras, N. G. T. (2005). *Modelagem, análise e controle de um processo de separação óleo/água*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- Guerra, R. (2007). *Projeto e simulação do controle de altitude autônomo de satélites usando lógica nebulosa*, Master's thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, SP.
- Júnior, J. D. S., Oliveira, S. A. N., Trindade, M. R. P., Oliveira, R. C. L., Santos, D. L. and Silva, C. D. (2010). Controle de nível em tanques separadores através de técnica não lineares: controle fuzzy sintonizado via algoritmo genético, *XVII Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2010*, Juiz de Fora, MG.
- Mamdani, E. H. (1976). Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, *Int. J. Man-Mach. Stud.* **8**(6): 669–678.
- Moraes, C. A. C. (1994). *Modelo fluidodinâmico para a estimativa de eficiência em hidrociclones para águas oleosas*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- Nunes, G. C. (2001). *Design and analysis of multivariable predictive control applied to an oil-water-gas separator: a polynomial approach*, PhD thesis, University of Florida, Florida, EUA.
- Nunes, G. C. (2007). Modelagem dinâmica do processamento primário de petróleo: conceitos fundamentais e aplicação em controle de processos, *Boletim Técnico da Produção de Petróleo* **2**(1): 29–47.
- Prasad, L. B., Gupta, H. O. and Tyagi, B. (2011). Intelligent control of nonlinear inverted pendulum dynamical system with disturbance input using fuzzy logic systems, *Int. Conf. on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering*, Sivakasi, Índia.
- Sandri, S. and Correa, C. (1999). Lógica nebulosa, *V Escola de Redes Neurais*, São José dos Campos, SP, pp. c073–c090.
- Silveira, M. A. C. R. (2006). *Controle de um processo de tratamento primário de petróleo*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- Simões, M. G. and Shaw, I. S. (2007). *Controle e modelagem fuzzy*, 2 ed. edn, Edgard Blucher, São Paulo, SP.
- Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications do modeling and control, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics* **15**(1): 116–132.
- Thomas, J. E. (2001). *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, Editora Interciência, Rio de Janeiro, RJ.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets, *Fuzzy Sets, Information and Control* **8**(3): 338–353.