

AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE UM SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO UTILIZANDO CONTROLADORES FUZZY

PABLO R. A. ARAÚJO, LEIZER SCHNITMAN E MÁRCIO FONTANA

*Laboratório de Automação Industrial, Centro de Capacitação Tecnológica em Automação Industrial
Escola Politécnica - UFBA*

E-mails: pablroruanaraujo@gmail.com; leizer@ufba.br; mfontana@ufba.br

Abstract— Despite the increasing advancement of renewable energy, oil is the widely used source of energy in the world. Among the several techniques used to extract the fuel from oil wells, the sucker-rod pumping is one of the most used method by industries. In this method, the control of the dynamic level at the annular favor better oil production. This paper reports two control techniques in a sucker-rod pumping system prototype, which are a fuzzy control and a PI Control supervised by a Fuzzy block. The results of each controller are discussed and compared.

Keywords— Industrial automation, Sucker-rod pumping system, Fuzzy control, PI Control supervised by Fuzzy, Supervisor fuzzy.

Resumo— Apesar do crescente avanço das energias renováveis, o petróleo ainda é uma fonte de energia largamente utilizada no mundo. Dentre as diversas técnicas utilizadas para extrair o combustível, uma das mais utilizada pelas indústrias é o Sistema de Bombeio Mecânico com Hastes. Neste método, o controle do nível de fluido no alunar é fundamental para o bom desempenho do processo. Neste artigo, são avaliadas duas técnicas de controle embarcado junto ao protótipo de bombeio mecânico, a saber: controle *fuzzy* e o controle PI supervisionado por lógica *fuzzy*. Os resultados de cada controlador são discutidos e comparados.

Palavras-chave— Automação industrial, Sistema de Bombeio Mecânico, Controle *Fuzzy*, Controle PI supervisionado por lógica *fuzzy*, supervisor *fuzzy*, lógica nebulosa.

1 Introdução

A elevação artificial é uma solução bastante utilizada e consiste em um conjunto de equipamentos e técnicas para tornar a produção do poço de petróleo economicamente viável (Estevam, 1993). Cada método de elevação apresenta características particulares e são escolhidos para atender aos parâmetros e aplicações específicas (Lins, 2010). O uso do método de Elevação Artificial utilizando o Sistema de Bombeio Mecânico (SBM) é o mais antigo e permanece sendo utilizado até os dias atuais. Embora não seja responsável pelo maior volume de petróleo elevado, ainda é o método mais utilizado em número de poços. As principais aplicações de BM são para elevar quantidades médias de fluidos em poços rasos, ou baixas vazões de fluidos em poços de maior profundidade (Lins, 2010).

Segundo Takács (2003), os equipamentos utilizados no BM podem ser divididos em dois subconjuntos de equipamentos: superfície e subsuperfície (ou fundo). A figura 1 ilustra os principais equipamentos do Sistema de BM, a saber: motor de superfície, redutor, unidade de bombeio, coluna de haste, coluna de produção, e o pistão.

Existem duas principais técnicas de controle na indústria petrolífera – os controladores *pump-off* e VSD. A primeira dessas técnicas apresenta as limitações de um controle liga e desliga e a segunda, permite alterar a característica do bombeio através da variação da velocidade do motor, que implica na variação da velocidade de bombeio, esta definida em cpm (ciclos por minuto). Esta variação de velocidade

é obtida com a utilização de um inversor de frequência.

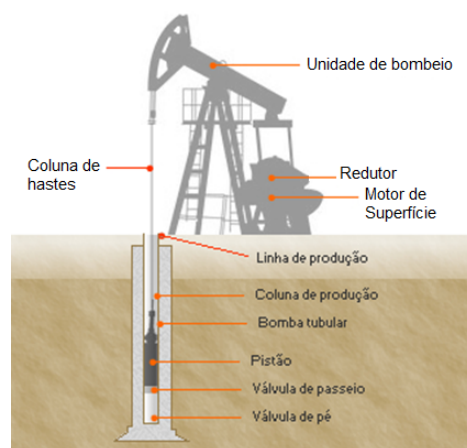


Figura 1 - Principais equipamentos do Sistema de BM

A utilização dos controladores deve-se fundamentalmente para assegurar maior produção de óleo, com uma velocidade máxima, limitada pela condição de enchimento completo da bomba, evitando assim, problemas como é o exemplo da pancada de fluido. O controle do sistema de bombeio mecânico pode ser realizado através de Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA), utilizando controladores lógicos programáveis (CLP).

Neste artigo é apresentado uma aplicação do uso de um CLP na automação e controle de um protótipo de bombeio mecânico utilizando controladores *fuzzy*.

Adicionalmente, analisa-se e compara-se os resultados experimentais de um controlador *fuzzy* e um controlador proporcional-integral (PI) escalonado por um supervisor *fuzzy*.

2 Lógica Nebulosa

2.1 O modelo Mamdani

Segundo Mamdani (1974), as variáveis de entrada sofrem o processo de *fuzzificação*, e em seguida servem de base de dados para o procedimento de inferência, o qual é baseado em regras realizadas por especialista do processo. Na sequência, o conjunto de regras atribui um valor *fuzzy* à interface de defuzzificação, que por sua vez, transforma as ações de lógica *fuzzy* inferidas em ações de lógica não-*fuzzy*. Em seguida, é realizado um escalonamento, compatibilizando os valores normalizados provenientes do passo anterior, com os valores dos universos de discursos reais das variáveis (Gomide, 1994). Assim, considerando r como um total de regras aplicadas no sistema *fuzzy*, e p o peso específico de uma determinada regra, pode-se calcular p como uma operação de conjunto entre os antecedentes desta regra. A operação de *produto* e *mínimo* (MIN) são dois operadores frequentemente usados para conjunção. Desta forma, Corrêa *et al* (2007) define p como sendo:

$$p = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_j}(y) \quad (1)$$

ou

$$p = \min[\mu_{A_i}(x); \mu_{B_j}(y)] \quad (2)$$

Definindo o vetor $\vec{Rz}$ como o resultado da discretização do universo de discurso da variável de saída $z \in \{z_{\min}, \dots, z_{\max}\}$, contendo λ elementos.

Temos então que $\mu_{C_k}(\vec{Rz})$ será o resultado do grau de pertinência do qualificador k para cada elemento do $\vec{Rz}$. Definindo também $\vec{Cp}$ como sendo a consequente, sob a forma de um vetor de λ elementos, relativa à n -ésima regra definida no sistema. Considerando o conjunto com operador conjuntivo:

$$\vec{Cp} = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_j}(y) \cdot \mu_{C_k}(\vec{Rz}) \quad (3)$$

A agregação da consequente de todas as regras do modelo é o próximo passo para o cálculo *fuzzy*. Defina-se $\vec{CA}_p$ como resultado desta agregação, onde:

$$\vec{CA}_p = \sum_{n=1}^r \vec{Cp} \quad (4)$$

Considerando as normalização desse conjunto agregado das consequentes de todas as regras como $\vec{CA}_n$, onde:

$$\vec{CA}_n = \frac{\vec{CA}}{\sum_{n=1}^r \vec{CA}} \quad (5)$$

O valor de saída em z será definido por:

$$z = \vec{Rz} \vec{CA}_n^T \quad (6)$$

Onde T representa o operador de transposição de matriz.

2.2 O controle Fuzzy

O controle *fuzzy* funciona basicamente modelando as ações a partir de conhecimento de especialista posto em regras linguísticas. A motivação para essa nova abordagem veio de casos onde o conhecimento especialista de controle era disponível (Gomide, 1994). A figura 2 ilustra a estrutura de um processo controlado por um controle *fuzzy*.

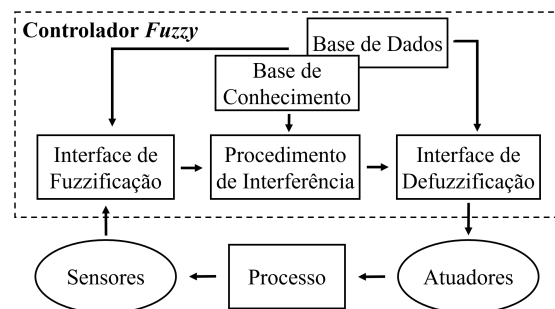


Figura 2 - Estrutura básica de um controlador *fuzzy*.

A base de conhecimento consiste de uma base de regras, caracterizando a estratégia de controle. A base de dados armazena as definições necessárias sobre discretizações e normalizações dos universos de discurso, as partições *fuzzy* dos espaços de entrada e saída e as definições das funções de pertinência. O procedimento de inferência processa os dados *fuzzy* de entrada, junto com as regras, de modo a inferir as ações de controle *fuzzy*, aplicando o operador de implicação *fuzzy* e as regras de inferência da lógica nebulosa. As diversas regras são ponderadas e a interface de defuzzificação transforma a ponderação das regras em ações de controle.

Para a realização do controle de protótipo de bombeio mecânico, toda a programação realizada empregando a técnica de controle *fuzzy* foi projetada utilizando a ferramenta *FuzzyDesigner* da Rockwell Automation.

A figura 3 ilustra os conjuntos nebulosos utilizados no projeto. Nas figuras 3(a) e 3(b) estão representadas as entradas do controlador *fuzzy*: o erro do sistema - diferença entre o valor de referência e o nível do anular do sistema, e a variação do erro - diferença entre o erro atual e o erro passado. Para essas variáveis foram utilizadas funções de pertinência no modelo trapezoidal. A figura 3(c) mostra a função de pertinência da saída do controlador *fuzzy*, a variável controlada - tensão do motor de superfície, tal função possui os modelos trapezoidal e *singles*. O método de defuzzificação foi o do centroide.

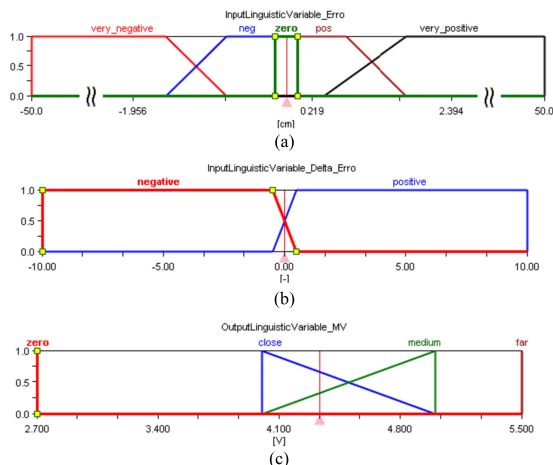


Figura 3 - Conjuntos nebulosos utilizados no projeto: (a) erro do sistema, (b) variação do erro do sistema e (c) tensão do motor de superfície.

2.3 O controle PI supervisionado por Fuzzy

Em um controle supervisionado, as regras do *fuzzy* são também utilizadas para ajustar os parâmetros de um controlador. Se uma planta não linear muda de ponto de operação, utilizando o supervisor *fuzzy*, pode-se mudar os ganhos do controlador dinamicamente de acordo com cada ponto de operação (Jantzen, 1998). A figura 4 mostra a estrutura da planta para um controlador supervisionado.

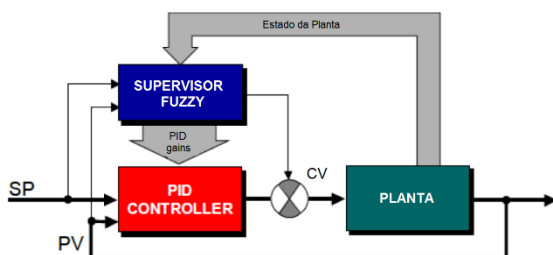


Figura 4 - Estrutura do sistema de controle PI supervisionado pelo Fuzzy (Rockwell Automation, 2007).

O controlador supervisionado implementado no protótipo do SBM tem estrutura similar à apresentada na figura 4, onde o supervisor *fuzzy*, com base nos valores do nível do anular, determina valores para os ganhos do controlador PI para três diferentes regiões de operação.

A figura 5 ilustra os conjuntos nebulosos usados, onde na figura 5(a) representa-se a única entrada do supervisor: o nível da coluna de produção que o sistema está operando, ao qual foi utilizada funções de pertinência no modelo de trapezoidal. A figura 5(b) e 5(c) mostram as saídas do supervisor respectivamente o ganho proporcional (K_p) e o ganho integral (K_i) do controlador PI. As saídas possuem funções de pertinências no modelo de *singletons*. O método de defuzzificação foi a média dos máximos, uma vez que os valores dos ganhos não variam linearmente.

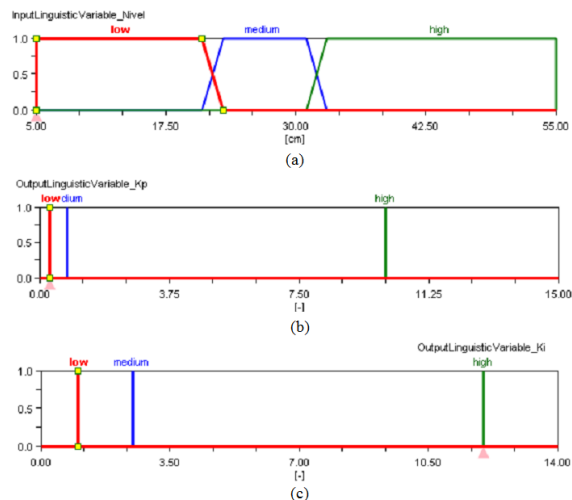


Figura 5 - Conjuntos nebulosos utilizados no projeto: (a) nível da coluna de produção, (b) ganho proporcional (K_p) e (c) ganho integral (K_i).

3 Protótipo e ferramentas de automação

O protótipo do sistema de BM foi construindo em madeira do tipo MDF. Essa estrutura é utilizada para integrar todas as partes do protótipo (ver figura 6), a saber: fonte, circuitos, sensores, atuadores e outros subsistemas. A unidade de bombeio é formado pelo balancim, coluna, caixa de suporte e conjunto de biela e manivela. Um aquário de vidro com capacidade de 15 litros foi utilizado como reservatório. A representação do poço, da coluna, e da cabeça de produção do SBM foram feitas utilizando peças de acrílico, alinhados e fixados na estrutura do suporte. Para representar a haste, foi utilizada uma barra rosca de aço devido ao peso e facilidade de instalação da válvula de passeio. No inferior dessa barra, foi instalada a válvula de passeio, formada por um disco de borracha e por um cilindro vazado de acrílico. Na base da coluna de produção encontra-se a válvula de pé, onde sua vedação é realizada por uma esfera de borracha (Correia *et al*, 2014).

O motor utilizado no projeto para realizar o movimento do bombeio mecânico é um motor redutor de corrente contínua (CC) usado para levantamento de vidro de carro. O redutor tem a função de reduzir a alta velocidade do motor CC para a velocidade de bombeio que neste projeto não deve ultrapassar 60 CPM. Foi utilizado o motor modelo F006B40160 da Bosch. A determinação da altura do nível da coluna de líquido (poço) é realizada indiretamente por um sensor de pressão MPXV5010DP da *Freescale*. Aplica-se uma tensão constante de 7,5V no moto-bomba, fabricado pela VP, código VP-7038, afim de provocar uma vazão de entrada suficiente para elevar o nível do anular até a superfície do poço, tornando o protótipo mais próximo da realidade.



Figura 6 - Protótipo do Bombeio Mecânico.

Dentre as ferramentas de automação e controle, foi utilizado o RSLogix™ 5000, um *software* que suporta a família Allen-Bradley ControlLogix de controladores programáveis, incluindo aplicações com processos, bateladas, *motion*, *safety* e inversores de frequência. O RSLinx Classic é uma solução de comunicação, o FactoryTalk® View Site Edition (SE) que é um *software* de supervisão Interface Homem Máquina (HMI) para o monitoramento e controle distribuído de multi-usuário-servidor e o FuzzyDesigner que é um pacote de *software* para projetar sistemas *fuzzy* com o objetivo de ser implementado como um Sistema Fuzzy Hierárquico (HFS) (Rockwell, 2007).

O hardware utilizado foi o controlador CompactLogix 5332E, fabricada pela Rockwell Automation. O módulo de entrada analógica utilizado foi 1769-IF8 que possui 8 canais de entrada ($\pm 10V_{cc}$, 0 a $10V_{cc}$, 0 a $5V_{cc}$, e a $5V_{cc}$ ou 0 a $20mA$, 4 a $20mA$) (Rockwell, 2005).

O requisito referente ao controle foi precisão. A precisão é uma propriedade demonstrada pela capacidade de atender ao *setpoint* pré-definido mesmo com perturbações (Ogata, 2010). Uma vez alcançado o regime permanente, o erro do nível dinâmico medido em relação ao ponto de operação definido (*setpoint*) deveria ser inferior a variação de 1cm. A velocidade de bombeamento não deve exceder a 60 CPM. Quanto ao requisito de tempo de resposta, o sistema deveria alcançar o ponto de operação em até 20 segundos para uma entrada degrau de amplitude igual a 5cm.

4 Resultados e discussões

Para todos os experimentos exibidos nesta seção, o ponto de operação em regime estacionário inicial foi com o nível medido em 10cm.

A figura 7 mostra os resultados de testes realizados utilizando o controlador Fuzzy. As figuras 7(a) e 7(d) representam a resposta do sistema a um degrau de amplitude 5cm no nível da coluna de produção. Observa-se que o tempo morto da resposta é desprezível e que o sinal leva 12 segundos para alcançar a

referência. A resposta possui um percentual de sobre-sinal de aproximadamente 6,7%, (valor máximo de 16cm) no instante de 32 segundos. Considera-se que o sistema entra em regime permanente logo após o sinal alcançar a referência. Observa-se, ainda, que o sinal de saída do sistema apresenta uma resposta transitória rápida, aproximadamente 18 segundos. É importante salientar que o tempo de resposta do controlador é menor que os requisitos de controle do protótipo do SBM (20 segundos). Observa-se também que apesar do sistema responder de forma satisfatória, há pequenas oscilações. Estas oscilações são devido à limitações do protótipo. A figura 7(d) mostra que a tensão no motor (sinal do controlador) se manteve dentro do valor estabelecido no processo, comportando-se de forma limitada, variando basicamente entre 2.5 e 5.5V, evitando assim, movimentos bruscos da unidade de bombeio. O sinal de erro (figura 7(d)), atende as especificações do projeto e em geral possui o módulo do erro < 1cm.

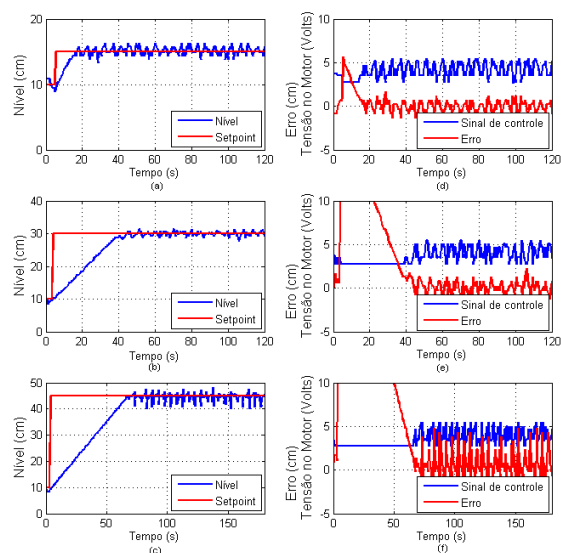


Figura 7 – Três experimentos ilustrando a resposta do sistema com o controlador Fuzzy para diferentes pontos de operação ao longo da coluna: (a), (b) e (c) Sinais de saída do sistema e (d), (e) e (f) sinais de controle e de erro do sistema.

As figuras 7(b) e 7(e) ilustram a resposta do sistema para uma mudança no sinal de referência para 30cm desejáveis no nível da coluna de produção. A figura 7(b) exibe a resposta do sistema a um degrau de amplitude igual a 20cm no nível da coluna de produção. O sinal leva 40 segundos para alcançar a referência. É importante salientar que o tempo de subida do sistema é maior em comparação ao 15cm no nível da coluna de produção devido à maior amplitude do degrau. A resposta possui um percentual de sobre-sinal de aproximadamente 3% (valor máximo de 31cm) no instante de 51 segundos. A figura 7(e) mostra que a tensão no motor se manteve mínima até aproximadamente 44 segundos, quando o nível alcança a referência, e em nenhum momento o sinal de controle ultrapassa o valor estabelecido no processo. O erro do sistema inicia com 20cm, e vai reduzindo até que, por volta de 41 segundos, o siste-

ma entra em regime permanente, considerando que o módulo do erro se mantém $< 1\text{cm}$. Nota-se ainda que, devido a região de operação ser maior do que aquela para a qual o controlador foi projetado (15cm), percebe-se que, com certa frequência, o erro em regime permanente assume valores maiores em módulo que 1cm.

As figuras 7(c) e 7(f) exibem a resposta do sistema à uma entrada de referência de 45cm no nível da coluna de produção. A figura 7(c) exhibe a resposta do sistema à um degrau de amplitude igual a 35cm no nível da coluna de produção. O sinal leva 66 segundos para alcançar a referência. É importante salientar que o tempo de subida do sistema é maior em comparação aos casos anteriores devido ao fato que a amplitude do degrau também é maior. A resposta possui um percentual de sobre-sinal de aproximadamente 7% (valor máximo de 48cm) no instante de 82 segundos. A figura 7(f) mostra que a tensão no motor se manteve mínima até 70 segundos e em nenhum momento o sinal de controle ultrapassou o valor estabelecido no processo. O erro do sistema possui valor inicial de 35cm e vai reduzindo até que, em aproximadamente 70 segundos, o sistema entra em regime permanente. Contudo, observa-se que o módulo do erro assume valores $> 1\text{cm}$ com maior frequência, quando comparado com os sinais de erro anteriores em regiões de operação menores, com grandes oscilações, fazendo com que o controlador atue com menor precisão em regime permanente.

A figura 8 mostra os resultados dos testes realizados utilizando o controlador PI Supervisionado por lógica *Fuzzy*.

As figuras 8(a) e 8(d) ilustram o comportamento do sistema e do sinal de controle do controlador PI para um sinal de referência em 15cm de altura da coluna de produção. É possível verificar a validade do controlador, e rastreamento da referência. O sinal de saída do sistema (ver figura 8(a)) é rastreado com um regime transitório rápido, de aproximadamente 20 segundos e estável em regime permanente (oscilação em torno do ponto de operação e inferior a 1cm). A velocidade de resposta é menor do que aquela estabelecida nos requisitos de controle do protótipo do SBM (20 segundos). A resposta possui um sobre-sinal de aproximadamente 13%. Analisando a figura 8(d), pode-se observar que a tensão no motor (sinal de controle) se manteve dentro do valor estabelecido no processo, e que se comportou de forma limitada, atuando/acionando o motor (tensões entre 3.5 e 5V) sem saturação, evitando movimentos bruscos da unidade de bombeio. O sinal de erro, após o regime transitório, manteve-se com módulo de erro $< 1\text{cm}$ durante o experimento. As figuras 8(b) e 8(e) mostram o resultado para um sinal de referência de 30cm no nível da coluna de produção. A figura 8(b) exhibe a resposta do sistema à um degrau de amplitude igual a 20cm. A resposta possui um percentual de sobre-sinal de aproximadamente 10% (valor máximo de 33cm) no instante de 48 segundos. A figura 8(e) mostra que a tensão no motor se manteve mínima até o momento em que o nível alcança a referência, e em

nenhum momento o sinal de controle ultrapassou o valor estabelecido no processo. Verifica-se ainda que o erro do sistema inicia com 20cm e vai reduzindo até o sistema entrar em regime permanente, por volta de 70 segundos, onde começa a oscilar com amplitudes menores que 1cm.

As figuras 8(c) e 8(f) ilustram o resultado para um sinal de referência de 45cm no nível da coluna de produção. Analogamente ao caso anterior, observa-se que a figura 8(c) exhibe a resposta do sistema à um degrau de amplitude igual a 35cm. A resposta possui um percentual de sobre-sinal de aproximadamente 6,7% (valor máximo de 48cm) no instante de 76 segundos. A figura 8(c) mostra que a tensão no motor se manteve mínima até 72 segundos, quando o nível alcançou a referência, e em nenhum momento o sinal de controle ultrapassou o valor estabelecido no processo. Nota-se que o erro em regime permanente assume valores em módulo $> 1\text{cm}$.

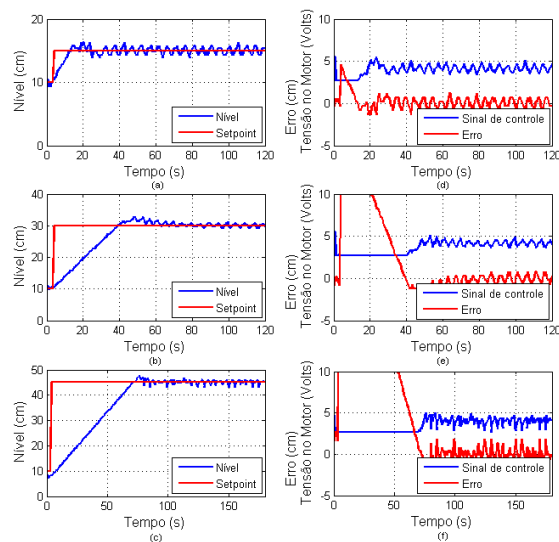


Figura 8 - Três experimentos ilustrando a resposta do sistema com o controlador Supervisionado para o ponto de operação ao longo da coluna: (a), (b) e (c) Sinais de saída do sistema e (d), (e) e (f) sinais de controle e de erro do sistema.

Ao analisar os resultados dos controladores exibidos nas figuras 7 e 8, percebe-se que as duas técnicas de controle utilizadas com o protótipo do SBM satisfazem as especificações do projeto no quesito de precisão do controlador. A tabela 1 compara de maneira quantitativa as respostas dos dois controladores usados no projeto para as três regiões de operação.

A realização de ensaios ao longo da coluna do protótipo teve uma grande importância no que diz respeito a análise da resposta do sistema para toda a coluna de nível no anular. Analisando os resultados dos controladores na tabela 1, percebe-se que para toda a coluna, os controlares apresentam uma precisão e tempo de resposta satisfatórios, contudo, ao analisar o módulo do erro em regime permanente, percebe-se que o controlador *fuzzy* apresenta o maior erro em regime permanente, além disso, o controlador PI supervisionado por *Fuzzy* apresenta um melhor desempenho ao longo da coluna do anular, pois

possui menor erro em regime permanente e um menor tempo de resposta, sendo assim o melhor controlador para se operar ao longo de toda a coluna em estudo.

Tabela 1 - Análise comparativa dos controladores

Sinal de referência (cm)	Características avaliadas	Controlador <i>Fuzzy</i>	Controlador Supervisionado
15	Sobre-sinal (%)	6,7	12
	Tempo de pico (s)	32	20
	Tempo de subida (s)	12	10
	Tempo de acomodação (s)	18	20
	Módulo do erro em regime permanente	0,51	0,49
30	Sobre-sinal (%)	3	10
	Tempo de pico (s)	51	48
	Tempo de subida (s)	40	35
	Tempo de acomodação (s)	41	70
	Módulo do erro em regime permanente	0,56	0,41
45	Sobre-sinal (%)	7	6,7
	Tempo de pico (s)	82	76
	Tempo de subida (s)	66	72
	Tempo de acomodação (s)	70	82
	Módulo do erro em regime permanente	1,1	0,44

5 - Conclusões

Apesar de ser algo comum para a academia, o uso de controladores *fuzzy* na indústria ainda é um paradigma a ser vencido. Há alguns anos diversos fabricantes de CLPs já oferecem recursos para aplicações de controladores baseados na lógica nebulosa, no entanto, a grande parte da indústria nacional ainda não tem explorado adequadamente estes novos recursos.

As duas técnicas de controle apresentaram resultados satisfatórios para regiões inferiores ao nível de 45cm da coluna de produção do SBM. Foi observado um comportamento não linear para valores de referência acima de 30cm no nível da coluna. Esta característica pode ser associada a flexibilidade do conjunto de hastes, que diminui o curso útil do pistão quando se aumenta a velocidade de bombeio. Observou-se também que a carga na coluna de hastes é elevada o suficiente para mudar o comportamento do sistema, provocando um aumento dos ruídos, o que explica o elevado erro em regime permanente para o controlador *Fuzzy* nesta região. É verificado que o controlador PI supervisionado por lógica *fuzzy* consegue contornar esse problema, apresentando resultados notavelmente mais satisfatórios, uma vez que esse controlador utiliza técnicas de controle PI para controlar o sistema, onde seus ganhos são supervisionados utilizando a lógica *fuzzy*. O supervisor *fuzzy* escolhe, baseado no conjunto de regras, valores de ganho adequados para cada região de operação do controlador PI no sistema de BM.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Rockwell Automation do Brasil Ltda pela parceria com CTAI/UFBA. Os autores também agradecem as agências brasileiras FAPESB, CAPES e do CNPq pelo suporte financeiro parcial para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Correia, D.; Neri R.; Torres T.; Dórea T (2014). Relatório Final do projeto da unidade de bombeio mecânico. Universidade Federal da Bahia.
- Corrêa, J. F.; Oliveira F. M. Schnitman L. (2007.). MAICE – uma Ferramenta para Modelagem de Conhecimento Especialista aplicada à Automação de Poços de Petróleo – ICAPETRO2007.
- Estevam, V. (1993). Curso de Exploração e Produção de Petróleo. *Métodos de Elevação*. Petrobras. DEPRO/DITEP/SETPRO.
- Gomide, F. A. C.; GUDWIN, R. R. (1994). Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy.
- Jantzen, J. (1998). Design of Fuzzy Controllers. Technical report N. 98-E-864, Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby.
- Lins, F. C. A. (2010). Modelagem e Simulação de um Sistema de Bombeio Mecânico em Poços Direcionais utilizando Parâmetros Concentrados. 2010. 62 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.
- Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*. Vol 121, no 12, pp 1585-158.
- Ogata, K. (2010). Engenharia de Controle Moderno. 5ª Edição. São Paulo: Person Prentice Hall.
- Rockwell Automation (2005). Compact I/O 1769-IF8 Analog Input Module. 2005. Disponível em: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1769-um002_-en-p.pdf>. Acesso em: 01/04/2016.
- Rockwell Automation (2007). User Manual, RSLogix5000 Fuzzy Designer. Disponível em: <<http://www.rockwellautomation.com>> Acesso em 14 de outubro de 2015.
- Takács, Gábor (2003). Sucker-Rod Pumping Manual, 1. ed. PennWell Corporation.