

CONTROLADOR FUZZY PI, POR BANDAS, APLICADO EM UM PROCESSO DE NÍVEL EM VASOS SEPARADORES DE PLATAFORMAS DE PETROLEO OFFSHORE

SILMAR A. N. OLIVEIRA*, JOÃO D. S. JUNIOR*, DIEGO L. SANTOS[†], CLEISON D. SILVA[†],
ROBERTO C. L. OLIVEIRA[†]

*Laboratório de Automação e Controle, Departamento de Engenharia de Controle e Automação, Instituto de Estudos Superiores da Amazônia
66055 – 260 Belém, PA, Brasil

[†]Laboratório de Controle e Supervisão de Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará
66095 – 550 Belém, PA, Brasil

Emails: adleonn@gmail.com, jjoaodias@gmail.com, santosdl@hotmail.com,
cleisond@gmail.com, limao@ufpa.br

Abstract— Oil platforms have production plants that use cylindrical horizontal tank, known as separators, to remove gas from oil. These plants are subject to hard input variations (gush), due to outflow characteristics between the well and the platform. These gushes cause instability in control's plant of oil and gas production with possible risks of stopping production. To control these separators level, traditionally it is used PID controllers to act in a valve installed in the oil tank output. For systems with high oscillations in load, this controller is tuned to maintain the level constant. To reduce these risks it was developed an advanced control strategy – Fuzzy Control by Bands – whose the main idea is to allow the oscillation in the controlled variable (level) inside some bounds, aiming to stabilize the plant and raise the operational reliability. This paper will describe one of the main control strategy used in oil production and treatment systems.

Keywords— Fuzzy Control, Controller PI, Control by Bands and Control Level.

Resumo— Plataformas de petróleo possuem plantas de produção que utilizam vasos cilíndricos horizontais, chamados separadores, para retirar o gás do óleo. Estas plantas estão sujeitas a severas variações de entrada (golfadas), devido às características do escoamento entre os poços e a plataforma. Estas golfadas provocam instabilidade no controle da planta de produção de óleo e de gás com possíveis riscos de parada de produção. Para controlar o nível desses separadores, tradicionalmente utilizam-se controladores PID para atuarem numa válvula instalada na saída de óleo do vaso. Para sistemas com grandes oscilações na carga este controlador é sintonizado para manter o nível constante, em contrapartida as oscilações de vazão na entrada do vaso se propagam para a saída, causando instabilidade nos equipamentos instalados à jusante do separador. Para minimizar estes riscos foi elaborada uma estratégia de controle avançado – Controle Fuzzy por Bandas – cuja idéia central é permitir a oscilação da variável controlada (nível) dentro de certos limites, com o objetivo de estabilizar a planta e aumentar a confiabilidade operacional. Neste artigo será descrito uma das principais estratégias de controle utilizadas para sistemas de produção e tratamento de óleo.

Palavras-chave — Controle Fuzzy, Controlador PI, Controle por Bandas e Controle de Nível

1 Introdução

As plantas de processamento primário convencionais, encontradas na indústria do petróleo, utilizam vasos cilíndricos horizontais, denominados separadores gravitacionais, seja para separar gás do líquido (separação bifásica), seja para separar gás, óleo e água (separação trifásica) (Giovani et al, 2004).

Estas plantas estão sujeitas a severas variações de entrada (golfadas), devido às características do escoamento entre os poços e a plataforma (Álvaro et al, 2004). Estas golfadas provocam instabilidade no controle da planta de produção de óleo e de gás com possíveis riscos de parada de produção. A qualidade da separação no local de extração é fundamental para a lucratividade do empreendimento (Campos et al, 2006).

Para controlar o nível nos separadores, tradicionalmente utiliza-se a estrutura de controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) para atuar

em uma válvula instalada na saída de líquido (óleo e água) do vaso (Álvaro et al, 2004; Giovani et al, 2004).

A ação de controle será executada de forma que a válvula seja acionada para proporcionar uma vazão adequada ao necessário para se manter o nível do separador próximo a uma determinada referência (*setpoint*). Conseqüentemente, o principal problema neste tipo de sistema é o repasse das oscilações de carga para a vazão de saída. Somente para sistemas com pequenas oscilações na carga, a utilização do PID é satisfatória (Giovani et al, 2004). Diversas propostas (desde a utilização de controle proporcional, controle não-linear até *feedforward*) são apresentadas com os mais variados nomes: controle de *surge*, *level averaging control* etc. A maioria delas requer a medição da vazão, seja de exportação ou de carga. Entretanto as condições operacionais de uma planta de processamento primário são tais que ocorrem freqüentes mudanças de carga e alterações de regime de escoamento na linha de produção. Desta forma, o algoritmo ideal é

aquele que possa se adaptar melhor a essas variações. Do ponto de vista operacional, simplicidade é também desejável.

O objetivo deste artigo é apresentar uma nova estratégia de controle de nível para estes separadores, utilizando uma técnica de controle inteligente (Passino e Yurkovich, 1997), (Shaw e Godoy, 1999) e (Ning et al, 2004), o controle fuzzy PI por bandas.

Desta forma, um algoritmo de controle que permita o amortecimento das oscilações nos separadores é desejável, ou seja, o controlador de nível ideal deve permitir que o nível varie dentro de uma faixa operacional (banda) para que as vazões na saída de óleo sejam menos oscilatórias (Giovani et al, 2004).

2 Processo de Controle de Nível

Na figura 1 é apresentado um diagrama simplificado que ilustra um vaso separador e suas dimensões. Neste problema foi considerada a interface entre gás e líquido (bifásica). A vazão média de entrada, para este separador, foi considerada em torno de 1000 m³/h, havendo variações abruptas (golfadas), neste regime de escoamento. O controle ocorre através do acionamento da válvula (Level Indicator Controller - LIC) posicionada na saída de líquido do vaso.

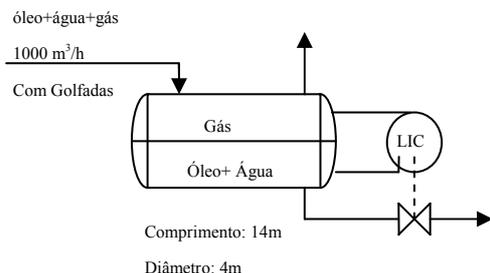


Figura 1. Diagrama da Planta de Controle de Nível.

As oscilações ocorridas no vaso separador, proveniente da vazão de entrada, devem ser restritas a determinados limites. O nível não pode subir de forma que ocorra arraste de líquido pelo gás ocasionando problemas nos moto compressores de recuperação de vapor ou descer de modo a permitir a passagem de gás com o líquido, causando baixa vazão e pressão no oleoduto.

Variações abruptas na vazão de entrada do vaso separador são comuns devido às características do regime de escoamento dos poços de petróleo até a planta. Essas variações abruptas são refletidas para a saída do sistema, através das oscilações na coluna de líquido, tornando o sistema não-linear (Giovani et al, 2004).

Em Álvaro et al (2004) é sugerido que válvulas de controle com atuadores pneumáticos e sensores podem ser modeladas como sistemas de primeira ordem com constante de tempo da ordem de 10 e 5 segundos, respectivamente. As funções de

transferência que representam o comportamento dinâmico da válvula e do sensor são apresentadas nas equações 1 e 2, respectivamente.

$$G_V(s) = \frac{2000/3600}{10s + 1} \quad (1)$$

$$G_S(s) = \frac{1}{5s + 1} \quad (2)$$

3 Controlador PI

Neste trabalho foi utilizado nas simulações um controlador PI Linear, pois é muito utilizado em processos reais, para comparação com o controlador Fuzzy PI por bandas.

No projeto do controlador PI linear, foi colocado um zero a esquerda do pólo da planta. Com isso consegue-se garantir uma maior robustez do controlador e um erro nulo em regime permanente para uma entrada do tipo degrau.

O projeto de sintonia do controlador PI foi realizado em torno da referência do sistema, nível com 2,8m de altura. Os parâmetros do controlador $K_c = 1$ e o zero em $s = -0,0055$, foram obtidos tomando como análise o lugar das raízes e pela especificação de um sobre sinal menor ou igual a 5%. Assim a função de transferência do controlador $C(s)$ é dada por:

$$C(s) = \frac{(s + 0,0055)}{s} \quad (3)$$

4 Controlador Fuzzy PI por Bandas

No controle por bandas é considerada uma faixa operacional, ou seja, um valor máximo e um valor mínimo, tal que o controlador possa atuar de maneira que o nível não ultrapasse esses limites. Durante a oscilação de nível entre o máximo e o mínimo da banda, a vazão de saída deverá ser igual à média da vazão de entrada. Quando estes limites forem ultrapassados o controlador deverá atuar de modo mais agressivo, visando garantir o retorno para dentro da banda.

No Controle Fuzzy por Bandas são definidas duas bandas de operação que visam à máxima suavidade possível das perturbações em torno do *setpoint*.

Uma banda não crítica (região de baixo ganho) foi estabelecida dentro de uma banda crítica (região de alto ganho). O Controlador Fuzzy deverá atuar de modo mais suave na região não crítica e de modo mais agressivo na região crítica, conforme figura 2. Os valores que determinam esta faixa foram obtidos de forma empírica, através de entrevista com operadores de campo.



Figura 2. Diagrama do Vaso Separador.

Na região não crítica o ganho do processo é extremamente baixo, e nas regiões críticas o ganho do processo é extremamente alto.

Para controlar o nível de líquido no interior do vaso separador, utilizou-se um controlador Fuzzy PI, utilizando uma variável auxiliar (Qin e Borders, 1994). Este controlador atua na válvula instalada na saída do vaso separador. A maioria dos controladores fuzzy utiliza como variáveis de entrada o erro (e) e a variação do erro (Δe). Entretanto esta entrada adicional, a variável auxiliar (AV) (figura 3), é utilizada para indicar as diferentes regiões em que o processo está operando. Logo, estas regiões determinam as “bandas” em que o controlador deverá possuir um comportamento diferente.

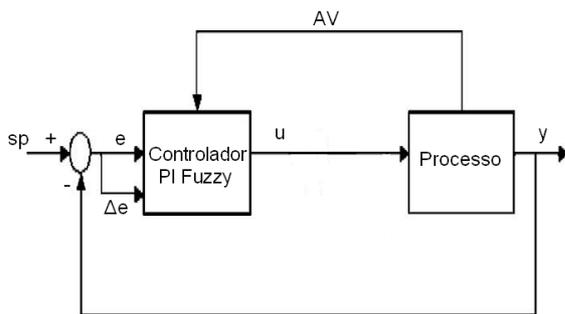


Figura 3. Controlador Fuzzy PI por Bandas com a variável auxiliar (AV).

A AV pode ser a variável de controle, a saída do processo ou o *setpoint*, dependendo de como as regiões de operação forem definidas (Qin e Borders, 1994). Ressalta-se que, para este caso, a AV estará sempre disponível. Considerando uma determinada região de AV, o controlador fuzzy pode atuar baseado no conhecimento associado ao processo para aquela região, como um controlador fuzzy PI clássico, pois a relação remanescente é entre o erro, variação do erro e variação do sinal de controle (Fuentes et al, 2002).

Depois de alguns experimentos, onde se alterou a AV entre o *setpoint* e variável de saída, se observou que o desempenho de controle foi superior utilizando-se a saída do processo como variável auxiliar. Esta variável foi dividida em três regiões, isto é, três funções de pertinência que podem ser definidas utilizando o conhecimento do operador do processo (Baixo, Médio e Alto). A figura 4 apresenta a partição da variável AV. Estas funções de pertinência correspondem à altura do vaso separador,

ou seja, as regiões críticas e a região não crítica, conforme figura 2.

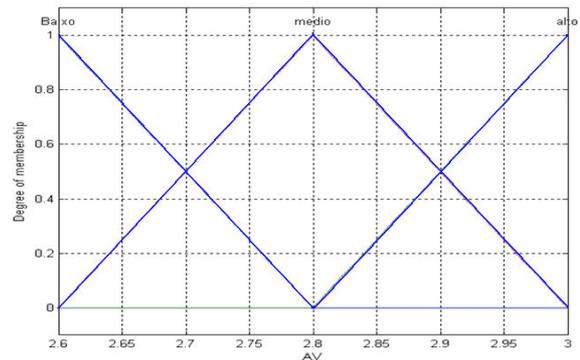


Figura 4. Variável auxiliar (AV)

Em seguida foi necessário definir as funções de pertinências associadas com as outras entradas do controlador, o erro de controle e variação do erro, conforme figuras 5 e 6.

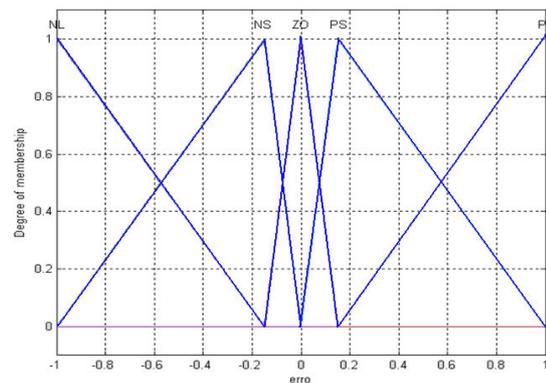


Figura 5. Funções de pertinência para o erro de controle

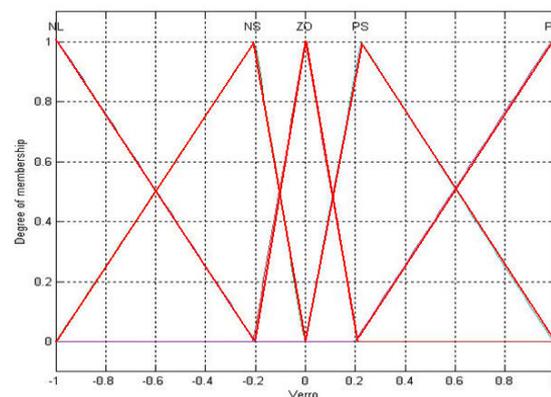


Figura 6. Funções de pertinência para a variação do erro

A próxima etapa foi definir as funções de pertinência associadas à saída do controlador, variação do sinal de controle (Δu), observado na figura 7. Ressalta-se que esta variável requer, normalmente, uma resolução maior que as demais variáveis, pois o controlador deve ter a capacidade de

ser mais agressivo ou menos agressivo dependendo da não-linearidade do processo.

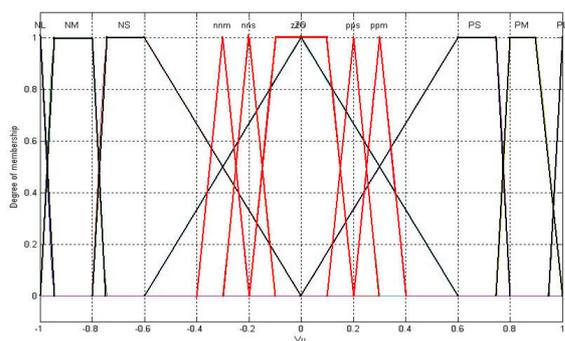


Figura 7. Funções de pertinência para a variação do sinal de controle

As figuras 5, 6 e 7, mostram que o universo de discurso do erro, variação do erro e variação do sinal de controle está entre $[-1, 1]$. Sendo assim é possível escalar estas variáveis como:

$$e^\diamond = \frac{e}{S_e} \quad \Delta e^\diamond = \frac{\Delta e}{S_{\Delta e}} \quad \Delta u^\diamond = \frac{\Delta u}{S_{\Delta u}} \quad (4)$$

Onde S_e , $S_{\Delta e}$ e $S_{\Delta u}$ são fatores de escala para e , Δe e Δu , respectivamente, que são parâmetros de sintonia para o controlador *fuzzy*. Além disso, como é mostrado em (Qin e Borders, 1994), estes parâmetros estão relacionados com os parâmetros de sintonia do controlador PI como:

$$K_p = 0.5(S_{\Delta u} / S_{\Delta e}) \quad (5)$$

$$T_i = \Delta t(S_e / S_{\Delta e}) \quad (6)$$

Onde K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integral e Δt o período de amostragem. Além do mais, para uma ação de controle proporcional mais forte, tanto $S_{\Delta u}$ pode ser aumentado ou $S_{\Delta e}$ diminuído. Como $S_{\Delta u}$ está restrita a velocidade da resposta física do atuador, o último parâmetro de sintonia para o controle proporcional é o $S_{\Delta e}$. Para forçar uma ação de controle integral, deve-se diminuir S_e ou aumentar $S_{\Delta e}$, pois a constante de tempo integral pequena representa uma forte ação de controle integral.

Continuando o desenvolvimento do controlador, foi definida a base de regras *fuzzy* para cada região do processo. Foi necessário definir um conjunto de regras para cada região de atuação do processo. O espaço da AV está particionado em três funções de pertinência, Baixo, Médio e Alto. As regiões, Baixo e Alto (não Médio) correspondem à região crítica e o conjunto de regras será o mesmo nestas regiões, conseqüentemente eliminando-se 25 regras redundantes. Portanto para a região da AV Médio, as regras são diferentes e nenhuma pôde ser eliminada.

As tabelas 1 e 2 apresentam a base de regras definidas para a AV Médio e não Médio, respectivamente. Quando as oscilações estiverem na

região crítica, as regras ativadas corresponderão a AV não Médio e o controlador possuirá comportamento mais agressivo. Oscilações na região não crítica ativarão a base de regras da AV Médio e o controlador possuirá comportamento inverso, sendo mais suave.

O conjunto de regras para esse processo pode ser entendido como:

$$\{Se AV=medio e e = PL e \Delta e = PL \text{ então } \Delta u = NM\}$$

BASE REGRAS		ERRO				
		NL	NS	ZO	PS	PL
VARIÇÃO DO ERRO	NL	ppm	ppm	ppm	pps	zso
	NS	ppm	pps	pps	zso	nns
	ZO	ppm	pps	zso	nns	nnm
	PS	pps	zso	nns	nns	nnm
	PL	zso	nns	nnm	nnm	nnm

Tabela 1 - AV Médio

BASE REGRAS		ERRO				
		NL	NS	ZO	PS	PL
VARIÇÃO DO ERRO	NL	PM	PM	PS	PM	ZO
	NS	PM	PS	PS	ZO	NM
	ZO	PS	PS	ZO	NS	NS
	PS	PM	ZO	NS	NS	NM
	PL	ZO	NM	NS	NM	NM

Tabela 2 - AV Não Médio

5 Sintonia do Controlador Fuzzy

Em resumo, o seguinte procedimento pode ser seguido para sintonizar o controlador fuzzy por bandas:

- Sintonizar os fatores de escala, para a região de baixo ganho;
- Sintonizar a posição interna das funções de pertinências para Δu , na região de alto ganho. Isto basicamente resulta em ações de controle brandas;
- Sintonizar as funções de pertinências para a variável auxiliar, para realizar uma transição suave de controle;
- Realizar uma sintonia fina nas funções de pertinências e nas regras para atingir o desempenho de controle desejado.

6 Resultados

Simularam-se dois controladores no modelo do processo de controle de nível no Matlab® MathWorks. O controlador PI Linear e o Controlador Fuzzy PI por Banda.

Nas figuras 8 e 9 são apresentados os gráficos da saída do sistema e do sinal de controle, respectivamente, após simulação dos controladores PI Linear e Fuzzy PI por bandas. Observou-se então que o PI Linear possui um sobre-sinal maior que o Fuzzy PI se aproximando bastante do limite superior da faixa operacional (banda), e um sob-sinal bastante acentuado permitindo que a variável controlada demore a se estabilizar.

Enquanto que o Fuzzy PI por Bandas na região de alto ganho atua de maneira mais agressiva e na região de baixo ganho atua de maneira mais suave. Demonstrando assim seu desempenho superior e a sua validação em sistemas com altas não-linearidades.

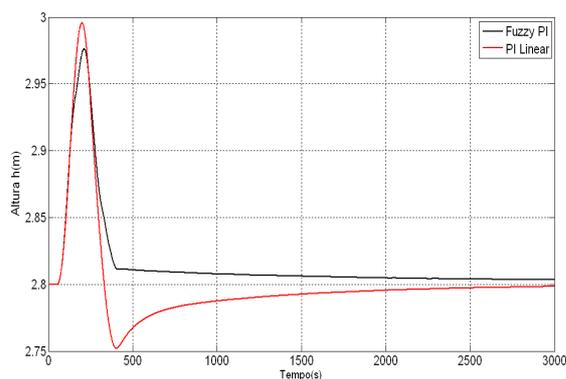


Figura 8. Saída do sistema do controlador PI Linear e do Controlador Fuzzy PI por Bandas.

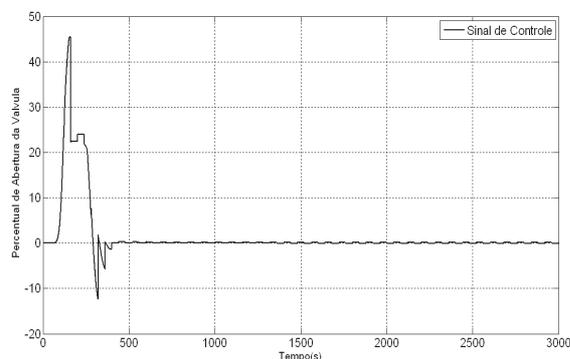


Figura 9. Sinal de Controle do Controlador Fuzzy PI por Bandas

7 Conclusão

Este artigo apresentou uma nova estratégia de controle de nível para separadores de produção óleo/gás, o uso de uma nova estratégia inicialmente passa pela aceitação de um novo paradigma de operação: o nível deve oscilar dentro de certos limites (banda) para que a vazão de saída do separador seja o mais constante possível. Com o objetivo de estabilizar e aumentar a confiabilidade operacional.

Esta estratégia de controle também tem como objetivo diminuir as consequências das “golfadas”, reduzindo as variações de vazão para os processos a jusante. Outra vantagem desta estratégia é minimizar os desgastes dos equipamentos, como válvulas e

bombas, aumentando a confiabilidade da planta. Esta maior estabilidade permite também melhorar a eficiência do tratamento do óleo e da água produzida.

O algoritmo proposto atendeu às especificações de desempenho, a planta passou a trabalhar mais estável, e diversos ganhos operacionais foram obtidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da FINEP, do CNPQ e da Petrobras, que estão financiando o projeto envolvendo três universidades federais (UFRN, UFBA, UFPA), o qual visa avaliar a aplicação de outras técnicas de controle, além do convencional PID industrial, e comparar seus desempenhos em plantas não lineares.

8 Referências Bibliográficas

- Passino, M. K. e Yurkovich, S. (1997). Columbus, Ohio “ Fuzzy Control ”, Menlo Park, California Reading, Massachusetts Harlow, England Berkeley, California Don Mills, Ontario Sydney, Bonn Amsterdam, Mexico City, pp. 21-137.
- Shaw, S. I. e Godoy, S. M. (1999). Controle e Modelagem Fuzzy, Editora Edgard Blücher.
- Campos, M. M. e Kaku, S. (2004). Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos. Rio de Janeiro: Editora Moderna Ltda.
- Fuente, M. J., Robles, C., Casado, O., Syaflie, S. e Tadeo, F. (2006). Fuzzy control of a neutralization process, *Science Direct, Engineering Applications of Artificial Intelligence*, pp.905-914.
- Ning, L., Shao-Yuan, L. e Yu-Geng, X. (2004) Multi-model predictive control based on the Takagi-Sugeno Fuzzy models: a case study, *Science Direct, Information Sciences*, pp.247-263, 165.
- Álvaro, M. B. F. et. al., Marco, A. A. M. e Giovanni, C. N. (2004). Controle de nível em separadores óleo/gás, *ISA - Sociedade de Instrumentação, Sistemas e Automação-Distrito 4 – América do Sul*.
- Giovani, C. N. (2004). Controle por Bandas: Conceitos básicos e aplicação no amortecimento de oscilações de carga em unidades de produção de petróleo. *Bol. Téc. Petrobras*, RJ, 47(2/4): 151-165.
- Campos, M. M., Loureiro, P. e Álvaro, M. B. F. (2006). Novas Estratégias de Controle para a plataforma de Petróleo P-55, *Rio oil & Expo and Conference 2006*.
- Qin, S.J., Borders, G. (1994). A multiregion fuzzy logic controller for nonlinear process control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2, 74-81.