

Aplicação de técnicas de sintonia *fuzzy* em uma coluna de destilação piloto

Adelson Siqueira Carvalho
NPO - CEFET-Campos
adelsonsc@yahoo.com.br

Ronald Coutinho da Silva
NPO - CEFET-Campos
coutinhods@yahoo.com.br

Dênis Barbosa do Nascimento
NPO - CEFET-Campos
denisbn01@yahoo.com.br

RESUMO

Este artigo apresenta a aplicação de dois métodos de sintonia de controladores PID em um processo de destilação considerando dois modelos distintos. Os sistemas de controle utilizam dois tipos de controlador, um PID clássico e um controlador PID tendo seus parâmetros ajustados por um sistema fuzzy. São apresentados os métodos de sintonia convencionais como Ziegler & Nichols para um controlador PID clássico e um sistema fuzzy baseado em regras do tipo SE..ENTÃO é projetado para sintonia de um controlador PID modificado. Os sistemas de controle utilizando os dois controladores são validados com dois modelos matemáticos de um processo de destilação piloto, um deles encontrado pelo método da curva de reação e outro através de modelos auto-regressivos. Os resultados apresentados encorajam a utilização de controladores sintonizados por sistemas fuzzy.

Palavras-chave: Sintonia de controladores PID, sistemas *fuzzy*, modelos auto-regressivos.

1. INTRODUÇÃO

A primeira forma de controle utilizada pelo homem e que ainda está presente em muitos processos é o controle manual. Com o aumento das necessidades e sofisticções nas atividades humanas foi necessário automatizar ou semi-automatizar determinados processos, aumentando desta forma a complexidade.

A necessidade de se controlar sistemas e processos físicos existe desde tempos remotos LOPES *et al* (2005).

Apesar dos processos industriais estarem se tornando cada vez mais complexos, não lineares e multivariáveis, o controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) continua sendo utilizado nas malhas de controle industriais por ser um controlador eficaz e de fácil implementação.

A obtenção do modelo de processos não-lineares, por métodos experimentais, faz-se a partir de uma perturbação na forma de degrau na variável manipulada e verificando a resposta da variável controlada, e extraíndo os valores dos parâmetros característicos do processo que são: ganho do processo, constante de tempo e tempo morto. Para estes tipos de modelo de processo, vários métodos de sintonia PID foram desenvolvidos para determinar os parâmetros deste controlador, dentre eles: Ziegler & Nichols e Cohen & Coon CAMPOS e TEIXEIRA (2006).

Em processos não-lineares, o comportamento da saída do sistema controlado não é o mesmo para perturbações em sentidos diferentes na variável manipulada, e nem possuem

o mesmo comportamento em pontos de operação diferentes. Conseqüentemente, a sintonia do controlador PID, pelos métodos convencionais será diferente.

A complexidade inerente aos processos industriais e conseqüente ineficácia dos métodos de sintonia convencionais têm despertado o interesse na utilização de sistemas inteligentes em controle e automação.

Para resolver este problema, utilizou-se um sistema *fuzzy* para determinar os parâmetros do controlador PID, em regime de operação em malha fechada, para um processo simulado. Através de regras heurísticas do tipo SE..ENTÃO os parâmetros do PID são determinados de forma que o processo tenha uma resposta satisfatória.

Os métodos de sintonia clássicos e o método *fuzzy* foram implementados e simulados no Matlab® por questão de análise gráfica de resultados e por possuir um bom ambiente de simulação de sistemas de controle.

O artigo está organizado da seguinte maneira: na seção 2 são apresentados a coluna de destilação didática e os modelos matemáticos desenvolvidos em estudos correlacionados; na seção 3 o estado da arte da pesquisa. Nas seções 4 e 5 são apresentados a fundamentação teórica acerca dos métodos de sintonia para controladores PID e a metodologia proposta neste trabalho. Na seção 6 os resultados obtidos e na seção 7 a conclusão do trabalho de pesquisa.

2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Um processo de destilação baseia-se em aquecer uma determinada mistura de componentes para separar as substâncias de acordo com seus diferentes pontos de ebulição.

A coluna de destilação localizada no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Automação do CEFET – Campos é uma coluna de destilação didática onde o componente de processamento é a mistura binária de álcool e água e o produto final é o álcool hidratado com uma graduação alcoólica entre 92 e 96° GL, em condições normais de operação.

A Figura 1 apresenta a estrutura da coluna de destilação do Cefet-Campos.



Figura 1: Coluna de destilação do CEFET – Campos

Diferente de sistemas de destilação instalados em ambientes industriais, a coluna de destilação do CEFET – Campos não apresenta subsistemas como refeedor e refluxo de topo. Na coluna de destilação em questão, o elemento responsável pelo aquecimento é uma resistência elétrica de 1000W localizada no interior da base da coluna e como não possui o refluxo de topo, todo o destilado é encaminhado, por pressão interna, para um

trocador de calor onde é condensado. Os instrumentos de medição e atuação são interligados por uma rede *Foundation Fieldbus*.

2.1 Modelos do Processo

NAEGELE (2000) apresenta na Tabela 1 o resumo dos testes dinâmicos realizados na coluna de destilação piloto e suas respectivas funções de transferência no domínio da frequência. Cabe atentar para o fato de que os testes foram realizados com a planta operando em manual e com possibilidade de variação da potência da resistência de aquecimento, recurso não disponível no sistema automático atual.

Tabela 1 – Tabela de funções de transferência NAEGELE (2000).

Entradas	Saídas	Temperatura do topo (t.topo)	Temperatura da base (t.base)
Vazão (-24%)		$\frac{11,88e^{-1364s}}{436s + 1}$	$\frac{0,97}{1154s + 1}$
Vazão (+24%)		$\frac{0,64e^{-54s}}{475s + 1}$	$\frac{1,23e^{-213s}}{885s + 1}$
Potência (-10%)		$\frac{0,00072}{580s + 1}$	$\frac{0,062}{1440s + 1}$
Potência (+10%)		$\frac{0,03}{1263s + 1}$	$\frac{0,018}{805s + 1}$

Os parâmetros de ganho do processo, tempo morto e constante de tempo foram adaptados para efeitos de simulação no ambiente Matlab®.

Para efeito de utilização dos modelos matemáticos em simulação e posterior validação do sistema de controle, apenas as funções que relacionam a temperatura de topo com a vazão de alimentação serão aproveitadas.

CARVALHO e GUILLERMO (2007) apresentam uma metodologia inspirada na identificação de processos através dos estimadores de mínimos quadrados para ajuste de modelos ARX (*Auto Regressive with eXogenous Inputs*) para a modelagem da relação entre temperatura de topo e vazão de alimentação. Os modelos resultantes serão implementados através de diagramas de blocos com operadores de atraso unitário, estes modelos serão utilizados para simulação em malha fechada em série com os controladores propostos neste trabalho.

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - 12) + e(t)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + \sum_{n=1}^6 a_n q^{-n}$$

$$B1(q^{-1}) = \sum_{n=1}^{12} b_n q^{-n-1} \text{ CARVALHO e GUILLERMO (2007).}$$

3. ESTADO DA ARTE

Processos industriais como o de destilação são sistemas dinâmicos, multivariáveis e de comportamento não-linear. Estes sistemas possuem algumas restrições quando se deseja projetar os controladores por métodos convencionais. Este problema de sintonia abre caminho para a utilização de métodos baseados em inteligência artificial como sistemas *fuzzy* e diversas aplicações destes métodos então disponíveis na forma de textos científicos.

SHAW e SIMÕES (1999) apresentam um projeto de controladores supervisórios multivariáveis *fuzzy* que atuam nos pontos de operação dos controladores PID. A Figura 2 mostra cada variável do processo pode ser mantida constante por um controlador PID, enquanto os pontos de operação dos PID's são provenientes de uma interface construída com base na operação heurística, através de gerenciamento das variáveis de controle e de variáveis de observação.

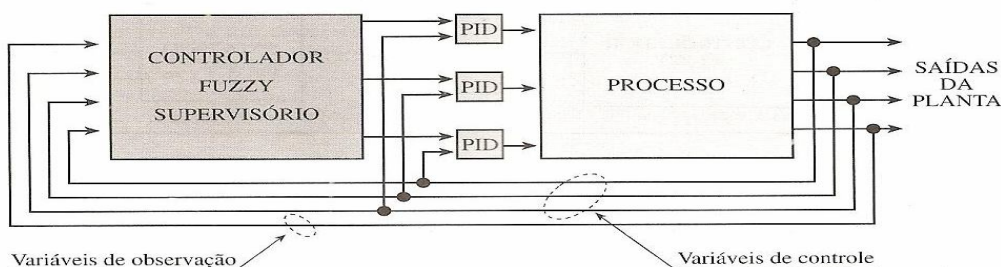


Figura 2: Controle *fuzzy* supervisório SHAW e SIMÕES (1999).

TORRES *et al.* (2002) aplicaram, em um sistema multimalha de tanques, algumas técnicas de sintonia PID diferentes e analisaram técnicas de desacoplamento.

LOPES *et al.* (2005) aplicaram métodos baseados em controle clássico e método baseado em lógica *fuzzy* para sintonizar o PID responsável por controlar o nível de um sistema de tanques acoplados.

FERNANDES JR (2006) apresentou um sistema automático de re-sintonia de controladores PID, para sistemas de primeira e segunda ordem.

BARROS *et al.* (2006) desenvolveram uma biblioteca de lógica *fuzzy* para implementar o controle em sistemas não-lineares para posteriormente serem utilizados em microcontroladores/microprocessadores para executar diversas formas de controle.

CERVANTES e RAMIREZ (2008) aplicaram técnicas de controle PID e controle Fuzzy em um processo não-linear de fabricação de papel e fizeram um comparativo entre os resultados obtidos.

4. MÉTODOS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID

4.1 Método da Sensibilidade Limite

O Método da Sensibilidade Limite foi proposto por Ziegler e Nichols, e é baseado no ajuste de uma malha fechada aumentando-se o ganho até que a variável controlada entre em oscilações com amplitude constante. A partir desta resposta, determina-se o valor

de G_u que é o ganho mínimo que torna o processo criticamente estável e P_u que é o período correspondente às oscilações. Como pode ser visto na Figura 3.

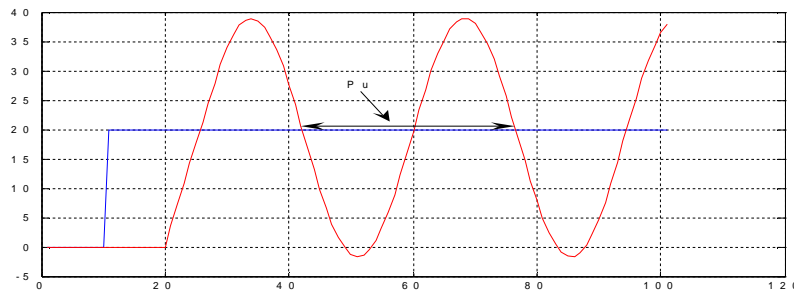


Figura 3: Oscilações com amplitude constante.

Os valores de G_u e P_u deverão ser aplicados nas formulas, na tabela 2, propostas por Ziegler e Nichols para determinar o valor dos parâmetros do controlador PID.

Tabela 2: Sintonia segundo Ziegler e Nichols CAMPOS e TEIXEIRA (2006).

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_u$	-	-
PI	$0,45 K_u$	$P_u/1,2$	-
PID	$0,6 K_u$	$P_u/2$	$P_u/8$

4.2 Método *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* é uma técnica de inteligência artificial, disciplina que procura maneiras de máquinas simularem o raciocínio humano na solução de problemas diversos GOSMANN *et al* (2002).

Esta técnica incorpora a capacidade de um especialista humano de modelar o funcionamento de um sistema de controle, trabalhando de uma forma similar a um raciocínio dedutivo, controlando processos industriais com características não-lineares, relacionando variáveis da planta descritas no controlador.

A lógica *fuzzy* permite o tratamento de expressões que envolvam grandezas de forma exata. Esta forma de mensurar as grandezas é muito parecida com o comportamento dos seres humanos, por isso sendo um bom modelo para emular o nosso comportamento PIRES e NASCIMENTO JR (2008).

A utilização do sistema *fuzzy* possui as seguintes vantagens quando aplicado em sistemas de controle:

1. Aplicado em processos onde o modelo matemático não existe, não é conhecido ou é muito difícil de ser obtido ou implementado em máquinas computacionais;
2. Facilidade para incorporar o conhecimento de especialistas humanos, para especificação das regras de controle;
3. Tratamento da imprecisão dos sinais dos sensores empregados;

4. Podem ser expandidos e aperfeiçoados, adicionando regras que venham melhorar o desempenho;
5. Pode ser usado para melhorar sistemas de controle já existentes.

Em processos onde é utilizada a lógica *fuzzy*, os valores de entrada e saída do controlador, que são os sinais dos sensores e atuadores respectivamente, não pertencem a esta lógica sendo necessário que conversões sejam realizadas. Assim, estes sistemas possuem elementos denominados “fuzzificador” e “defuzzificador” posicionados na entrada e saída do sistema de controle, respectivamente.

A estrutura de um sistema fuzzy é mostrada na Figura 4.



Figura 4: Estrutura de um sistema Fuzzy LOPES *et al* (2005).

A interface de fuzzificação é responsável pelo mapeamento dos valores numéricos de entrada fornecidos pelos sensores, normalizando estes valores em um universo de discurso para formar os conjuntos *fuzzy*. A base de conhecimentos consiste de uma base de dados onde estão contidas as informações referentes ao número e tipo das funções de pertinência, extensão do universo do discurso das variáveis, variáveis lingüísticas e seus valores lingüísticos, e uma base de regras onde estão as regras de produção que associam as variáveis lingüísticas de entrada com as de saída. O processo de inferências consiste em utilizar as regras de controle na presença das variáveis de entrada medida do processo determinando como as regras são ativadas e combinadas. Na interface de fuzzificação, o valor lingüístico associado a variável de saída é convertido em um valor numérico de saída, para que a ação de controle possa ser aplicada ao processo.

Os sistemas *fuzzy* ao serem utilizados para a sintonia de controladores PID vão se relacionar com estes controladores da seguinte forma: a variável de entrada do sistema *fuzzy* é o *set-point* e as variáveis de saída são os parâmetros de sintonia do controlador PID. Regras heurísticas devem ser formuladas para relacionar os valores fuzzyficados destas variáveis, bem como suas funções de pertinência.

5. METODOLOGIA

O sistema de controle foi construído e simulado no “simulink” do Matlab®. Foi aplicado o método fuzzy de sintonia PID no sistema de controle onde o modelo do processo de destilação foi obtido por NAEGELE (2000) e também por CARVALHO e GUILLERMO (2007) por diferentes métodos.

Na Figura 5 podemos observar o sistema de controle construído no “simulink” utilizando um controlador PID sintonizado pelo sistema *fuzzy* e o mesmo sistema de controle utilizando um controlador PID sem sintonia, para comparação de respostas. Também podemos notar que o bloco *fuzzy* possui três saídas referentes aos valores dos parâmetros do controlador PID.

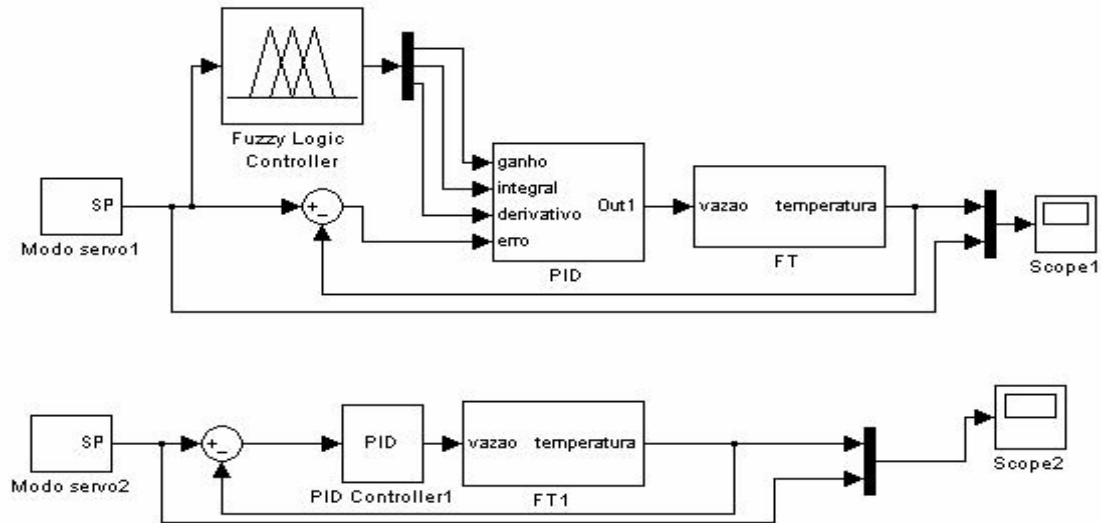


Figura 5: Diagrama de bloco do sistema de controle utilizando função de transferência da coluna de destilação.

Dois sistemas foram comparados e os resultados serão apresentados na seção 6.

Este sistema foi simulado utilizando o modelo da planta obtido por CARVALHO e GUILLERMO (2007). Na Figura 6 é apresentado este modelo auto-regressivo implementado na forma de diagrama de blocos:

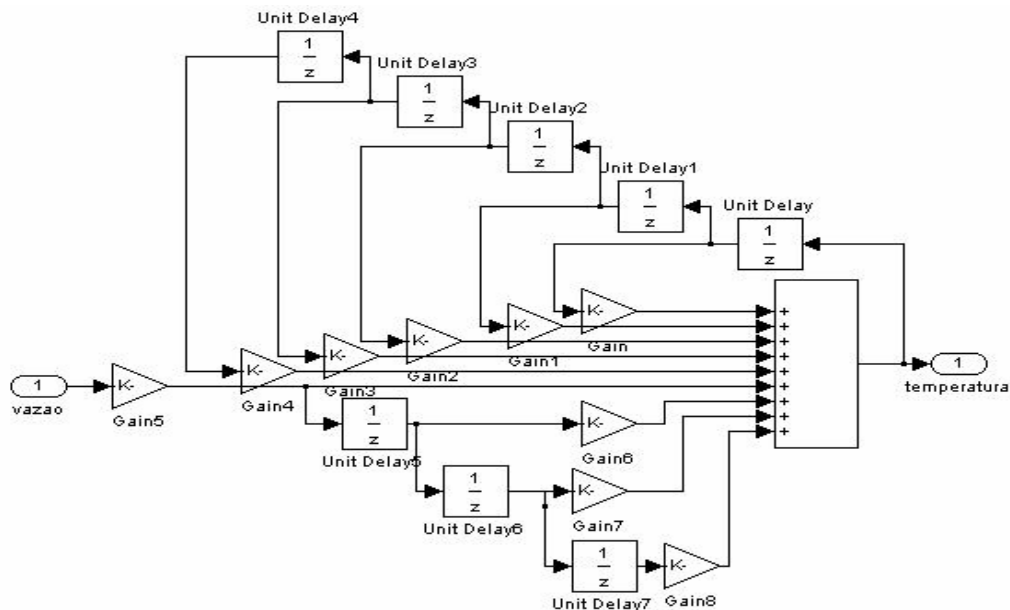


Figura 6: Função de transferência em forma de diagrama de blocos

O sistema de controle também foi simulado utilizando função de transferência do processo de destilação obtida por NAEGELE (2000). Como pode ser visto na Figura 7.

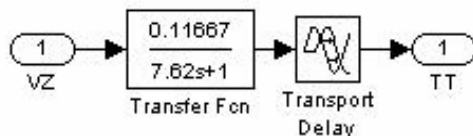


Figura 7: Função de transferência em forma de diagrama de blocos obtido por NAEGELE (2000).

Esta função de transferência apresenta como parâmetros característicos do processo: ganho do processo (0,11667), constante de tempo (7,62) e tempo morto (0,9).

A Figura 8 mostra as modificações feitas na estrutura do controlador PID, para que as saídas do sistema *fuzzy* fossem adaptadas para serem as entradas do controlador.

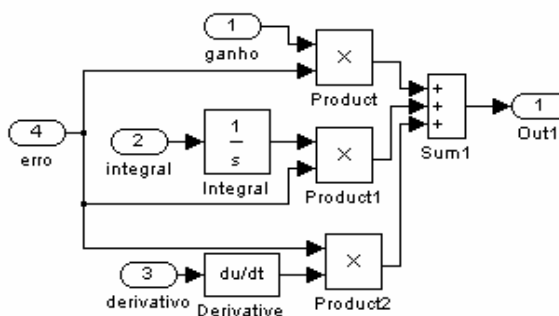


Figura 8: Estrutura do PID modificado.

O sistema *fuzzy* foi projetado de forma que as variáveis de entrada e saída são o valor do setpoint e os parâmetros do PID, respectivamente. A Figura 9 mostra a estrutura do sistema.

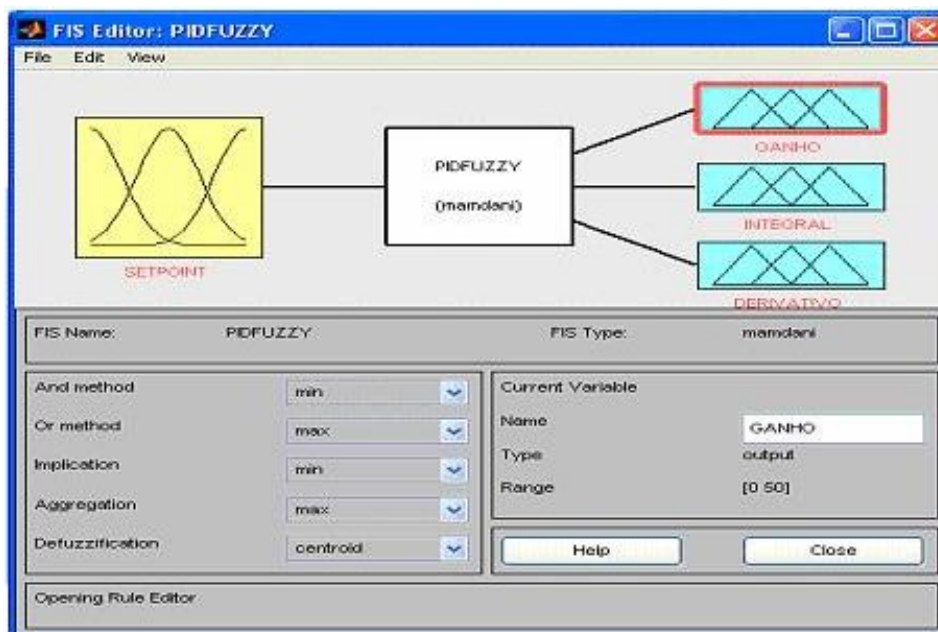


Figura 9: Estrutura do controlador Fuzzy.

A Figura 10 mostra as regras que relacionam as variáveis lingüísticas de entrada com as de saída do controlador fuzzy.

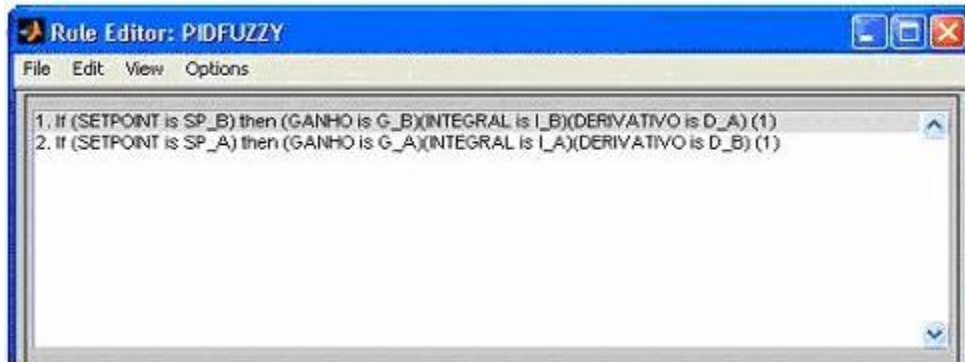


Figura 10: Regras que relacionam as variáveis lingüísticas de entrada e saída do controlador.

Como o método de Ziegler&Nichols foi desenvolvido para sintonia PID onde o modelo do processo é obtido pelo método da curva de reação, ele foi aplicado no sistema de controle utilizando o modelo de NAEGELE (2000).

As funções de pertinência das variáveis de entrada e saída do sistema *fuzzy* são do tipo trapezoidais com nível de pertinência máximo nos extremos do universo de discurso da variável e valores de pertinência seguindo uma transição no centro do intervalo. Como podem ser visto na Figura 11.

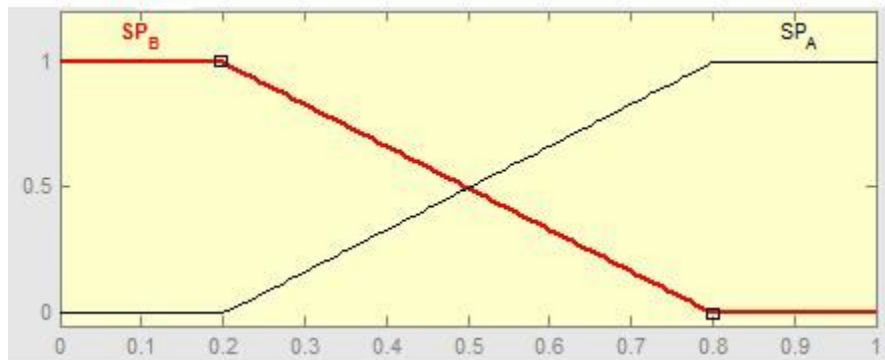


Figura 11: Função de pertinência para a variável de entrada do sistema fuzzy.

6. RESULTADOS

Os resultados dos sistemas de controle apresentados serão verificados de forma gráfica através da visualização do comportamento da variável controlada (temperatura no topo da coluna) com o sistema operando em malha fechada. É desejável que esta consiga “rastrear” o *set-point* da melhor forma possível. Para teste do sistema de controle foram introduzidas perturbações consecutivas no *set-point*, esta forma de controle é dita modo servo ou rastreador de *set-point*.

Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as respostas dos sistemas de controle aplicados ao modelo auto-regressivo.

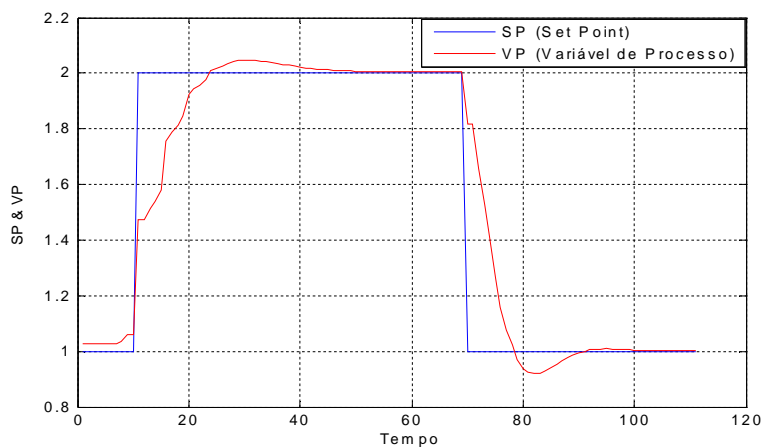


Figura 12: Resposta obtida utilizando método fuzzy de sintonia PID para o modelo auto-regressivo.

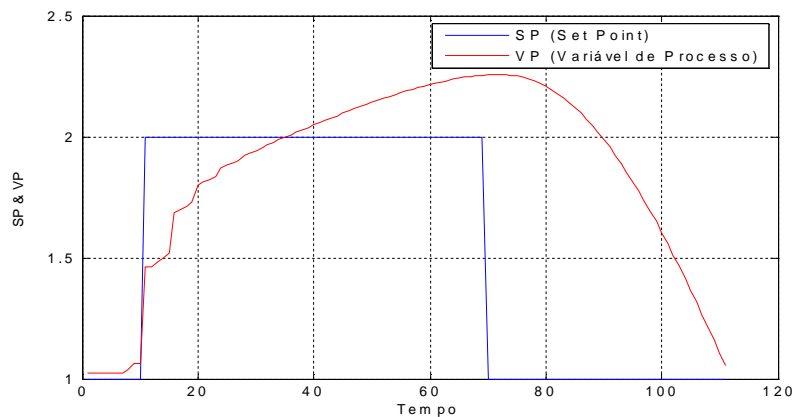


Figura 13: Resposta obtida utilizando controlador PID para o modelo auto-regressivo.

Nas Figuras 14, 15 e 16 são apresentadas as respostas dos sistemas de controle aplicados à função de transferência obtida pelo método da curva de reação.

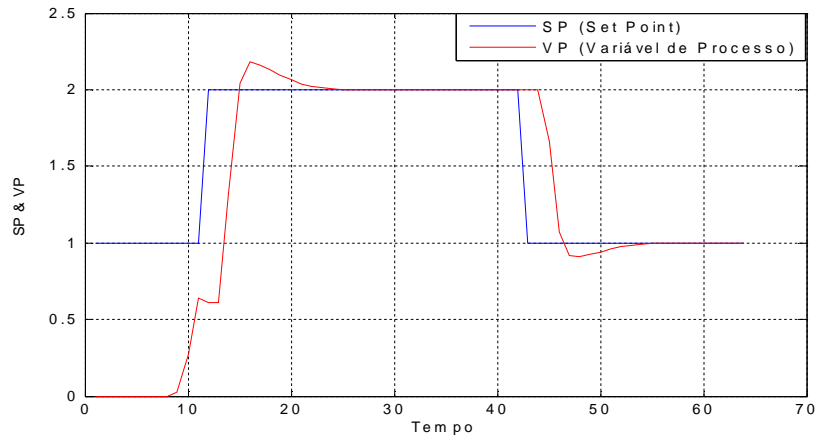


Figura 14: Resposta obtida utilizando método fuzzy de sintonia PID para a função de transferência obtida pelo método da curva de reação.

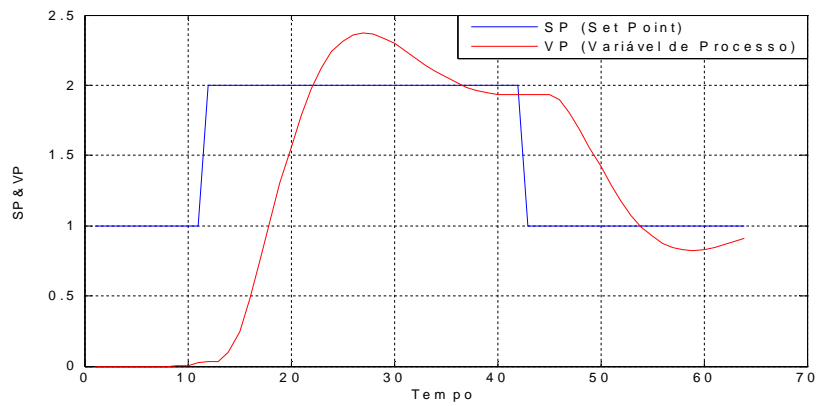


Figura 15: Resposta obtida utilizando controlador PID para a função de transferência obtida pelo método da curva de reação.

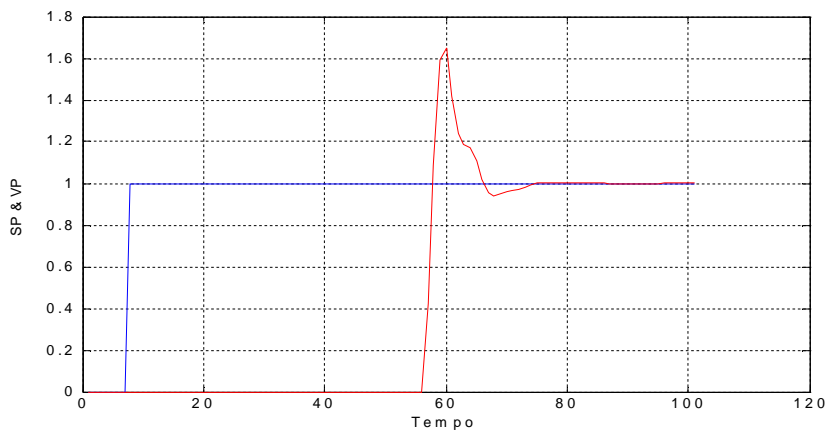


Figura 16: Resposta obtida utilizando PID sintonizado por método de Ziegler e Nichols para a função de transferência obtida pelo método da curva de reação.

7. CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados neste trabalho é possível verificar uma resposta mais satisfatória, sob os aspectos de sobre-sinal e tempo de retorno da variável ao *set-point*, para o sistema utilizando o sintonizador baseado em lógica *fuzzy*.

Os modelos utilizados para teste dos sistemas de controle são modelos bastante fiéis ao comportamento do processo permitindo, portanto a extrapolação dos resultados para sistemas reais e plantas de processo industriais.

Contudo, a aplicação do sistema de controle baseado em sintonia *fuzzy* deve ainda ser validado na tarefa de controle do próprio sistema real – coluna de destilação piloto – ficando, portanto como sugestão para trabalhos futuros.

A aplicação dos sistemas de controle baseados em inteligência artificial dependem da verificação real das vantagens agregadas com sua utilização, logo este trabalho visa dar uma singela contribuição neste sentido.

8. REFERÊNCIAS

BARROS, A. C. S.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; ALEXANDRIA, A. R. Biblioteca para implementação de controladores utilizando lógica *fuzzy*, 2006, Rev. Tecnol. Fortaleza.

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. Controles típicos de equipamentos e processos industriais. São Paulo: Blücher, 2006.

CARVALHO, A. S., GUILLERMO, L. H. F. Modelagem de colunas de destilação através de modelos auto-regressivos, 2007. IV Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT. Resende-RJ: AEDB.

CERVANTES, S. G. S.; RAMIREZ, E. F. F. Estudo comparativo entre as técnicas de controle PID e *fuzzy* aplicado ao processo de fabricação de papel, 2008. In: Conferência Internacional de Aplicações Industriais (Induscon), Poços de Caldas-MG.

FERNANDES JR, F. G. Metodologia para re-sintonia de controladores PID industriais. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade federal do Rio Grande do Norte, Natal.

GOSMANN, H. L.; FILHO, F. M. L.; BAUCHSPIESS, A. Controle *fuzzy* para sistema de nível de líquidos, 2002, XIV – Congresso Brasileiro de Automática, Natal.

LOPES, J. S. B.; FERNANDES JR, F. G.; MAITELLI, A. L.; ARAÚJO, F. M. U.; OLIVEIRA, L. A. H. G. Implementação de controladores PID utilizando lógica *fuzzy* e

instrumentação industrial, 2005, VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Luís.

NAEGELE, E. F. Proposta de controle para uma coluna de destilação didática: mistura binária etanol-água. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

PIRES, J. R. C.; NASCIMENTO JR, C. L. Controle fuzzy para braço robótico utilizando abordagem adaptativa neuro-fuzzy (ANFIS) do matlab. Disponível em: <<http://www.bibl.ita.br/viiiencita/Controle%20fuzzy%20para%20braco%20robotico%20utilizando%20anfis%20do%20matlab.pdf>>. Acessado em 25/07/2008.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. Controle e modelagem fuzzy. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1999.

TORRES, B. S.; JOTA, F. G.; PENA, R. T. Sintonia de controladores PID em sistemas multimalha, 2002, II Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação – ISA Show South América.