

## AVALIAÇÃO DO PROJETO DE UM CONTROLADOR FUZZY APLICADO A UMA PLANTA DE NÍVEL HART COM DINÂMICA ASSIMÉTRICA

LETÍCIA H. DE MOURA<sup>1</sup>, MARLON J. DO CARMO<sup>1</sup>.

1 . Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus III  
36700-000 Leopoldina, MG, BRASIL

E-mails: letsmoura@gmail.com, marloncarmo@ieee.org

**Abstract**— This study is the result of a fuzzy control application in order to improve the fluid level control performance in a Didactic Plant located at CEFET-MG lab. Using the software MATLAB/SIMULINK, the method validation was done and the real curve process was approximated by Bröida's three parameter model. Finally, this paper also shows a computational effort analysis which is compared with the fuzzy logic efficiency.

**Keywords**— Advanced Control, Fuzzy, Didactic Plant, Fluid Level Control.

**Resumo**— Este trabalho é o resultado de uma aplicação de controle fuzzy com o objetivo de melhorar o desempenho de um sistema de nível em uma Planta Didática da SMAR presente no laboratório do CEFET-MG. Para validação do método foi feita a simulação utilizando o software MATLAB/SIMULINK onde a curva real foi aproximada através de um modelo a três parâmetros de Bröida. Ao final do trabalho é mostrada também uma análise do esforço computacional comparado com a eficiência da lógica nebulosa.

**Palavras-chave**— Controle Avançado, Fuzzy, Planta Didática, Controle de Nível.

### 1 Introdução

Devido aos seus benefícios econômicos, tais como projeto integrado, flexibilidade, melhor controle de qualidade e requerimentos da economia de energia, o número de aplicações do controle avançado cresce a cada dia. Dentre esses controles, destaca-se a partir da década de 80 sistemas que utilizam os conjuntos nebulosos, ou *fuzzy*. Isso se deve às vantagens da sua utilização, pois podem trabalhar com entradas contendo informações imprecisas; boa resposta mesmo a processos complexos, com comportamento não linear, ordem elevada e atraso de transporte; e possibilitam a inclusão da experiência de especialistas através das regras linguísticas (Coelho et al., 2003).

Ferreira Júnior (2009) apresenta a importância crescente desse tipo de controle e mostra como várias empresas utilizam seus benefícios para tecnologias presentes no mercado atual. Bons exemplos são a prevenção de grandes variações da temperatura nos ar condicionados da Hitachi e Sharp, nos freios anti-bloqueio da Nissan, na transmissão dos carros da Honda e Nissan e até no ajuste da força e estratégia de cozinhar dos fornos de microondas da Hitachi, Sanyo, Sharp e Toshiba, dentre outras aplicações.

Este trabalho descreve a utilização da Planta Didática SMAR como meio de aplicação de novas técnicas de controle em um processo não linear e similar aos encontrados na indústria. Diferente das técnicas mais abordadas nas disciplinas de controle (Oliveira et al., 2011), onde é assumido o sistema como linear ou aproximadamente linear em torno de um ponto de operação, o controle inteligente busca novas alternativas para ir além dessa barreira e criar uma operação mais robusta e confiável.

O ensino de controle automático e instrumentação requerem práticas de laboratório nas quais é possível aproximar os conceitos estudados da sua aplicação na indústria. A Planta Didática SMAR permite demonstrar experimentalmente operações de diversas malhas de controle utilizando os mesmos equipamentos e ferramentas desenvolvidos para a aplicação em controle industrial. O uso da tecnologia OPC (<http://www.opcfoundation.org>) possibilitou integrar as operações da planta ao software MATLAB, onde a ação de controle é gerada.

A Planta Didática presente no laboratório do CEFET-MG Campus III é uma planta de processo contínuo composta por três tanques, cinco transdutores HART, duas bombas de partida direta, duas válvulas controladoras, uma resistência de imersão, um painel de operação local e um CLP modelo LC700 do fabricante SMAR. Nela, não há o objetivo do processo de produção de nenhum produto, possui caráter apenas experimental. A planta é mostrada na Figura 1.



Figura 1. Planta Didática SMAR

Essa planta é monitorada e operada através de um computador e um *software* de supervisão, que efetua a aquisição de dados dos equipamentos da planta, podendo também atuar nos seus valores internos e nos modos operacionais das malhas de controle. Ela possui três variáveis de processo que podem ser controladas: nível, vazão e temperatura; Possui três tipos de atuadores: bombas d'água, válvulas controladoras de vazão resistências de imersão. Este trabalho utiliza apenas o controle de nível.

O protocolo de comunicação utilizado é o HART que foi desenvolvido pela Fischer Rosemount na década de 80 para facilitar a comunicação com instrumentos de campo inteligentes. Esse protocolo possibilita a comunicação digital bidirecional em instrumentos inteligentes de campo sem interferir no sinal analógico de 4-20mA, estes podem ser transmitidos simultaneamente na mesma fiação e ao mesmo tempo.

Neste trabalho é utilizada a interface de comunicação OPC para realizar a comunicação entre o CLP SMAR LC700 e o *software* que realiza a identificação e o controle da planta. Neste caso, o cliente OPC é o *software* MATLAB/SIMULINK, que lê e escreve valores diretamente da saída e da entrada periférica do servidor OPC, que é a TAG List fornecida pela SMAR.

## 2 Obtenção da curva de reação e levantamento do modelo a três parâmetros

Para adquirir a curva de reação é necessário, antes de tudo, ajustar a válvula de saída do tanque de forma que alcance um equilíbrio e este não encha muito rápido ou o contrário, impossibilitando que se adquira a curva de nível. Isso é necessário, porque para que o sistema forme a curva e estabilize é preciso que a quantidade de água que entra iguale em certo nível com a quantidade de água que sai do tanque. À medida que a água no tanque sobe, aumenta a pressão de saída na parte de baixo no tanque. Essa pressão irá aumentar até equilibrar com a entrada do tanque. Este é o ponto considerado como ponto de equilíbrio do nível para dada abertura da válvula de entrada.

O MATLAB possui um toolbox chamado OPC, que permite que ele se conecte ao servidor OPC da planta HART. O SIMULINK tem a facilidade de já possuir os blocos funcionais da interface OPC, basta somente configurá-lo para utilizá-lo na comunicação.

Neste trabalho, são utilizados 3 blocos da OPC toolbox:

- *OPC Configuration*: é utilizado para configurar o servidor OPC que será utilizado. No caso da planta HART é o "Smar.LC700Server".
- *OPC Read*: é utilizado para ler a variável de uma entrada analógica ou digital, como, por exemplo, um sensor de nível, de vazão, etc.
- *OPC Write*: é utilizado para escrever uma variável em uma saída analógica ou digital, como, por exemplo, uma válvula de controle, uma bomba, etc.

- *OPC Write*: é utilizado para escrever uma variável em uma saída analógica ou digital, como, por exemplo, uma válvula de controle, uma bomba, etc.

A malha mostrada na Figura 2 foi desenvolvida no SIMULINK e empregada para adquirir a curva de reação de nível da planta HART. Para isso foi utilizado o bloco *OPC Configuration*, onde foi selecionado o servidor da planta HART *Smar.LC700 Server*, o bloco *OPC Write*, onde foi selecionada a tag da válvula de controle da entrada do tanque que é SA010.00 e foi selecionado um bloco de constante ligada ao bloco *Write*, onde se escolhe o valor de abertura da válvula, que varia de 0 (0%) a 10.000 (100%), já que o valor é analógico. Além disso, foi utilizado também o bloco *OPC Read*, onde foi selecionada a tag do sensor de nível, que é EA003.02 e ligado a ele foi colocado um *Scope* para visualizar a curva e salvá-la. Dessa forma, ao iniciar a simulação da malha, escolhe-se o valor de abertura da válvula que se deseja (no caso, da simulação realizada o valor escolhido foi 10.000, ou seja, 100% da válvula foi aberta) e através o bloco *Write* esse valor é enviado para a válvula da planta. Inicia-se então o enchimento do tanque de aquecimento, e através do sensor de nível selecionado no bloco *Read* é possível acompanhar a curva de reação pelo *Scope* até o nível alcançar a estabilidade.

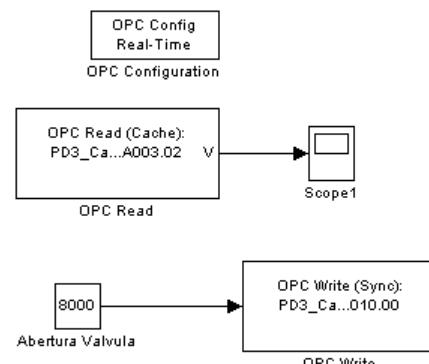


Figura 2. Disposição dos blocos no SIMULINK para obter a curva de reação a malha aberta.

A curva de reação obtida está representada pela Figura 3.

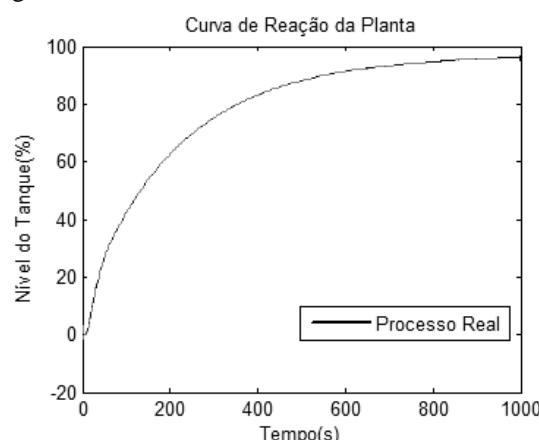


Figura 3. Curva de reação da planta a malha aberta

Através da Figura 3 observa-se que o processo apresenta características dinâmicas assimétricas, ou seja, um crescimento rápido no início e mais lento na medida em que se aproxima do estado estacionário. Este processo com característica dinâmica assimétrica é previsto pela academia e proposto por Kheir (1996). Além disso, outra não linearidade presente é o atraso de transporte.

O método de identificação utilizado aplicado à curva de reação da planta de nível foi o método de Bröida. Com a utilização do método, foi obtido um modelo a três parâmetros ( $\theta$ ,  $\tau$  e  $K$ ). O atraso de transporte ( $\theta$ ) será obtido através de análise visual da curva de reação da planta de nível, e o ganho ( $K$ ) e a constante de tempo ( $\tau$ ) serão obtidos através das simulações realizadas. O método de identificação foi modificado para que fosse possível realizar a identificação da Planta Didática. O atraso de transporte utilizado foi igual a 2,5, pois o valor de  $\theta$  simulado é negativo, devido a característica do processo de ter uma subida inicial rápida e um tempo mais lento para estabilizar.

No método de Bröida (Bouamama, 1998), os parâmetros  $\theta$ ,  $\tau$  e  $K$  de sistema de primeira ordem com atraso de transporte são determinados utilizando-se dois pontos da curva de reação conforme gráfico da Figura 4:

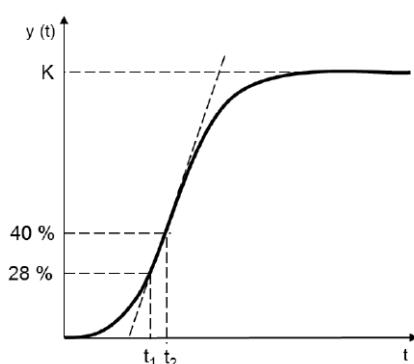


Figura 4. Curva de Reação com os parâmetros para o Método de Bröida

Sendo que:

$$\tau = 5,5(t_2 - t_1) \quad (1)$$

e

$$\theta = 2,8t_1 - 1,8t_2 \quad (2)$$

Os três parâmetros obtidos para o sistema de primeira ordem com atraso de transporte foram:  $\theta = 2,5$ ;  $K = 96$  e  $\tau = 198$ .

Resultando na função de transferência:

$$G(s) = \frac{96e^{-2,5s}}{198s + 1} \quad (3)$$

Na Figura 5, observa-se sua resposta a uma entrada degrau comparada a do processo real (curva de reação da planta de nível).

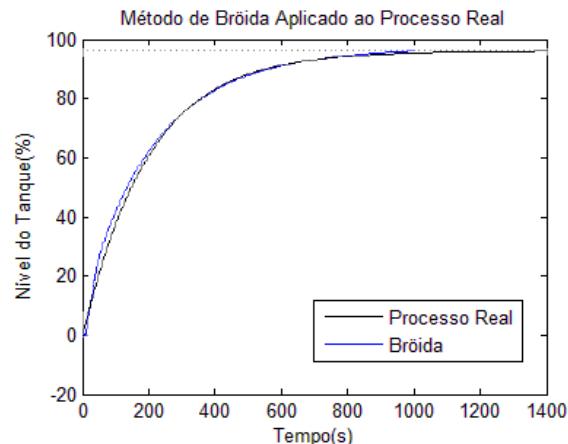


Figura 5. Resposta do método de Bröida aplicado a um processo real

O modelo obtido é adequado para o projeto de controladores PID convencionais, baseados em métodos tais como Ziegler e Nichols. Porém, testes realizados em trabalhos anteriores, utilizando tais regras, na mesma planta, produziram respostas muito lentas e com oscilações em regime permanente e sobrelevação acima de 20%.

### 3 Controle fuzzy

Na metodologia convencional de controle o processo a ser controlado é modelado através da identificação de sistemas onde é mesmo tido como linear ou aproximadamente linear. É então obtido um conjunto de equações diferenciais cuja solução fornece os parâmetros necessários ao controlador como sobre-sinal, tempo de acomodação e amortecimento. Para processos com características altamente não lineares, como o proposto por este trabalho, o projeto de controladores pode não fornecer respostas satisfatória.

O controle inteligente fuzzy foca-se no comportamento do ser humano ao lidar com um conjunto de circunstâncias e é então o operador que é identificado enquanto ele controla o sistema (Simões et al., 2007). Desta forma não é preciso ter o modelo matemático do sistema a ser controlado, isso facilita porque sistemas não-lineares não possuem uma regra ideal para soluções analíticas e precisam ser linearizados em torno de um ponto de operação. Outra grande restrição aplicada a modelos matemáticos é que as variáveis são assumidas como invariante no tempo e na realidade a maioria dos processos se alteram ao se modificar a temperatura e pressão, por exemplo, além de poder ocorrer deterioração dos componentes envolvidos. Em contrapartida se fossem inclusas todas as variáveis relevantes ao processo, o modelo matemático se tornaria extremamente complexo para ser elaborado e compreendido.

O princípio da incompatibilidade descrito por Zadeh diz que “Conforme a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade de fazer afirmações precisas e significativas sobre seu comporta-

mento diminui, até um limiar em que a precisão e relevância tornam-se praticamente características mutuamente exclusivas". Ou seja, para processos de alta complexidade a precisão matemática perde seu significado.

Existe um grande descompasso entre a capacidade de uma máquina solucionar um problema e a forma criativa dos seres humanos de pensar. Máquinas lidam com informações precisas, binária enquanto pessoas raciocinam de forma incerta e imprecisa. A possibilidade de fazer com que sistemas possam também pensar de forma difusa e imprecisa o tornaria mais inteligente. Baseado nessa teoria foi criada na década de 1960 por Lofti A. Zadeh a lógica nebulosa ou *fuzzy*. Seu primeiro trabalho (Zadeh, 1965) foi motivado pelo fato de que os recursos tecnológicos eram incapazes de solucionar situações ambíguas nas quais a lógica booleana não podia ser aplicada. Esses processos muitas vezes se definem melhor por palavras ou expressões humanas do que pela matemática.

O conhecimento humano é utilizado através de regras do tipo SE <condição>, ENTÃO <controle> e a estrutura do sistema nebuloso é mostrado na Figura 6.

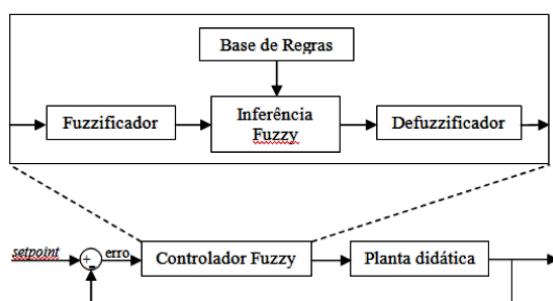


Figura 6. Sistema de controle *fuzzy*.

O controlador *fuzzy* foi projetado com o auxílio do software MATLAB que já possui um *toolbox* sobre o assunto, é o *FIS Editor*. Através dessa ferramenta é possível editar as funções de pertinência, adicionar e remover entradas e saídas e determinar a base de regras que é constituída de regras de inferência estabelecidas a partir da operação do processo de nível.

Simões (2007) sugere duas entradas para serem feitas o controle: o erro e a variação do erro. Foi realizado então o projeto de um controlador *fuzzy* utilizando essas duas entradas e a saída enviado um valor para modificar a abertura da válvula.

Na prática o controlador utilizou funções de pertinência triangulares e o método de defuzzificação por centroide. Após várias simulações e alterações nas funções de pertinência e nas regras não se obteve um resultado satisfatório. O principal motivo observado para a falha do projeto é a dinâmica assimétrica da malha de nível, essa não simetria ocorre porque conforme a quantidade de água no tanque aumenta, o peso da coluna de líquido faz com que a vazão de saída acresça. Tendo observado isso, foi proposto um segundo projeto modificando uma das entradas. Em

vez de se utilizar a variação do erro, a segunda entrada do controlador foi definida como a própria altura desejada para a coluna de água no tanque. Isso permitiu que as ações de controle variassem de acordo com o *setpoint*.

Segundo essa ultima abordagem, foi realizado o controle *fuzzy* utilizando duas variáveis de entrada: erro e *setpoint*. A variável de saída utilizada é o valor de abertura da válvula. Funções de pertinência são funções numéricas gráficas ou tabuladas que atribuem valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. As funções de pertinência utilizadas nesse controle são mostradas na Figura 7 abaixo. Nela, as variáveis linguísticas utilizadas dentro da faixa de valores mostrada são, para o erro, negativo muito grande (NMG), negativo grande (NG), negativo médio (NM), negativo pequeno (NP), zero (ZE), positivo pequeno (PP), positivo médio (PM), positivo grande (PG) e positivo muito grande (PMG); para a entrada (ou *setpoint*), muito pequena (MP), pequena (PE), média (ME), grande (GR), muito grande (MG); e, para a válvula, negativa grande (NG), negativa média (NM), negativa pequena (NP), zero (ZE), positiva pequena (PP), positiva média (PM) e positiva grande (PG).

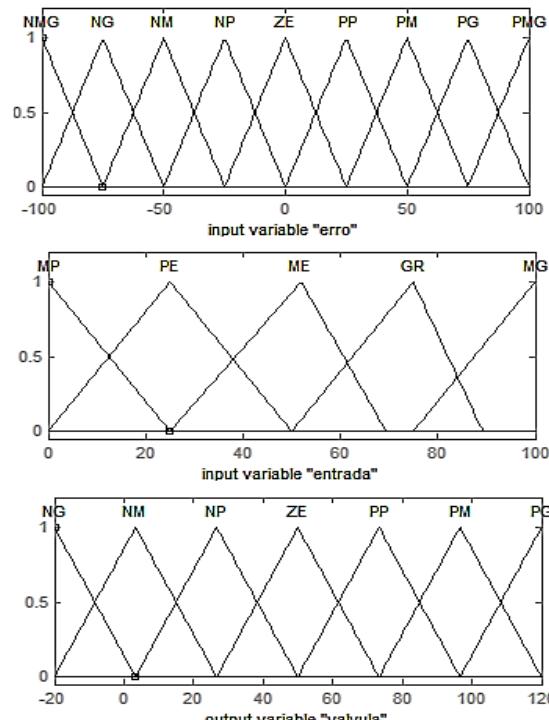
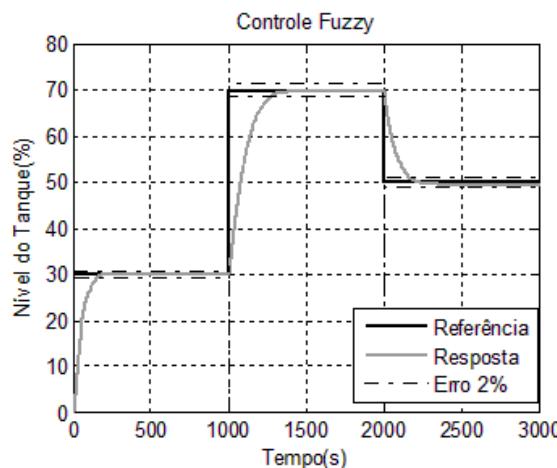


Figura 7. Funções de pertinência

O objetivo inicial para a resposta de controle era que ele respondesse com erro menor do que 2% para quaisquer valores de *setpoint* testados. A resposta obtida com o controlador *fuzzy* pode ser vista na Figura 8, nela observa-se que o controle respondeu conforme o esperado com erros em regime estacionário de -0,44%, -0,20% e 1,13% para *setpoints* de 30%, 70% e %50, respectivamente.

Figura 8. Resposta do controlador *fuzzy*

#### 4 Esforço computacional

Outra característica do controle fuzzy que foi analisada por este trabalho foi o esforço computacional durante as simulações considerando o número de regras utilizadas. Foram feitas então duas simulações, a primeira utilizando 45 regras e a segunda, 17 regras. As bases de regras podem ser vistas pelas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Base de regras maior

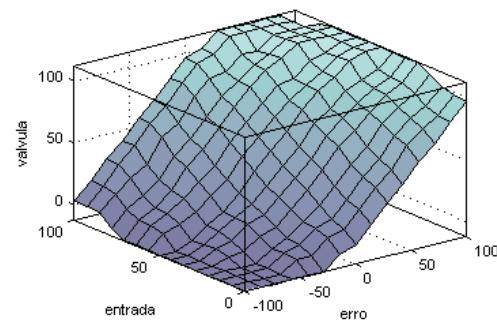
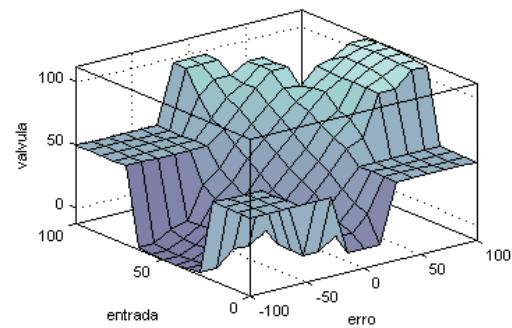
Erro	Referência				
	MP	PE	ME	GR	MG
NMG	NG	NG	NG	NG	NM
NG	NG	NG	NG	NM	NP
NM	NG	NG	NM	NP	ZE
NP	NG	NM	NP	ZE	PP
ZE	NM	NP	ZE	PP	PM
PP	NP	ZE	PP	PM	PG
PM	ZE	PP	PM	PG	PG
PG	PP	PM	PG	PG	PG
PMG	PM	PG	PG	PG	PG

Tabela 2. Base de regras menor

Erro	Referência				
	MP	PE	ME	GR	MG
NMG			NG		
NG			NG		
NM			NM		
NP		NM	NP	ZE	
ZE	NM	NP	ZE	PP	PM
PP		ZE	PP	PM	
PM			PM		
PG			PG		
PMG			PG		

Visualmente, a superfície em três dimensões que relaciona as duas variáveis de entrada e a saída mostra a grande diferença que a diminuição de regras

causa ao resultado de controle. Essas superfícies são mostradas abaixo pelas Figuras 9 e 10.

Figura 9. Superfície com duas variáveis de entrada e a variável de saída do controlador *fuzzy* com maior número de regrasFigura 10. Superfície com duas variáveis de entrada e a variável de saída do controlador *fuzzy* com menor número de regras

Repetindo a mesma simulação já mostrada pela Figura 8, a Figura 11 mostra que o tempo de subida foi perturbado mais visivelmente quando foi feito o *setpoint* a 70%. O esforço computacional foi quantificado fazendo três vezes, no mesmo computador, as duas simulações e medindo o tempo gasto de cada uma. Utilizou-se as funções do MATLAB tic e toc para ter uma medida de tempo precisa. A média das três simulações forneceu então o tempo médio de 415,75s e 199,25s para mais e menos regras, respectivamente. Ou seja, o esforço causado pela simulação com mais regras é mais que o dobro. Um meio tempo pode ainda ser feito otimizando o número de regras para balancear esforço computacional e desempenho. Não houve alteração no erro em regime estacionário.

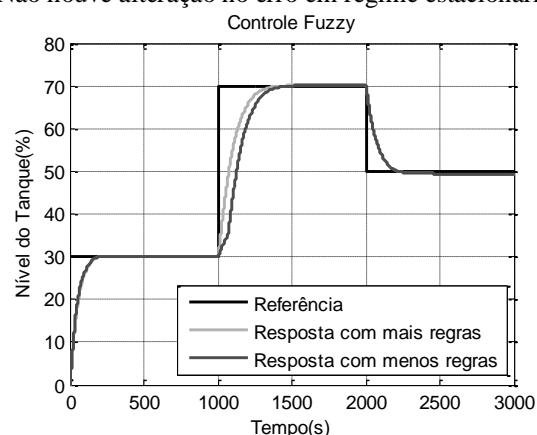


Figura 11. Comparação da resposta do controlador utilizando 45 e 17 regras

## 5 Conclusão

Os resultados obtidos através dessa pesquisa mostraram um resultado satisfatório com uma resposta mais rápida e estável. O tempo de subida encontrado foi consideravelmente menor do que os obtidos por projetos anteriores realizados na planta que não utilizavam controle inteligente. Apesar de o controle fuzzy possuir um esforço computacional maior do que um simples PID, ele compensa com resultados melhores e um projeto simplificando sem a necessidade de modelos matemáticos da planta.

O controle inteligente *fuzzy* possui uma vasta área de aplicação desde a industrial até diagnósticos médicos. Mas é preciso difundir mais esta técnica de controle ainda pouco ensinada nos cursos de controle, pois o mesmo possui uma aplicação simples e eficiente. Combinação muito importante para manter o mercado competitivo e com bons resultados.

Uma restrição encontrada pela aplicação da lógica nebulosa é a falta de um procedimento sistemático para sua análise e projeto. É necessária a observação da forma como o operador executa a função e avaliação do resultado esperado para gerar as regras e funções de pertinência que, posteriormente, serão sintetizadas por tentativa e erro.

A técnica pode ser ainda aperfeiçoada combinando o controle *fuzzy* com redes neurais, o chamado neuro-*fuzzy*.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-MG pelo apoio fornecido para este trabalho.

## Referências Bibliográficas

- Bouamama, B.O (1998); “La régulationautomatique”, Ecole Universitaire D’Ingénieurs de Lille (ECUDIL), França.
- Coelho, L. S.; Almeida, O. M.; Antonio Augusto R. Coelho, A. A. (2003). Projeto e estudo de caso da implementação de um sistema de controle nebuloso. *Sba Controle & Automação*, vol.14 no.1 Campinas. DOI: [10.1590/S0103-17592003000100003](https://doi.org/10.1590/S0103-17592003000100003)
- Ferreira Júnior, P. A. (2009). Eficiência energética em ambientes prediais utilizando rede sem fio Zigbee e Controle Fuzzy. xiv, 97 f., il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade de Brasília, Brasília.
- Kheir, N. A.; Aström, K. J.; Auslander, D.; Cheok, K. C.; Franklin, G. F.; Masten, M.; Rabins, M (1996). Control systems engineering education, *Automatica* 32, 147–166. DOI: [10.1016/0005-1098\(96\)85546-4](https://doi.org/10.1016/0005-1098(96)85546-4)
- Luiz, C. C., Silva, A. C., Coelho, A. A. R., Bruciapaglia, A. H (1997). Controle Adaptativo Versus Controle Fuzzy: Um Estudo de Caso em um Processo de Nível. Brasil: SBA Controle & Automação.
- Oliveira, A. M.; Silva, P. G.; Carmo, M. J.; Oliveira, A. R.; Araújo Jr, L. O (2011). Diagnóstico do Ensino de Controle em Cursos de Engenharia Eletrica e Engenharia de Controle e Automação. Brasil: COBENGE.
- OPC Foundation. Disponível em:<[www.opcfoundation.org](http://www.opcfoundation.org)>. Acesso em: 28 mar. 2013.
- Simões, M. G; Shaw I. S (2007). Controle e Modelagem Fuzzy. São Paulo: Blucher: FAPESP.
- Zadeh, L. A (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353. DOI: [10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)