

## Identificação e Controle Fuzzy de uma Planta Didática de Nível

Adelson Siqueira Carvalho (IFF Campos) [adelsonsc@gmail.com](mailto:adelsonsc@gmail.com)  
Adriellen Lima de Sousa (IFF Campos) [adriellenlima@gmail.com](mailto:adriellenlima@gmail.com)  
Leonardo do Espírito Santo Francisco (IFF Campos) [leo\\_nardo\\_es@hotmail.com](mailto:leo_nardo_es@hotmail.com)

### RESUMO

*Neste trabalho é utilizada uma abordagem experimental para a identificação de uma planta experimental de controle de nível utilizando modelos autorregressivos. Como será demonstrado, esta metodologia fornece uma representação satisfatória do sistema, e possui maior praticidade se comparada a técnicas mais clássicas de modelagem. No presente trabalho ainda é descrito o projeto de um controlador de nível de líquido baseado em Lógica Fuzzy, que, devido à sua característica de tomadas de decisões próximas ao ser humano, oferece uma solução que atende aos requisitos de desempenho e estabilidade deste sistema. A validação do modelo bem como do controlador Fuzzy, foi viabilizada através da realização de uma integração entre o módulo de aquisição de dados ADAM-6022 e o software de engenharia Matlab, utilizando-se a opção de comunicação através do protocolo de comunicação de dados OPC que o mesmo dispõe.*

Palavras-chave: Controle de nível. Modelos autorregressivos. Lógica Fuzzy. OPC.

### 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos o homem buscou desenvolver técnicas e equipamentos que substituíssem o seu trabalho de forma a aumentar a segurança de seu ambiente profissional, obter maior qualidade e rapidez na produção. Todas essas características aliadas ao benefício econômico provenientes de sua utilização tornaram o controle automático indispensável em várias operações industriais.

Visando a um maior rendimento produtivo nas indústrias, os profissionais têm buscado inspiração no funcionamento da mente humana para solucionar problemas complexos, de acordo com Filho et al. (2002). A lógica Fuzzy é uma destas técnicas inteligentes que simula modos de raciocínio aproximados e manipula o conhecimento do especialista para a solução de problemas.

O presente trabalho apresenta a implementação de um controlador Fuzzy em uma Planta Experimental de Controle de Nível composta por dois tanques. Deseja-se obter resultados satisfatórios para o controle do nível de um dos tanques, de forma que este seja controlado a partir da utilização desta classe de controladores, que tem sido utilizada em vários outros trabalhos científicos.

O controlador Fuzzy trata do relacionamento entre entradas e saídas agregando vários parâmetros que são descritos de forma lingüística, o que faz com que o mesmo seja capaz de proporcionar um desempenho satisfatório aos sistemas, proporcionando um controle que não requer cálculos ou equações complexas, de acordo com Vale (2007).

Além do projeto do controlador, é descrita a utilização de modelos autorregressivos para realizar a identificação de uma Planta Experimental de Controle de Nível. Esta abordagem fornece uma representação matemática confiável por considerar as não-linearidades do sistema a partir da utilização de um conjunto de dados oriundos do sistema real. Segundo Carvalho (2008) apud Aguirre (2000), a identificação de sistemas visa obter um modelo matemático que explique, ao menos de forma aproximada, a relação de causa e efeito presente nos dados.

A construção do modelo autorregressivo, bem como o projeto do controlador Fuzzy, foram possíveis devido à utilização do protocolo de comunicação de dados OPC (OLE for Process Control), através do software Matlab, onde se estabelece uma relação cliente/servidor entre o mesmo e a planta física.

## **2. OBJETO DE ESTUDO: PLANTA EXPERIMENTAL DE CONTROLE DE NÍVEL**

O objeto de estudo do presente trabalho é a Planta Experimental de Controle de Nível apresentada na Figura 1, que é formada por uma estrutura metálica móvel onde os equipamentos estão afixados. A planta possui o controlador ADAM 6022 que suporta duas malhas PID. Neste trabalho, entretanto, suas funções de controle serão desabilitadas, visto que o controle será efetuado no software Matlab. O equipamento servirá como um módulo universal de aquisição de dados. O objetivo do sistema é controlar o nível do fluido contido no tanque TQ-01. Para mantê-lo constante, é necessário que a vazão de fluido que entra neste tanque, fornecida pela bomba MB-102 seja igual à vazão que escoar para o tanque TQ-02.

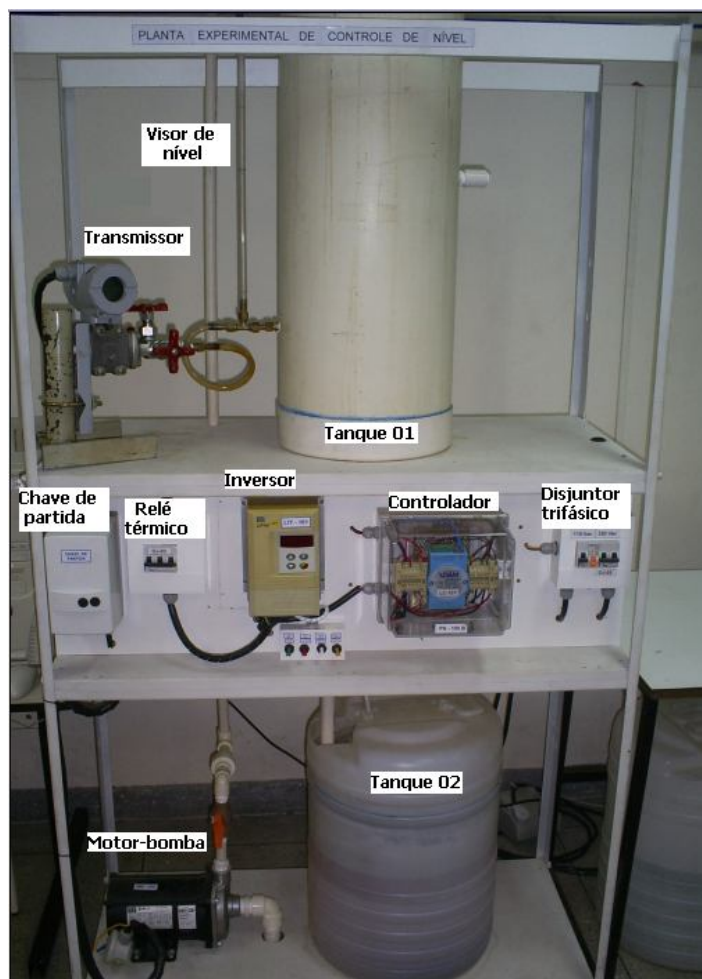


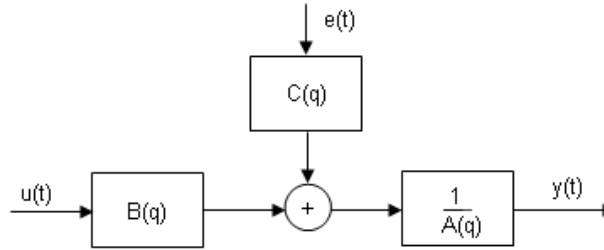
Figura 1 - Planta experimental de controle de nível

### 3. FERRAMENTAL TEÓRICO

#### 3.1 MODELOS AUTORREGRESSIVOS

A utilização dos modelos autorregressivos no contexto industrial se explica devido à sua capacidade de descrever o comportamento dinâmico de um processo o qual seja impossível ou extremamente complexo sua descrição através de métodos tradicionais. Essa descrição é geralmente realizada matematicamente, através da estimação de parâmetros, que serve para determinar os coeficientes do modelo a partir dos dados obtidos experimentalmente. De acordo com Carvalho (2008), estes modelos foram utilizados inicialmente por pesquisadores da área de modelagem para a previsão de problemas de séries temporais e de controle. Com o passar do tempo este modelo foi utilizado por vários pesquisadores da área industrial, que a partir de seu formato primário incluíam novas variações.

Os modelos ARMAX (*Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs*) incluem dinâmicas de distúrbios, como pode ser visualizado na Figura 2. Geralmente, estes são utilizados em sistemas nos quais os distúrbios presentes no processo são relevantes, segundo com Carvalho (2008).



**Figura 2** – Diagrama de blocos do modelo ARMAX

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

onde  $C(q^{-1})$ : polinômio na variável  $q$ , simboliza a média móvel e possui a seguinte forma:

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$$

$nc$ : ordem do polinômio  $C(q^{-1})$ ;

Desta forma, os modelos ARX são representados por:

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_nay(t-na) = b_1u(t-nk) + b_2u(t-nk-1) + \dots + b_{nb}u(t-nk-nb+1) + e(t) + c_1e(t-1) + \dots + c_{nc}e(t-nc)$$

Muitas são as aplicações que os modelos ARMAX possibilitam e, devido à simplicidade em sua utilização podem fornecer uma significativa proposta de metodologia na solução de problemas industriais que necessitam de representações matemáticas dos processos.

### 3.2 TEORIA FUZZY

A teoria Fuzzy é uma técnica de inteligência artificial que têm se tornado uma alternativa viável para aplicações em controle de processos. Um controlador Fuzzy procura simular o raciocínio lógico humano para resolver os problemas. Utiliza o conhecimento do especialista para modelar o funcionamento do sistema de controle, através da utilização de regras, relacionando as variáveis de entrada e saída da planta. Esta técnica trata informações qualitativas e não valores exatos, os valores são descritos linguisticamente, o que possibilita a existência de valores imprecisos e aproximados, segundo Coelho e Almeida (2003).

Se comparada a outras técnicas de controle, a teoria Fuzzy possui uma fase de elaboração do projeto simples, não sendo necessária utilização de equações matemáticas complexas ou tabelas, tarefas estas que consomem grande parte do tempo de projeto em outras técnicas de controle que as utilizam.

Um sistema lógico Fuzzy, representado na Figura 3, demonstra como a entrada é modificada, através da etapa de fuzzificação e, segue à etapa de inferência, onde ocorre a tomada de decisão do sistema, com base em regras pré-determinadas, a partir de onde se tem os valores difusos de saída que serão decodificados na etapa de defuzzificação.

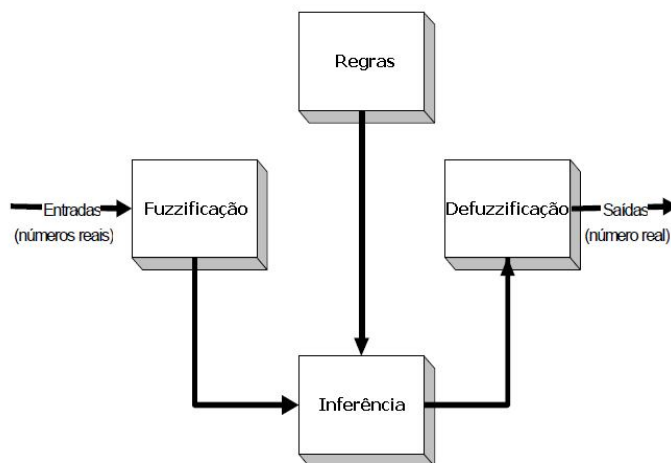


Figura 3 – Sistema Fuzzy. Adaptado de Henriques (1999)

A etapa de fuzzificação consiste da tradução dos valores de entrada em valores Fuzzy verbais, geralmente provenientes de sensores e dispositivos existentes na planta industrial. Esta parte do sistema lógico Fuzzy inclui a definição das funções de pertinência e variáveis lingüísticas, bem como a determinação do universo de discurso de cada uma destas variáveis.

As variáveis lingüísticas Fuzzy devem ser escolhidas a partir das variáveis físicas de processo sobre as quais as regras de controle são aplicadas. A variável lingüística é uma variável cujos valores podem ser os nomes para os conjuntos Fuzzy, segundo Gomide e Gudwin (1994). Funções de pertinência são funções que descrevem os sistemas dinâmicos através de modelos Fuzzy.

A etapa de inferência Fuzzy é aquela que utiliza regras do tipo *se antecedente...então conseqüente* com o objetivo de produzir uma saída Fuzzy que será utilizada para fins de cálculo da variável de saída para o processo (VALE, 2007).

As regras do controlador definirão quais serão as saídas, tomadas pelo controlador, cada vez que observar uma determinada combinação nos valores de entrada. Na fase de projeto do controlador, devem ser elaboradas as regras para o mesmo. Para isto é necessário que o projetista conheça o comportamento natural do processo a ser controlado e que saiba claramente quais ações deseja que o mesmo tome em face das diversas condições que as variáveis de entrada possam assumir.

A defuzzificação consiste na transformação das variáveis Fuzzy produzidas pela máquina de inferência em variáveis reais que serão enviadas ao processo. Dentre os métodos mais utilizados estão o centro dos máximos, média dos máximos e o centro de massa.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Neste trabalho desejou-se obter uma representação matemática para a Planta Experimental de Controle de Nível através da utilização de um modelo autorregressivo do tipo ARMAX. As variáveis ‘nível do tanque’ e ‘vazão da bomba’ serão relacionadas para a composição do conjunto de dados necessários à estimação do modelo.

A estimação consiste em identificar parâmetros que, relacionados entre si, forneçam um

modelo matemático de um sistema que tenha validade para simular seu comportamento em várias áreas de pesquisa onde não seja possível a utilização da planta real como, por exemplo, em simulação virtual.

Os valores medidos de nível, num range de 0 a 100 % da variável que são recebidos pelo módulo ADAM 6022, são convertidos através do conversor A/D em uma faixa de 0 a 65535 respectivamente, sabendo-se que o conversor possui resolução de 16 bits. Como a saída analógica do módulo ADAM 6022 possui conversor D/A de 12 bits, a faixa de trabalho está entre 0 e 4095.

Foi utilizada uma entrada em forma de onda quadrada de amplitude máxima de 2700 e mínima de 1200, com período de 80 segundos, para estimular o sistema. A configuração no Simulink utilizada é apresentada na Figura 4.

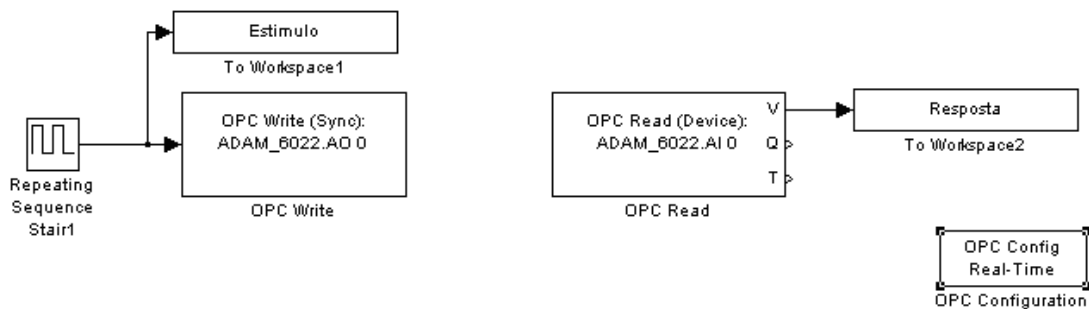


Figura 4 – Identificação do sistema

O bloco Repeating Sequence Stair1 fornece o estímulo de entrada em forma de onda quadrada ao bloco OPC Write, que por sua vez escreve sobre a planta esses valores. Além disso, esse estímulo será enviado ao workspace do Matlab através do bloco To workspace1, na variável 'Estimulo' que será usada posteriormente.

O comportamento do sistema será registrado a partir da leitura que o bloco OPC Read faz do mesmo e semelhantemente ao estímulo de entrada, será enviado ao workspace do Matlab através do bloco To workspace2 na variável chamada 'Resposta'.

Os dados geralmente são separados em duas partes, uma para teste e outra para validação. O conjunto de testes é utilizado para a elaboração do modelo, isto é, para a estimação dos parâmetros do modelo, enquanto o conjunto de validação serve como uma amostra do sistema real que deve ter suas respostas comparadas àquelas obtidas pelo modelo a uma determinada entrada de acordo com Carvalho (2008).

Neste trabalho, os dados foram separados em dois conjuntos A1 e A2, no workspace do Matlab, como segue:

$$A1=[Resposta(1:2:243) Estimulo(1:2:243)];$$

$$A2=[Resposta(2:2:244) Estimulo(2:2:244)];$$

Estes conjuntos são, cada um deles, formados por duas colunas sendo a primeira a variável 'Resposta' e a segunda a variável 'Estimulo'. Ambos os conjuntos foram extraídos do conjunto total de dados e formados de forma intercalada. O conjunto A2 foi utilizado para os testes enquanto A1 usado para a validação.

Os valores das ordens escolhidos para os coeficientes do modelo foram [1 1 1 0]. Este conjunto foi escolhido primeiramente por se tratar de ordens mais simples, podendo vir a ser

modificado caso não fosse atingida uma representação satisfatória da planta. Esta configuração, contudo, apresentou um bom desempenho não sendo necessário experimentar modelos com ordem mais elevadas.

Os coeficientes do modelo autorregressivo foram obtidos através do Matlab utilizando-se a seguinte linha de comando:

```
m=armax (A2,[1 1 1 0]),
```

O modelo encontrado é:

$$0.34031 z$$

$$z - 0.95767$$

De posse do modelo, deve-se certificar-se de que ele sirva para representar outros conjuntos de dados provenientes do mesmo sistema, o que será possível através da validação deste modelo. A importância da validação consiste no fato de a maioria dos sistemas reais serem não-lineares, o que não garante que o modelo obtido realmente seja uma representação útil do sistema. O comando do Matlab que fornece as respostas do modelo a uma determinada entrada proveniente da planta é o predict. O comando é utilizado da seguinte forma:

```
y=predict (m,A1),
```

onde y retornará a resposta do modelo a esta entrada, que é armazenada em um vetor e este é sobreplotado com a planta real, como pode ser visto na Figura 5.

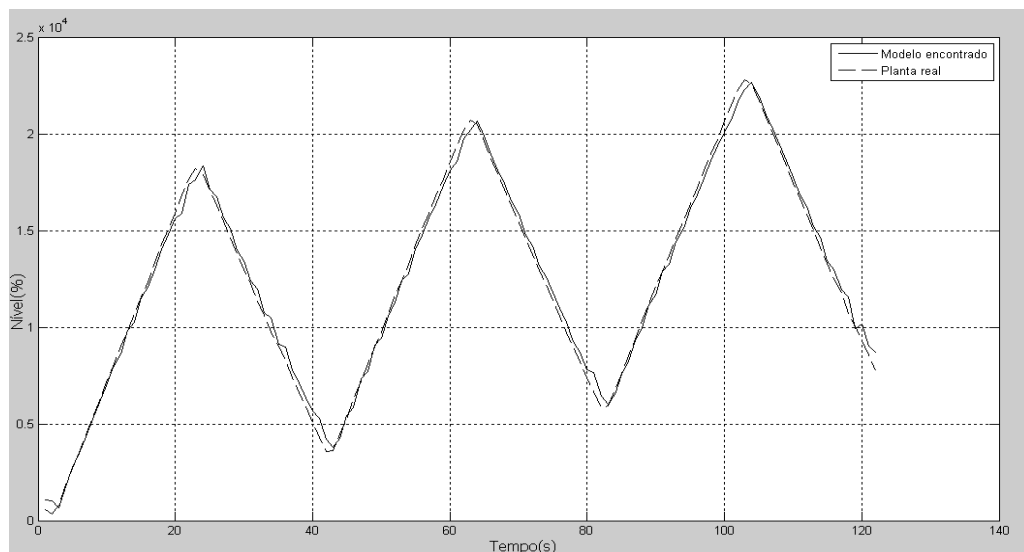


Figura 5 – Saída do sistema comparada ao modelo

Através da Figura 5 pode-se observar que o modelo encontrado apresentou um grau de aderência considerável em relação à planta real, significando que este pode ser utilizado para substituir o mesmo em situações nas quais se torna inviável sua utilização devido à impossibilidade de parada de produção para realização de testes, que poderiam resultar em danos à mesma. Além disso, a utilização do modelo traz o benefício de diminuição do tempo no qual os testes são realizados através dos ambientes virtuais de simulação, o que traz resultados mais rapidamente do que seria caso fosse utilizada a planta real.

#### 4.2. CONTROLE

O presente trabalho comprometeu-se a elaborar um controlador Fuzzy para o sistema de

nível de líquido em questão. Os testes deste controlador foram realizados diretamente na planta. Como variáveis lingüísticas para a entrada do controlador Fuzzy foram definidas o ‘erro’ de nível e a ‘variação do erro’ do nível. A variável lingüística ‘erro’ é obtida através da diferença entre o valor do SP e o valor da VP. A ‘variação do erro’ é obtida comparando-se o ‘erro’ no instante atual com o ‘erro’ no instante anterior, que foi obtido utilizando-se um bloco de atraso no Simulink. Como variável lingüística de saída foi definida a ‘vazão da bomba’ que é influenciada pela rotação da bomba.

Um esquemático da configuração desenvolvida no Simulink segue na Figura 6, com um *set point* em degrau de 50%.

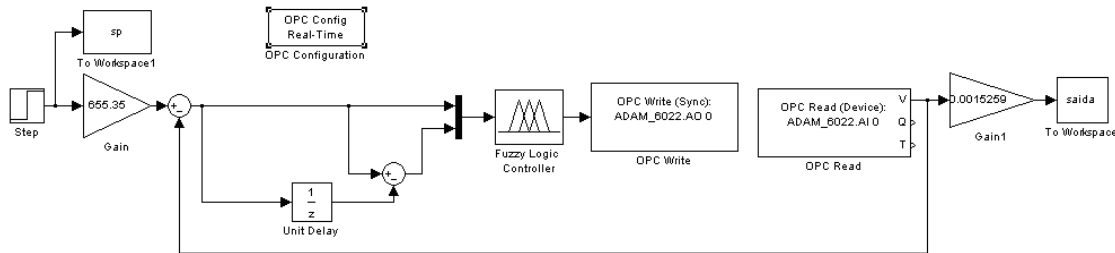


Figura 6 – Diagrama de blocos do Simulink para controle da planta

Este controlador foi projetado com cinco funções de pertinência para a variável lingüística de entrada ‘erro’. São elas: ‘neg’, ‘Pneg’, ‘zero’, ‘Ppos’ e ‘pos’, como podem ser vistas na Figura 7, e sete funções de pertinência para a variável lingüística de saída ‘vazão da bomba’. São elas: ‘baixa’, ‘Pbaixa’, ‘MPbaixa’, ‘cte’, ‘MPalta’, ‘Palta’ e ‘alta’, que podem ser visualizadas na Figura 8.

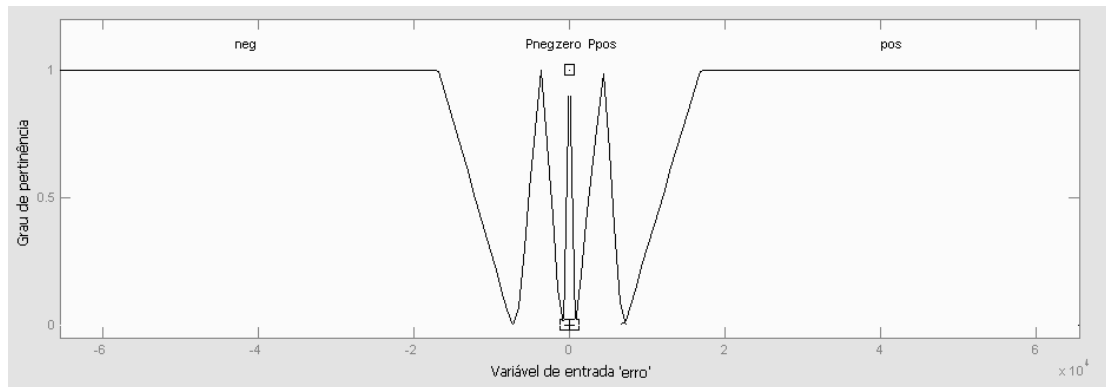


Figura 7 - Funções de pertinência da variável ‘erro’

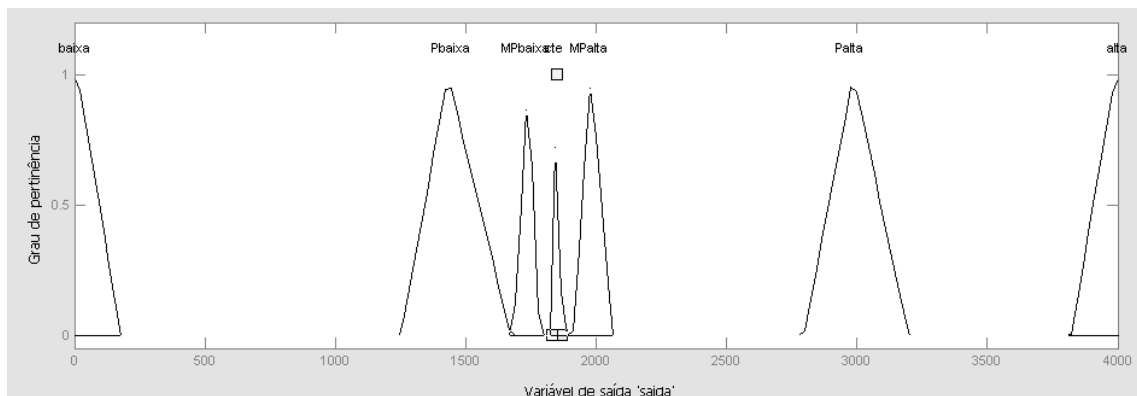


Figura 8 - Funções de pertinência da variável ‘vazão de saída’



A utilização da ‘variação do erro’ como variável lingüística da entrada permite ao controlador antecipar uma ação corretiva, pois ao considerar o erro no instante anterior pode perceber para onde os valores da variável estão tendendo, isto é, ao comparar o valor atual com o anterior o controlador é capaz de perceber o aumento ou decréscimo do valor do erro.

A Figura 9 mostra a disposição das funções de pertinência da ‘variação do erro’. São elas: ‘mneg’, ‘neg’, ‘zero’, ‘pos’ e ‘mpos’. É importante ressaltar que esta variável foi utilizada apenas para aumentar a precisão do controlador na região onde a variável ‘erro’ é zero, isto é, o range da ‘variação do erro’ abrange apenas os valores cuja diferença entre o instante atual e anterior esteja concentrada na função de pertinência central da variável ‘erro’.

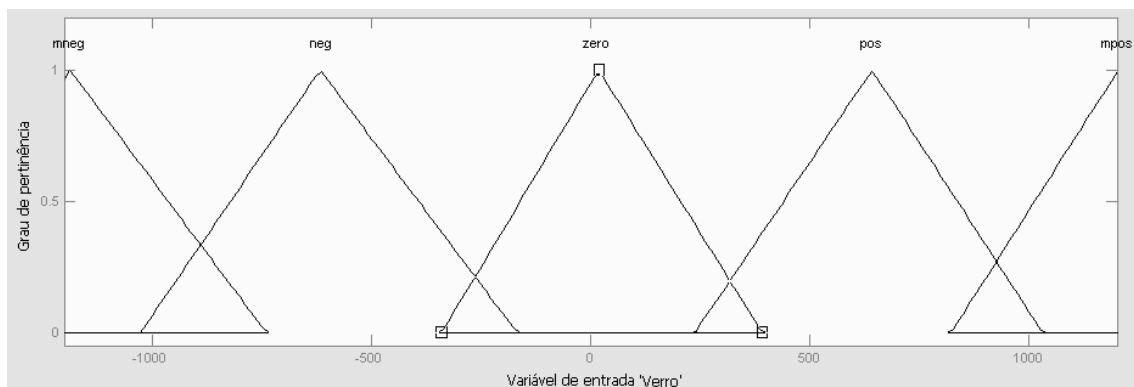


Figura 9- Funções de pertinência da variável ‘variação do erro’

As regras elaboradas para o Controlador são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1. Regras do controlador

IF ERRO	AND VARIÇÃO DO ERRO	THEN VAZÃO SAÍDA
NEG	-----	BAIXA
PNEG	-----	PBAIXA
ZERO	ZERO	CTE
ZERO	MPOS	MALTA
ZERO	POS	MALTA
ZERO	NEG	MBAIXA
ZERO	MNEG	MBAIXA
PPOS	-----	PALTA
POS	-----	ALTA

A resposta do sistema à entrada em degrau é apresentada na Figura 10:

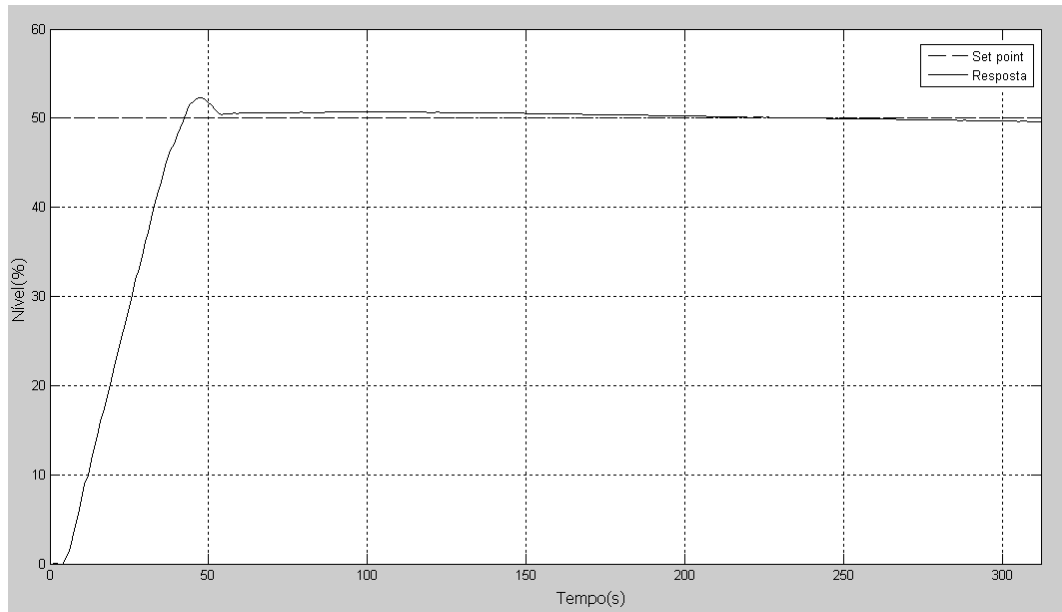


Figura 10 - Resposta da planta a um SP em degrau de 50%

Como pode ser visto, o controlador permitiu a variável de processo ‘nível do tanque’ alcançar o valor de *setpoint* e, desta forma, considerou-se a resposta satisfatória.

Depois de alcançado um desempenho aceitável com o teste em degrau, o mesmo controlador foi testado com entrada em onda quadrada, para analisar a capacidade do mesmo em se manter no SP ainda que este varie bruscamente. A configuração realizada para este teste está ilustrada na Figura 11:

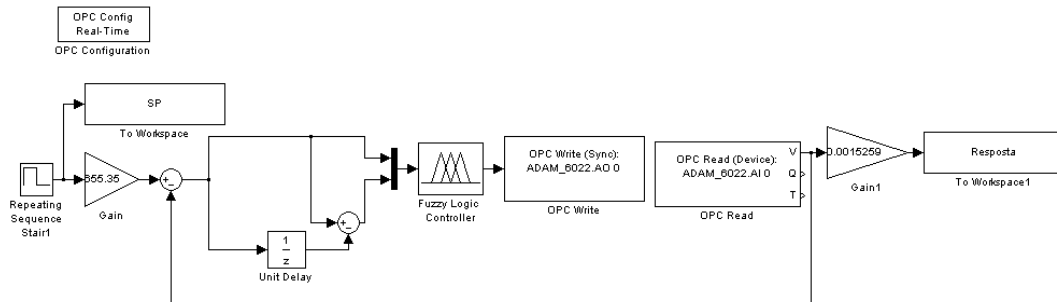


Figura 11 – Diagrama de blocos do Simulink para controle da planta com estímulo em onda quadrada

O resultado para este teste com entrada em onda quadrada de amplitude máxima de 50% e mínima de 20% pode ser visualizado na Figura 12:

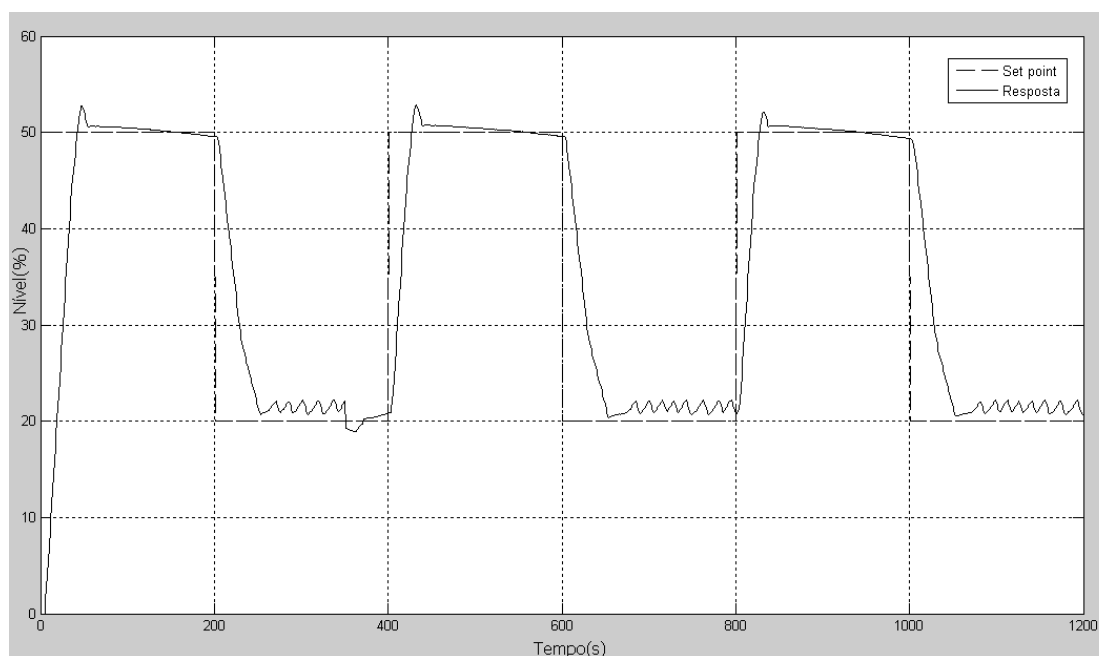


Figura 12 - Resposta da planta a uma entrada em onda quadrada

Como demonstra a Figura 12, o sistema é capaz de seguir variações no SP quando utilizado o controlador projetado. Pôde-se considerar que o objetivo de encontrar um controlador Fuzzy que fizesse a planta de nível alcançar os valores pré-determinados foi, portanto, alcançado.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, observa-se que a lógica Fuzzy fornece desempenho satisfatório ao tentar controlar uma Planta de Controle de Nível. No presente trabalho a obtenção de um controlador eficiente para a planta só se fez possível mediante o conhecimento do funcionamento da mesma. Este trabalho apresentou os detalhes sobre a implementação do controlador Fuzzy. Além disso, um pouco do ferramental teórico sobre o assunto foi apresentado, constituindo uma base teórica para trabalhos futuros.

## 6. REFERÊNCIAS

CARVALHO, Adelson Siqueira. **Modelagem de colunas de destilação através de modelos auto-regressivos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção - Campos dos Goytacazes, RJ - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 2008.

COELHO, Leandro dos Santos, ALMEIDA, Otacílio. **Projeto e estudo de caso da implementação de um sistema de controle nebuloso**. Revista Controle & Automação, Vol.14 no.1, 2003.

FILHO, Fernando de Melo Luna, GOSMANN, Hugo Leonardo, BAUCHSPIESS, Adolfo. **Controle fuzzy para sistema de nível de líquidos**. XIV Congresso Brasileiro de Automática. Natal- RN, 2002.

GOMIDE, Fernando Antonio Campos, GUDWIN, Ricardo Ribeiro. **Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy**. SBA Controle & Automação, Vol.4, nº3. 1994.

HENRIQUES, Luis Oscar de Araújo Porto. **Compensação das oscilações de torque de um acionamento de relutância chaveado utilizando técnicas de controle neuro fuzzy.** Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia Elétrica - Rio de Janeiro, RJ. UFRJ, 1999.

VALE, Marcelo Roberto Bastos Guerra. **Análise comparativa do desempenho de um controlador fuzzy acoplado a um PID neural sintonizado por um algoritmo genético com controladores inteligentes convencionais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de computação. UFRN, 2007.