

## **Modelo autorregressivo e controlador Fuzzy para um sistema de controle digital de velocidade do Kit Digital Servo**

**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)**

**Larissa dos Santos Martins (IFF Campos) [larissa\\_martinsrj@hotmail.com](mailto:larissa_martinsrj@hotmail.com)**

**Philippe Massad Bringhenti (IFF Campos) [philipemassad@gmail.com](mailto:philipemassad@gmail.com)**

### **RESUMO**

*Este artigo trata da identificação e controle de velocidade do Kit didático Servo Digital existente no laboratório de automação industrial no IFF Campus Campos-Centro. A identificação do sistema é realizada por meio do modelo autorregressivo ARMAX e o controle é baseado na lógica Fuzzy com regras do tipo SE..ENTÃO. Os testes experimentais são desenvolvidos no ambiente simulink – MATLAB.*

Palavras-Chave: Kit didático Servo Digital, modelo autorregressivo, lógica Fuzzy.

### **1. INTRODUÇÃO**

Modelar matematicamente sistemas é uma tarefa que requer um grande esforço e torna-se muito penosa principalmente para sistemas complexos. Muitas vezes opta-se por obter modelos para processos não-lineares através de métodos experimentais. A partir das respostas que a variável controlada fornece, quando submetidas a estímulos conhecidos na variável manipulada, é possível utilizar métodos que possuam modelos pré-formatados, visando obter os coeficientes adequados que permitam a representação do sistema em questão.

O presente trabalho segue esta metodologia ao utilizar a classe de modelos autorregressivos ARMAX para construir um modelo que represente o comportamento dinâmico do Kit Servo Digital. Além disto, através da teoria que tenta simular o comportamento humano na solução de problemas, a lógica Fuzzy, um controlador é projetado para o mesmo sistema. O objetivo do kit é controlar a velocidade de um disco rotativo, variável controlada, através de um valor em tensão que alimenta o circuito do motor.

A base teórica necessária para o entendimento do problema consiste de modelos autorregressivos e lógica Fuzzy. Na seção 2 é apresentado o objeto de estudo, na seção 3 um breve estado da arte, o ferramental teórico na seção 4 e a metodologia utilizada na seção 5. Na seção 6 é apresentada a metodologia utilizada e na seção 7 as conclusões com gráficos e figuras.

### **2. OBJETO DE ESTUDO**

O objeto de estudo é um módulo didático da FeedBack, que é uma combinação de componentes eletromecânicos, circuitos eletrônicos e software utilizados para treinamento dos fundamentos do controle. Foram utilizadas as unidades mecânicas (UM-33-100) e a unidade digital (UD-33-120) para a realização de testes e modelagem. A composição das unidades descritas abaixo podem ser encontradas no manual do fabricante.

A unidade mecânica 33-100 (Figura 1) é composta de:

- Um motor de corrente contínua (atuador) - que converte energia elétrica em energia mecânica rotativa;
- Um tacogerador analógico (sensor) - transforma energia mecânica de acionamento do mesmo em energia elétrica na forma de tensão contínua induzida em seus terminais. Essa tensão gerada é proporcional à velocidade angular a qual o tacogerador é submetido. O ganho do sensor é  $K_t=2,5V/1000rpm$ ;
- Disco rotativo (planta);
- Potenciômetros de entrada e saída analógicos, codificadores digitais absolutos e incrementais e freio magnético;



Figura 1: Unidade mecânica 33-100.

A unidade digital 33-120 (Figura 2) é composta de:

- Circuitos dos conversores analógico-digital (A/D ou ADC) e digital-analógico (D/A ou DAC) para conversão dos sinais do sistema. O conversor A/D é um dispositivo eletrônico capaz de gerar uma representação digital de uma grandeza analógica e o conversor D/A é um dispositivo eletrônico capaz de gerar uma representação analógica de uma grandeza digital;
- Possui ainda um sistema de introdução de falhas ao sistema de controle;

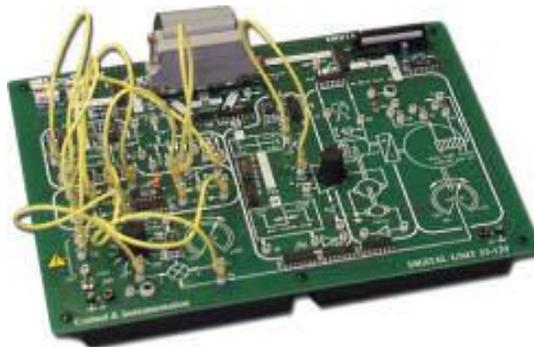


Figura 2: Unidade digital 33-120.

Os softwares MATLAB e SIMULINK foram utilizados para a aquisição, tratamento dos dados, identificação, e elaboração do controlador Fuzzy.

### 3. UM BREVE ESTADO DA ARTE

A abordagem de identificação de sistemas utilizando modelos autorregressivos e aplicação de técnicas de controle avançadas, como a lógica Fuzzy, tem se mostrado efetiva nas áreas de pesquisas de controle e aquisição de dados. Diversos são os trabalhos científicos publicados com metodologias similares. Esse estado da arte consiste em citá-los fazendo um comparativo com o trabalho em questão.

Almeida et al. (2001) descreveram a importância de atividades práticas de tarefas como modelagem, análise transitória, controle, comportamento em regime e resposta em frequência no software científico Matlab/Simulink em disciplinas referentes a Engenharia de Controle e Automação.

Os conceitos teóricos das disciplinas de Engenharia seriam melhor entendidos pelos alunos se fossem exemplos concretos testados experimentalmente em laboratórios da universidade. Essa relevância foi descrita no trabalho anterior e tem sido motivação do trabalho desenvolvido no Kit servo digital.

Callai e Coelho (2005) apresentam diferentes esquemas de adaptação por modelo de referência para melhorar o desempenho de um controlador Fuzzy. Os resultados foram descritos por meio de um experimento num balanço horizontal constituído por uma haste horizontal com hélices conectadas as suas extremidades e um potenciômetro conectado ao eixo central.

Um bom indicador da eficácia de qualquer controlador são os resultados a partir de experimentos. Em ambos os trabalhos, isso foi feito para mostrar a eficácia do controlador Fuzzy.

Carvalho (2008) apresenta a modelagem de uma coluna de destilação piloto utilizando modelo autorregressivo do tipo ARX. Sua abordagem destaca as particularidades do modelo. Em seu trabalho é fornecida a representação linear discreta do sistema. Os modelos obtidos são validados com índices de desempenho e análise dos resíduos da modelagem.

Os dois trabalhos utilizam modelos autorregressivos. Porém um através de representação ARX e outro com ARMAX.

Nascimento (2008) aplica dois controladores, *um PID clássico e um controlador PID* tendo seus parâmetros ajustados por um sistema Fuzzy, em um processo de destilação piloto 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. Valida os controladores com dois modelos matemáticos, um deles encontrado pelo método da curva de reação e outro através de modelo autorregressivo.

O trabalho citado acima usou das vantagens da lógica Fuzzy para obter ajustes consideráveis no controlador PID. No Kit servo digital, o controlador utilizado já foi do tipo Fuzzy.

## **4. FERRAMENTAL TEÓRICO**

### **4.1. MODELOS AUTORREGRESSIVOS**

Modelos autorregressivos fazem uso de representações lineares, para a modelagem de sistemas dinâmicos, através de equações de recorrência. Segundo Ljung e Glad (1994) existem duas maneiras de se obter um modelo pra uma planta de processo: uma é através da chamada “modelagem”, utilizando as leis da física e detalhes da construção mecânica (que nem sempre é possível, ou é desconhecida), ou através de sinais obtidos da planta, método chamado de “identificação”. O modelo utilizado nesse trabalho é do tipo ARMAX e sua representação matemática é feita da seguinte maneira:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - n_k) + C(q^{-1})e(t) \quad (1)$$

Onde

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (2)$$

$$B(q^{-1}) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b+1} \quad (3)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \quad (4)$$

A ordem é referente ao número de entradas e saídas atrasadas. Quanto maior a ordem, maior o esforço computacional e a probabilidade de erro a predição também aumenta. Sua representação em diagrama de blocos pode ser vista na Figura 3:

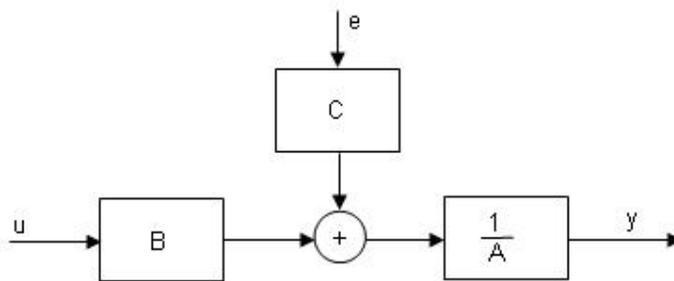


Figura 3: Modelo ARMAX representado em diagrama de blocos.

#### 4.2 – LÓGICA FUZZY

A lógica Fuzzy é a lógica baseada na teoria dos conjuntos fuzzy. Ela procura corresponder o raciocínio exato a um caso de raciocínio aproximado, sendo descrito por regras do tipo *Se-Então*.

Nos sistemas lógicos, o valor verdade de uma proposição só pode assumir dois valores: verdadeiro (1) ou falso (0). Já na lógica Fuzzy, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto Fuzzy de qualquer conjunto parcialmente ordenado, pois estes são descritos linguisticamente, como por exemplo: *verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso*.

O diferencial do controle Fuzzy é que ele permite modelar as ações a partir de informações fornecidas pelo operador, ou seja, conhecimento especialista, em vez de modelar o processo em si. Nos métodos convencionais de controle de processos, os mesmos são desenvolvidos por meio da modelagem matemática, o que muitas vezes é por demais trabalhosa. A motivação para a abordagem vem das muitas características vantajosas em relação aos métodos clássicos, são estes: Facilidade de entendimento, flexibilidade, tolerância a dados imprecisos, modelagem de funções não-lineares complexas, implementação em conjunto a métodos de controle convencionais, baseada em linguagem natural.

O controlador Fuzzy possui a estrutura representada na Figura 4. Seus componentes básicos são: interface de fuzzificação, base de conhecimento, base de dados, procedimento de inferência e interface de defuzzificação.

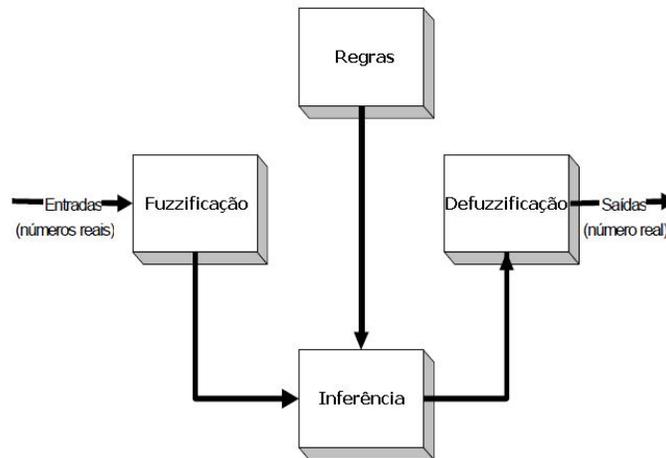


Figura 3 – Sistema Fuzzy. Adaptado de Henriques (1999)

A *interface de fuzzificação* é a responsável pela conversão dos valores das variáveis de entrada para valores a universos de discurso normalizados e na transformação dos mesmos em números em conjuntos Fuzzy, de modo que possam ser associadas à variáveis linguísticas. Na *base de conhecimento* há um banco de regras, caracterizando a estratégia de controle e seus objetivos. A *base de dados* armazena as definições necessárias sobre discretizações e normalizações dos universos de discurso, as divisões 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. A *interface de defuzzificação* faz a conversão das ações de controle Fuzzy inferidas em ações de controle não-Fuzzy. Depois disso, torna os valores normalizados vindos do passo anterior compatíveis com os valores dos universos de discurso reais das variáveis.

## 5. METODOLOGIA

O experimento realizado neste trabalho seguiu as seguintes etapas:

- Identificação do sistema;
- Verificação do modelo;
- Validação do modelo;
- Elaboração do controlador Fuzzy;
- Testes do controlador no modelo encontrado;
- Testes do controlador no sistema real.

Para a etapa de identificação, primeiro foi feito o teste para detectar ruído no sensor (Figura 5), onde a planta era colocada em um valor conhecido (zero), e era feita a coleta dos dados. O indicativo Bad Link demonstra que a foto foi tirada antes de conectar o computador à planta real.

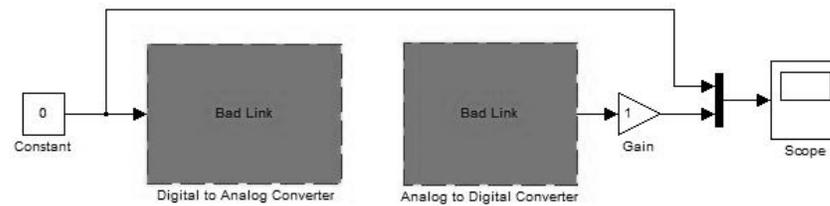


Figura 5: Experimento para detecção do ruído do sensor.

A partir do experimento anterior, foi encontrado o valor de offset médio de 0.60131 e o mesmo foi adicionado ao diagrama de blocos utilizado para coleta de dados. Teste que consistiu em aplicar uma entrada em degrau negativo de valor -8V na planta para que fossem coletados os valores de saída correspondentes que seriam utilizados para a identificação do modelo da planta. A Figura 6 mostra o experimento:

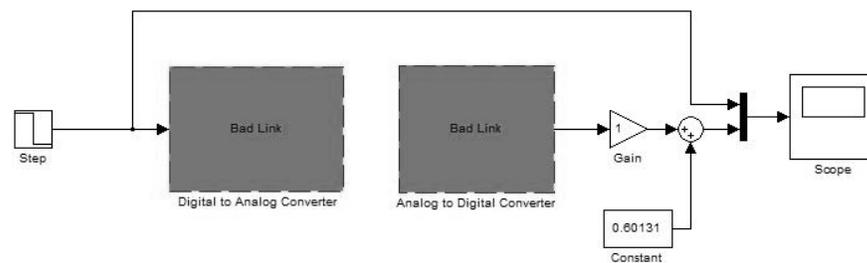


Figura 6: Experimento para aquisição dos dados utilizados para identificação.

Depois que os dados foram coletados, esses foram tratados e divididos em duas partes. Um modelo ARMAX foi encontrado utilizando uma das amostras (etapa de identificação), e teve sua saída calculada a partir da outra (etapa de validação). O código escrito no ambiente do Matlab® pode ser visto a seguir:

```

entrada=dados(:,2);
saida=dados(:,3);
A1=[saida(1:499) entrada(1:499)];
A2=[saida(500:1001) entrada(500:1001)];
m=arimax(A2,[1 1 1 0]);
y=predict(m,A1);

```

Um gráfico de comparação entre a planta real e a resposta do modelo é apresentado na Figura 7.

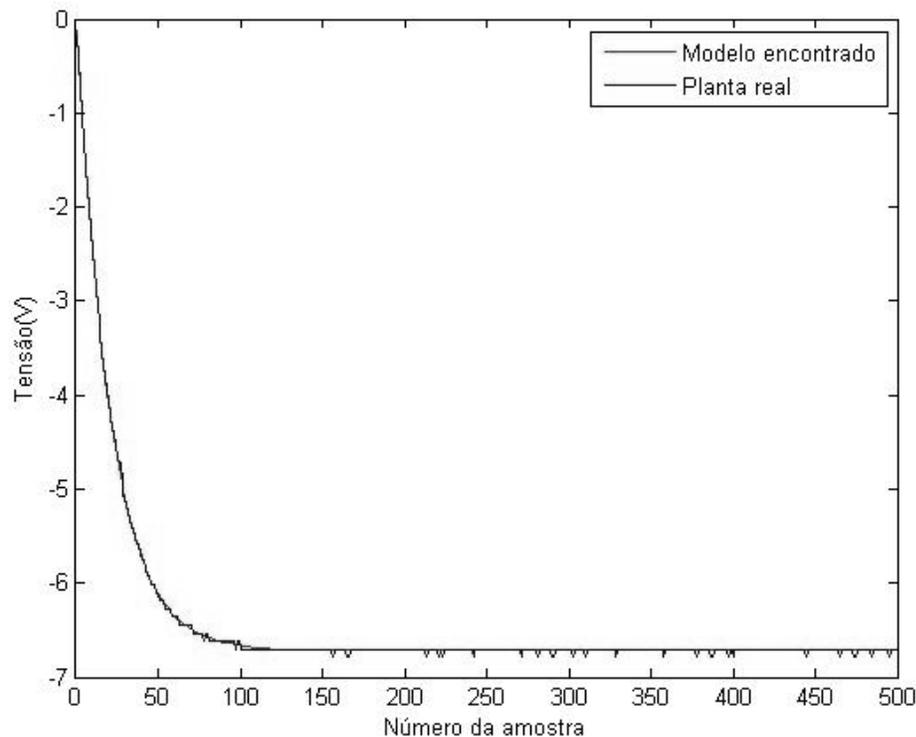


Figura 7: Comparação entre sistema real e modelo encontrado.

Na elaboração do controlador Fuzzy foi considerada a referência em velocidade, já que esta seria a variável controlada. Porém o sensor retorna os valores em tensão, logo foi necessário converter esse sinal para a grandeza de velocidade. O ganho do sensor corresponde a 2,5 V/1000 RPM, portanto foi utilizado um fator multiplicativo para realizar a conversão.

A entrada do controlador foi o erro, e as variáveis lingüísticas definidas foram: muito negativo, médio negativo, pouco negativo, zero, pouco positivo, médio positivo, muito positivo. A saída com um range de -10 a 10 V foi definida como: negativo A, negativo médio, negativo B, zero, positivo B, positivo médio, positivo A.

Depois de configurado o controlador, fechando-se a malha de controle foi realizado o teste da Figura 8, visando analisar a eficiência do controlador sobre o modelo encontrado anteriormente.

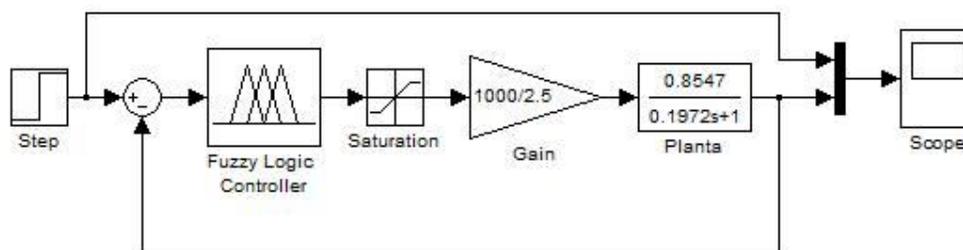


Figura 8: Teste do controlador Fuzzy com o modelo encontrado.

O gráfico de resposta do modelo com o controlador projetado pode ser visualizado na Figura 9.

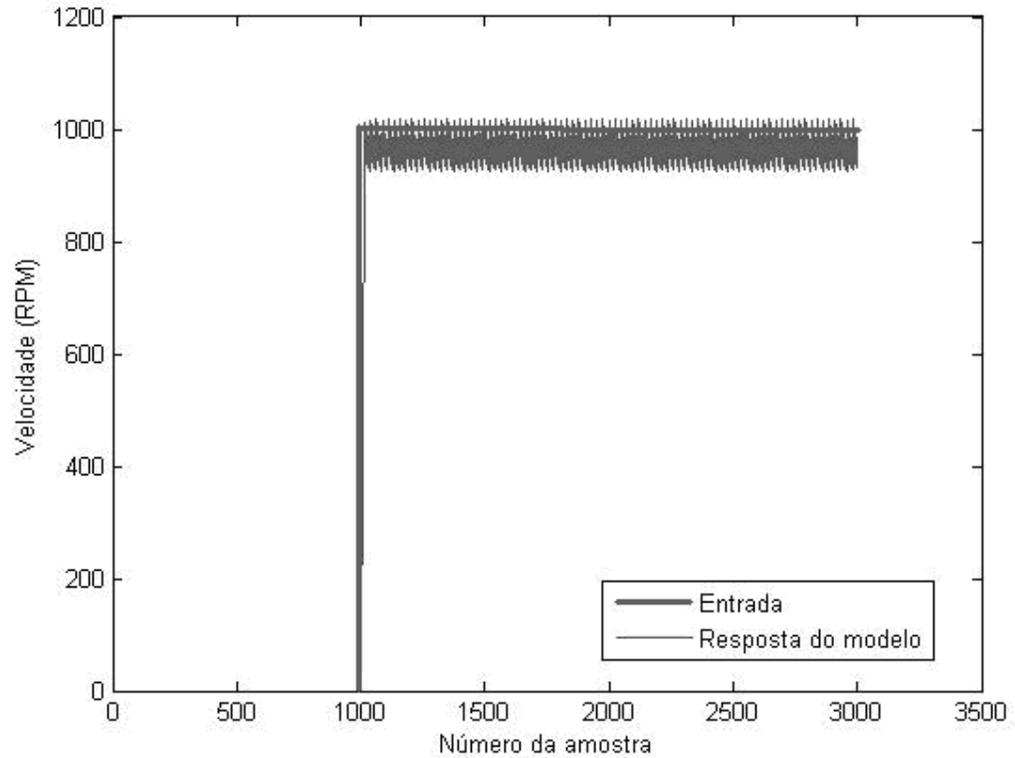


Figura 9: Gráfico da resposta do sistema utilizando controle Fuzzy projetado.

Depois de validado o controlador no modelo da planta, desejou-se verificar a eficiência do controlador na planta real. A Figura 10 mostra o diagrama de blocos utilizado no Simulink®, utilizando uma entrada em degrau:

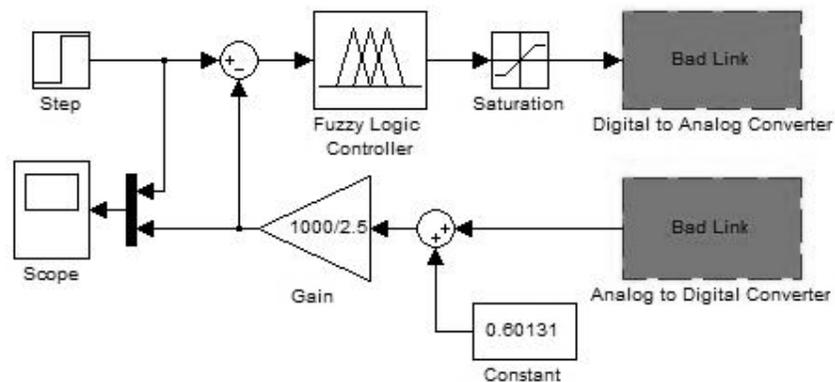


Figura 10: Experimento utilizando o controlador Fuzzy no sistema real.

A resposta obtida do sistema real ao utilizar o controlador projetado é apresentada na Figura 11.

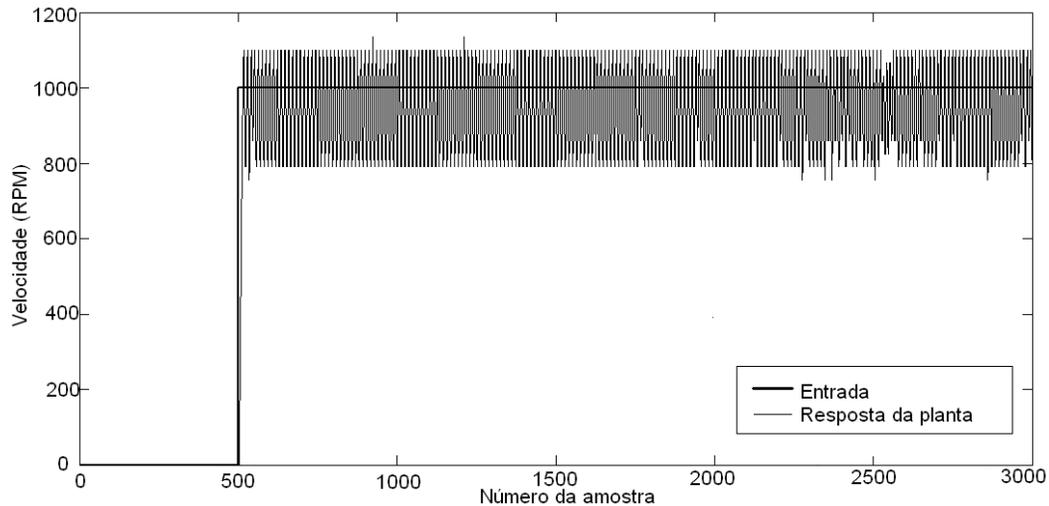
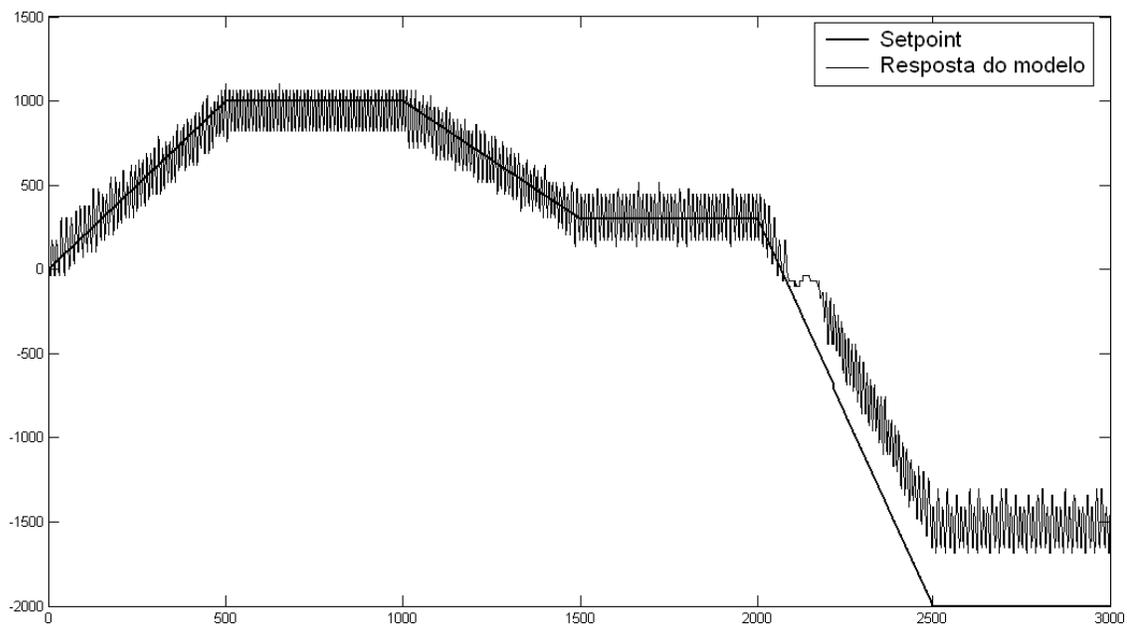


Figura 11: Experimento utilizando o controlador Fuzzy no sistema real.

Após a realização do teste com a entrada em degrau, foi realizado um teste utilizando-se a entrada em PRBS (PseudoRandom Binary Sequence) que é uma entrada aleatória, que permite analisar o desempenho do sistema controlado a partir de um setpoint variável. A resposta pode ser observada na Figura 12.



## 6. CONCLUSÃO

Este artigo visou apresentar a identificação de um sistema kit Servo Digital através de modelos autorregressivos e implementar um controlador Fuzzy no mesmo sistema. Como pôde ser visto, o modelo encontrado foi capaz de descrever o sistema dinâmico do kit Servo digital, fornecendo uma representação que possui validade para ser utilizado quando a planta real não estiver disponível.

Além de os modelos autorregressivos possuírem uma representação matemática não-complexa, o auxílio computacional do software MATLAB torna a identificação de sistemas, dinâmicos através de métodos empíricos, uma tarefa simples. Ambos o modelo encontrado e a

planta real foram testados utilizando o controlador Fuzzy obtido com o auxílio do Matlab. A lógica Fuzzy é uma das técnicas da inteligência artificial capaz de controlar um sistema dinâmico como o kit Servo Digital com eficiência.

## **7. REFERÊNCIAS**

ALMEIDA, O. M; COELHO, A. A. R; SANTOS, J. E. S; SUMAR, R. R; Laboratório de simulação no ensino de sinais e sistemas lineares. Cobenge – 2001

CALLAI, T. C.; COELHO, L. S.; COELHO, A. A. R; Controle nebuloso adaptativo por modelo de referência: projeto e aplicação em sistemas não-lineares. Revista Controle & Automação- 2007

CARVALHO, A. S., Modelo ARX para uma coluna de destilação piloto. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - SBPO, 2008.

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.

LJUNG, L., Glad,T. (1994) Modeling of dynamic systems. 1ed. New Jersey: Prentice Hall.

MAYNE, D. W.; JENNINGS, A. K.; Linear motor digital servo control. Califórnia: United States Patent,1987.

NASCIMENTO, D. Aplicação de técnicas de sintonia Fuzzy em uma coluna de destilação piloto. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT 2008.