



PROPOSTA DE NOVOS BLOCOS FUNCIONAIS *FIELDBUS FOUNDATION* PARA REALIZAR O CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO DE ESTADOS

Afonso Celso Caldas Pacheco

Universidade de São Paulo (USP) - Departamento de Engenharia Mecânica, Caixa postal 359
Fone: (016) 273-9435, CEP: 13560-250, São Carlos – SP, Brasil, apacheco@sc.usp.br

Elenilton Teodoro Domingues

Universidade de São Paulo (USP) - Departamento de Engenharia Mecânica, Caixa postal 359
Fone: (016) 273-9435, CEP: 13560-250, São Carlos – SP, Brasil, elenilton@bol.com.br

Mario Pinotti Junior

Universidade de São Paulo (USP) - Departamento de Engenharia Mecânica, Caixa postal 359
Fone: (016) 273-9435, CEP: 13560-250, São Carlos – SP, Brasil, pinotti@sc.usp.br

***Resumo.** Neste artigo é apresentado um novo bloco funcional Fieldbus Foundation, Estimador de Estados. O bloco funcional foi utilizado no controle por variáveis de estado de um sistema térmico. São apresentados o cálculo dos parâmetros do bloco, a sua configuração, a descrição do sistema controlado, a modelagem da planta e o projeto do sistema de controle. Os resultados dos testes da nova estratégia de controle por realimentação de estado demonstraram a funcionalidade do bloco bem como o alto grau de precisão encontrado no controle do sistema térmico.*

***Palavras chaves:** Fieldbus, bloco funcional, estimador de estados.*

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento dos processadores digitais na década de 70 houve um incentivo ao uso de computadores para monitorar e controlar os instrumentos a partir de uma estação de controle central, como mostra Karam et al (2000). E devido à crescente complexidade existente na indústria atual os sistemas de controle tornam-se cada vez mais precisos, confiáveis e versáteis. Como citado por Branco (1996), para que todas as exigências desses avanços sejam atendidas têm sido desenvolvidos, implementados e simulados algoritmos de controle e estimação aplicando-se técnicas de controle avançadas como; estimação de estados, controle adaptativo, preditivo, estocástico, dentre outras. Aliado a isso tem-se a rede Fieldbus que permite utilizar tais algoritmos diretamente nos instrumentos de campo. Sendo realizado um controle verdadeiramente distribuído e com maior flexibilidade na aplicação de estratégias de controle, fundamentais para se atingir o objetivo principal em processos industriais, isto é, se obter maior eficiência aliada à confiabilidade.

Seguindo essa tendência é apresentado neste artigo um algoritmo de controle moderno utilizando estimação de estados, implementado como um bloco funcional para realizar o controle de um sistema térmico. A nova estratégia de controle em rede Fieldbus é executada no campo e de maneira distribuída. O novo bloco funcional desenvolvido foi denominado bloco funcional estimador de estados.

2. APLICAÇÃO DO BLOCO FUNCIONAL EM FIELDBUS

As aplicações de blocos funcionais, de acordo com a norma Fieldbus Foundation (1999), são definidas na Foundation System Architecture como aplicações da planta ou fábrica que realizam uma ou mais funções de controle e monitoramento automáticos. As aplicações de controle Fieldbus são modeladas como um conjunto de blocos funcionais coordenados para executar um certo número de operações que realizam uma ou mais funções de controle e monitoramento. Este conjunto de operações, coletivamente, fornece uma única função de controle de alto nível. O modelo do bloco funcional é um algoritmo em tempo real que transforma parâmetros de entrada em parâmetros de saída e sua operação é controlada através de parâmetros de controle. A interoperação entre blocos funcionais é modelada através da ligação de um parâmetro de entrada de um bloco a um parâmetro de saída de outro.

3. NOVO BLOCO FUNCIONAL ESTIMADOR DE ESTADOS

O novo bloco funcional estimador de estados foi projetado e desenvolvido de acordo com os requisitos obrigatórios da norma Foundation. O seu algoritmo realiza a estimação dos estados de um sistema dinâmico. Este bloco funcional possui um sistema de equações dinâmicas matriciais (Eq.1 e Eq. 2) que são executadas em malha fechada, num processo de convergência. Enquanto que a lei de controle é definida pela Eq. (3).

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + B u + L (y - \hat{y}) \quad (1)$$

$$\hat{y} = C \hat{x} \quad (2)$$

$$u = -K \hat{x} \quad (3)$$

A seguir é mostrada uma representação esquemática do bloco com seu algoritmo, entradas e saídas Fig. (1), e sua representação em diagrama de blocos Fig. (2).

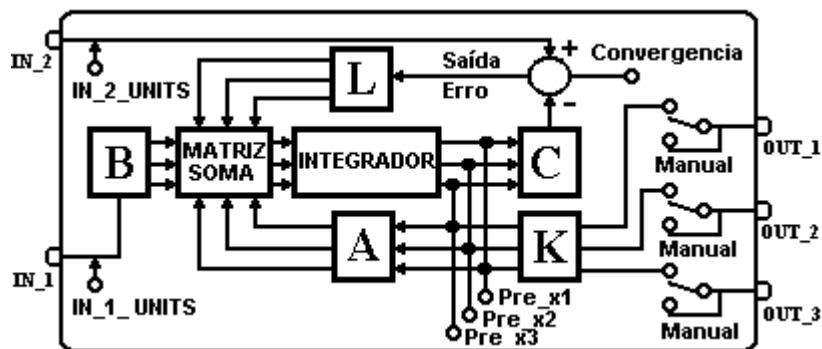


Figura 1. Bloco funcional estimador de estados.

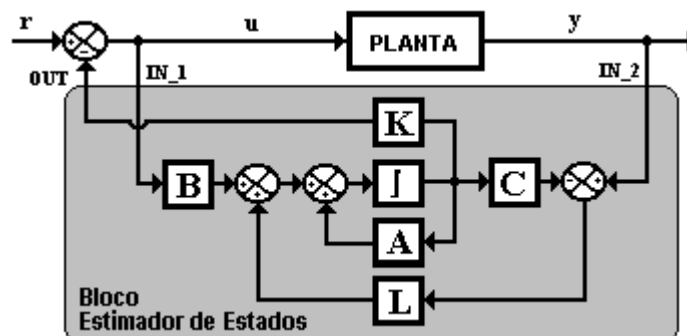


Figura 2. Representação em diagrama de blocos.

A cada execução do bloco as Eq. (1) e Eq. (2) são executadas em um número constante de vezes, de modo que o tempo de execução do bloco, por definição, seja aproximadamente o tempo de execução de um bloco de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Desta forma, de acordo com Brandão (2000) a convergência do bloco pode se dar em algumas execuções, dependendo das características da planta.

4. SISTEMA TÉRMICO UTILIZADO PARA TESTAR O NOVO BLOCO FUNCIONAL

O sistema dinâmico utilizado na realização dos testes de campo do bloco estimador de estados foi um forno elétrico instrumentado com transmissores Fieldbus Foundation, um transmissor de temperatura TT 302 e um conversor Fieldbus 4 a 20 mA FI 302. A Figura (3) mostra o esquema da montagem do sistema. Os dois transmissores estão em um canal do Fieldbus ligado a uma placa de interface PCI302, esta placa PCI é o LAS (Link Active Scheduler) do canal Fieldbus.

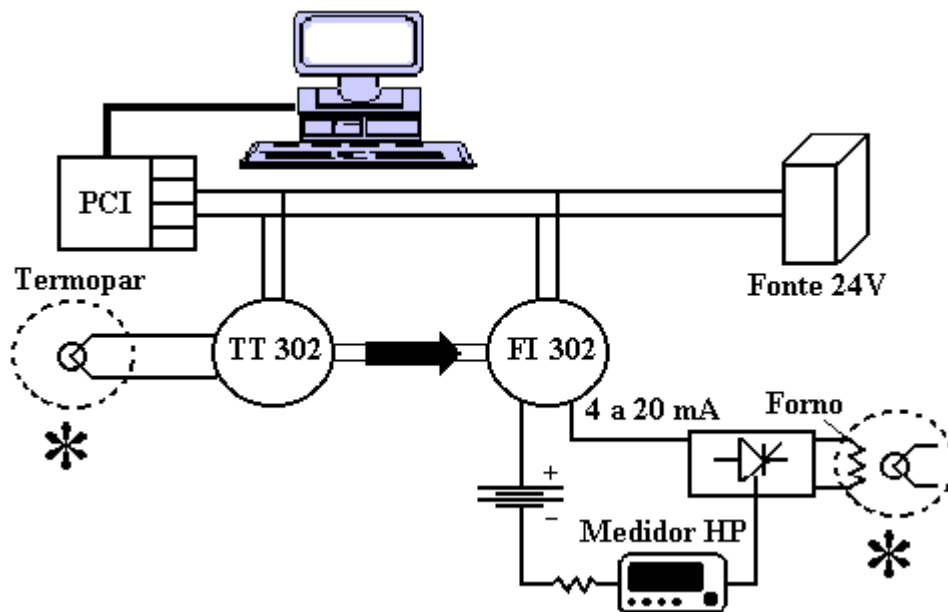


Figura 3. Esquema do forno elétrico instrumentado com Fieldbus.

O transmissor de temperatura está ligado a um termopar tipo K, que mede a temperatura interna do forno. A compensação de junta fria é realizada pelo transmissor através da leitura de um termistor PT100 à temperatura ambiente. O conversor de Fieldbus para 4 a 20 mA está acionando uma chave estática que alimenta a resistência elétrica e fornece potência ao forno. O sistema dinâmico utilizado possui entrada em porcentagem de potência, onde vale a relação proporcional direta entre 0 a 100% e 4 a 20 mA, e saída em temperatura (°C).

5. MODELO DA PLANTA OBTIDO ATRAVÉS DE DADOS EXPERIMENTAIS

Para obter o modelo do sistema térmico foi aplicada uma entrada em degrau de 60%, em malha aberta, e assumido que a curva de resposta transitória é dada por uma soma de exponenciais, descrita pela seguinte equação:

$$y(t) = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} + c_3 e^{-\lambda_3 t} \quad (4)$$

Com os respectivos coeficientes encontrados através da curva de dados reais, Fig. (5), a Eq. (4) torna-se:

$$y(t) = 184,04 - 46,06e^{-5,19 \times 10^{-3}t} - 150,47e^{-1,14 \times 10^{-3}t} \quad (5)$$

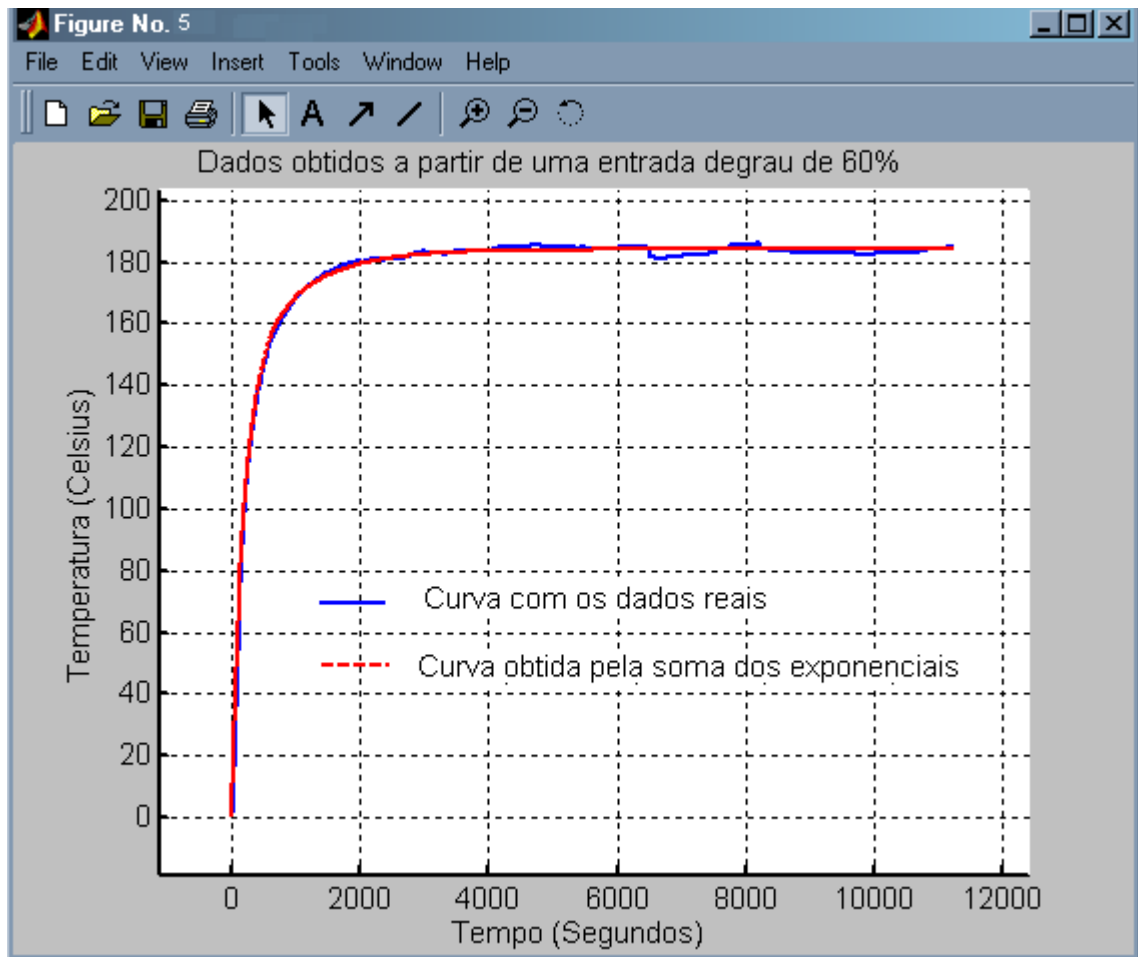


Figura 5. Curva dos dados reais e a curva obtida.

A Figura (5) mostra a curva de dados reais obtida para uma entrada degrau de 60%, e a curva obtida pela Eq. (5) encontrada através da soma de exponenciais. Dividindo os coeficientes c_1 , c_2 e c_3 da Eq. (5) por 60, obtemos a equação da curva normalizada para uma entrada degrau unitária. Logo temos:

$$y_n(t) = 3,067 - 7,678e^{-5,19 \times 10^{-3}t} - 2,507e^{-1,14 \times 10^{-3}t} \quad (6)$$

5.1. Função transferência a partir da equação da curva normalizada

Admitindo-se que a Função Transferência da resposta tem a seguinte forma:

$$Y(s) = \frac{a_1s + a_0}{s(s + \lambda_2)(s + \lambda_3)} \quad (7)$$

Aplicando-se a Transformada Inversa de Laplace na Eq. (7) e comparando-a com a Eq. (5), tem-se os seguintes termos: $a_0 = 1,809 \times 10^{-5}$ e $a_1 = 1,324 \times 10^{-2}$. Substituindo os valores de a_0 , a_1 , λ_2 e λ_3 na Eq. (7) obtém-se a função transferência da resposta do sistema dada por:

$$Y(s) = \frac{1,324 \times 10^{-2} (s + 1,809 \times 10^{-5})}{s (s + 5,193 \times 10^{-3})(s + 1,136 \times 10^{-3})} \quad (8)$$

Com uma entrada degrau unitário:

$$U(s) = \frac{1}{s} \quad (9)$$

A função transferência do sistema térmico é a seguinte:

$$G(s) = \frac{1,3236 \times 10^{-2} s + 1,8091 \times 10^{-5}}{(s + 5,1932 \times 10^{-3})(s + 1,1357 \times 10^{-3})} \quad (10)$$

5.2. Incluindo o tempo morto na função transferência

O tempo morto ou atraso de transporte existe na maioria dos sistemas de controle de processo. Este representa um atraso na medida, isto é, um atraso na ação do controlador ou um atraso na operação do atuador. A função transferência do tempo morto é dada por:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-T s} \quad (11)$$

Se o tempo morto for muito pequeno, então $e^{-T s}$ pode ser aproximado por:

$$e^{-T s} \cong \frac{1}{Ts + 1} \quad (12)$$

Portanto para o sistema térmico em questão tem-se que $T=15,579$ s, logo:

$$e^{-15,579 s} \cong \frac{1}{15,579 s + 1} \quad (13)$$

Incluindo o tempo morto em $G(s)$, obtem-se a função transferência final do sistema térmico:

$$G_F(s) = \frac{0,84963 \times 10^{-3} (s + 0,001367)}{(s + 0,06419)(s + 0,00519)(s + 0,001136)} \quad (14)$$

6. MODELAGEM POR ESPAÇO DE ESTADOS DO SISTEMA TÉRMICO

A representação de um sistema dinâmico na forma de espaço de estado é mostrada pelas Eq. (15) de estado e Eq. (16) de saída:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (15)$$

$$y = Cx \quad (16)$$

Transformando a Eq. (14) na forma de espaço de estado tem-se as matrizes da equação de estado e da equação de saída:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -3,786 \times 10^{-7} & -4,122 \times 10^{-4} & -7,052 \times 10^{-2} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 8,496 \times 10^{-4} \\ -5,875 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \text{ e } C = [1 \ 0 \ 0].$$

7. CONFIGURAÇÃO DO MODELO DA PLANTA NO BLOCO FUNCIONAL

Para a implementação do modelo da planta no bloco funcional estimador de estados é necessário converter o modelo do domínio contínuo no tempo para o discreto, ou seja, é necessário discretizar as matrizes A, B e C. Esta conversão deve ser realizada com a inclusão de um holder de ordem zero. O tempo de amostragem do sistema digital deve ser calculado com base no macrociclo da estratégia de controle utilizada no Fieldbus, neste caso 550 ms. O período de 550 ms de macrociclo se adequa perfeitamente ao sistema dinâmico controlado, que apresenta uma velocidade relativamente menor. Desta maneira não se caracteriza a influência da discretização do controle no desempenho deste, ou seja, o sistema de aquisição e controle pode ser considerado contínuo.

Durante o período do macrociclo, o bloco estimador de estados é executado uma única vez, porém o modelo dinâmico interno realiza cinco loops a cada execução, portanto o valor de tempo do macrociclo deve ser dividido por cinco para se achar o correto valor do período de amostragem para a discretização. Discretizando-se o modelo descrito em A, B e C com um holder de ordem zero e taxa de amostragem de 110 ms, temos as seguintes matrizes dinâmicas discretas no tempo:

$$A_D = \begin{bmatrix} 1,000 \times 10^0 & 1,372 \times 10^{-1} & 9,382 \times 10^{-3} \\ -3,552 \times 10^{-9} & 1,000 \times 10^0 & 1,365 \times 10^{-1} \\ -5,169 \times 10^{-8} & -5,278 \times 10^{-5} & 9,904 \times 10^{-1} \end{bmatrix}, B_D = \begin{bmatrix} 7,971 \times 10^{-6} \\ 1,160 \times 10^{-4} \\ -8,025 \times 10^{-6} \end{bmatrix} \text{ e } C_D = [1 \quad 0 \quad 0].$$

8. PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

Substituindo o sinal de controle da Eq. (3) na Eq. (15) tem-se:

$$\dot{x} = (A - B K) x \quad (17)$$

A matriz de ganho de realimentação de estado (K) que força os autovalores A - BK a serem $\mu_1, \mu_2 \dots \mu_n$ (valores desejados) é determinada a seguir da seguinte forma:

a) Testar a controlabilidade do sistema:

$$M = [B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B] \quad (18)$$

b) Se for controlável, então a partir do polinômio característico da matriz A, determinar os valores de $a_1, a_2 \dots a_n$.

$$|sI - A| = s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n \quad (19)$$

c) Determinar a matriz transformação T que transforma a equação de estado do sistema na forma canônica controlável:

$$T = M W \quad (20)$$

Onde:

$$W = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

d) Utilizando os valores desejados para os autovalores (pólos desejados em malha fechada), escrever o polinômio característico correspondente e determinar os valores de $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$.

$$(s-\mu_1)(s-\mu_2)L(s-\mu_n)=s^n+\alpha_1s^{n-1}+L+\alpha_{n-1}s+\alpha_n \quad (22)$$

e) Logo, a matriz de ganho de realimentação de estado K é dada por:

$$K=[\alpha_n-a_n|\alpha_{n-1}-a_{n-1}|\dots|\alpha_2-a_2|\alpha_1-a_1] T^{-1} \quad (23)$$

E agora o cálculo da matriz de ganho do estimador de estados (L)

a) Testar a observabilidade do sistema:

$$N=[C^* | A^*C^* | \dots | (A^*)^{n-1}B^*] \quad (24)$$

b) Se for observável, então a partir do polinômio característico da matriz A, determinar os valores de $a_1, a_2 \dots a_n$.

$$|sI - A|=s^n+a_1s^{n-1}+\dots+a_{n-1}s+a_n \quad (25)$$

c) Determinar a matriz transformação Q que transforma a equação de estado do sistema na forma canônica controlável:

$$Q=WN^* \quad (26)$$

d) Utilizando os valores desejados para os autovalores (pólos desejados do observador), escrever o polinômio característico correspondente e determinar os valores de $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$.

$$(s-\mu_{e1})(s-\mu_{e2})\dots(s-\mu_{en})=s^n+\alpha_1s^{n-1}+\dots+\alpha_{n-1}s+\alpha_n \quad (27)$$

e) Logo, a matriz L é dada por:

$$L=[\alpha_n-a_n|\alpha_{n-1}-a_{n-1}|\dots|\alpha_2-a_2|\alpha_1-a_1] Q^{-1} \quad (28)$$

9. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS K e L DO BLOCO FUNCIONAL ESTIMADOR

Para um tempo de acomodação de aproximadamente 350s e um overshoot $\geq 5\%$ as localizações dos pólos desejados de malha fechada são: $\mu_1=-1,3668 \times 10^{-3}$, $\mu_2=-1,7000 \times 10^{-2}$ e $\mu_3=-4,9771 \times 10^{-2}$.

Desta forma, se obtém a matriz K para ser: $K_1=9,9585 \times 10^{-1}$, $K_2=7,8588 \times 10^{+1}$ e $K_3=1,1770 \times 10^{-3}$

Os pólos desejados do estimador de estado foram projetados para serem aproximadamente 8 vezes mais rápido do que os pólos desejados de K. Portanto $\mu_{e1}=-8,000 \times 10^{-2}$, $\mu_{e2}=-9,000 \times 10^{-2}$ e $\mu_{e3}=-1,000 \times 10^{-1}$. Logo a matriz L será: $L_1=2,0203 \times 10^{-1}$, $L_2=3,3867 \times 10^{-4}$ e $L_3=3,3517 \times 10^{-5}$.

10. ESTRATEGIA DE CONTROLE NO FIELDBUS COM O BLOCO FUNCIONAL ESTIMADOR DE ESTADOS

A malha de controle será implementada conforme a Fig. (6) a seguir.

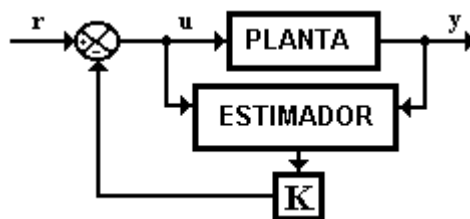


Figura 6. Diagrama de blocos da planta e do estimador de estado.

No Fieldbus a malha da estratégia de controle será configurada conforme a ligação dos blocos funcionais mostrada a seguir pela Fig. (7):

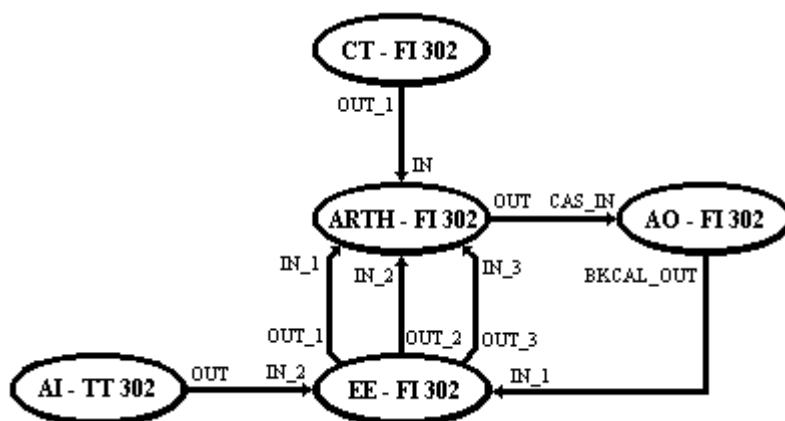


Figura 7. Estratégia de controle com o bloco estimador de estados.

O sinal de referência (setpoint) na malha de controle acima é gerado pelo bloco funcional Constante (CT-FI302). O bloco estimador de estados (EE-FI302) recebe a variável de entrada (temperatura em °C) e a variável de saída (corrente de 4 a 20mA) do sistema real através dos blocos entrada analógica (AI-TT302) e saída analógica (AO-FI302) respectivamente. Então são estimados os estados da planta real, multiplicados pelos ganhos de realimentação e fornecidos os resultados ao bloco aritmético (ARTH-FI302). O bloco aritmético tem a função de somar os estados multiplicados pelos ganhos de realimentação e compará-los com o valor de referência fornecido pelo bloco constante, determinando o erro e enviando ao bloco de saída analógica para fazer as correções necessárias e atuar na planta real.

11. RESULTADOS

Na Figura (8), Figura (9) e Figura (10) é possível verificar a dinâmica da resposta da malha de controle conforme a configuração mostrada pela Fig. (7), bem como a dinâmica de cada estado estimado e a entrada em porcentagem de potência.. Os testes foram realizados para os setpoints de: 70, 120 e 170 °C.

Nos gráficos das figuras a seguir as curvas representam a resposta do sistema, o setpoint e os estados estimados. As curvas são identificadas pela legenda apresentada abaixo:

Legenda:

- | | |
|--|------------------------------------|
| 1- Estado estimado 1 (x_1 = temperatura); | 4- Ponto de ajuste (Setpoint) |
| 2- Estado estimado 2 (x_2); | 5- Corrente aplicada de 4 a 20 mA; |
| 3- Estado estimado 3 (x_3); | 6- Temperatura controlada. |

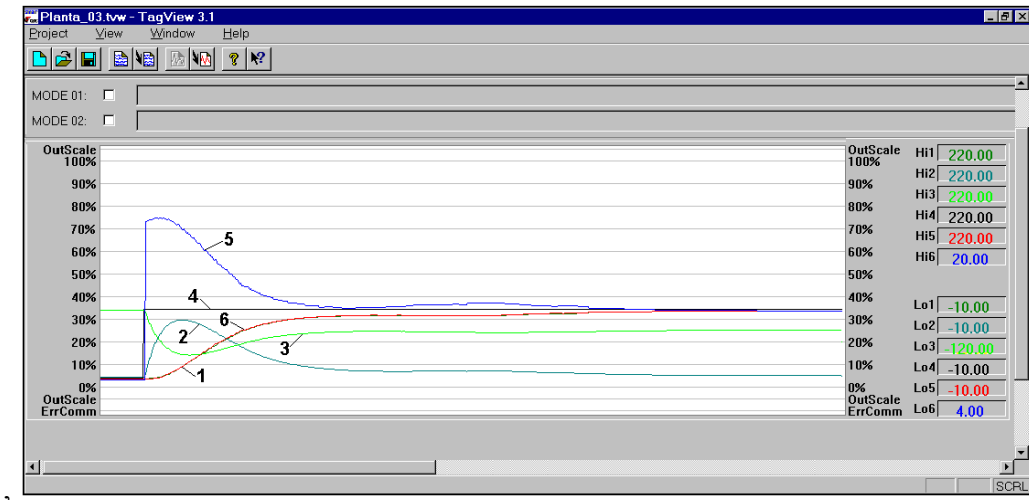


Figura 8. Curvas de resposta do controle do sistema térmico – Setpoint de 70 °C.

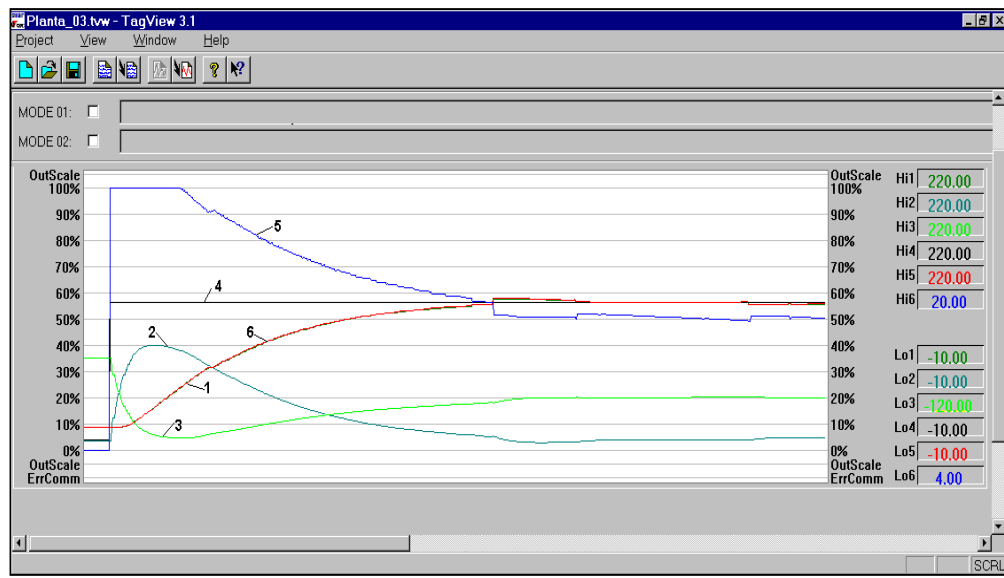


Figura 9. Curvas de resposta no controle do sistema térmico – Setpoint de 120 °C.

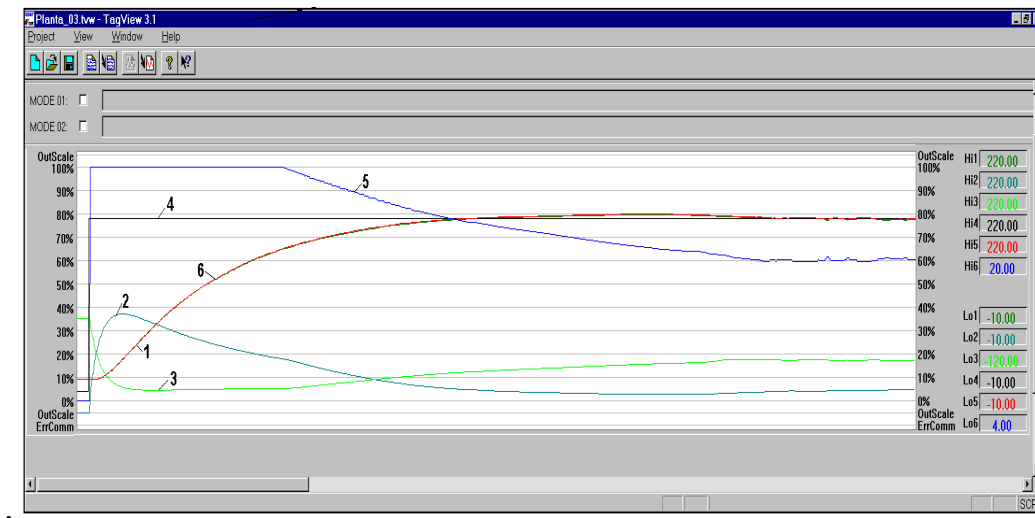


Figura 10. Curvas de resposta no controle do sistema térmico – Setpoint de 170 °C.

12. CONCLUSÕES

Foi apresentado neste artigo o controle de um sistema térmico por realimentação de estados estimados no protocolo Fieldbus Foundation. Os passos para determinar os parâmetros da planta e o projeto do sistema de controle para configurar o bloco estimador de estado, foram descritos minuciosamente. Testes realizados mostram a funcionalidade do bloco funcional estimador de estados no controle do sistema térmico, que pode ser uma alternativa para o controlador PID existente. O resultado mostrado pelas curvas traduz a confiabilidade e o alto grau de precisão encontrado no sistema de controle de uma planta térmica.

13. REFERÊNCIAS

- BRANCO, E.L.S., 1996, “Desenvolvimento de um Controlador Avançado de Processos Industriais”, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, M.Gerais, Brasil.
- BRANDÃO, D., 2000, “Bloco Funcional para controle Fieldbus por variáveis de estado”, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, S.Carlos, S.Paulo, Brasil.
- FIELDDBUS FOUNDATION (1999). Foundation Specification. Function Block Application Process Parte-1(FF-890-1.4), Parte-2(FF-891-1.4) e Parte-3(FF-892-1.4), Final Specification
- KARAM, D., SAMPA, M.H.O. and RELA, P.R., 2000, “Fieldbus: technology application in a Co sterilization Plant”, Radiation Physics and Chemistry, Vol. 57, pp.605- 607

PROPOSAL OF NEW FUNCTION BLOCKS FIELDDBUS FOUNDATION TO ACHIEVE THE CONTROL FOR FEEDBACK OF STATES

Afonso Celso Caldas Pacheco

University of São Paulo (USP) – Mechanical Engineering Department, P.O.box 359
Fone: +5502116 273-9435, ZIP: 13560-250, São Carlos – SP, Brazil, apacheco@sc.usp.br

Elenilton Teodoro Domingues

University of São Paulo (USP) - Mechanical Engineering Department, P.O.box 359
Fone: +5502116 273-9435, ZIP: 13560-250, São Carlos – SP, Brazil, elenilton@bol.com.br

Mario Pinotti Junior

University of São Paulo (USP) - Mechanical Engineering Department, P.O.box 359
Fone: +5502116 273-9435, ZIP: 13560-250, São Carlos – SP, Brazil, pinotti@sc.usp.br

Abstrac. In this article a new function block Fieldbus Foundation is presented, state estimator. The function block was used in the control, for state variable, of a thermal system. The calculation of the parameters of the block, its configuration, the description of the system controlled, the modeling of the plant and the design of the control system are presented. The results of the tests of the new strategy of control for feedback of state had demonstrated the functionality of the block as well as the high degree of accuracy found in the control of the thermal system.

Key words: Fieldbus, function block, state estimator.