

Deteccção e Isolamento de Falhas Sobre Sensores Utilizando Banco de Observadores

Elson Gustavo Mota Arruda¹, Nestor Roqueiro²

^{1,2} Departamento de Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina,
Cx. Postal 476, CEP 88040-900, Florianópolis - SC, Brasil

¹ elson@das.ufsc.br, ² nestor@das.ufsc.br

Resumo – Em operações como produção, transporte e refino, necessita-se coletar grande numero de informações e operar de forma confiável e segura. Questões ligadas à segurança de pessoal e meio ambiente têm justificado o estudo de técnicas de Deteccção e Isolamento de Falhas (FDI).

O sistema FDI apresentado neste documento foi projetado para operar sobre a planta didática SMAR – PD3 (que é controlada via rede Foundation Fieldbus). Aqui é apresentada uma descrição do processo a ser monitorado e uma modelagem matemática do mesmo.

Neste trabalho é apresentada uma técnica de FDI baseado em modelo que utiliza um banco de observadores para detectar falha sobre sensores bem como os resultados da aplicação sobre a planta didática. Os observadores são projetados por LQR (regulador quadrático linear).

Palavras-Chave: falha; modelo; observador; deteccção; sensor.

Abstract – In operations as production, transport and refining, are needed to collect great number of information, to operate of a safe and trustworthy form. Questions like the security of staff and environment have justified the study of techniques of Fault Detection and Isolation (FDI).

The FDI system presented in this document was projected to operate on SMAR - PD3 didactic plant (that it is controlled by a Foundation Fieldbus network). Here is presented a description of the process to be monitored and a mathematical modeling of this.

In this work one FDI technique based on model that uses a bank of observers to detect faults on sensors is presented as well the results of the application on the didactic plant. The observers are projected by LQR (Linear-quadratic Regulator).

Keywords: fault, model, observer; detection, sensor.

1. Introdução

Detecção e Isolamento de Falhas (FDI) é um importante problema em Engenharia de Processos. FDI é um ponto central do Gerenciamento de Eventos Anormais (AEM) e tem recebido grande atenção da indústria e da comunidade acadêmica nos últimos anos.

A rápida FDI, enquanto o processo ainda esta operando em uma região controlável, pode ajudar a evitar a progressão de eventos anormais e reduzir eventuais perdas de produtividade. Entretanto, esta tarefa permanece, predominantemente, uma tarefa manual.

Devido à complexidade e ao porte dos processos modernos, a tarefa de operadores humanos lidarem com FDI tem se tornado cada vez mais difícil. Venkatasubramanian et al. (2002) apresentam estatísticas mostrando que cerca de 70% dos acidentes industriais são causados por erros humanos. Estes eventos anormais têm significativo impacto econômico, ambiental e à saúde dos trabalhadores. Poucos eventos anormais chegam a se tornar catástrofes, entretanto, acidentes menores são muito comuns, ocorrendo diariamente. É estimado que somente a indústria petroquímica estadunidense tem perdas em torno de US\$20 bilhões/ano devido a erros no AEM. Este valor pode ser muito maior se considerarmos outros seguimentos da indústria, como o setor farmacêutico, química especial e energia. Acidentes nestas áreas têm custado à economia britânica US\$27 bilhões/ano, valores estes apresentados por Laser (2003).

Este trabalho foi desenvolvido sobre a planta didática SMAR-PD3. Esta planta opera com rede de comunicação industrial Foundation Fieldbus (FF) e apresenta um ambiente representativo de aplicações reais. Considerando que inúmeras indústrias petrolíferas utilizam redes de comunicação industrial FF, a implementação de técnicas FDI sobre uma planta operando com FF é certamente um desafio que deve ser transposto na busca de aplicações práticas de trabalhos acadêmicos.

2. Problema Proposto e Modelagem

Este trabalho foi desenvolvido sobre a planta didática SMAR – PD3, que opera com Foundation Fieldbus. Por se tratar de uma planta didática ela é multiprocessos, possibilitando a simulação de diversos processos comumente encontrados na indústria e utilizando os mesmos equipamentos e ferramentas de configuração utilizados em aplicações industriais.

Neste trabalho é proposto a Detecção e Isolamento de Falhas sobre a planta didática, e para este propósito a planta foi configurada para simular um processo de aquecimento multivariável que pode ser visto na Figura 1.

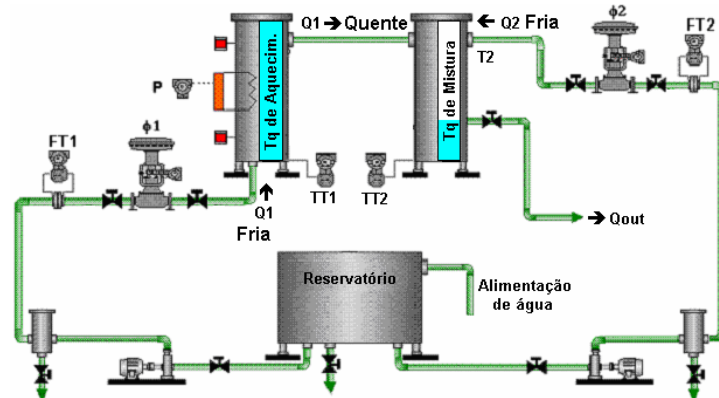


Figura 1. Arranjo físico do problema proposto

O arranjo da planta para este propósito consiste em:

- Variar a temperatura do tanque de mistura tendo como variável de entrada a abertura das válvulas de controle do tanque de aquecimento e do tanque de mistura.
- A resistência do tanque de aquecimento é mantida em um ponto de operação durante todo o processo, assim esta não é uma variável de entrada.
- As variáveis de saída são as temperaturas do tanque de aquecimento e do tanque de mistura.

Deseja-se detectar uma variação não desejada do ponto de operação, caracterizando uma falha no sistema.

2.1. Modelagem do Processo

A modelagem deste processo foi obtida através da aplicação de sinais do tipo degrau nas variáveis de entrada do sistema (abertura das válvulas de controle) e medindo as variáveis de saída (temperatura dos tanques). Os ensaios foram feitos mantendo-se um sinal de corrente enviado às resistências em um valor constante.

As funções de transferência obtidas na modelagem do sistema são apresentadas nas Equações (1), (2) e (3).

$$G_{11} = \frac{-0,588}{27s+1} * \frac{1}{28s+1} \quad (1)$$

$$G_{12} = \frac{30s - 0,18}{79s + 1} * \frac{-80s + 1}{80s + 1} \quad (2)$$

$$G_{22} = \frac{-0,14}{58s+1} * \frac{1}{18s+1} \quad (3)$$

Na Figura 2 podemos observar como as funções de transferência se relacionam.

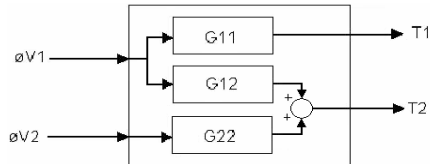


Figura 2. Relações das funções de transferência

Considerando que a maioria dos algoritmos para o cálculo de filtros (observadores) são desenvolvidos para trabalhar com uma representação em espaço de estados, representamos o sistema multivariável em espaço de estados, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Representação do sistema em espaço de estados

$$A = \begin{bmatrix} -0,0728 & -0,0423 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,0313 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,0252 & -0,0101 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0156 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,0728 & -0,0307 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0313 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,1250 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0,1250 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0,0625 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Detecção e Isolamento de Falhas

Existe uma grande variedade de técnicas FDI, pode-se ver um comparativo entre diversas técnicas em Venkatasubramanian et al. (2002) e em Venkatasubramanian et al. (2003). A técnica para FDI abordada neste trabalho é uma técnica quantitativa, baseada em modelo, utilizando observadores de estado para geração de resíduo, resíduo este que é utilizado para determinar a existência ou não de falhas no sistema.

O sistema de geração de resíduo aqui utilizado foi um banco de estimadores (observadores) detectando falhas sobre sensores. Um diagrama esquemático da configuração implementada pode ser vista na Figura 3.

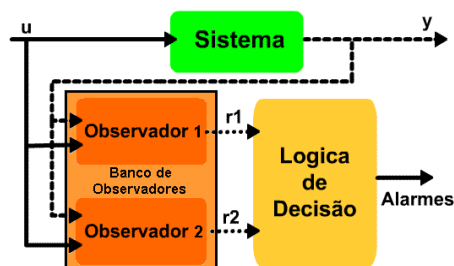


Figura 3. Esquema FDI utilizando um Banco de Observadores

Cada observador, do Banco de Observadores implementado, é guiado pelo vetor de entradas, $u(t)$, e por uma única saída, $y_i(t)$, desta forma cada observador detecta falhas sobre o sensor do qual recebe o sinal de saída. O bloco

Lógica de Decisão compara os estados estimados por ambos os observadores e isola a falha, indicando sobre qual sensor ocorreu a falha.

3.1. Banco de Observadores

O modelo matemático do observador é basicamente o mesmo que o do sistema, exceto por um termo adicional que incorpora o erro de estimação para compensar as incertezas de modelagem e o erro inicial. Este termo adicional é a matriz de ganho do observador (K_{obs}) que penaliza o erro entre a saída medida, $y(t)$, e a saída estima, $\hat{y}(t)$.

A partir do princípio da dualidade, que pode ser visto em Ogata (2003), podemos projetar um observador de estados (calcular a matriz de ganho do observador) a partir de um algoritmo desenvolvido para o cálculo de um controlador por realimentação de estados bastando utilizar o par (A^T, C^T) no lugar do par (A, B) .

Neste trabalho são utilizados observadores de ordem completa projetados por LQR (regulador quadrático linear), utilizando-se a função *lqr* do Matlab para o cálculo da matriz de ganho do observador.

Os argumentos para a função *lqr* são, além do par (A^T, C^T) , duas matrizes definidas positivas e tipicamente diagonais, normalmente denominadas de Q e R. As matrizes Q e R determinam, no caso do projeto de observadores, a importância relativa entre o seguimento de estados e a suscetibilidade a ruídos, os elementos das matrizes Q e R são definidos de tal forma que um elemento q_i seja maior que um elemento q_j quando se deseja dar prioridade ao estado x_i em relação ao estado x_j , como Stefani et al. (1994) apresentam. Os elementos de R são escolhidos de forma análoga.

Para o projeto dos observadores que serão utilizados no sistema FDI sobre a planta didática foram obtidos valores para as matrizes Q e R de forma empírica, aplicando-se um ruído branco somado a uma onda senoidal sobre o sinal de saída do sistema modelado e observando a velocidade com que os estados estimados alcançavam os estados reais bem como a suscetibilidade do observador ao ruído. Para os ruídos apresentados na Tabela 3 foram obtidas as seguintes matrizes Q e R:

Tabela 2. Matrizes Q e R obtidas para o sistema

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 200 \end{bmatrix}$$

Tabela 3. Descrição dos ruídos aplicados nos ensaios

Ampl. Max. Sinal (°C)	Ruído (%)	Ampl. Seno	Ampl. R.B.	Ampl. Max. do Ruído
36	1	0.20	0.08	0,36
36	5	1	0,4	1,8
36	10	2	0,8	3,6
36	20	4	1,6	7,2

Considerando que se deseja projetar um observador de ordem completa para cada saída, o projeto deve levar em conta uma saída de cada vez. Os comandos do Matlab, apresentados nas Equações (4) e (5), calculam os observadores que serão guiados pela saída 1 e 2, respectivamente.

$$K_{obs1}^T = \text{lqr}(A^T, C(1,:), Q, R(1,1)) \quad (4)$$

$$K_{obs2}^T = \text{lqr}(A^T, C(2,:), Q, R(2,2)) \quad (5)$$

3.2. Lógica de Decisão

A lógica de decisão consiste em comparar os estados estimados por ambos os observadores do Banco de Observadores, possibilitando desta forma identificar sobre qual sensor ocorreu a falha.

O sistema em questão tem seis estados, para este sistema os estados 1 e 2 são utilizados para verificar a ocorrência de falha no sensor 1 (temperatura do tanque de aquecimento) e os estados 4 e 6 são utilizados para verificar a ocorrência de falha no sensor 2 (temperatura do tanque de mistura).

A lógica de decisão consiste em subtrair o estado estimado pelo observador guiado pela saída 1 do estado estimado pelo observador guiado pela saída 2. Quando esta diferença ultrapassa um patamar é sinalizada uma falha. A escolha dos patamares é feita considerando-se que o sinal apresenta um ruído. Um patamar pequeno apresentará alarmes falsos e um patamar grande pode não sinalizar falhas quando estas ocorrem. Um esquema mostrando como a lógica de decisão é implementada para o estado 1 pode ser vista na Figura 4, a lógica de decisão para os outros estados é análoga.

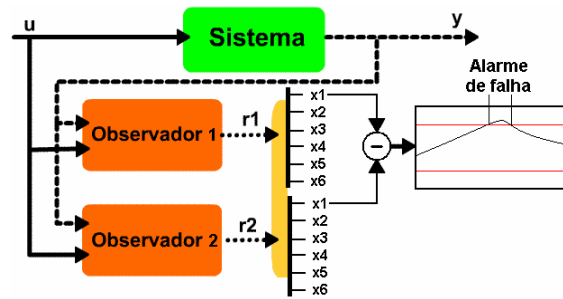


Figura 4. Lógica de isolamento de falhas

Um importante fato a ser comentado é que o modelo levantado para a planta didática não é um modelo ideal do sistema, desta forma os estados estimados pelos observadores não reconstróem os estados reais. Este problema é transposto pelo fato de que é utilizado o mesmo modelo para cada observador do Banco de Observadores, isso faz com que a comparação seja feita entre estados equivalentes, mesmo que diferentes dos estados reais.

4. Aplicação do Sistema DFI na Planta Didática

O sistema FDI projetado neste trabalho foi aplicado sobre a planta didática SMAR-PD3. Além da implementação da comunicação do Matlab com Foundation Fieldbus as únicas alterações do sistema projetado foram ajustes nos patamares da lógica de decisão. Os valores para estes patamares foram obtidos a partir de dados de simulações prévias.

Para a realização dos testes do sistema FDI sobre a planta didática foram simuladas as seguintes falhas:

- Diminuição da corrente que alimenta a resistência de aquecimento do tanque 1. Como a potência dissipada no tanque 1 foi considerada constante na modelagem, uma diminuição desta potência é vista como uma falha no sensor 1. Falha aplicada no sistema aos 2880 s.
- Abertura parcial da válvula de fundo do tanque de mistura, buscando simular um vazamento neste. Isto deve ser detectado pelo sistema FDI como uma falha no sensor 2. Falha aplicada no sistema aos 4935 s.

Na Figura 5 são apresentados gráfico relativos a detecção de falhas no sensor 1, que apresentam:

- O primeiro e o terceiro gráfico são os resíduos dos estados $\hat{x}_1$ e $\hat{x}_2$, respectivamente.
- O segundo e o quarto gráfico apresenta uma visão mais aproximada dos patamares dos gráficos 1 e 4, respectivamente.
- O quinto gráfico mostra a indicação gerada pelo “Bloco de Decisão” sobre a presença ou não de falhas no sistema, onde 0 significa sem falha e 1 significa presença de falha.

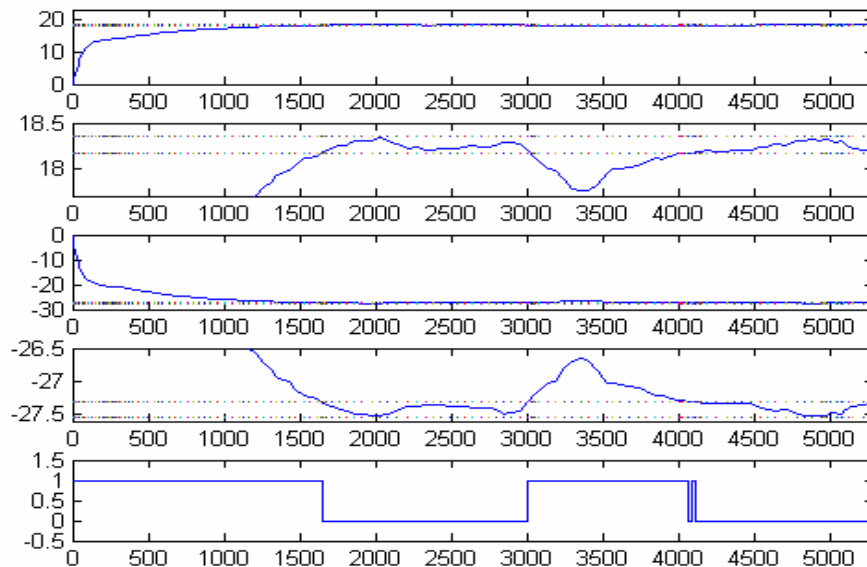


Figura 6. Gráficos da detecção de falhas sobre o sensor 1

A Figura 7 apresenta gráficos equivalentes aos apresentados na Figura 6, entretanto considerando os resíduos para o sensor 2.

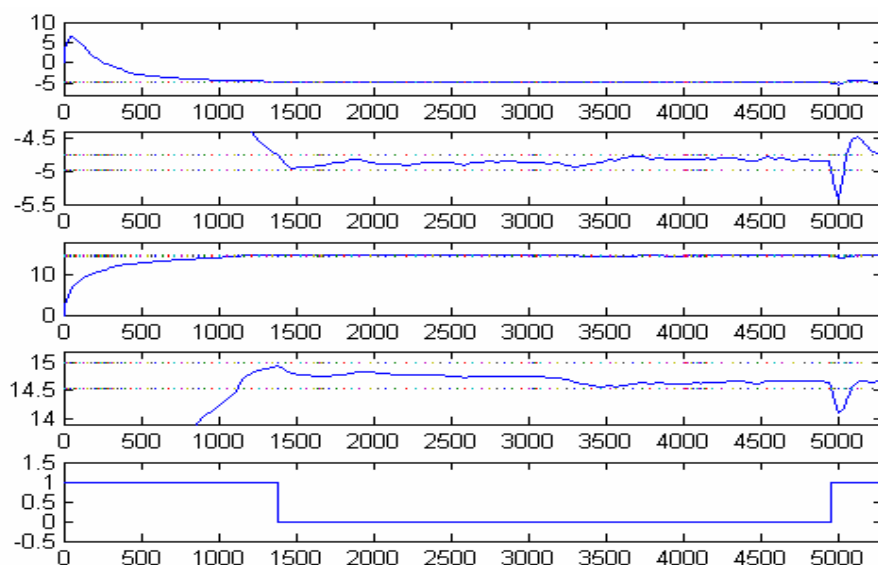


Figura 7. Gráficos da detecção de falhas sobre o sensor 2

Nos dois gráficos mostrados acima podemos observar que uma falha é sinalizada no início da simulação, esta falsa indicação de falha é devido ao ajuste dos patamares que estão calibrados para o regime permanente. É possível observar também que há um atraso de cerca de 50 segundos para a sinalização de uma falha, tempo este devido à “folga” dada ao patamar para não sinalizar ruídos como falha.

5. Conclusões

O sistema FDI implementado apresenta como principal vantagem a simplicidade. O sistema de detecção de falhas é composto de observadores de estado e o isolamento de falhas consiste na comparação entre estados estimados por saídas diferentes, possibilitando a utilização de um modelo matemático não exato do sistema, entretanto esta configuração apresenta alguns pontos negativos. Os principais aspectos negativos são a necessidade de ajustes periódicos nos patamares e a detecção de falhas somente sobre sensores (que é uma característica intrínseca da configuração implementada).

6. Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP, e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás PRH-34 ANP/MCT. Também ao Departamento de Automação e Sistema e à equipe do PRH-34 pelo apoio.

7. Referências

- LASER, M. Recent safety and environmental legislation. *Trans IchemE*, 78, 419-422, 2000.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*, 4ª ed., São Paulo, Prentice Hall, 2003.
- STEFANI, R. T., SAVANT C. J., SHAHIAN B. *Design of Feedback Control Systems*, Saunders College Publishing, 1994.
- VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, R., YIN, K., KAVURI, S. N. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods. *Computers & Chemical Engineering*, 27, 293-311, 2002.
- VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, R., YIM, K., KAVURI, S. N. A review of process fault detection and diagnosis. Part III: Process history based methods. *Computer and Chemical Engineering* 27, pag. 327-346, 2003.