

AULA 2

MODELAGEM DE FALHAS

2.1 - INTRODUÇÃO

Nesta aula serão desenvolvidos os modelos de dois sistemas dinâmicos considerando os efeitos das falhas. O objetivo de tal desenvolvimento é ter uma ferramenta de projeto e teste dos sistemas de detecção e diagnóstico de falhas que serão estudados adiante.

Serão modelados dois sistemas dinâmicos, a saber: sistema de acionamento elétrico utilizando máquina de corrente contínua (C.C.) e sistema de tanques interativos. Os modelos destes sistemas são não lineares e de ordem 3 e 2, respectivamente. Para o sistema de acionamento C.C., além do modelo contínuo é desenvolvido o modelo discreto. Serão apresentados resultados de simulações de algumas falhas modeladas.

2.2 - MODELAGEM DE FALHAS PARA O SISTEMA DE ACIONAMENTO C.C.

2.2.1 - MODELO DO SISTEMA DE ACIONAMENTO C.C.

O sistema de acionamento C.C. é composto por duas fontes de alimentação, conversores estáticos controlados, uma máquina de corrente contínua e uma carga mecânica, figura 2.1. O diagrama de blocos do sistema completo, incluindo o controle, é mostrado na figura 2.2. O controlador de velocidade, tipo proporcional integral, fornece o valor da corrente de armadura de referência. O controle da corrente da armadura é feito através da variação da tensão de alimentação. Esta tensão é função do ângulo de disparo do conversor, fornecido pelo controlador de corrente. A malha de campo, além de proporcionar o controle da corrente, permite que o sistema de acionamento opere à velocidade acima da nominal com potência constante, via enfraquecimento de campo (Bose, 1986).

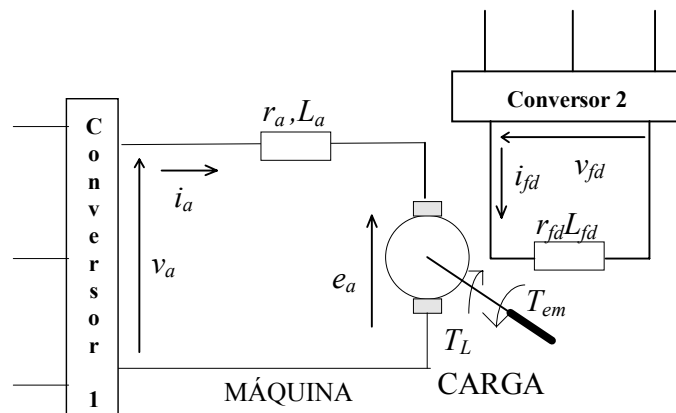


Fig. 2.1 - Representação do sistema de acionamento C.C.

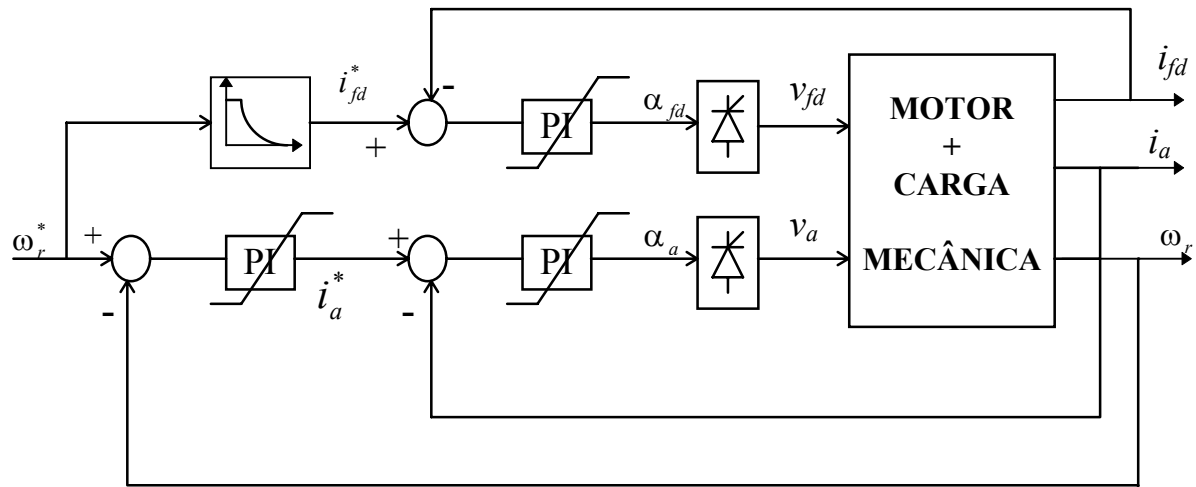


Fig. 2.2 - Diagrama de blocos do sistema de acionamento C.C.

onde

- v_a : tensão de alimentação do circuito da armadura;
- v_{fd} : tensão de alimentação do circuito de campo;
- i_a : corrente do circuito de armadura;
- i_{fd} : corrente do circuito de campo;
- ω_r : velocidade mecânica de rotação em rad/s;
- α_{fd} : ângulo de disparo do conversor do circuito de campo;
- α_a : ângulo de disparo do conversor do circuito de armadura;

sendo que as variáveis indexadas por n são referentes a valores nominais da máquina.

A corrente de campo de referência é calculada da seguinte forma:

$$i_{fd}^* = \begin{cases} i_{fd}^n, & \text{para } \omega_r^* \leq \omega_r^n \\ i_{fd}^n \cdot \frac{\omega_r^n}{\omega_r^*}, & \text{para } \omega_r^* > \omega_r^n \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.1.1 - Modelo da Máquina de Corrente Contínua

A máquina de corrente contínua possui o campo (excitação) independente da armadura, como mostrado na figura 2.1. Considerando as correntes i_a e i_{fd} e a velocidade ω_r como variáveis de estado, o modelo dinâmico para a máquina funcionando como motor é representado por:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} (v_a - r_a \cdot i_a - e_a) \\ \frac{di_{fd}}{dt} = \frac{1}{L_{fd}} (v_{fd} - r_{fd} \cdot i_{fd}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_m} (T_{em} - B_m \cdot \omega_r - T_L) \end{cases} \quad (2.2)$$

sendo

$$\begin{cases} e_a = L_{afd} \cdot i_{fd} \cdot \omega_r \\ T_{em} = L_{afd} \cdot i_{fd} \cdot i_a \end{cases} \quad (2.3)$$

onde r_a : resistência do circuito da armadura;
 r_{fd} : resistência do circuito de campo;
 L_a : indutância do circuito da armadura;
 L_{fd} : indutância do circuito de campo;
 L_{afd} : indutância mútua armadura/campo;
 e_a : força-contratromotriz da armadura;
 T_{em} : conjugado eletromagnético;
 T_L : conjugado mecânico exigido pela carga;
 B_m : coeficiente de atrito viscoso;
 J_m : momento de inércia do sistema motor/carga.

Considerando que i_a , i_{fd} e ω_r são as variáveis medidas, colocando na forma de equação de estado, tem-se o modelo contínuo para a máquina de corrente contínua, representado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_a}{L_a} & -\frac{L_{afd}}{L_a} \cdot x_3 & 0 \\ 0 & -\frac{r_{fd}}{L_{fd}} & 0 \\ \frac{L_{afd}}{J_m} \cdot x_2 & 0 & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{fd}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot [T_L] \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad \text{onde} \quad \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_{fd} \\ \omega_r \end{bmatrix}$$

Nota-se que se trata de um sistema dinâmico não linear, resultante do produto de variáveis de estado.

Um modelo discreto para o sistema acima é representado pela equação (2.5). Para obtê-lo foi usada a mesma metodologia adotada por Silvino *et alii* (1993).

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2(k) & 0 \\ 0 & a_3 & 0 \\ a_4(k) & 0 & a_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(k) \\ v_{fd}(k) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \cdot [T_L(k)] \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ y_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix}$$

onde

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = a_1(r_a, L_a) = e^{-\frac{r_a}{L_a} \cdot h} \quad a_3 = a_3(r_{fd}, L_{fd}) = e^{-\frac{r_{fd}}{L_{fd}} \cdot h} \\ a_5 = a_5(B_m, J_m) = e^{-\frac{B_m}{J_m} \cdot h} \quad a_4(k) = a_4(B_m, J_m, x_2(k)) = L_{afd} \frac{(1-a_5)}{B_m} \cdot x_2(k) \\ b_1 = b_1(r_a, L_a) = \frac{1-a_1}{r_a} \\ a_2(k) = a_2(r_a, L_a, r_{fd}, L_{fd}, x_3(k)) = \\ = \frac{1}{r_{fd} \cdot L_a - r_a \cdot L_{fd}} [L_{afd} \cdot L_{fd} \cdot (a_3 - a_1) \cdot x_3(k) + (r_a \cdot L_{fd} \cdot a_1 - r_{fd} \cdot L_a \cdot a_3)] \\ b_2 = b_2(r_{fd}, L_{fd}) = \frac{1-a_3}{r_{fd}} \quad d_1 = d_1(B_m, J_m) = -\frac{1-a_5}{B_m} \end{array} \right. \quad (2.6)$$

2.2.1.2 - Modelo da Carga Mecânica

O modelo da carga mecânica é estabelecido pela equação de conjugado. Considerou-se uma carga genérica, cujo conjugado é:

$$T_L = C_0 + C_1 \cdot \omega_r + C_2 \cdot \omega_r^2 \quad (2.7)$$

2.2.1.3 - Modelo dos Conversores Estáticos

Os dois conversores, da armadura e do circuito de campo, são tipo Ponte de Graetz a Tiristor. É adotado o modelo estático para calcular a tensão de saída em função do ângulo de disparo (Bose, 1996):

$$\begin{aligned} v_a &= 2.34V_{oa} \cos \alpha_a \\ v_{fd} &= 2.34V_{ofd} \cos \alpha_{fd} \end{aligned} \quad (2.8)$$

sendo V_{oa} e V_{ofd} os valores eficazes das tensões nas entradas dos conversores da armadura e campo, respectivamente.

2.2.2 - MODELAGEM DAS FALHAS PARA O SISTEMA DE ACIONAMENTO C.C.

Do ponto de vista de classificação de falhas, o sistema de acionamento C.C. pode ser dividido em três grandes grupos: atuadores (conversores da armadura e do campo); planta ou processo (máquina e carga mecânica) e sensores (medidores de corrente e velocidade). Serão abordadas falhas relacionadas a estes três grupos.

2.2.2.1 - Falhas em Atuadores

O número de falhas que podem ocorrer nos conversores estáticos é muito grande, como, por exemplo, queima de componentes nos circuitos de potência e comando. Mas, do ponto de vista da máquina, as duas falhas mais graves são curto-circuito e desconexão do conversor. Estas falhas podem ser modeladas pelas chaves ideais CH_{aa} , CH_{afd} , CH_{cca} e CH_{ccfd} , figura 2.3.

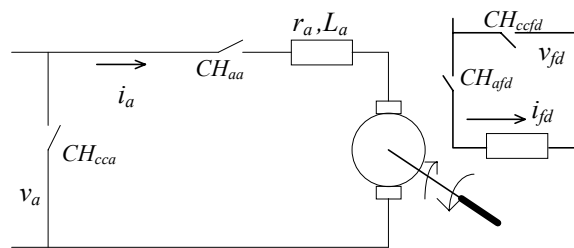


Fig. 2.3 - Representação do sistema de acionamento C.C. para falhas nos atuadores.

Associando os parâmetros:

- $k_{aa} \in \{0,1\}$ $\{ 0 \}$ indica a desconexão do conversor da armadura;
- $k_{afd} \in \{0,1\}$ $\{ 0 \}$ indica a desconexão do conversor do campo;
- $k_{cca} \in \{0,1\}$ $\{ 1 \}$ indica curto-circuito do conversor da armadura;
- $k_{ccfd} \in \{0,1\}$ $\{ 1 \}$ indica curto-circuito do conversor do campo;

aos estados das chaves, tal que:

- $k_i=0$ se CH_i estiver aberta e
- $k_i=1$ se CH_i estiver fechada, $i=aa, afd, cca$ e $ccfd$.

Considerando que uma falta de alimentação é caracterizada por uma corrente e um curto-circuito, por uma tensão nula, tem-se o modelo para falhas no circuito de alimentação da máquina dado por (2.9).

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{aa} \cdot a_1 & k_{aa} \cdot a_2(k) & 0 \\ 0 & k_{afd} \cdot a_3 & 0 \\ a_4(k) & 0 & a_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{aa} \cdot \bar{k}_{cca} \cdot v_a(k) \\ k_{afd} \cdot \bar{k}_{cfd} \cdot v_{fd}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \cdot [T_L(k)]$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ y_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} \text{ onde } \bar{k}_i = 1 - k_i \quad (3.9)$$

2.2.2.2 - Falhas em Componentes da Planta

As falhas no conjunto máquina/carga consideradas são: curto-circuito entre espiras na bobina da armadura; curto-circuito entre espiras na bobina do campo; falha no sistema de ventilação e falha de lubrificação. As duas primeiras podem ser modeladas por variações nas resistências e indutâncias da armadura e do campo. Estas variações são modeladas pelos parâmetros:

$k_{ca}^{r_a} \in [0,1]$ indica a variação na resistência r_a quando ocorre curto-circuito na bobina da armadura;

$k_{ca}^{L_a} \in [0,1]$ indica a variação na indutância L_a quando ocorre curto-circuito na bobina da armadura;

$k_{cfd}^{r_{fd}} \in [0,1]$ indica a variação na resistência r_{fd} quando ocorre curto-circuito na bobina do campo;

$k_{cfd}^{L_{fd}} \in [0,1]$ indica a variação na indutância L_{fd} quando ocorre curto-circuito na bobina do campo.

A falha no sistema de ventilação se traduz em variações das resistência da armadura e do campo, provocadas pela elevação de temperatura da máquina. Já uma má lubrificação dos mancais, falha de lubrificação, pode ser modelada por uma variação do coeficiente de atrito.

Os parâmetros que representam estas duas falhas são:

$k_{fv}^{r_a}$ indica a variação na resistência r_a quando ocorre falha no sistema de ventilação;

$k_{fv}^{r_{fd}}$ indica a variação na resistência r_{fd} quando ocorre falha no sistema de ventilação;

k_{fl} indica a variação no coeficiente de atrito, B_m , quando ocorre falha de lubrificação dos mancais.

O modelo que incorpora somente as falhas em componentes da planta é composto pelas equações de (2.5) a (2.8), onde, no cálculo dos coeficientes de (2.6), a_1 , $a_2(k)$, a_3 , $a_4(k)$, b_1 , b_2 e d_1 , os parâmetros nominais são substituídos por (2.10).

$$\begin{cases} r_a^f = k_{ca}^{r_a} . k_{fv}^{r_a} . r_a \\ L_a^f = k_{ca}^{L_a} . L_a \\ r_{fd}^f = k_{efd}^{r_{fd}} . k_{fv}^{r_{fd}} . r_{fd} \\ L_{fd}^f = k_{efd}^{L_{fd}} . L_{fd} \\ B_m^f = k_{fi} . B_m \end{cases} \quad (2.10)$$

2.2.2.3 - Falhas de Instrumentação

Aqui são consideradas falhas bruscas (desligamentos) dos sensores de corrente (armadura e campo) e de velocidade, modeladas pelos parâmetros:

$$k_{i_a}^f \in \{0,1\} \quad \{ 1 \} \text{ indica falha no sensor da corrente da armadura;}$$

$$k_{i_{fd}}^f \in \{0,1\} \quad \{ 1 \} \text{ indica falha no sensor da corrente do campo;}$$

$$k_{\omega_r}^f \in \{0,1\} \quad \{ 1 \} \text{ indica falha no sensor de velocidade da máquina.}$$

Com relação ao modelo das falhas nos sensores, este difere do modelo representado pelas equações (2.5) a (2.8) somente com relação à equação de saída, que passa a ser calculada por:

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ y_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{k}_{i_a}^f & 0 & 0 \\ 0 & \bar{k}_{i_{fd}}^f & 0 \\ 0 & 0 & \bar{k}_{\omega_r}^f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} \quad \text{onde } \bar{k}_i = 1 - k_i \quad (2.11)$$

2.2.3 - Modelo Geral das Falhas no Sistema de Acionamento C.C.

Considerando os dois tipos de falhas abordados anteriormente, tabela 1, tem-se o modelo completo dado por (2.12), (2.6), (2.7) e (2.8). O circuito representativo deste modelo é mostrado na figura 2.3.

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{aa} \cdot a_1^f & k_{aa} \cdot a_2^f(k) & 0 \\ 0 & k_{af} \cdot a_3^f & 0 \\ a_4^f(k) & 0 & a_5^f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1^f & 0 \\ 0 & b_2^f \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{aa} \cdot \bar{k}_{cca} \cdot v_a(k) \\ k_{af} \cdot \bar{k}_{ccfd} \cdot v_{fd}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d_1^f \end{bmatrix} [T_L(k)]$$

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{k}_{i_a}^f & 0 & 0 \\ 0 & \bar{k}_{i_{fd}}^f & 0 \\ 0 & 0 & \bar{k}_{\omega_r}^f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} \text{ onde } \bar{k}_i = 1 - k_i \quad (3.12)$$

sendo que os coeficientes indexados pelo sobrescrito “f” são calculados substituindo os parâmetros nominais da máquina por (2.10).

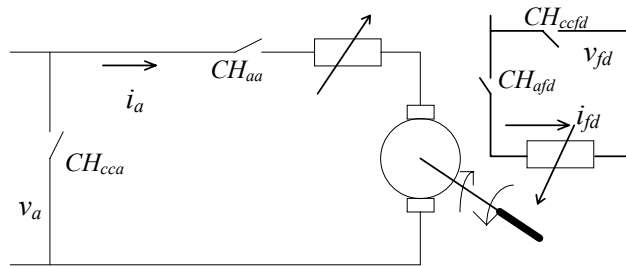


Fig. 2.4 - Representação do sistema de acionamento C.C. para os diversos tipos de falhas.

Tabela 1: Resumo das falhas no sistema de acionamento C.C.

Tipo de Falha	Variáveis Afetadas	Parâmetros Indicadores da Falha	Definição dos Parâmetros
abertura da bobina da armadura	$i_a=0$	k_{aa}	$\{0, 1\}$
abertura da bobina de campo	$i_{fd}=0$	k_{af}	$\{0, 1\}$
curto-circuito do conversor da armadura	$v_a=0$	k_{cFa}	$\{0, 1\}$
curto-circuito do conversor do campo	$v_{fd}=0$	k_{cFd}	$\{0, 1\}$
curto-circuito entre espiras da bobina de armadura	r_a e L_a	k_{ca}^r e k_{ca}^L	$[0, 1]$
curto-circuito entre espiras da bobina de campo	r_{fd} e L_{fd}	$k_{cf}^{r_{fd}}$ e $k_{cf}^{L_{fd}}$	$[0, 1]$
falha no sistema de ventilação	r_a e r_{fd}	k_{fv}^r e $k_{fv}^{r_{fd}}$	$[1, \infty)$
falha de lubrificação dos mancais	B_m	k_{fl}	$[0, \infty)$
falha no sensor de corrente da armadura	i_a	$k_{i_a}^f$	
falha no sensor de corrente da fonte	i_{fd}	$k_{i_{fd}}^f$	$\{0, 1\}$
falha no sensor de velocidade	ω_r	$k_{\omega_r}^f$	$\{0, 1\}$

2.2.4 - RESULTADOS DE SIMULAÇÕES DO SISTEMA DE ACIONAMENTO C.C.

As figuras 2.5, 2.6 e 2.7 mostram as curvas de correntes de campo e de armadura e velocidade para a partida da máquina com ocorrência de falhas. As falhas simuladas foram: abertura da armadura; abertura do campo e falha no sensor de velocidade. Uma desconexão do conversor da armadura provoca a parada da máquina, pois, com a corrente de armadura nula, o conjugado eletromagnético também se anula. Já a corrente de campo não é afetada, porque o circuito de campo é independente, figura 2.5. A desconexão do conversor do campo provoca a parada da máquina e, com isto, um aumento da corrente de armadura, que fica limitada somente pela resistência r_a , porque a força-contratromotriz se anula com a velocidade, conforme expressão (2.3). Quando ocorre uma falha no sensor de velocidade, indicando valor nulo, o controlador fornece uma ação de controle, solicitando uma corrente de armadura de referência maior, para efetuar a correção do erro. No instante da ocorrência da falha o sistema estava funcionando em condição nominal; isto impede que a corrente de armadura acompanhe o aumento da referência, pois a tensão de armadura não pode ser aumentada e nem ocorreu redução de força-contratromotriz.

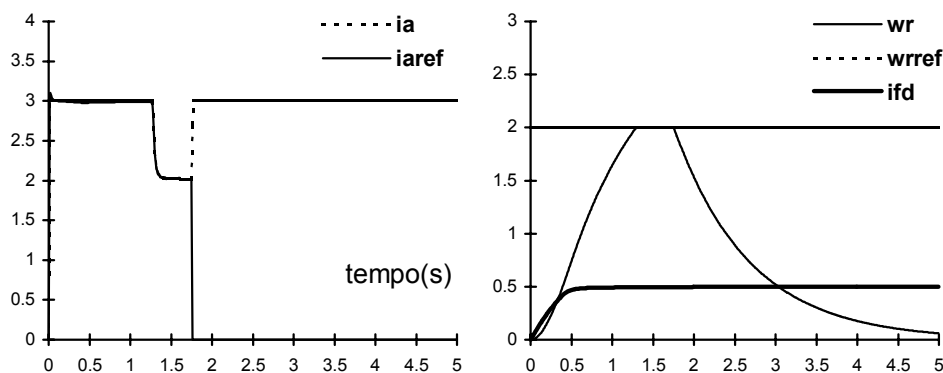
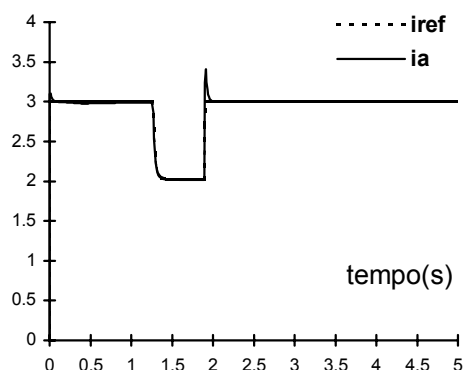


Fig. 2.5 - Simulação da desconexão do conversor da armadura



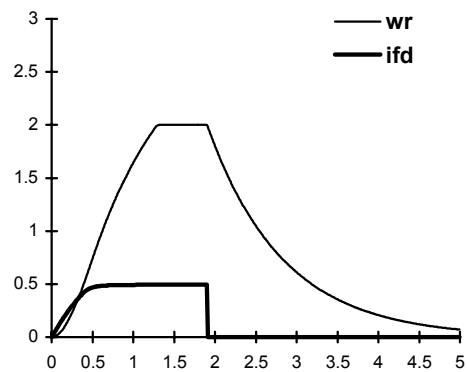


Fig. 2.6 - Simulação da desconexão do conversor de campo

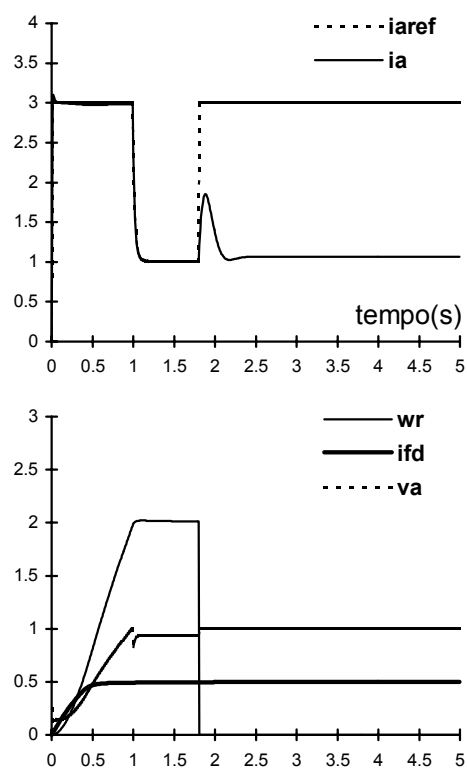


Fig. 2.7 - Simulação de falha no sensor de velocidade

2.3 - MODELAGEM DE FALHAS PARA O SISTEMA DE TANQUES INTERATIVOS

A modelagem de falhas apresentada neste item foi desenvolvida e validada por Pereira (1996). Boa parte do texto apresentado neste item foi retirada do referido trabalho, sendo que as equações foram escritas de forma mais compacta.

2.3.1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A descrição detalhada do Sistema de Tanques Interativos (ou acoplados)-STI, do Laboratório de Controle de Processos Industriais do CPDEE-UFMG, está presente em (Jota et alli, 1995; Braga, 1994). A figura 2.8 mostra o diagrama simplificado do sistema. Um microcomputador PC386 executa o software de supervisão e controle, ligado a um Controlador Lógico Programável (PLC), através de uma porta serial RS-232. O PLC é encarregado da aquisição de dados das variáveis do processo, de atuar na planta de acordo com os dados fornecidos pelo microcomputador, além de executar o controle lógico do intertravamento necessário para o funcionamento correto do sistema. Entre o PLC e a planta há um painel de operação que permite, além da visualização das variáveis, o controle lógico e a operação manual do processo.

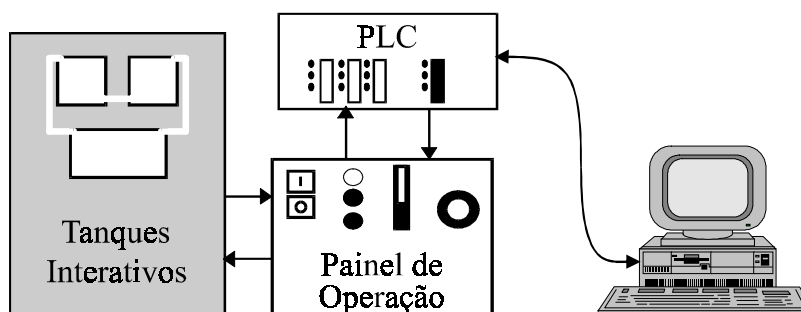


Fig. 2.8 - Diagrama de blocos do Sistema de Tanques Interativos (Braga, 1994)

A figura 2.9 mostra o diagrama do fluxo de massa nos Tanques Interativos. O objetivo é controlar o nível do tanque TQ-3, h_3 , e a sua vazão de saída, q_o . O ciclo de operação do sistema consiste no bombeamento da água do tanque TQ-1 para o tanque TQ-2 através da bomba BA-1. A água flui para o tanque TQ-3 através do princípio dos vasos comunicantes; a intensidade deste acoplamento é controlada através das válvulas FV-3 e FV-4 (a válvula FV-5 fica permanentemente fechada durante o funcionamento normal). O ciclo se completa com o bombeamento da água do TQ-3 de volta para o TQ-1 através da bomba BA-2. Com isto, o controle do nível no tanque TQ-3 é feito a partir da atuação da válvula pneumática FCV-1, que controla a vazão de entrada de TQ-2, conseqüentemente, controla a vazão de entrada de TQ-3. Já a vazão de saída de TQ-3 é controlada atuando-se na válvula pneumática FCV-2.

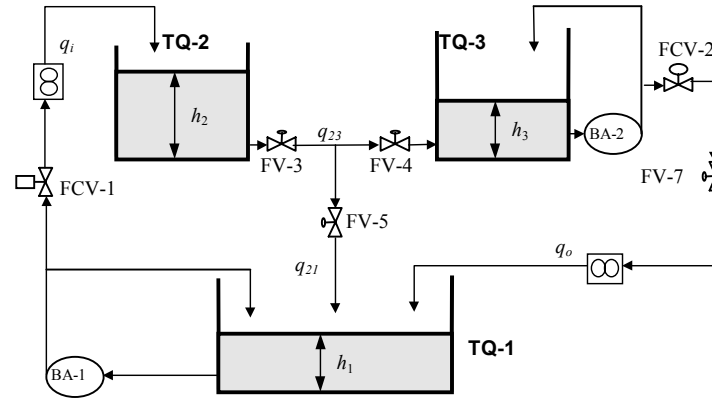


Fig. 2.9 - Fluxo de massa nos Tanques Interativos

2.3.2 - MODELO DO SISTEMA DE TANQUES INTERATIVOS

O modelo matemático do sistema de tanques interativos é obtido a partir do balanço de massa entre os tanques TQ-2 e TQ-3 e utilizando a Lei de Bernouli (Braga, 1994). Tomando-se: $x_1 = h_2$, $x_2 = h_3$, $y_1 = h_3$, $y_2 = q_o$ e $y_3 = q_i$, o modelo do sistema é dado por:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} [q_i(R_1, u_1, p_1) - q_{23}(x_1, x_2)] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} [q_{23}(x_1, x_2) - q_o(R_2, u_2, p_2)] \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} y_1 = x_2 \\ y_2 = q_o(R_2, u_2, p_2) \\ y_3 = q_i(R_1, u_1, p_1) \end{cases} \quad (2.14)$$

onde

$$\begin{cases} q_i(R_1, u_1, p_1) = Q_{i \max} \cdot q_f(R_1, u_1, p_1) \\ q_o(R_2, u_2, p_2) = Q_{o \max} \cdot q_f(R_2, u_2, p_2) \\ q_{23}(x_1, x_2) = \frac{\sqrt{x_1 - x_2}}{R_h} \end{cases} \quad (2.15a)$$

a expressão usada para calcular a vazão q_f (Pereira, 1996) foi:

$$q_f(R_i, u_i, p_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{R_i^{2((u_i-1))}} - 1 \right) \cdot p_i}} \quad (2.15b)$$

sendo $q_o(R_2, u_2, p_2)$: vazão de saída do tanque TQ-3, em m^3/s ;
 $q_i(R_1, u_1, p_1)$: vazão de entrada do tanque TQ-2, em m^3/s ;
 $q_{23}(x_1, x_2)$: vazão entre os tanques TQ-2 e TQ-3, em m^3/s ;
 $q_f(R_i, u_i, p_i)$: vazão fracionária da válvula “i”;
 Q_{imax} : vazão máxima de entrada do tanque TQ-2, em m^3/s ;
 Q_{omax} : vazão máxima de saída do tanque TQ-3, em m^3/s ;
 A : área da base dos tanques TQ-2 e TQ-3;
 R_1 : representa o alcance da válvulas FCV-1;
 R_2 : representa o alcance da válvulas FCV-2;
 p_1 : razão entre a queda de pressão mínima e máxima da válvula FCV-1;
 p_2 : razão entre a queda de pressão mínima e máxima da válvula FCV-2;
 R_h : resistência hidráulica do duto entre os tanques;
 u_1 : sinal de controle fracionário da válvula FCV-1;
 u_2 : sinal de controle fracionário da válvula FCV-2.

As variáveis de controle u_1 e u_2 indicam as posições fracionárias dos eixos das válvulas FCV-1 e FCV-2, respectivamente, ou seja indicam a abertura ou fechamento das mesmas. Estas grandezas são determinadas a partir do sistema de controle como mostrado na figura 2.10.

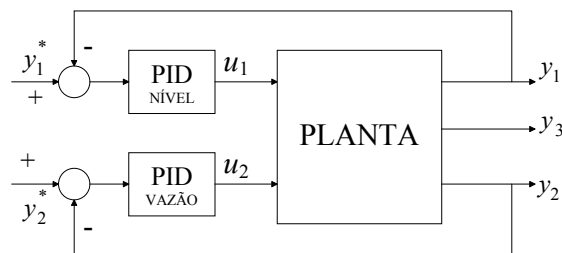


Fig. 2.10 - Diagrama de blocos do sistema de controle

2.3.3 - MODELAGEM DE FALHAS PARA O SISTEMA DE TANQUES INTERATIVOS

2.3.3.1 - Falha dos Atuadores

As falhas nos atuadores modeladas foram: *falhas nas válvulas FCV-1 e FCV-2 e nas bombas BA-1 e BA-2*. No caso das válvulas a falha mais comum é o agarramento, isto é, a válvula fica presa numa certa posição, não mais respondendo aos comandos do controlador. A modelagem desta falha é feita fixando-se o valor da vazão da válvula, que depende da posição fracionária do eixo da válvula na qual ocorreu o agarramento, u_{a1} para a válvula FCV-1 e u_{a2} para FCV-2. Portanto, tem-se:

$$q_i^{fcv1}(R_1, u_1, p_1) = Q_{imax} \cdot q_f(R_1, u_{a1}, p_1) = q_{a1} \quad (2.16)$$

para falha na válvula FCV-1 e

$$q_o^{fcv2}(R_2, u_2, p_2) = Q_{omax} \cdot q_f(R_2, u_{a2}, p_2) = q_{a2} \quad (2.17)$$

para falha em FCV-2.

Já para as bombas, a falha mais comum é a interrupção do funcionamento (por um defeito mecânico ou elétrico). Esta falha pode ser realizada desligando a bomba no painel de controle (modo manual). Para a bomba BA-1, a falha é modelada fazendo a vazão de entrada igual a zero, ou seja:

$$q_i^{fa1}(R_1, u_1, p_1) = 0 \quad (2.18)$$

para falha de desligamento da bomba BA-1.

No caso da bomba BA-2, a vazão de saída só será nula se o nível do TQ-03 for inferior à altura ao ponto de tomada de água da bomba, h_{ba2} . Caso contrário, haverá uma vazão de saída, por efeito da gravidade, até que estes níveis se igualem. Esta vazão é dependente do nível e da abertura da válvula e é dada por:

$$q_o^{fa2}(R_2, u_2, p_2, x_2) = \begin{cases} 0 & \text{se } x_2 \leq h_{ba2} \\ \frac{\sqrt{x_2 - h_{ba2}}}{R_{hb31}} \cdot R_2^{(u_2-1)} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.19)$$

Com isto, o modelo do sistema de tanques interativos que incorpora as falhas dos atuadores é dado por:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} [q_i^{fa}(R_1, u_1, p_1) - q_{23}(x_1, x_2)] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} [q_{23}(x_1, x_2) - q_o^{fa}(R_2, u_2, p_2, x_2)] \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} y_1 = x_2 \\ y_2 = q_o^{fa}(R_2, u_2, p_2, x_2) \\ y_3 = q_i^{fa}(R_1, u_1, p_1) \end{cases} \quad (2.21)$$

sendo

$$\begin{cases} q_i^{fa}(R_1, u_1, p_1) = \bar{k}_{fba1} \cdot Q_{imax} \cdot [\bar{k}_{fcv1} \cdot q_f(R_1, u_1, p_1) + k_{fcv1} \cdot q_{a1}] \\ q_o^{fa}(R_2, u_2, p_2, x_2) = Q_{omax} \cdot \left[\bar{k}_{fba2} \cdot (\bar{k}_{fcv2} \cdot q_f(R_2, u_2, p_2) + k_{fcv2} \cdot q_{a2}) + k_{fba2} \cdot K_{b2} \cdot \frac{\sqrt{x_2 - h_{ba2}}}{Q_{omax} \cdot R_{hb31}} \cdot R_2^{(u_2-1)} \right] \end{cases} \quad (2.22)$$

onde $\bar{k}_{fcv1} = 1 - k_{fcv1}$ e $k_{fcv1} \in \{0,1\}$ indica a falha na válvula FCV-1;

$$\begin{aligned}\bar{k}_{fcv2} &= 1 - k_{fcv2} \text{ e } k_{fcv2} \in \{0,1\} \text{ indica a falha na válvula FCV-2;} \\ \bar{k}_{fba1} &= 1 - k_{fba1} \text{ e } k_{fba1} \in \{0,1\} \text{ indica a falha na bomba BA-1;} \\ \bar{k}_{fba2} &= 1 - k_{fba2} \text{ e } k_{fba2} \in \{0,1\} \text{ indica a falha na bomba BA-2;}\end{aligned}$$

$$K_{b2} = \begin{cases} 0 & \text{se } x_2 \leq h_{ba2} \\ 1 & \text{se } x_2 > h_{ba2} \end{cases}$$

2.3.3.2 - Falha nos Componentes do Sistema

As falhas modeladas foram: *entupimentos e vazamentos* nos dutos de conexão entre tanques. Os entupimentos considerados foram: no duto de entrada de TQ-2, no duto de saída de TQ-3 e no duto de conexão TQ-2 e TQ-3. O vazamento modelado também é entre TQ-2 e TQ-3.

O *entupimento* de um duto provoca um aumento da sua resistência hidráulica, conseqüentemente, provoca uma redução da vazão no mesmo. Os entupimentos no duto de entrada de TQ-2, no duto de saída de TQ-3 e no duto de ligação de TQ-2 e TQ-3 foram modelados multiplicando-se as vazões $q_i(R_1, u_1, p_1)$, $q_o(r_2, u_2, p_2)$ e $q_{23}(x_1, x_2)$ por parâmetros definidos no intervalo [0, 1].

Já o *vazamento* entre os tanques TQ-2 e TQ-3 pode ser modelado considerando-se que o fluxo de água no vazamento do duto é composto por uma parte de origem de TQ-2 e por uma parte de origem de TQ-3. Como no sistema real esta falha é simulada abrindo a válvula FV-5, a cada uma destas componentes são atribuídas resistências hidráulicas similares à resistência entre TQ-2 e TQ-3. A vazão que escoar por razão do vazamento pode ser determinada pelo nível, h_i , de cada tanque. Com isto, tem-se o modelo do sistema para falhas nos componentes:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} \left[q_i^{fc}(R_1, u_1, p_1) - q_{23}^{fc}(x_1, x_2) - \frac{\sqrt{x_1}}{R_{hv21}} \cdot k_{fv23} \right] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} \left[q_{23}^{fc}(x_1, x_2) - q_o^{fc}(R_2, u_2, p_2) - \frac{\sqrt{x_2}}{R_{hv31}} \cdot k_{fv23} \right] \end{cases} \quad (2.23)$$

$$\begin{cases} y_1 = x_2 \\ y_2 = q_o^{fc}(R_2, u_2, p_2) \\ y_3 = q_i^{fc}(R_1, u_1, p_1) \end{cases} \quad (2.24)$$

sendo

$$\begin{cases} q_i^{fc}(R_1, u_1, p_1) = \bar{k}_{fe12} \cdot Q_{imax} \cdot q_f(R_1, u_1, p_1) \\ q_o^{fc}(R_2, u_2, p_2) = \bar{k}_{fe31} \cdot Q_{omax} \cdot q_f(R_2, u_2, p_2) \\ q_{23}^{fc}(x_1, x_2) = \bar{k}_{fe23} \frac{\sqrt{x_1 - x_2}}{R_h} \end{cases} \quad (2.25)$$

onde $\bar{k}_{fe12} = 1 - k_{fe12}$ e $k_{fe12} \in [0,1]$. Indica o entupimento no duto entre TQ-1 e TQ-2;

$\bar{k}_{fe31} = 1 - k_{fe31}$ e $k_{fe31} \in [0,1]$. Indica o entupimento no duto entre TQ-3 e TQ-1;

$\bar{k}_{fe23} = 1 - k_{fe23}$ e $k_{fe23} \in [0,1]$. Indica o entupimento no duto entre TQ-2 e TQ-3.

$k_{fv23} \in [0,1]$. Indica o vazamento no duto entre TQ-2 e TQ-3.

Estes parâmetros não só indicam a presença da falha mas também a sua intensidade.

2.3.3.3 - Falha de Instrumentação

As variáveis de saída y_2 e y_3 são medidas utilizando-se sensores de vazão do tipo turbina, e y_1 , sensor de nível tipo célula de carga. Para estes sensores foram consideradas somente falhas bruscas. No caso do sensor de nível, falhas bruscas podem ser causadas pela queda da linha de transmissão do sinal para o PLC ou pela desconexão do tubo de ar da cápsula da célula de carga. Já as falhas bruscas dos sensores de vazão podem ocorrer pela queda da linha de transmissão do sinal, pelo agarramento da turbina ou mesmo pela obstrução do feixe de luz infravermelho usado na medição.

Estas falhas podem ser modeladas da seguinte forma:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} [q_i(R_1, u_1, p_1) - q_{23}(x_1, x_2)] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} [q_{23}(x_1, x_2) - q_o(R_2, u_2, p_2)] \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} y_1 = k_{fv1} \cdot x_2 \\ y_2 = k_{fv2} \cdot q_o(R_2, u_2, p_2) \\ y_3 = k_{fv3} \cdot q_i(R_1, u_1, p_1) \end{cases} \quad (2.27)$$

onde $k_{fv1} \in \{0,1\}$ indica falha no sensor de nível;

$k_{fv2} \in \{0,1\}$ indica falha no sensor de vazão de saída;

$k_{fv3} \in \{0,1\}$ indica falha no sensor de vazão de entrada.

2.3.4 - MODELO GERAL DAS FALHAS NO SISTEMA DE TANQUES INTERATIVOS

Utilizando o desenvolvimento feito nos itens anteriores e incorporando algumas consideração práticas sobre a planta real, como ruído de medição e proteção (Braga, 1994; Pereira, 1996), chega-se ao modelo geral dado por (2.52) a (2.57). Com relação à proteção, esta ocorre quando o nível do tanque TQ-2 atingir o nível máximo e quando o nível do tanque TQ-3 atingir um valor de 4% do nível máximo. Para a primeira situação a bomba BA-1 é desligada. Já para a segunda situação a bomba BA-2 é desligada, provocando uma elevação do nível até 6% do máximo quando a bomba é religada.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{A} \left[q_i^f(R_1, u_1, p_1) - q_{23}^f(x_1, x_2) - \frac{\sqrt{x_1}}{R_{hv21}} \cdot k_{fv23} \right] \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{A} \left[q_{23}^f(x_1, x_2) - q_o^f(R_2, u_2, p_2, x_2) - \frac{\sqrt{x_2}}{R_{hv31}} \cdot k_{fv23} \right] \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\begin{cases} y_1 = k_{fv1} \cdot x_2 + r_{y_1} \\ y_2 = k_{fv2} \cdot q_o^f(R_2, u_2, p_2, x_2) + r_{y_2} \\ y_3 = k_{fv3} \cdot q_i^f(R_1, u_1, p_1) + r_{y_3} \end{cases} \quad (2.29)$$

sendo

$$\begin{cases} q_i^f(R_1, u_1, p_1) = Q_{imax} \bar{k}_{fe12} \cdot \bar{k}_{fba1} \left[\bar{k}_{fcv1} \cdot q_f(R_1, u_1, p_1) + k_{fcv1} \cdot q_{a1} \right] \\ q_o^f(R_2, u_2, p_2, x_2) = Q_{omax} \bar{k}_{fe31} \cdot \left[\bar{k}_{fba2} \cdot \left(\bar{k}_{fcv2} \cdot q_f(R_2, u_2, p_2) + k_{fcv2} \cdot q_{a2} \right) - k_{fba2} \cdot K_{b2} \cdot \frac{\sqrt{x_2 - h_{hba2}}}{Q_{omax} \cdot R_{hb31}} \cdot R_2^{(u_2-1)} \right] \\ q_{23}^f(x_1, x_2) = \bar{k}_{fe23} \cdot \frac{\sqrt{x_1 - x_2}}{R_h} \\ q_f(R_i, u_i, p_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{R_i^{2((u_i-1))}} - 1 \right) \cdot p_i}} \end{cases} \quad (2.30)$$

onde r_{y_1} , r_{y_2} e r_{y_3} são variáveis aleatórias de distribuição uniforme, média nula e amplitude máxima $a_1=0,075\% \cdot x_{2max}$, $a_2 = 0,25\% Q_{omax}$ e $a_3=0,5\% Q_{imax}$, respectivamente. Estas variáveis foram incluídas no modelo para simular o efeito do ruído de medição observado (Pereira, 1996).

As condições de intertravamento são modeladas pelas constantes da seguinte forma:

$$k_{fba1} = \begin{cases} 1 & \text{se } x_1 > x_{1max} \text{ ou se ocorrer falha na bomba BA1} \\ 0 & \text{se } x_1 \leq x_{1max} \text{ se não ocorrer falha na bomba BA1} \end{cases} \quad (2.31)$$

$$k_{fba2} = \begin{cases} 1 & \text{se } x_2 \leq 0.04 \cdot x_{2max} \text{ ou se ocorrer falha na bomba BA2} \\ 0 & \text{se } x_2 \geq x_{2max} \text{ se não ocorrer falha na bomba BA2} \end{cases} \quad (2.32)$$

$$K_{b2} = \begin{cases} 0 & \text{se } x_2 \leq h_{ba2} \\ 1 & \text{se } x_2 > h_{ba2} \end{cases} \quad (2.33)$$

Com este modelo é possível simular as diversas falhas resumidas na tabela 2.

Tabela 2: Tipo de falhas no sistema de tanques interativos

Tipo de Falha	Parâmetro Indicador da Falha	definição do Parâmetro
agarramento da válvula CV-1	k_{fcv1}	{0,1}
agarramento da válvula CV-2	k_{fcv2}	{0,1}
desligamento da bomba BA-01	k_{ba1}	{0,1}
desligamento da bomba BA-02	k_{ba2}	{0,1}
entupimento no duto entre TQ-1 e TQ-2	k_{fe12}	[0,1]
entupimento no duto entre TQ-3 e TQ-1	k_{fe31}	[0,1]
entupimento no duto entre TQ-2 e TQ-3	k_{fe23}	[0,1]
vazamento no duto entre TQ-2 e TQ-3	k_{fv23}	[0,1]
falha no sensor de nível de TQ-3	k_{fy1}	{0,1}
falha no sensor de vazão de saída de TQ-3	k_{fy2}	{0,1}
Falha no sensor de vazão de entrada de TQ-2	k_{fy3}	{0,1}

2.3.5 - RESULTADOS DE SIMULAÇÕES DE FALHAS NO SISTEMA DE TANQUES INTERATIVOS

A figura 2.11 mostra as curvas das variáveis de entrada, sinais de controle, e saída do sistema de tanques interativos quando ocorre um entupimento no duto de conexão de TQ-3 para TQ-1 em $t=500$ segundos. A intensidade do entupimento é $k_{fe31}=0,79$. Na prática essa situação pode ser efetuada através do fechamento da válvula FV-7. Quando ocorre o entupimento o controlador de vazão de saída de TQ-3 tende a compensar o efeito abrindo mais a válvula FCV-2. Para este caso simulado, a vazão máxima de água que pode fluir na tubulação é inferior à vazão desejada para compensar o efeito do entupimento, valor do *setpoint*, com isto a malha de vazão não é controlada. Nota-se que a vazão de entrada de TQ-2 também sofreu redução, para permitir o controle de nível de TQ-3, via fechamento da válvula FCV-1. Para entupimentos de menor intensidade, por exemplo $k_{fe31}=0,11$, a vazão de saída de TQ-3 não é alterada, figura 2.12. A figura 2.13 mostra a situação onde ocorre uma falha no sensor de

vazão de saída, interrupção total do sinal transmitido do sensor para o PLC. Após a ocorrência da falha a leitura do sensor de vazão FE-2 é nula. Isto faz com que o controlador de vazão abra a válvula FCV-1 para tentar fazer com que a vazão medida seja igual ao *setpoint*. Isto acarreta um aumento da vazão de saída real, que não é o valor medido, e conseqüentemente aumenta a vazão de entrada de TQ-2, para efetuar o controle do nível de TQ-3. Outros resultados simulados com o modelo são apresentados em (Pereira, 1996; Camargo, 1997), onde também são apresentados resultados experimentais obtidos na planta piloto.

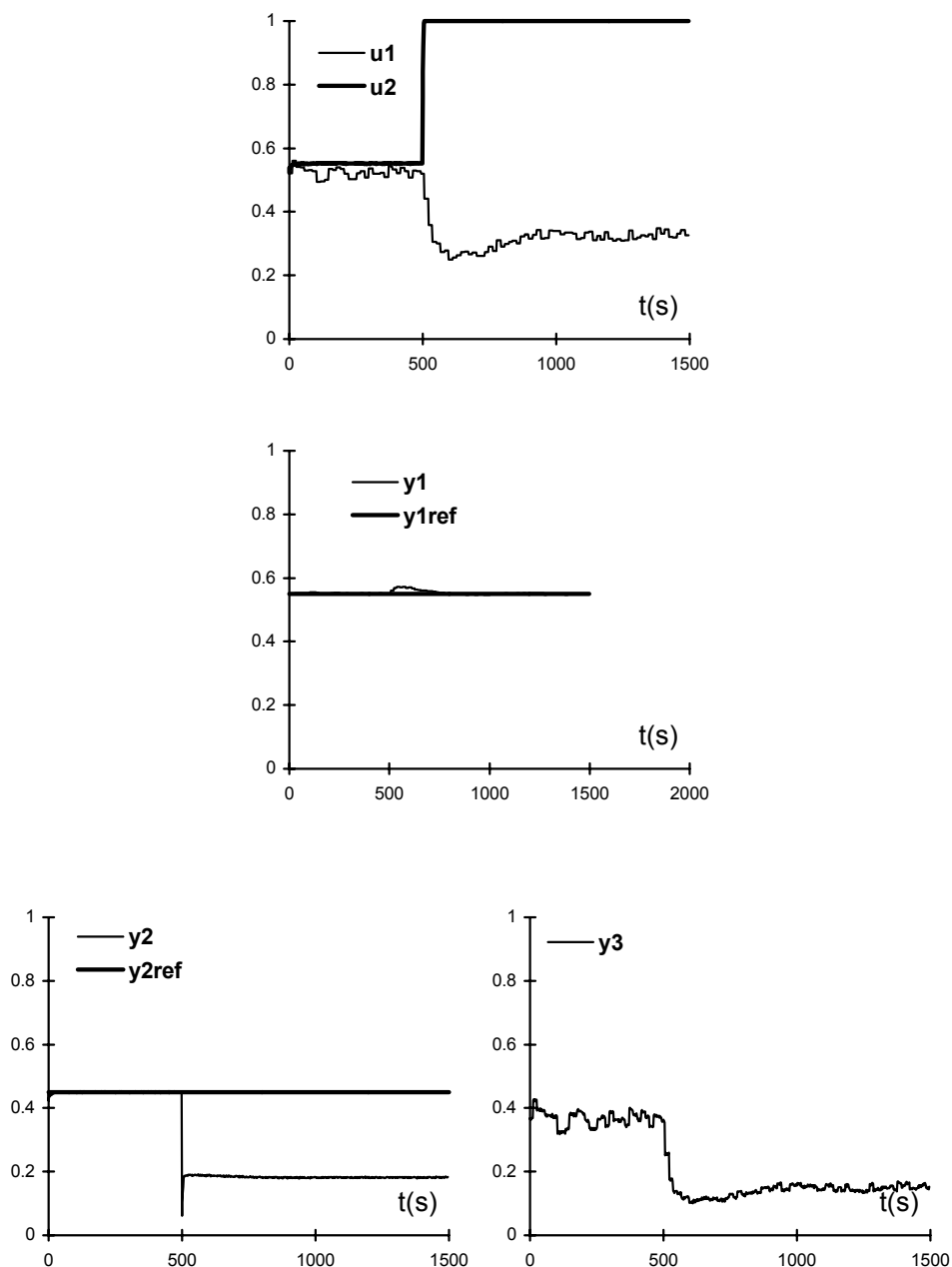


Fig. 2.11 - Curvas das variáveis de entrada e saída do STI para entupimento entre TQ-3 e TQ-1 com $k_{fe31}=0.79$.

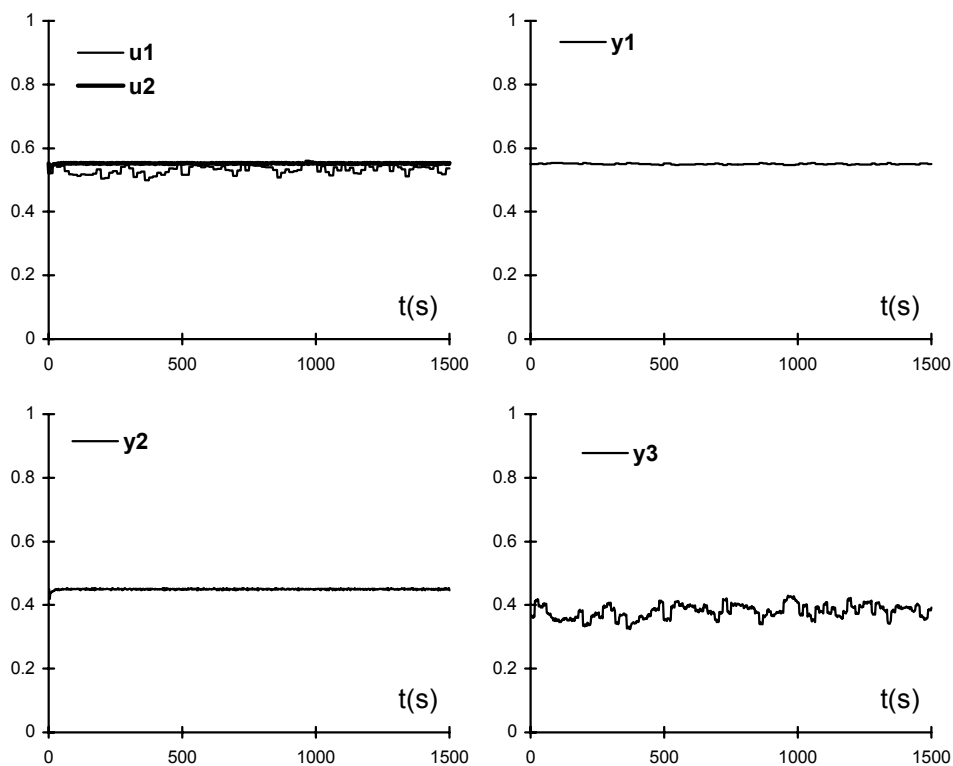


Fig. 2.12 - Curvas das variáveis de entrada e saída do STI para entupimento entre TQ-3 e TQ-1 com $k_{fe31}=0.11$.

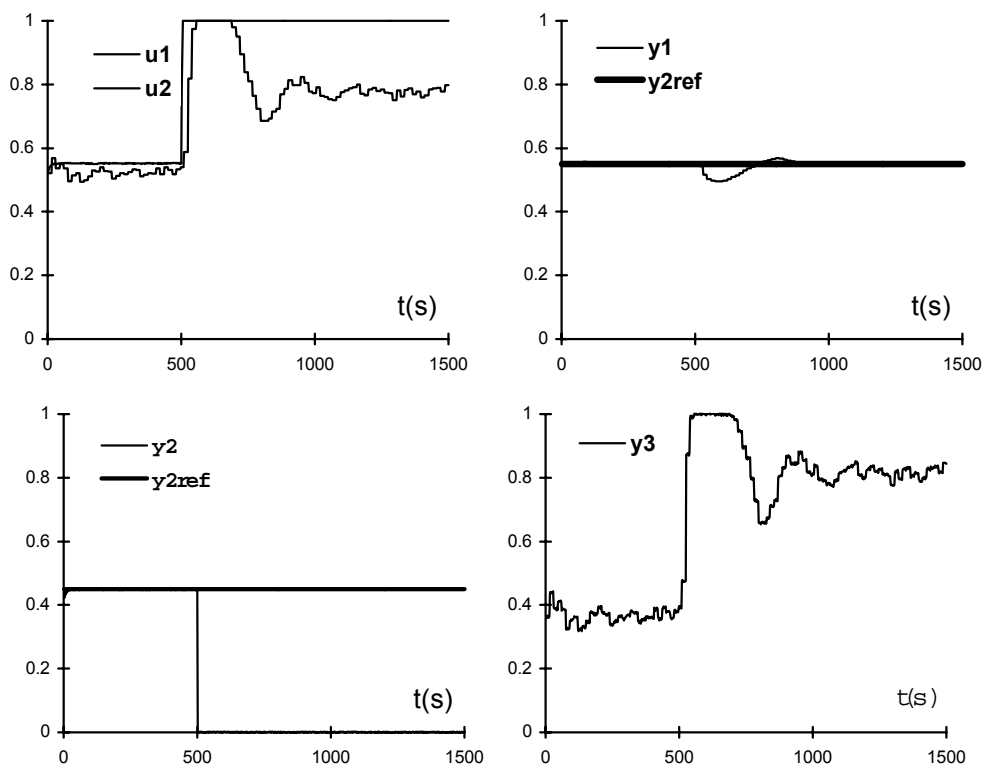


Fig. 2.13 - Curvas das variáveis de saída e entrada do STI para falha no sensor de vazão de saída de TQ-3 e TQ-1.

EXERCÍCIO

Implementar os modelos apresentados e simular as falhas relacionadas nas tabelas 1 e 2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, L. A.; Pereira, M. F. S. & Guimarães, R. A. (1996). "Instrument Fault Detection and Isolation in a Tank System". *XI Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 647-652, São Paulo, Brazil.
- Bose, B.K. *Power Electronic A.C. Drives*, Prentice Hall, New Jersey, 1986.
- Braga, A. R. (1994). "Implementação de Estratégias de Controle Multimodal e Multivariável". *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, Brasil*.
- Camargo, H. A. (1997). "Detecção e Isolamento de Falhas Utilizando Estimativa de Parâmetros de Modelos Contínuos e Limites de Confiança Adaptativos - Aplicação a uma Planta Piloto". *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, Brasil*.
- Caminhas, W. M.; Pereira, M. F. S.; Aguirre, L. A.; Tavares, H. M. F. & Gomide, F. A. C. (1997). "Detecção e Identificação de Falhas de Instrumentação num Sistema de Tanques Interativos Usando Rede Neurofuzzy". *Anais do 3o. Congresso Brasileiro de Redes Neurais*, pp. 201-206, Curitiba-Paraná, Brasil.
- Caminhas, W. M. "Estratégias de Detecção e Diagnóstico de Falhas em Sistema Dinâmicos". Tese de Doutorado – FEEC - Unicamp, 1997, 160 páginas.
- Jota, F. G.; Braga, A. R. & Pena, R. T. (1995). "Performance Assessment of Advanced Process Control Algorithms Using an Interacting Tank System". *IEEE Industry Applications Society, 30th Annual Meeting*, Orlando, Florida, October 8-12.
- Krause, P. C., *Analysis of Electric Machinery*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1986.
- Pereira, M. F. S. (1996). "Desenvolvimento e Aplicação de um Método de Detecção e Identificação de Falhas Baseado em Observadores Dedicados". *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, Brasil*.
- Silvino, J. L.; Bottura, C.P. & Resende, P. (1993) "Observadores de Fluxo e Estimativa de Parâmetros da Máquina de Indução Via Modelamento Discreto Não-Estacionário". *Revista Controle & Automação*, vol. 4 n. 6, pp. 11-22.