

DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS DE CONTROLE  
LINEARES USANDO UMA MODIFICAÇÃO DO FILTRO DE DETECÇÃO

por

ANDRÉ FERREIRA DE MELLO \*  
MARCELO LOPES DE OLIVEIRA E SOUZA \*\*

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvida uma nova versão do Filtro de Detecção e Identificação de Falhas. Esta nova versão possibilita a identificação mais fácil e segura de falhas em sensores podendo mesmo, com um só filtro, identificar falhas em qualquer um dos sensores. Testes foram realizados ilustrando o desempenho do filtro e a maneira de ajustar seus parâmetros. Os resultados dos testes demonstram a potencialidade deste procedimento que pode ser útil para se fazer a identificação de falhas em sistemas de controle lineares e invariantes no tempo.

ABSTRACT

This paper presents a new approach in detecting and identifying faults in Linear Time Invariant Control Systems. This new approach permits an easier and more reliable identification of sensor faults. Even a single filter can identify faults in any independent sensor. Tests have been carried out to illustrate the filter performance and the way to adjust the filter parameters. The test results demonstrate the validity of this procedure in detecting and identifying faults.

\* Engenheiro de Eletrônica e M.Sc. em CEA/Mec. Espac. e Controle  
Aços Especiais Itabira S.A.-ACESITA  
Depto. de Engenharia-Coord. de Automação  
Praça 10 de Maio, 9  
35180-000, Timóteo, MG

\*\*Engenh. de Eletrônica, Ph.D. em AA/Controle e Estimaç., Pesq. Sr.  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle-DMC  
Av. dos Astronautas, 1758 - CP 515  
12227-010, Jardim da Granja, S. José dos Campos, SP  
E-Mail: MARCELO@DEM.INPE.BR

## O FILTRO DE DETECCÃO MODIFICADO

### 1 - INTRODUÇÃO

Neste trabalho é apresentado o Filtro de Deteccão Modificado. Este filtro é um Filtro de Deteccão Convencional onde além do vetor de resíduos, outros vetores são gerados subtraindo-se uma componente do vetor de resíduos (Fig. 1). Esses vetores são utilizados para se identificar falhas em sensores.

Esta idéia foi desenvolvida porque os estudos iniciais com o Filtro de Deteccão Convencional foram dificultados pela estrutura do mesmo. Nele, falhas em sensores fazem com que a saída do filtro fique restrita a um plano, na melhor das hipóteses, enquanto que nos casos de falhas em atuadores ou de mudança na dinâmica o mesmo fica restrito a uma reta. Isto dificulta a identificação das falhas principalmente na presença de ruídos e perturbações porque exige implementações diferentes para os dois casos. Além disso, o Filtro de Deteccão Convencional não é capaz de detectar falhas em todos os sensores como foi visto no Cap. 2, da Ref. 1.

Assim, neste trabalho procurou-se desenvolver um filtro no qual a resposta para as falhas em sensores ficassem restritas a uma reta, além de permitir que falhas em todos os sensores fossem detectadas. O desenvolvimento deste é dado na próxima secção.

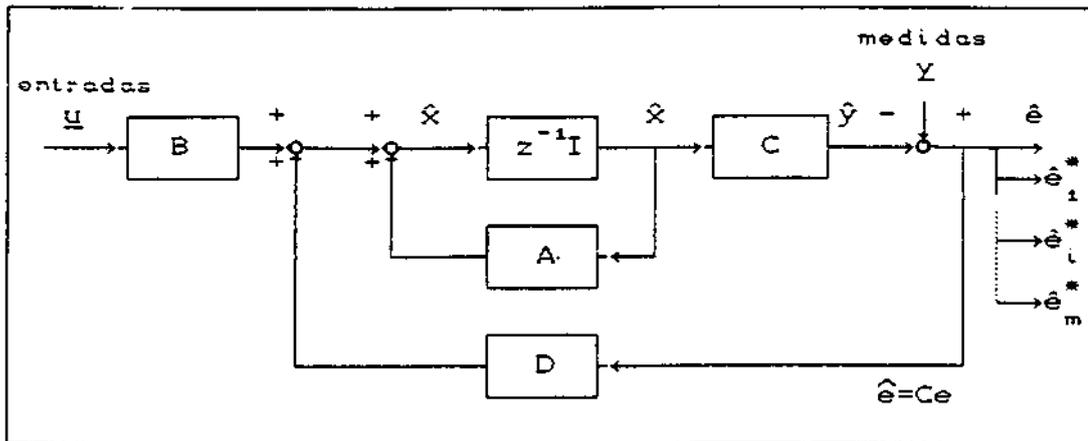


Fig. 1 - Diagrama do Filtro de Detecção Modificado.

## 2 - DESENVOLVIMENTO DO FILTRO MODIFICADO

Seja o sistema descrito por:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

onde  $x(k)$  é de ordem  $n$ ,  $y(k)$  de ordem  $m$ , e  $u(k)$  de ordem  $p$ . É desejável colocar este sistema numa forma padrão que simplifique o projeto da matriz  $D$ . Assim tem-se o sistema na forma:

$$x'(k+1) = A'x'(k) + B'u(k) \quad (3)$$

$$y(k) = C'x'(k) \quad (4)$$

onde  $A' = TAT^{-1}$ ,  $B' = TB$ ,  $C' = CT^{-1}$  e  $x' = Tx$ .

Sendo que

$$A' = \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ \underline{0} & A'_{22} \end{bmatrix} \quad A'_{11} \text{ é de ordem } m \times m \quad (5)$$

$$C' = \begin{bmatrix} I_m & : & \underline{0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Se T (T é a matriz de transformação) é da forma :

$$T = \begin{bmatrix} C \\ \dots \\ W \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad T^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha & : & \beta \end{bmatrix}$$

$$\text{logo} \quad TT^{-1} = \begin{bmatrix} C\alpha & C\beta \\ W\alpha & W\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m & \underline{0} \\ \underline{0} & I_{n-m} \end{bmatrix}$$

o que implica que  $C\alpha = I_m$  e  $C\beta = 0$ .

Logo para, T desta forma, C' tem a estrutura desejada. O próximo passo é escolher W de forma a que A' tenha a forma desejada. Seja  $M^{-1}$  uma matriz cujas linhas sejam formadas pelos autovetores-linha da matriz A. Então:

$$M^{-1}AM = A \quad (\text{onde } A \text{ é a matriz espectral})$$

Se os autovalores da matriz A são distintos (assuma-se isto daqui para frente), pode-se pegar um subconjunto das linhas da matriz  $M^{-1}$  de forma a se obter um conjunto de n linhas L.I. em T. Se uma das linhas w for complexa (ou seja, tiver componentes com parte imaginária não nula) pode-se substituir esta linha por uma linha cujas componentes são iguais à parte real da linha originalmente escolhida e substituir sua complexa conjugada por uma linha formada pela parte imaginária da linha original. Neste caso  $A'_{22}$  terá a forma bloco-diagonal.

Pode-se notar que os autovalores correspondentes aos autovetores-linha incluídos em W serão

correspondentes aos autovetores-linha incluídos em  $W$  serão os autovalores de  $A'_{22}$ . Isto quer dizer que no projeto do Filtro de Detecção Modificado escolhe-se apenas  $m$  autovalores, os restantes  $n-m$  autovalores são os mesmos que o do sistema real, e também afetam o desempenho do filtro. Além disto, não existe nenhuma garantia que os mesmos serão tais que o filtro seja estável. Mas se o sistema real tem modos instáveis, eles provavelmente estarão incluídos em  $A'_{11}$ , porque modos instáveis devem ser estabilizados pelo controlador, e isto frequentemente requer o sensoriamento das variáveis de estado responsáveis pela instabilidade.

Agora que a matriz  $T$  foi determinada e o sistema está na forma padrão, pode-se partir para o projeto do Filtro de Detecção Modificado.

### 3 - PROJETO DO FILTRO DE DETECÇÃO MODIFICADO

Esta seção mostra como determinar a matriz de ganho  $D$  do Filtro de Detecção Modificado. Vamos assumir daqui para frente que o sistema está na forma padrão dada pelas equações ( 5) e ( 6). Se isto não for verdade pode-se, como foi visto, colocá-lo nesta forma através da transformação vista na seção anterior. O seguinte teorema é de fundamental importância no projeto do Filtro de Detecção Modificado.

Teorema 1: Seja

$$F = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & \dots & f_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_m \\ \dots \\ \underline{0} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & \dots & v_m \\ \underline{0} & \underline{0} & \dots & \underline{0} \end{bmatrix} \quad ( 7)$$

o conjunto de falhas para o qual o Filtro de Detecção Modificado é projetado; e seja também  $\lambda_1^i = \lambda$  ( $i=1,2,\dots,m$ ),

$$[zI-G]^{-1} = \left[ \begin{array}{c|c} (z-\lambda) & A_{12} \\ \hline (z-\lambda) & (zI-A_{22}) \\ \hline 0 & \end{array} \right]^{-1}$$

ou, utilizando-se o Lema 1:

$$[zI-G]^{-1} = \left[ \begin{array}{cc} (z-\lambda)^{-1} I_m & -(z-\lambda)^{-1} I_m A_{12} (zI-A_{22}^{-1}) \\ 0 & (zI-A_{22})^{-1} \end{array} \right] \quad (17)$$

Da equação (13) tem-se que  $d_i = \begin{bmatrix} d_i^1 \\ \underline{0} \end{bmatrix}$ , ou seja, as  $(n-m)$  componentes inferiores do vetor são nulas.

Usando as expressões (16) e (17) com a expressão para  $d_i$  acima obtém-se:

$$E(z) = \frac{1}{(z-\lambda)} d_i N(z) \quad (18)$$

e neste caso o vetor  $E(z)$  tem direção constante.

Da equação (10) tem-se que:

$$\hat{E}(k)_i^* = \frac{1}{(z-\lambda)} C_i^* d_i N(z) \quad (19)$$

que tem direção constante. E da equação (11) tem-se que:

$$\hat{E}(k)_j^* = \frac{1}{(z-\lambda)} C_j^* d_i N(z) + \bar{v}_i N(z) \quad (20)$$

que só tem direção fixa se  $C_j^* d_i = \bar{v}_i$ ; de outra forma a resposta fica restrita a um plano. (q.e.d.)

Existe uma interpretação geométrica para os fatos acima (ver Fig. 2). A projeção da saída no subespaço descrito por  $e_1$  e  $e_2$  ( $\hat{e}_3^*$ ) corresponde a se "olhar" na direção de  $e_3$  (ver Fig. 2d) e "olhando", percebe-se que

enquanto um vetor  $\hat{e}$  se desloca de  $\underline{a}$  para  $\underline{b}$  em  $\hat{e}_3^*$  ele se desloca de  $\underline{q}$  a  $\underline{p}$  pela reta  $\overline{op}$ . "Olhando-se" a projeção em  $\hat{e}_2^*$  ou  $\hat{e}_1^*$ , ve-se curvas ao invés de retas (Fig. 2a e c).

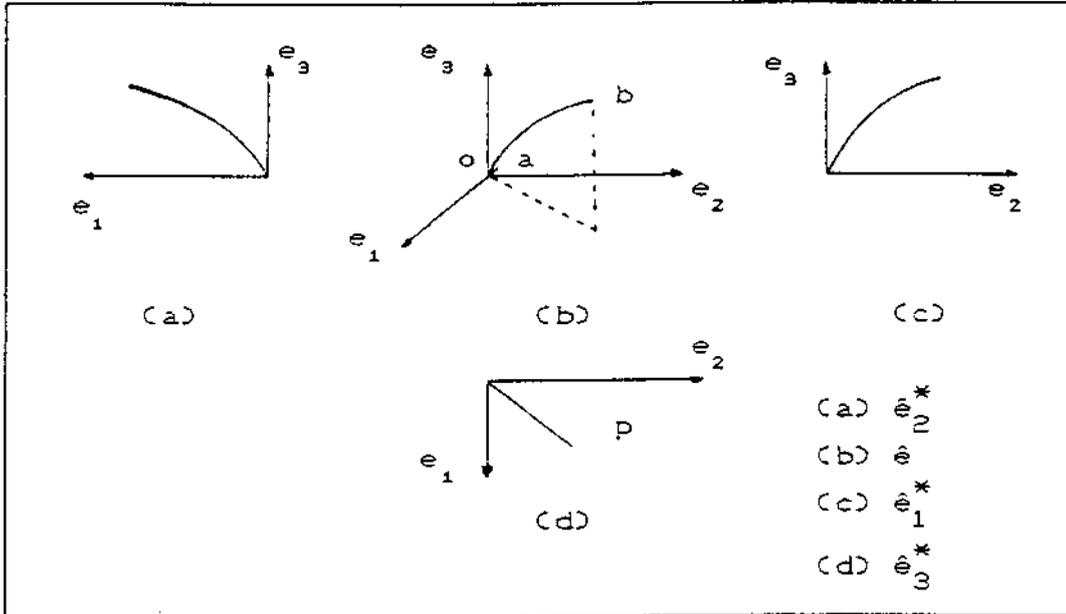


Fig. 2 - Resposta do Filtro de Detecção Modificado para uma falha no sensor 3

Como o objetivo é obter uma assinatura fácil de ser identificada para falhas em sensores, nota-se a importância do resultado acima. Ele nos garante que, com um Filtro de Detecção Modificado, pode-se detectar e identificar falhas em todos os sensores. Mas não se está restrito a detectar e identificar falhas em sensores. Isto pode ser feito também para certas falhas em atuadores e mudanças na dinâmica como mostra o seguinte teorema.

Teorema 2: Seja  $F$  definido como anteriormente

$$F = \begin{bmatrix} I_m \\ \dots \\ \underline{0} \end{bmatrix}$$

o conjunto de falhas para o qual o Filtro de Detecção Modificado é projetado com  $\lambda_1^i = \lambda$  para  $i=1,2,\dots,m$  e  $e(0)=0$ .

Então  $\hat{e}(k)$  terá uma mesma direção para todo  $k$  ( $k=0,1,\dots$ ) se  $f$  for uma combinação linear das colunas de  $F$ . O mesmo é verdade para  $\hat{e}_i^*$  (') para  $i=1,2,\dots,m$ .  $f$  no caso é o vetor evento associado à falha em um atuador ou a uma mudança na dinâmica.

Demonstração: Sabe-se (Ref.1, Cap. 4 ) que a resposta do filtro para falhas em atuadores e mudanças na dinâmica pode ser descrita como:

$$e(k+1) = Ge(k) + fn(k) \quad ( 21)$$

$$\hat{e}(k) = Ce(k) \quad ( 22)$$

$$\hat{e}(k)_j^* = C_j^* e(k) \quad ( 23)$$

onde  $f$  é o chamado vetor evento. Como  $f$  é uma combinação linear das colunas da matriz  $F$  tem-se que:

$$f = \begin{bmatrix} f' \\ 0 \end{bmatrix} \quad ( 24)$$

onde  $f'$  pode ser um vetor  $m \times 1$  qualquer, exceto o vetor nulo. Usando as eqs. ( 19) e ( 20) com a expressão para  $f$  acima obtém-se:

$$E(z) = \frac{1}{(z-\lambda)} f N(z) \quad ( 25)$$

e, neste caso,  $E(z)$  terá direção constante. Também teremos da eq. ( 22) que:

$$\hat{E}(z) = \frac{1}{(z-\lambda)} f' N(z) \quad ( 26)$$

As eqs. para  $\hat{E}(k)_j^*$  são iguais à eq. para  $\hat{E}(z)$  omitindo-se a  $j$ -ésima linha. Completando assim a prova (q. e. d.).

A próxima seção descreve como é feito o reconhecimento das assinaturas produzidas pelas falhas.

#### 4 - IDENTIFICAÇÃO DAS FALHAS

Como as seções anteriores mostraram, cada falha possui uma "assinatura", e é através desta assinatura que se faz a sua identificação. A assinatura corresponde ao comportamento do conjunto de  $m+1$  vetores,  $\hat{e}(k)$  e  $\hat{e}_i^*(k)$ .

As assinaturas produzidas pelo Filtro de Detecção Modificado permitem a utilização de técnicas simples de diagnósticos. Como em qualquer tipo de sistema de detecção usando filtros, o surgimento de resíduos com magnitude maior do que um valor limiar indica uma falha.

Vários testes estatísticos, muitos dos quais envolvendo a somatória de sucessivos resíduos, podem ser usados para minimizar o número de falsas detecções por ruídos e erros de modelagem.

Falhas em atuadores e mudanças na dinâmica produzem vetores  $\hat{e}(k)$  e  $\hat{e}_i^*(k)$  (para  $\forall i$ ) com direção fixa. Já para falhas em sensores,  $\hat{e}(k)$  não tem direção fixa, mas um e somente um dos vetores  $\hat{e}_i^*(k)$  tem direção fixa.

Mas como se pode saber se um vetor tem uma dada direção e se a mesma é fixa? Há várias possibilidades, mas a utilizada aqui com mais sucesso é usar a média móvel do módulo do cosseno do ângulo entre os vetores  $Cf_j$  e  $\hat{e}(k)$  e as médias móveis dos módulos dos cossenos entre cada par  $(Cd_i)_i^*$  (que é a coluna  $Cd_i$  sem a  $i$ -ésima componente) e  $\hat{e}(k)_i^*$ .

Assim obtém-se o seguinte conjunto de funções:

$$s_i = \sum_{j=k-p+1}^k \frac{|(c f_i)^T \hat{e}(j)|}{\| (c f_i) \| \| \hat{e}(j) \|} = \sum_{j=k-p+1}^k \cos \theta_i(j) \quad (27)$$

$$e \quad s_i^* = \sum_{j=k-p+1}^k \frac{|(c c d_i)_i^* j^T \hat{e}_i^*(j)|}{\| (c c d_i)_i^* \| \| \hat{e}_i^*(j) \|} =$$

$$= \sum_{j=k-p+1}^k \cos \theta_i^*(j) \quad (28)$$

Pode-se utilizar, para se conseguir uma maior discriminação entre as falhas, em vez do cosseno uma função do mesmo. Por exemplo:

$$\begin{cases} \gamma(k) = \frac{(\cos^2 \theta_i(k) - \phi)}{1 - \phi} & \text{se } \phi \leq \cos^2 \theta_i(k) \leq 1 \\ \gamma(k) = 0 & \text{se } \cos^2 \theta_i(k) \leq \phi \end{cases} \quad (29)$$

Quanto maior for o  $\phi$ , maior será o poder de discriminação entre as falhas. Mas se  $\phi$  for muito grande pode-se ignorar falhas na presença de ruídos.  $\phi$  deve estar no intervalo  $(0,1)$ .

Usando-se  $\gamma(k)$  acima pode-se reescrever (27) e (28) como:

$$s_i = \sum_{j=k-p+1}^k \gamma_i(j) \quad (30)$$

$$s_i^* = \sum_{j=k-p+1}^k \gamma_i^*(j) \quad (31)$$

Conhecidos os  $s_i$  e os  $s_i^*$  estabelece-se então um conjunto de regras para se identificar qual o componente que falhou.

Do exposto acima conclui-se que:  $s_i$  ( $s_i^*$ ) será próximo a 1 se o ângulo entre o vetor  $\hat{e}(k)$  e  $Cf_i$  ( $\hat{e}_i^*(k)$ ) e o vetor  $Cf_i$  ( $(Cf_i)_i^*$ ) for pequeno; e próximo a zero de outro modo. Se a direcção do vetor  $\hat{e}(k)$  ( $\hat{e}_i^*(k)$ ) variar  $s_i$  será reduzido, como se vê da expressão para  $s_i$ .

Pode-se estabelecer as seguintes regras (é importante lembrar que neste trabalho não se considera a possibilidade de várias falhas ocorrerem simultaneamente):

1ª Se  $s_i \geq \epsilon_i$  e  $s_j < \epsilon_j$  (para  $j \neq i$ ) e  $s_j^* < \epsilon_j^*$  (para  $\forall j$ ) então o componente que falhou é o correspondente ao vetor  $f_i$ .

2ª Se  $s_i^* \geq \epsilon_i^*$  e  $s_j < \epsilon_j$  (para  $\forall j$ ) e  $s_j^* < \epsilon_j^*$  (para  $j \neq i$ ) então o componente que falhou é o  $i$ -ésimo sensor.

3ª Se  $s_i^* \geq \epsilon_i^*$  e  $s_1 \geq \epsilon_1$  (para algum  $i$ ) e  $s_j^* < \epsilon_j^*$  (para  $j \neq i$ ) e  $s_j < \epsilon_j$  (para  $j \neq i$ ) então o componente que falhou é o correspondente à falha  $f_1$ .

Os valores  $\epsilon$  nas regras acima também são fatores a serem determinados através de simulações, assim como os valores adequados de  $\phi$  e  $p$ . Este conjunto de regras cobre a maioria das situações.

## 5 - FALHAS EM ATUADORES NÃO INCLUIDAS EM F

Falhas em atuadores e mudanças na dinâmica que não são combinações lineares das colunas em  $F$  não produzem, como regra geral, resíduos com direcção fixa. Mas assim mesmo é possível detectá-las com o auxílio de um ou mais Filtros de Detecção Convencionais projetados conforme

exposto no Capítulo 2, da Ref. 1.

Para se fazer a identificação agora, além de  $s_i$  e  $s_i^*$  precisa-se de um novo conjunto de funções  $s_i'$ . A função  $s_i'$  é definida exatamente da mesma maneira que  $s_i$ , só que em vez de  $\hat{e}(k)$  utiliza-se  $\hat{e}'(k)$  que é o resíduo obtido pelo outro filtro acrescentado ao sistema.

$$s_i = \sum_{j=k-p+1}^k \frac{|(Cf_i)^T \hat{e}'(j)|}{\| (Cf_i) \| \| \hat{e}'(j) \|} = \sum_{j=k-p+1}^k \cos \theta'_i(j) \quad (32)$$

Com esta abordagem é possível se detectar, em princípio um número grande de falhas. A dificuldade surge no caso de falhas que têm a mesma projecção no espaço de saída, isto é,  $Cf_i = Cf_j$  ( $i \neq j$ ). Neste caso não há como distinguir esta falha sem se fazer outras considerações envolvendo a dinâmica da falha. A próxima seção aplica o Filtro de Detecção Modificado ao exemplo dado no Capítulo 2, da Ref. 1.

## 6 - EXEMPLO

Esta seção retoma o exemplo do Cap.2 da Ref.1 utilizando agora o Filtro de Detecção Modificado. O primeiro passo é colocar o sistema na forma das equações (5) e (6). Os autovalores-linha de A são  $[1 \ 0 \ -1]^T$ ,  $[0 \ 0 \ 1]^T$  e  $[-1 \ 1 \ -1]^T$ . Escolhendo o autovetor  $[0 \ 0 \ 1]^T$  tem-se que:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A' = TA^{-1}T = \begin{bmatrix} 0,80 & 0,00 & 0,10 \\ -0,05 & 0,85 & 0,20 \\ 0,00 & 0,00 & 0,90 \end{bmatrix}$$

$$C' = CT^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad F' = TF = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Usando as equações (3.14) e (3.15) tem-se que:

$$D = \begin{bmatrix} 0,10 & 0,00 \\ -0,05 & 0,15 \\ 0,00 & 0,00 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad G = \begin{bmatrix} 0,7 & 0,0 & 0,1 \\ 0,0 & 0,7 & 0,2 \\ 0,0 & 0,0 & 0,9 \end{bmatrix}$$

$$[zI - G]^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} z^2 - 1,6z + 0,63 & 0 & 0,1z - 0,07 \\ 0 & z^2 - 1,6z + 0,63 & 0,2z - 0,14 \\ 0 & 0 & z^2 - 0,9z + 0,49 \end{bmatrix}}{(z - 0,7)^2(z - 0,9)}$$

Pode-se agora determinar a resposta do filtro às falhas para as quais ele foi projetado detectar.

Resposta para falha no atuador 1:

$$\begin{aligned} \hat{E}(z)_{fa} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \frac{z^2 - 1,6z + 0,63}{(z - 0,7)^2(z - 0,9)} N(z) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \frac{N(z)}{(z - 0,7)} \end{aligned} \quad (33)$$

Resposta para falha no atuador 2:

$$\hat{E}(z)_{fd} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{N(z)}{(z - 0,7)} \quad (34)$$

Resposta para falhas no sensor 1:

$$\hat{E}(z)_1^* = -0,05 \frac{N(z)}{(z-0,7)} \quad (35)$$

Resposta para falhas no sensor 2:

$$\hat{E}(z)_2^* = 0,15 \frac{N(z)}{(z-0,7)} \quad (36)$$

Como  $m=2$  os vetores  $E(z)_i^*$  são escalares, portanto não se pode distinguir as falhas dos dois sensores. Mas, neste exemplo, observando-se  $\hat{E}(z)$  para uma falha no sensor 2 tem-se que:

$$\hat{E}(z) = \begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,15 \end{bmatrix} \frac{N(z)}{(z-0,7)} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} N(z) \quad (37)$$

que neste caso é unidirecional. Logo, uma falha no sensor 2 tem comportamento semelhante a das falhas no atuador e na dinâmica, tendo direção distinta das mesmas.

Se não fosse este fato, as falhas dos dois sensores não poderiam ser distinguidas. Seria possível somente se detectar a falha de um dos sensores e dos outros componentes. Este problema não ocorrerá se  $m \geq 2$ .

O próximo item apresenta os resultados de simulações com o filtro modificado.

## 7 - SIMULAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste item é testado o Filtro de Detecção Modificado, utilizando o programa "Simulação" que está no Apênd. B, Ref. 10 mesmo exemplo já discutido nos Caps. 2, 3 Ref. 1 ... é simulado aqui. O conjunto de falhas também é o mesmo, ou seja, falhas nos dois atuadores e falhas nos dois sensores.

O primeiro conjunto de simulações mostra o desempenho do Filtro de Detecção Modificado na ausência de ruídos para diversos tipos de falhas. São simulados dois tipos de função  $n(k)$ : 1) A função degrau e 2) A função rampa como mostrado na Fig. 3. Lembrando que a função  $n(k)$  representa o modo como ocorreu a falha. Por exemplo, se a falha ocorrida é a de um sensor e  $n(k)$  é do tipo degrau, isto representa um viés ("bias") no sensor e no caso da rampa, uma divergência ("drift") no sensor.

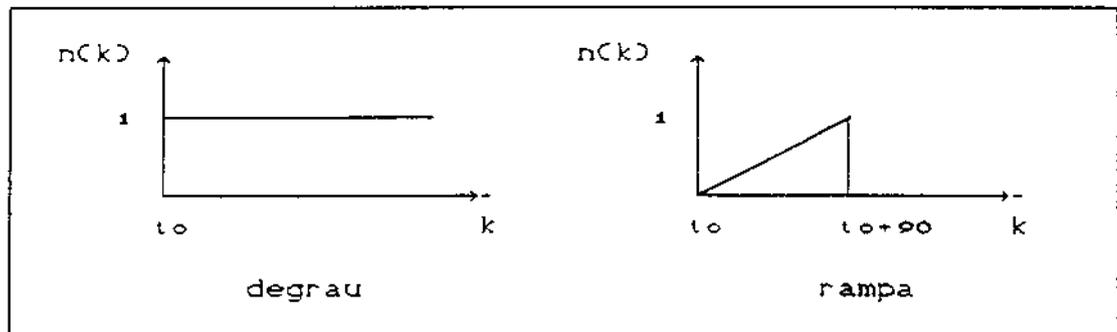


Fig. 3. - Tipos de falhas simuladas

A Tabela 1 resume os resultados para o primeiro conjunto de simulações. Os gráficos mostram as funções  $s_1$  e  $s_1^*$  tais como definidas pelas equações ( 34), ( 35) e ( 36) com  $p=10$  e  $\phi=0,999$ . O sinal  $s_1^*$  refere-se a falhas no sensor 1,  $s_2$  a falhas no sensor 2,  $s_3$  e  $s_4$

referem-se a falhas no atuador 1 e 2 respectivamente ( $s_2$  é usado no lugar de  $s_2^*$  como foi explicado nos itens 3-5, porque ambos  $s_1^*$  e  $s_2^*$  são escalares e  $\hat{e}(k)$  para uma falha no sensor 2 mantém uma direção fixa).

Para se identificar qual falha ocorreu utilizou-se uma das seguintes regras:

1ª Se  $s_i \geq \epsilon_i$  e  $s_j$  ( $j \neq i$ )  $< \epsilon_j$  e  $s_1^* < \epsilon_1^*$  então o componente que falhou é o correspondente ao vetor  $f_i$ .

2ª Se  $s_1^* \geq \epsilon_1^*$  e  $s_j$  ( $\forall j$ )  $< \epsilon_j$  então o componente que falhou é o sensor 1.

3ª Se  $s_1^* \geq \epsilon_1^*$  e  $s_i$  (para algum  $i$ )  $\geq \epsilon_i$  e  $s_j$  ( $j \neq i$ )  $< \epsilon_j$  então o componente que falhou é o correspondente ao vetor  $f_i$ .

Estas regras são particularizações para este exemplo das regras para identificação de falhas dadas no item 4: Assim na coluna "regra utilizada" temos o número da regra que é satisfeita e na coluna "falha identificada", a conclusão obtida sobre qual componente falhou.

Obs: Na aplicação das regras acima deveremos levar em conta que os  $s_i$  e os  $s_i^*$  podem ultrapassar os limites  $\epsilon$  em tempos diferentes. Portanto depois que um  $s_i$  (ou  $s_i^*$ ) ultrapassa o correspondente  $\epsilon$  deveremos esperar um intervalo de tempo  $\Delta T$  para ver se outra função  $s$  não irá ultrapassá-lo também.

TABELA 1 - RESUMO DOS RESULTADOS PARA O SISTEMA SEM RÚIDO NOS SENSORES

falha simulada	tipo falha	figura	regra utilizada	falha identificada
sensor 1	degrau	5	2	sensor 1
sensor 2	degrau	-	3	sensor 2
atuador 1	degrau	4	1	atuador 1
atuador 2	degrau	-	3	atuador 2
sensor 1	rampa	-	2	sensor 1
sensor 2	rampa	-	3	sensor 2
atuador 1	rampa	-	1	atuador 1
atuador 2	rampa	-	3	atuador 2

Notas: 1. Nas figuras foram omitidos os gráficos das funções que são identicamente nulas

2.  $\epsilon = 0,9$

3.  $\phi = 0,999$   $p = 5$   $\Delta T = 10$

Pode-se concluir a partir da Tabela 1 que os resultados confirmam o previsto. É possível se identificar facilmente e rapidamente as falhas, além de se conseguir identificar um número maior delas.

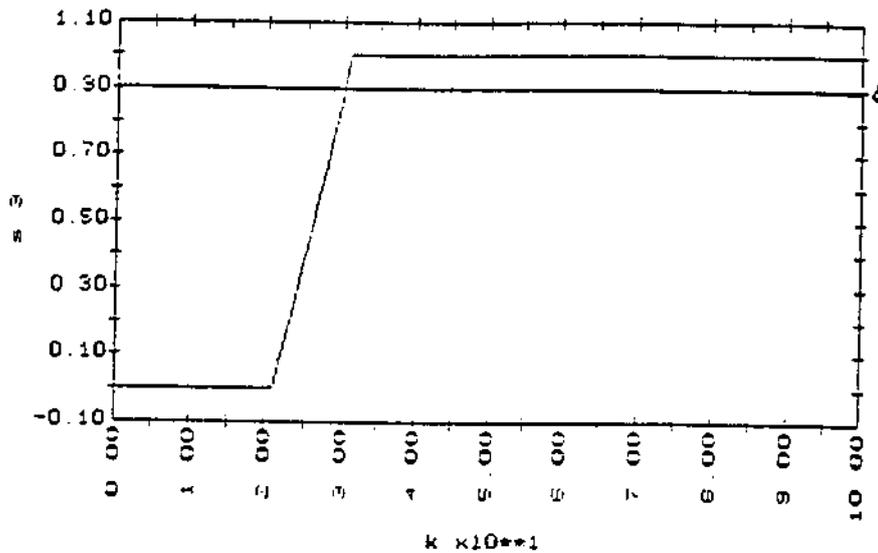


Fig 4 - Falha no atuador 1

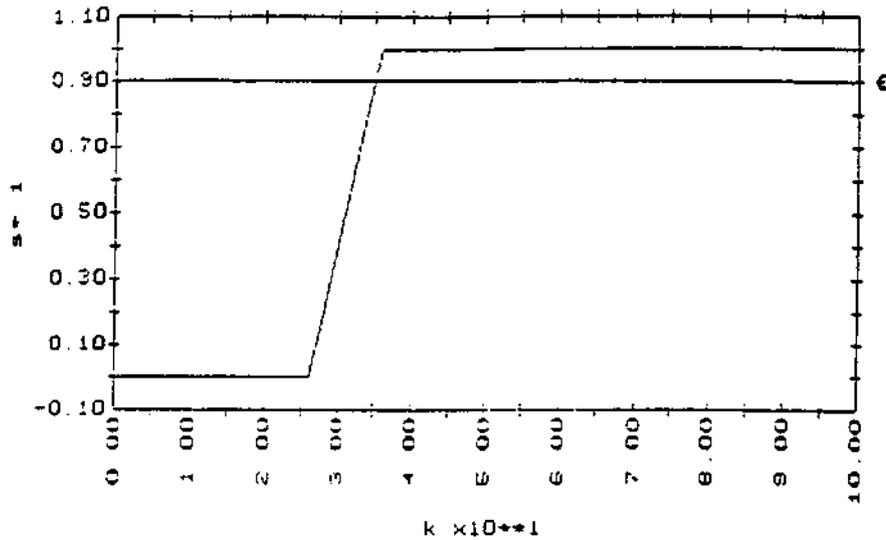


Fig. 5 - Falha no sensor 1

### 8 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos conduzem, às seguintes conclusões:

1. O Filtro de Detecção Modificado apresenta assinaturas fáceis de serem identificadas tanto para falhas em sensores como para falhas em atuadores.

2. O projeto do Filtro de Detecção Modificado é simples e os parâmetros que precisam ser ajustados como  $\phi$ ,  $p$  e  $\epsilon$  o foram sem nenhuma dificuldade durante as simulações.

3. Com o novo filtro podemos detectar falhas em todos os sensores, mas há restrições quanto ao tipo de falha em atuador que o mesmo pode identificar. Mas o Filtro Modificado pode ser associado ao Filtro Convencional. Enquanto o primeiro detectaria e identificaria falhas em todos os sensores e alguns atuadores, o segundo detectaria as falhas restantes.

4. O Filtro de Detecção Modificado tem como principal desvantagem o fato de não poder se escolher todos os autovalores do filtro.

5. O Filtro de Detecção parece indicado para se fazer a identificação de falhas em sistemas lineares invariantes no tempo com grande número de sensores.

#### 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Melo, A. F. Detecção e Identificação de Falhas em Sistemas de Controle Lineares Usando uma Modificação do Filtro de Detecção. INPE, S. J. Campos, 1991 (5367-TDI/466).

[2] Andry, A.N. et al. Eigenstructure Assignment in Linear Systems. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, AES-19(5):711-729, Sept. 1983.

[3] Adams, M. et al. Fault-Tolerant Control Systems I and II. Notas de Aula dadas no MIT, Cambridge, MA, 1984.

[4] Beard, R. V. Failure Accomodation in Linear Systems Through Self-Reorganization. Cambridge, MA, MIT, Feb., 1971.(Doc. Diss.).

[5] Meserole, J.S. Detection Filters for Fault-Tolerant Control of Turbofan Engines. Cambridge, MA, June, 1981 (Doc. Diss).

[6] White, J.E; Speyer, J.L. Detection Filter Design: Spectral Theory and Algorithms. IEEE Trans. Automatic Control, AC-32(7):593-603, July 1987.

[7] Willsky, A.S. A Survey of Design Methods for Failure Detection in Dynamic Systems. Automatica, 12:601-611, 1976.

[8] Willsky, A.S; Jones, H.L. A Generalized Likelihood Ratio Approach to the Detection and Estimation of Jumps in Linear Systems. IEEE Trans. Automatic Control, AC-21(2):347-352, Feb. 1976.

# Estratégias de Reconfiguração sob Falhas para Multiprocessadores: Aplicação à Máquina T-NODE

Raul Ceretta Nunes                      Ingrid Jansch-Pôrto  
Philippe O. A. Navaux

Pós-Graduação em Ciência da Computação  
Instituto de Informática - UFRGS  
Caixa Postal 15064 - CEP 91509-900 - Porto Alegre/RS - Brasil  
E-mails: ceretta@inf.ufrgs.br - ingrid@inf.ufrgs.br - navaux@inf.ufrgs.br

## Resumo

Procedimentos de reconfiguração são usados em diversos sistemas para isolar módulos falhos e recuperar o sistema dos erros produzidos. Deste modo, vários algoritmos de reconfiguração já foram propostos para encobrir falhas em ambientes multiprocessados. Entretanto, a maioria destina-se a casos específicos como, por exemplo, arquiteturas na forma de *arrays* e árvores.

Neste artigo é apresentado um algoritmo de reconfiguração para tolerar falhas na máquina T-NODE. Esta máquina possui uma arquitetura multiprocessadora fracamente acoplada, que tem como processador base o *transputer*. Sua arquitetura de interconexão é definida pelo usuário, apresentando variada gama de opções. Por isso, os algoritmos tradicionais não se aplicam. Pretende-se com este trabalho apresentar uma maneira de melhorar o nível de tolerância a falhas da máquina, para que ela possa ser usada em tarefas mais exigentes do ponto de vista de confiabilidade, sem perda excessiva de desempenho.

A descrição do trabalho inclui: objetivos, principais características da máquina T-NODE, análise de algoritmos existentes para arquiteturas multiprocessadoras na forma de árvores e *arrays*, o algoritmo proposto neste trabalho, e algumas conclusões.

## Abstract

In many systems, reconfiguration strategies are used to remove failed components and to recuperate system structure and operation parameters. Various reconfiguration algorithms have been proposed with the goal of covering faults in multiprocessing systems, but most of them support only specific architecture styles, as arrays or trees.

In this paper, a reconfiguration algorithm whose goal is to tolerate faults in the T-NODE machine, is proposed. The T-NODE is a loosed coupled, multiprocessor machine based on transputers. Its interconnection architecture is defined by the user among several possibilities. Because of this facility, traditional algorithms do not apply. We intend, with the research here related, to improve the fault-tolerance parameters of this machine without changing significantly its original performance; then this will make possible the use of the T-NODE to execute applications where reliability is required.

In the description we include: motivation and goals expected from the research, main characteristics of the T-NODE machine, analysis of existing reconfiguration algorithms, the algorithm here proposed and some conclusions taken from this work.