

# CARACTERÍSTICAS DO SINAL DE REALIMENTAÇÃO DA ESTRUTURA ALTERNATIVA DE 2DOF PARA USO EM DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS

MARIO HENRIQUE CHAVES\*, KARL HEINZ KIENITZ\*

*\*Instituto Tecnológico de Aeronáutica  
Praça Marechal Eduardo Gomes  
Vila das Acácias, 12228-900  
São José dos Campos, SP, Brasil*

Emails: [chaves@ita.br](mailto:chaves@ita.br), [kienitz@ieee.org](mailto:kienitz@ieee.org)

**Abstract**— In this paper, the characteristics of the feedback signal of the alternative two degrees of freedom structure are discussed for use in fault detection and diagnosis. The equations are presented and discussed, which relate the reference and fault signals with the feedback signal, used as a residual signal. Furthermore a case study is presented in which two types of additive faults are detected and diagnosed using the residual signal.

**Keywords**— Fault Detection, Alternative 2DOF Structure, Control Signal, Integrated Diagnostics.

**Resumo**— Neste trabalho são discutidas as características do sinal de realimentação da estrutura alternativa de dois graus de liberdade para uso em detecção e diagnóstico de falhas. São apresentadas e discutidas as equações que relacionam os sinais de referência e de falhas com o sinal de realimentação, usado como um sinal de resíduo. No trabalho também é apresentado um estudo de caso em que dois tipos de falhas aditivas são detectadas e diagnosticadas com o uso do sinal de resíduo.

**Palavras-chave**— Detecção de falhas, Estrutura Alternativa de 2DOF, Sinal de Controle, Diagnóstico Integrado.

## 1 Introdução

Diversas técnicas com o intuito de proporcionar detecção e diagnóstico de falhas foram desenvolvidas nas últimas décadas. Podem-se dividir essas técnicas basicamente em dois grupos, as chamadas técnicas baseadas em dados, caso que é bem tratado em Ding (2014), e técnicas baseadas em modelo, extensamente discutidas por Isermann (2006). No segundo grupo encontram-se, por exemplo, as equações de paridade (Chow e Willsky, 1984), observadores de estados e diversas técnicas de identificação de parâmetros.

Como exemplo do uso de modelos para detecção de falhas e controle de forma integrada, pode-se citar o trabalho de Nett et al. (1988), onde é apresentada uma técnica chamada de controlador de quatro parâmetros. Esse trabalho apresentou uma série de relações algébricas que relacionam as entradas de falhas aditivas com uma saída de diagnóstico, permitindo assim que, para sistemas ideais, ao adicionar um bloco de diagnóstico conectado às entradas e saídas do sistema, seja possível obter o diagnóstico preciso da falha presente no sistema.

Mais tarde em Tyler e Morari (1994), foi realizada uma discussão sobre os efeitos de incertezas do modelo sobre a capacidade de detecção e identificação das falhas como apresentado por Nett et al. (1988). Tyler e Morari (1994) mostram que quando existem incertezas no modelo, o sinal de diagnóstico passa a ser corrompido e é preciso considerar um conflito entre robustez de diagnóstico e desempenho de controle. Dessa forma, torna-se

necessário realizar o projeto integrado de controle e sistema de diagnóstico.

Ding et al. (2010) apresenta uma análise de três estruturas de controle afim de verificar se nas malhas de controle é possível obter naturalmente um sinal de diagnóstico e utiliza uma alternativa à estrutura convencional de dois graus de liberdade que é denominada de *estrutura alternativa de dois graus de liberdade* para demonstrar que tanto com essa estrutura como com outras estruturas, cada uma com suas limitações, é possível obter um sinal de diagnóstico com base em sinais presentes na malha de controle.

A estrutura apresentada como uma *estrutura alternativa* em Ding et al. (2010) foi anteriormente discutida nos trabalhos de Vilanova e Serra (1997), Åström e Hägglund (1995) e Kreisselmeier (1999) para o caso de projetos de controle de sistemas SISO (*single-input, single-output*) e é generalizada para o caso MIMO (*multiple-input, multiple-output*) no trabalho de Kienitz e Kadiramanathan (2017).

A estrutura alternativa de dois graus de liberdade apresenta a possibilidade de projeto em dois passos. Primeiramente é realizado o projeto da dinâmica desejada de entrada e saída e na sequência, pode-se realizar separadamente o projeto da dinâmica de rejeição de distúrbios e incertezas (Kienitz e Kadiramanathan, 2017).

No presente trabalho busca-se apresentar essa estrutura com a saída adicional do sinal de realimentação como um caso específico do controlador de quatro parâmetros de Nett et al. (1988) para

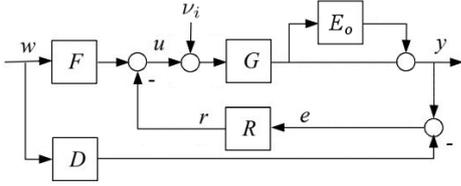


Figura 1: Estrutura Alternativa de dois graus de liberdade.

detecção de falhas aditivas na entrada. Com relação à influência das incertezas do modelo, realiza-se uma análise do comportamento do sinal de diagnóstico à luz do que foi apresentado por Tyler e Morari (1994). Ao final é apresentado um estudo de caso em que é utilizado o sinal de diagnóstico para detectar falhas aditivas em uma planta piloto industrial.

## 2 Estrutura Alternativa de Dois Graus de Liberdade

Como descrito por Kienitz e Kadiramanathan (2017), a estrutura alternativa de dois graus de liberdade apresenta a possibilidade de projeto em dois passos. Inicialmente é possível estabelecer a dinâmica de entrada e saída do sistema em malha fechada e depois, em um segundo passo, é possível desenvolver as características de rejeição de distúrbios e dos efeitos das incertezas do modelo.

Na Figura 1 é apresentada essa estrutura, onde  $D$  representa a dinâmica desejada,  $R$  o controlador de malha fechada,  $F$  um compensador *feedforward* e  $G$  a planta a ser controlada com  $m$  entradas e  $p$  saídas. A entrada  $\nu_i$  representa a falha aditiva na entrada e o bloco  $E_o$  a incerteza multiplicativa do modelo refletida na saída. Os outros sinais encontrados na malha são os sinais de referência ( $w$ ), controle ( $u$ ), realimentação ( $r$ ), erro de seguimento ( $e$ ) e saída do sistema ( $y$ ).

### 2.1 Ramo Direto

O projeto da dinâmica de entrada e saída do sistema é o primeiro passo no desenvolvimento do controlador. No caso de uma planta quadrada ( $m=p$ ) o bloco  $F$  é dado por:

$$F = G^{-1}D \quad (1)$$

Obtendo-se  $F$  como na equação (1), faz com que a dinâmica de entrada e saída, dada pela equação (2) (Kienitz e Kadiramanathan, 2017), seja igual à dinâmica desejada,  $D$ , quando não existem erros de modelagem  $E_o$  e ou falhas  $\nu_i$ , o que indica que nessas circunstâncias a dinâmica de entrada e saída independe da escolha do controlador  $R$ .

$$y = [I + (I + GR)^{-1}E_o]Dw + (I + GR)^{-1}G\nu_i \quad (2)$$

É importante observar que para os casos em que a planta não é quadrada, o procedimento adotado para a inversa não é tão direto, para mais detalhes o trabalho de Kienitz e Kadiramanathan (2017) deve ser consultado.

Além disso um importante fator na obtenção do compensador  $F$  é a propriedade de estabilidade desse controlador. Caso a planta controlada não seja de fase mínima, a dinâmica desejada irá apresentar limitações. Uma opção para lidar com o problema da inversão de  $G$  é realizar uma fatoração coprima (Vidyasagar, 1988), como apresentado por Vilanova e Serra (1997). Desse modo, a dinâmica do sistema é decomposta em duas partes, uma parte inversível e outra não inversível (equação (3)), como de maneira similar também é apresentado nos trabalhos de Ding et al. (2010) e Morari e Zafiriou (1989). A parcela não inversível mantém os zeros do semiplano direito da planta  $G$  e obrigatoriamente deve fazer parte da dinâmica desejada  $D$ . Dessa forma, a equação (1) fica como a equação (5) e a dinâmica desejada,  $D$ , como na equação (4).

$$G = G_z G_i \quad (3)$$

$$D = G_z D_z \quad (4)$$

$$F = G_i^{-1} D_z \quad (5)$$

Em que  $G_i$  é a dinâmica inversível,  $G_z$  a dinâmica com os zeros do semiplano direito de  $G$  e  $D_z$  é a dinâmica desejada considerando para sua escolha a dinâmica de  $G_z$ . Portanto, para sistemas de fase mínima,  $D_z$  será igual a  $D$ .

### 2.2 Malha de Realimentação

Como já observado, a dinâmica da malha de realimentação deve ser obtida de acordo com as características desejadas de rejeição da influência de distúrbios na saída do sistema. Na equação (2), observa-se que o sinal  $G\nu_i$  (falhas aditivas filtradas pela planta) é filtrado por uma função de sensibilidade da malha  $GR$ . O mesmo ocorre com as incertezas multiplicativas refletidas na saída, o que leva à possibilidade de projeto por *loop shaping* dessa função de sensibilidade (Kienitz e Kadiramanathan, 2017), mantendo os ganhos pequenos nas frequências de interesse de bom seguimento da referência.

### 2.3 Projeto $H_\infty$ estruturado do controlador $R$

Como apresentado em Kienitz e Kadiramanathan (2017), o projeto do controlador de realimentação pode ser executado com qualquer técnica que permita considerar as especificações de controle previamente definidas.

No presente trabalho optou-se por utilizar o projeto  $H_\infty$  estruturado de um controlador do tipo PID para o controlador  $R$ . A síntese de

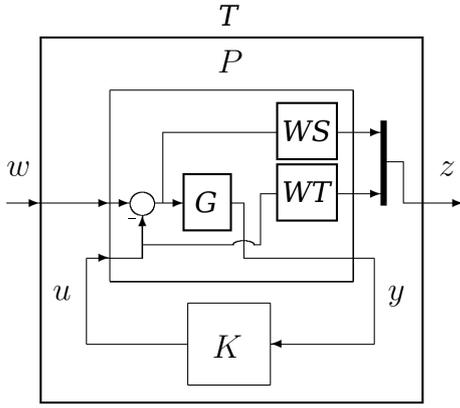


Figura 2: Sistema estendido para o problema de otimização  $H_\infty$ .

controladores  $H_\infty$  com estrutura de controle pré-definida (estruturada) é apresentada por Apkarian e Noll (2006) e sistematizada na biblioteca de controle robusto do software Matlab.

Seja  $\mathcal{K}$  o conjunto de controladores estruturados estabilizantes de uma planta estendida,  $P$ , como a mostrada na Figura 2. Então o problema do controle  $H_\infty$  pode ser definido como a busca por uma solução ótima do controlador  $K^* \in \mathcal{K}$  seguindo o seguinte programa de otimização (Apkarian e Noll, 2006):

$$\begin{aligned} \min & \|T_{w \rightarrow z}(P, K)\|_\infty \\ & K \in \mathcal{K} \end{aligned} \quad (6)$$

Na Figura 2 é demonstrado como o problema é montado para a otimização. No caso desse trabalho, foram utilizados pesos sobre as funções de sensibilidade e de sensibilidade complementar de entrada para impor limitantes superior e inferior na frequência de corte do sistema (Skogestad e Postlethwaite, 2005).

No caso da otimização de um controlador estruturado, busca-se então o controlador que minimiza a norma infinito de  $T_{w \rightarrow z}$  entre todos os controladores estruturados que estabilizam internamente o sistema, como visto na equação (7) (Apkarian e Noll, 2017).

$$\|T_{w \rightarrow z}(P, K^*(\theta))\|_\infty \leq \|T_{w \rightarrow z}(P, K(\theta))\|_\infty \quad (7)$$

O controlador  $K(\theta)$  PID apresenta a estrutura observada na equação (8). Onde  $\theta$  representa o conjunto de parâmetros variáveis do controlador.

$$K(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_d s}{s + \tau} \quad (8)$$

Tendo  $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$  como parâmetros variáveis e  $\tau$  como o valor do pólo utilizado para que a parte

derivativa do controlador seja própria. Vale lembrar que durante o projeto do sistema de controle com a estrutura alternativa de dois graus de liberdade, o aqui apresentado controlador  $K(\theta)$  será o controlador de realimentação  $R$ , pois o *loop shaping* considerado é realizado sobre a malha  $GR$ .

### 3 Características do sinal de realimentação $r$

Ding et al. (2010) apresenta um estudo sobre a possibilidade de acessar sinais de resíduos presentes na malha de controle. Através de análises baseadas na, já bem conhecida, parametrização de Youla (Youla et al., 1976), é mostrado que o sinal de controle pode ser interpretado como uma composição de resíduos e sinais de referência.

Como conclusão, são apresentados dois procedimentos para acesso dos resíduos, o primeiro é o uso de alguma estrutura já existente, em que o sinal de resíduo está naturalmente presente em algum ponto da malha de controle e o segundo é a configuração de uma malha de controle específica que permite o acesso a esses resíduos.

A técnica utilizada no presente trabalho utiliza o primeiro procedimento ao acessar o sinal de resíduo presente na malha de controle da estrutura alternativa de dois graus de liberdade, como feito por Ding et al. (2010).

A equação (9) apresenta a relação dos sinais  $\nu_i$  e  $w$  com o sinal de resíduo  $r$ . É confirmada novamente a afirmação de que, quando se considera que o modelo reflete exatamente o comportamento da planta, o controlador  $R$  não apresenta nenhuma influência sobre a dinâmica do sistema. Isso pode ser verificado na equação (9) ao fazer com que a entrada exógena  $\nu_i$  e a incerteza multiplicativa  $E_o$  sejam iguais a zero. Nesse caso o sinal de resíduo,  $r$ , torna-se zero.

$$\begin{aligned} r = & (I + RE_oG + RG)^{-1} RE_oDw + \\ & + (I + RE_oG + RG)^{-1} (RE_oG + RG)\nu_i \end{aligned} \quad (9)$$

$$r = T_{w \rightarrow r}Dw + T_{\nu_i \rightarrow r}\nu_i \quad (10)$$

Como verificação direta das propriedades já citadas do sinal  $r$ , fica claro que naturalmente o sinal  $r$  está em função de distúrbios e falhas aditivos na entrada, sendo independente da referência no caso em que a incerteza do modelo,  $E_o$ , é igual a zero, característica que é necessária para que o sinal seja utilizado como um resíduo em detecção e diagnóstico de falhas (Ding et al., 2010).

Portanto, o fato de existir uma incerteza  $E_o$  indica que o sinal de resíduo deixa de ser independente da referência e agora passa a apresentar resposta durante os transientes desse sinal e dependendo do tipo de sistema pode apresentar um valor em regime. Em Tyler e Morari (1994), é apresentado um exemplo de sistema em que uma

incerteza multiplicativa de entrada produz a redução significativa da capacidade de detecção de uma falha aditiva de entrada devido à influência da referência no sinal de alarme (saída do sistema de diagnóstico como chamado por Tyler e Morari (1994)) durante os transientes da referência.

Apesar de o projeto realizado por Tyler e Morari (1994) não considerar o procedimento aqui adotado, o objetivo final é o de observar a falha aditiva no sinal de alarme. Nesse caso, considerando que na estrutura de alternativa de dois graus de liberdade a função  $T_{\nu_i \rightarrow r}$  (equação (10)) se aproxima do ganho unitário quando  $R$  tende a infinito, pode-se concluir que o objetivo do projeto no trabalho de Tyler e Morari (1994) e as propriedades naturais do sinal  $r$  na estrutura alternativa de dois graus de liberdade são os mesmos, ou seja, na ausência de incertezas, é possível detectar facilmente a falha aditiva de entrada no sinal de alarme e no sinal  $r$ , respectivamente para o trabalho de Tyler e Morari (1994) e para o presente trabalho.

Desse modo, quando o modelo é preciso, o projeto do controlador e do sistema de geração de resíduos podem ser feitos separadamente, como é demonstrado por Nett et al. (1988) e por Tyler e Morari (1994), no entanto, no caso em que  $E_o$  é diferente de zero, o projeto do controlador pode vir a influenciar a capacidade de detecção e diagnóstico de falhas.

É importante observar que o sinal  $r$  sofre grande influência do tipo de sistema que está sendo controlado. Analisando as equações (9) e (10), observa-se que quando o ganho da planta tende a infinito em regime (pólo na origem), a função  $T_{w \rightarrow r}$  tenderá a zero em regime, desse modo o sinal  $r$  só estará em função de  $w$  durante os transientes da referência. Seguindo no caminho oposto, quando a planta apresenta pequenos ganhos em regime, serão observados valores constantes no sinal  $r$  em função da referência. Para tratar essas características de maneira mais clara foram considerados dois tipos de sistemas com incertezas no modelo.

### 3.1 Sistema com pólos na origem

A verificação do comportamento do sinal  $r$  em uma planta com ganho infinito em regime foi realizada utilizando o modelo de um helicóptero de dois graus de liberdade da marca Quanser. Para simular a incerteza refletida na saída, utilizou-se o valor constante de  $E_o = 0.01I$ , como feito no exemplo apresentado por Tyler e Morari (1994), em que  $I$  é a matriz identidade. Para observar a influência do desempenho do controlador sobre o comportamento do sinal  $r$ , foram realizados dois projetos, um com desempenho considerado satisfatório e outro com o desempenho deteriorado se comparado ao primeiro. Durante as simulações, foi aplicado na primeira entrada do sistema um

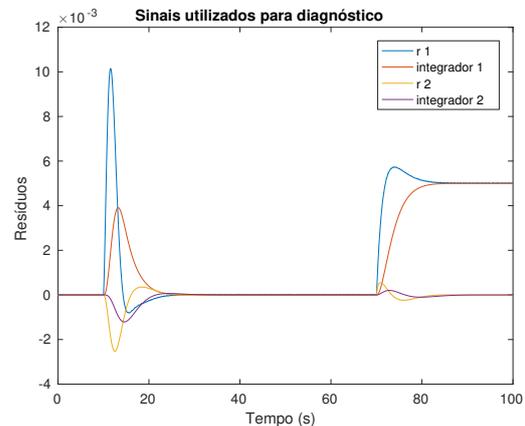


Figura 3: Resposta do sinal  $r$  para variação de sinais de referência e de falha aditiva de entrada do helicóptero 2DOF para o projeto com desempenho satisfatório.

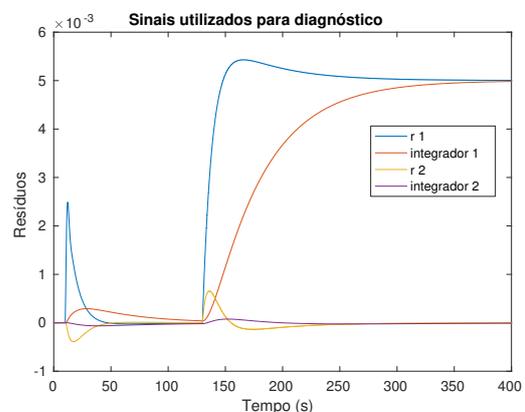


Figura 4: Resposta do sinal  $r$  para variação de sinais de referência e de falha aditiva de entrada do helicóptero 2DOF para o projeto com desempenho deteriorado.

degrau de referência,  $w$ , de  $0.5rad$  e um degrau de falha,  $\nu_i$ , de  $0.005V$ , enquanto que na segunda entrada foi mantido o valor 0 tanto para referência quanto para falha aditiva de entrada.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas, respectivamente, as respostas do sinal  $r$  para os projetos em que o controlador apresenta desempenho satisfatório e desempenho deteriorado. Nessas figuras também podem-se observar os sinais retirados diretamente dos integradores dos controladores PID. Para os dois casos a referência foi aplicada em 10 segundos de simulação, enquanto que a falha,  $\nu_i$ , foi aplicada em 130 segundos para o caso com desempenho deteriorado e em 70 segundos para o caso com desempenho satisfatório.

Como fica claro nas Figuras 3 e 4, o valor do sinal de referência não produz valor constante diferente de zero no sinal  $r$  para nenhum dos casos. Já a mudança de desempenho do controlador permite que seja realizada a redução dos picos relativos aos transientes da referência (Figuras 3 e 4 em

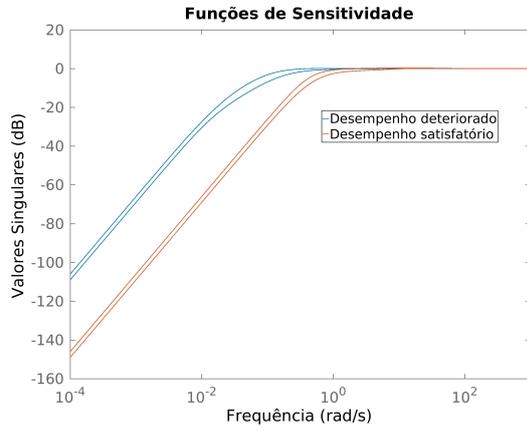


Figura 5: Funções de sensibilidade para os projetos com desempenho satisfatório e desempenho deteriorado.

10 segundos). Na Figura 5, podem-se observar as funções de sensibilidade obtidas em cada um dos projetos.

O uso dos sinais dos integradores pode ser interessante devido à ausência da contribuição das parcelas derivativa e proporcional do controlador, sendo possível assim observar basicamente a dinâmica de baixas frequências do sinal  $r$ . Desse modo, é possível tanto obter a redução de ruídos quanto a redução dos picos relativos à dinâmica de  $T_{w \rightarrow r}$ .

### 3.2 Sistema com ganho constante em regime

Sabendo-se que o ganho em regime é um importante fator na influência do sinal de referência sobre o sinal  $r$ , optou-se por estudar uma planta que não apresenta ganho infinito em regime (Figura 6). A planta utilizada é uma planta piloto industrial com dois tanques de processo e duas bombas. Nessa sessão do trabalho será utilizado o modelo da planta como obtido por Moraes (2015) e com incerteza multiplicativa refletida na saída como na sessão 3.1. Esse modelo foi obtido utilizando entradas e saídas escalonadas para a faixa de 0 a 100%, portanto, os sinais de referência,  $w$ , falha,  $\nu_i$ , controle e saída são todos considerados nessa mesma faixa. Os resultados experimentais desse mesmo sistema serão apresentados no estudo de caso ao final do trabalho.

Durante a simulação foi aplicado um sinal de referência de 5% de nível da planta em 10 segundos e uma falha aditiva,  $\nu_i$ , de 0.05% em 1200 segundos, ambos somente na entrada 1. Na Figura 7, observa-se que os transientes produzidos pela dinâmica de  $T_{w \rightarrow r}$  estão presentes, mas além disso, diferentemente do exemplo da sessão 3.1, agora o sinal  $r$  apresenta um valor constante em função da referência, o que pode ser explicado pelo fato de que, com  $|G|$  constante, a função  $T_{w \rightarrow r}$  só apresentará ganho tendendo ao zero caso o ganho em regime do controlador,  $R$ , também tenda ao zero,

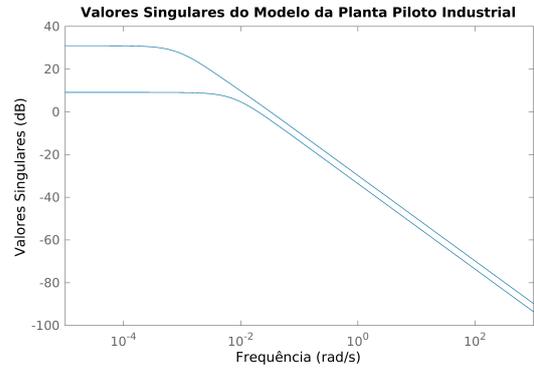


Figura 6: Valores singulares do modelo da planta piloto industrial obtido por Moraes (2015).

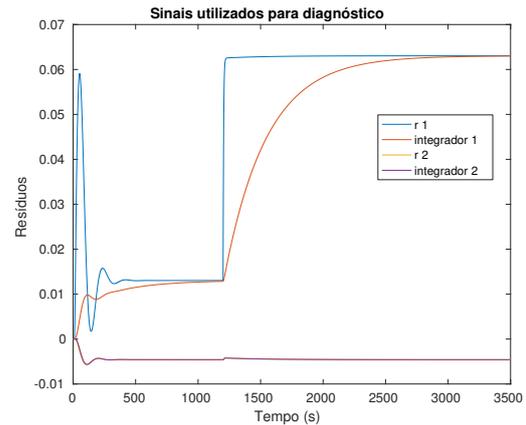


Figura 7: Resposta do sinal  $r$  para variação de sinais de referência e de falha aditiva de entrada da planta piloto industrial.

o que não é praticável.

Na Figura 7, observa-se também que o problema causado pelos picos do sinal  $r$  podem ser muito reduzidos utilizando técnicas de filtragem ou utilizando-se diretamente os sinais provenientes dos integradores dos controladores PID's de  $R$ .

## 4 Estudo de Caso

Para verificar as propriedades de  $r$ , foi realizado um estudo de caso utilizando uma planta piloto industrial da marca Yokogawa. A planta é composta por dois tanques de processo, uma bomba d'água para cada tanque e uma saída em comum para os dois tanques, como pode ser visto na Figura 8.

Em sua dissertação de mestrado, Moraes (2015) apresenta o procedimento de modelagem e controle dessa mesma planta. Moraes (2015) utilizou o ponto de operação 13% e 21% de nível d'água para os tanques 1 e 2, respectivamente, sendo esse mesmo ponto de operação utilizado para realizar os experimentos no presente trabalho.

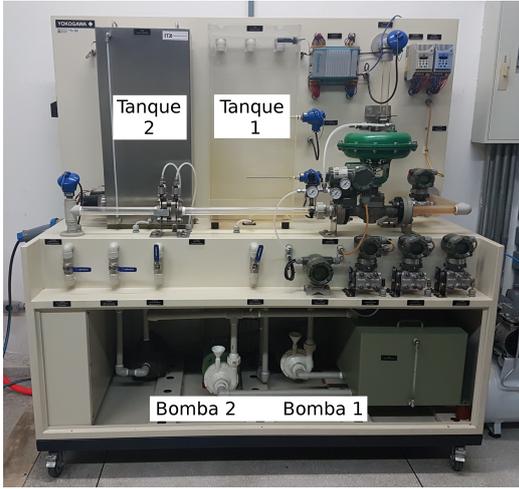


Figura 8: Planta piloto industrial Yokogawa.

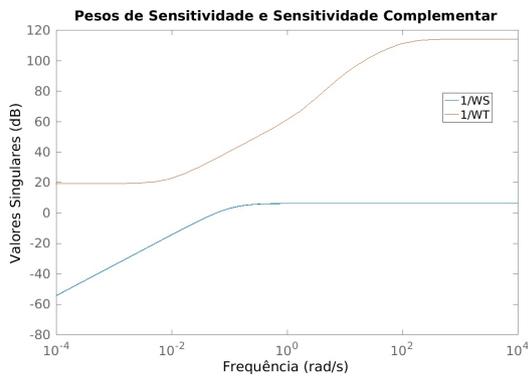


Figura 9: Pesos de sensibilidade (WS) e sensibilidade complementar (WT).

#### 4.1 Projeto do controlador

Inicialmente foi definida a dinâmica desejada como sendo de segunda ordem com tempo de subida de 60 segundos e sobressinal de 25% para os dois tanques como resposta à entrada do tipo degrau (equação (11)).

$$D = \begin{bmatrix} \frac{0.0014}{s^2+0.0306s+0.0014} & 0 \\ 0 & \frac{0.0014}{s^2+0.0306s+0.0014} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Devido à planta ser quadrada e de fase mínima, o controlador *feedforward*  $F$  pode ser obtido com o uso da equação (1). Os pesos de sensibilidade e de sensibilidade complementar podem ser observados na Figura 9. Para garantia de estabilidade robusta, utilizou-se a máxima incerteza do modelo como peso  $WT$ . Essa incerteza foi obtida aplicando o mesmo procedimento observado em (Moraes, 2015).

Realizando-se então a síntese do controlador  $R$  utilizando a estrutura estendida da Figura 2, obteve-se o controlador utilizado nos experimentos práticos de detecção e diagnóstico de falhas utilizando o sinal  $r$ .

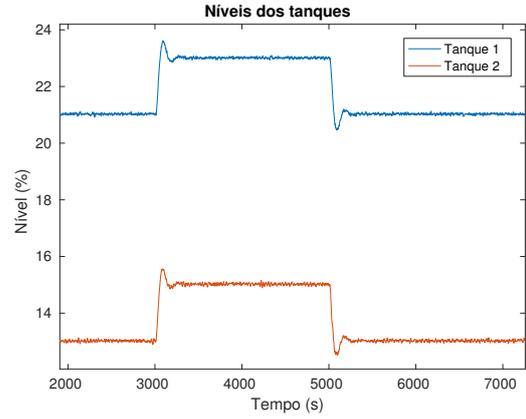


Figura 10: Saídas da planta piloto industrial.

#### 4.2 Definição dos limiares de detecção

Um importante ponto nas técnicas de detecção e diagnóstico de falhas é o mecanismo utilizado para indicar quando os resíduos passam a ter um comportamento apresentado somente quando falhas estão presentes. Nesse trabalho optou-se por utilizar limiares de detecção, que nada mais são que limites que se violados pelos resíduos, indicam que ocorreu uma falha.

Considerando que o sinal  $r$  deixa de ser independente de  $w$  quando existem incertezas no modelo, buscou-se definir quais seriam os limiares de detecção com base na influência dessas incertezas no sinal  $r$ .

A planta foi colocada em regime de operação de 21% e 13% para os tanques 1 e 2, respectivamente, e foram aplicados degraus de referência de 23% e 15% no instante 3000 segundos e em 5000 segundos a referência foi movida novamente para 21% e 13%. Na Figura 10 é apresentada a saída do sistema.

Com essas variações do sinal de referência e do ponto de trabalho do sistema, observou-se que o sinal  $r$  de fato não apresenta grande variação, o que é uma indicação de que o modelo está representando bem o sistema, no entanto, ainda existem variações, portanto, optou-se por criar os limiares de detecção em torno desses sinais, desse modo não ocorrerão falsos alarmes devido às incertezas do modelo. Na Figura 11 são apresentados os sinais coletados nos integradores dos controladores PID sendo encapsulados pelos limiares. Optou-se por utilizar os sinais dos integradores de  $R$  para, como já comentado anteriormente, reduzir as influências de ruídos no sinal utilizado para a detecção e diagnóstico de falhas, além de reduzir também os picos gerados pela dinâmica de  $T_{w \rightarrow r}$ . Daqui em diante, os sinais dos integradores também serão chamados de resíduos.

Tendo o conhecimento dos limiares foi possível aplicar falhas ao sistema e detectar e identificar o tipo de falha por meio dos resíduos. Nas Figuras 12 e 13 são apresentados os resíduos durante a

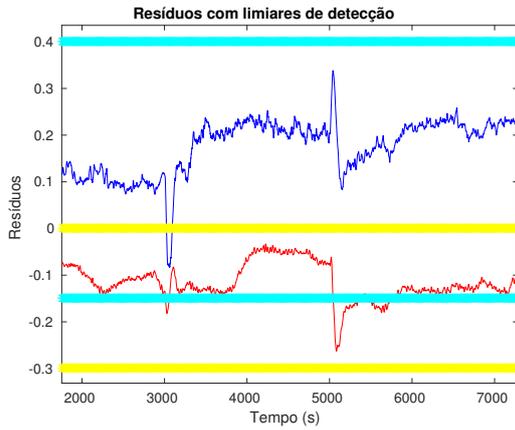


Figura 11: Sinais dos integradores de  $R$  com limiares de detecção cian para o resíduo do tanque 1 (azul) e amarelo para o resíduo do tanque 2 (vermelho).

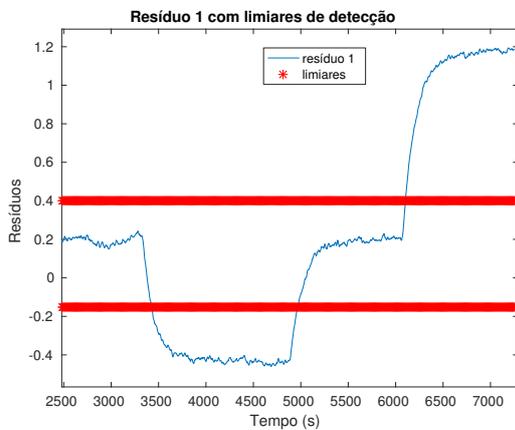


Figura 12: Resíduo do tanque 1 durante a aplicação de falhas.

aplicação de dois tipos de falhas. Em aproximadamente 3300 segundos, foi aplicada uma falha por meio da válvula de *bypass* da bomba 1. Observa-se que a falha surtiu efeito quase que unicamente no resíduo relativo ao canal 1, o que pode ser entendido devido ao acoplamento dos dois tanques ocorrer somente nas tubulações de saída de água, desse modo, uma falha em um atuador pode ser compensada pelo controlador de um canal sem que o outro canal seja muito afetado.

Em 5000 segundos, a primeira falha foi retirada e o sistema voltou a operar normalmente. A segunda falha foi aplicada em aproximadamente 6000 segundos na tubulação de saída de água do tanque 1 para simular o aumento de resistência ao fluxo d'água. Como o acoplamento do sistema é justamente nas saídas dos tanques, percebe-se que houve uma influencia sobre a dinâmica do tanque 2, fazendo com que os dois resíduos excedam os limiares.

A vazão d'água medida na tubulação do tanque 1 era de  $11.7l/min$  no momento em que as

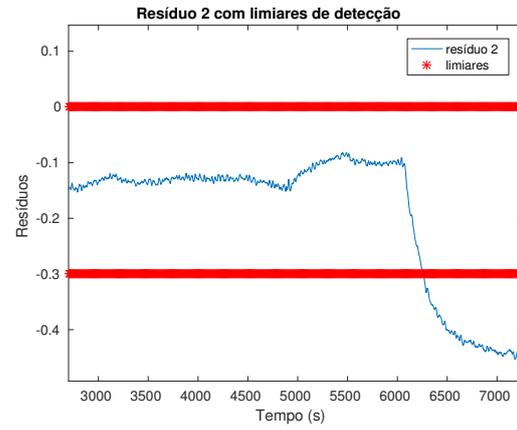


Figura 13: Resíduo do tanque 2 durante a aplicação de falhas.

falhas foram aplicadas. Durante a primeira falha a vazão d'água provocada pelo desvio foi de aproximadamente  $0.2l/min$ , já durante a segunda falha a redução de vazão causada pela restrição foi de  $0.45l/min$ . Dessa forma, nota-se que as falhas apresentam respectivamente uma variação na vazão de 1.7% e 3.8% para a falha 1 e 2. Vale ressaltar que, como pode ser observado nas Figuras 12 e 13, os resíduos ultrapassaram os limiares de detecção e não se mantiveram próximos desses, de modo que falhas com menores vazões também poderiam ter sido detectadas. Fica também evidente como as incertezas no modelo podem reduzir a capacidade de detecção e diagnóstico do sistema.

Sabendo-se que para cada falha há um comportamento dos resíduos, é possível criar uma tabela de sintomas para que o diagnóstico da falha possa ser realizado (Isermann, 2006). Na tabela 1, são apresentados quatro sintomas e as falhas relativas a eles. Os sintomas de falhas no canal do tanque 1 foram extrapoladas para o comportamento do tanque 2 devido à estrutura construtiva ser muito similar.

Na tabela 1, o símbolo  $+$  indica que o resíduo rompeu o limiar superior,  $-$  é o mesmo mas considerando o limiar inferior e  $O$  indica que o resíduo está entre os limiares superior e inferior.

## 5 Conclusões

Nesse trabalho foram apresentadas as principais características do sinal de realimentação da estrutura alternativa de dois graus de liberdade, indicando principalmente o seu comportamento em função de sinais de referência e de falhas aditivas na entrada. Conclui-se que o uso do sinal de realimentação como um resíduo para detecção e diagnóstico de falhas aditivas na entrada é dado por um procedimento relativamente simples, pois naturalmente esse sinal é gerado na malha de controle, tendo o projetista a opção de tornar esse sinal de diagnóstico mais ou menos robusto ao con-

Tabela 1: Sintomas das falhas aplicadas na planta

Falha	Sintoma	
	Resíduo 1	Resíduo 2
Vazamento ou problema na bomba 1.	-	O
Entupimento na tubulação de saída do tanque 1.	+	-
Vazamento ou problema na bomba 2.	O	-
Entupimento na tubulação de saída do tanque 2.	-	+

siderar o conflito entre desempenho de controle e robustez de diagnóstico. Além disso, foi demonstrado que o uso dos sinais dos integradores do controlador  $R$  pode apresentar mais simplicidade ainda por ser um sinal com pouca influência de ruídos e por naturalmente apresentar picos menores que o sinal  $r$ , reduzindo assim a quantidade de alarmes falsos observados durante os transientes da referência.

### Agradecimentos

Agradecimentos à CAPES pelo apoio financeiro e ao ITA pela estrutura e apoio por parte de seus colaboradores.

### Referências

- Apkarian, P. e Noll, D. (2006). Nonsmooth  $H_\infty$  synthesis, *IEEE Transactions on Automatic Control* **51**(1): 71–86.
- Apkarian, P. e Noll, D. (2017). The  $H_\infty$  control problem is solved, *AerospaceLab journal*.
- Åström, K. J. e Hägglund, T. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning*, Vol. 2, Instrument society of America Research Triangle Park, NC.
- Chow, E. e Willsky, A. (1984). Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems, *IEEE Transactions on Automatic Control* **29**(7): 603–614.
- Ding, S. X. (2014). *Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems*, Springer-Verlag London.
- Ding, S. X., Yang, G., Zhang, P., Ding, E. L., Jeansch, T., Weinhold, N. e Schultalbers, M.

(2010). Feedback control structures, embedded residual signals, and feedback control schemes with an integrated residual access, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* **18**(2): 352–367.

Isermann, R. (2006). *An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kienitz, K. H. e Kadirkamanathan, V. (2017). New insights for applications of Kreisselmeier’s structure in robust and fault tolerant control, *2017 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–8.

Kreisselmeier, G. (1999). Two-degree-of-freedom control structure., *at-Automatisierungstechnik* **47**: 266–269.

Moraes, A. T. (2015). Controle robusto para uma planta-piloto industrial utilizando técnica LQG/LTR. Dissertação de mestrado.

Morari, M. e Zafriou, E. (1989). *Robust Process Control*, Prentice Hall.

Nett, C. N., Jacobson, C. A. e Miller, A. T. (1988). An integrated approach to controls and diagnostics: The 4-parameter controller, *1988 American Control Conference*, pp. 824–835.

Skogestad, S. e Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*, John Wiley & Sons Ltd.

Tyler, M. L. e Morari, M. (1994). Optimal and robust design of integrated control and diagnostic modules, *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2060–2064.

Vidyasagar, M. (1988). Normalised coprime factorizations for nonstrictly proper systems, *IEEE transactions on automatic control* **33**(3): 300–301.

Vilanova, R. e Serra, I. (1997). Realisation of two-degrees-of-freedom compensators, *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* **144**(6): 589–595.

Youla, D., Jabr, H. e Bongiorno, J. (1976). Modern wiener-hopf design of optimal controllers—part II: The multivariable case, *IEEE Transactions on Automatic Control* **21**(3): 319–338.