

CONTROLE TOLERANTE A FALHAS: NOVAS ABORDAGENS DE RECONFIGURAÇÃO

Thiago Valério Mendes da Cruz ¹; Orlando Vinicyus Santos Martins ²; Mariella Maia Quadros ³

¹ Thiago Valério Mendes da Cruz, Bolsista CNPq, Engenharia de Controle e Automação, IFMG Campus Sabará, Sabará - MG;

² Orlando Vinicyus Santos Martins, Engenharia de Controle e Automação, IFMG Campus Sabará, Sabará - MG

³ Orientadora: Pesquisadora do IFMG, Campus Sabará; mariella.quadros@ifmg.edu.br

RESUMO

Ao projetar um sistema de controle para um processo industrial, deseja-se que este atenda às especificações de desempenho, seja confiável, seguro e que tenha estabilidade garantida. Porém, na ocorrência de falhas de componentes, como em sensores e atuadores, o desempenho do sistema pode ser deteriorado, resultando em perda de funcionalidade, ou até mesmo em instabilidade. Dessa forma, é importante que sejam projetados sistemas de controle tolerantes a falhas (FTC, do inglês *Fault Tolerant Control*), para que, mesmo na presença de falhas, seja possível garantir a estabilidade do sistema de malha fechada e assegurar um desempenho aceitável. Um dos principais métodos de FTC é a reconfiguração de controle a partir da detecção de falhas nos sensores e atuadores, com a utilização de um bloco de reconfiguração, composto de sensor virtual e atuador virtual, com o objetivo de receber os sinais de controle e dos sensores e corrigi-los, assim mantendo o controlador nominal, sem necessidade de reprojeto. Entretanto essa estratégia pode exigir a utilização de um módulo de detecção e isolamento de falhas (FDI, do inglês *Fault Detection and Isolation*), que ao ser conectado ao sistema de malha fechada pode levá-lo a um funcionamento inadequado devido a possíveis falsos alarmes, detecções incorretas de falhas devido à perturbações e ruídos, podendo até mesmo piorar o desempenho do sistema. Uma outra possível estratégia de FTC é a utilização de controladores híbridos adaptativos, que possuem comportamento de sistemas dinâmicos contínuos e discretos no tempo. Este controlador é capaz de adaptar sua dinâmica de acordo com novas circunstâncias, podendo compensar possíveis falhas de atuador. Desse modo, este trabalho visa o desenvolvimento de técnicas de FTC utilizando a estratégia de bloco de reconfiguração com sensor virtual, juntamente com o desenvolvimento de um controlador PI híbrido adaptativo, para que mesmo na presença de falhas de sensores e atuadores seja possível compensá-las sem a necessidade de utilização de um módulo FDI. Além disso, os desempenhos obtidos com utilização das abordagens propostas são verificados por meio de simulações computacionais.

INTRODUÇÃO:

A crescente complexidade e automação de dispositivos e processos industriais demandam cada vez mais sua confiabilidade. No entanto, a ocorrência de falhas nos sensores e atuadores afeta negativamente a disponibilidade desses sistemas, implicando na maioria dos casos em prejuízos materiais e riscos à segurança. Neste contexto, a implementação de sistemas de controle tolerante a falhas (FTC) é essencial para garantir a manutenção de certas propriedades do sistema, tais como estabilidade e desempenho. As técnicas de FTC podem ser: passivas (STEFANOVSKI, 2018; YANG; YE, 2009; SUN et al., 2018), que lidam com as falhas como se fossem perturbações desconhecidas a serem rejeitadas e que são consideradas no projeto do controlador utilizando, por exemplo, técnicas de controle robusto; ou ativas (LUNZE; RITCHER, 2008; FLEPSDEZASSE; SVARIECK; BREMBECK, 2018; LUNZE; STEFFEN, 2006; BOUNEMEUR; CHEMACHEMA; ESSOUNBOULI, 2018; PIZZI et al., 2019), que alteram a malha de controle após a detecção e diagnóstico das falhas e, portanto, exigem informações provenientes de um sistema de diagnóstico e isolamento de falhas (FDI) (COSME et al., 2018; NAKAMURA et al., 2017).

A abordagem passiva tende a ser mais conservadora, pois na etapa de projeto são consideradas as condições pré-definidas de falhas que podem afetar o sistema, assim como suas condições nominais de funcionamento. Então, é fornecida uma única solução em malha fechada, independentemente da ocorrência de falhas ou do comportamento nominal do sistema, muitas vezes resultando em um baixo desempenho. Assim, esta classe de abordagens não faz nenhuma alteração no sistema quando é afetado por falhas e não requer detecção e isolamento de falhas em tempo real. Por outro lado, estratégias de FTC ativas fazem adaptações no sistema de malha fechada em tempo real, para que permaneça estável e dentro de certas condições de desempenho quando as falhas ocorrerem. Portanto, um módulo FDI é extremamente necessário, pois essas adaptações dependem diretamente da identificação de onde ocorreram as falhas, seu período e intensidade.

O FTC ativo pode ser realizado por meio de acomodação de falhas ou reconfiguração de controle. A primeira modifica o controlador para mitigar os efeitos das falhas, desconsiderando as mudanças na malha de controle e continuam utilizando os mesmos sensores e atuadores do sistema. Já a última modifica tanto a malha de controle quanto o controlador, de modo que apenas a parte saudável do sistema seja utilizada (QUADROS et al., 2020; QUADROS; LEITE; PALHARES, 2022).

Dentre as técnicas de reconfiguração de controle, uma que adquiriu destaque ao longo das últimas décadas é a abordagem denominada ocultação de falhas (STEFFEN, 2005; ROTONDO; CRISTOFARO; JOHANSEN, 2018; RITCHER, 2011), que consiste em inserir um sistema, chamado bloco de reconfiguração, entre a planta com falhas e o controlador. O bloco pode ser composto por atuadores virtuais, utilizado em caso de falhas de atuadores, ou de sensores virtuais, em caso de falhas de sensores. Além disso, seus projetos são independentes um do outro e do projeto do controlador, de acordo com o princípio da separação. O principal objetivo de um bloco de reconfiguração é receber os sinais de controle e dos sensores e corrigi-los de modo que o mesmo controlador (projetado para o sistema nominal) possa ser utilizado sem a necessidade de reprojeto. É importante ressaltar que esta abordagem permite que o sistema de malha fechada permaneça estável e com desempenho satisfatório mesmo na presença de falhas, sem precisar modificar a estrutura ou o projeto do controlador implementado. Embora as estratégias de reconfiguração de controle sejam eficientes para lidar com falhas de sensores e atuadores, possuem a exigência de inclusão de um módulo FDI adicional ao sistema que seja capaz de detectar e estimar as possíveis falhas de forma precisa. Entretanto, isso pode não ser possível, uma vez que o módulo FDI pode indicar um falso alarme, estimar as falhas com erros devido à perturbações e ruídos, ou até mesmo podem não indicar um evento de falha. Assim, o desempenho do sistema de malha fechada pode ser deteriorado e a sua estabilidade não ser mais garantida (STEFFEN, 2005; ROTONDO; NEJJARI; PUIG, 2014; TABATABAEIPOUR et al., 2015; QUADROS et al., 2020; QUADROS; LEITE; PALHARES, 2022).

Uma outra possível técnica de FTC ativa é dada pela utilização de um controlador PI (Proporcional-Integral) híbrido adaptativo tolerante a falhas de atuador, que apresenta comportamento linear durante a maior parte do tempo, e tem seu estado reiniciado quando uma certa condição de salto é atendida, de acordo com seu projeto. Assim, um controlador PI híbrido se comporta como um PI convencional durante a execução do algoritmo de controle, mas também realiza reiniciações no estado do integrador, de modo a possibilitar uma considerável melhora no desempenho do sistema de malha fechada. Nos trabalhos de Scola et al. (2017) e Quadros et al. (2019) são propostos controladores PI híbridos adaptativos de simples implementação em processos industriais, capazes de fornecer uma maior eficiência energética que os controladores PI convencionais, além de rejeitar perturbações e incertezas paramétricas no modelo, presentes frequentemente nesses processos.

Portanto, este trabalho propõe o desenvolvimento e implementação de sistemas de controles FTC ativos, a partir da utilização de um bloco de reconfiguração composto de sensor virtual para tratar falhas de sensores e de um controlador PI híbrido adaptativo para compensar falhas de atuadores. É importante ressaltar que essas duas abordagens serão implementadas sem a necessidade de utilização de módulo FDI adicional ao sistema, por meio de metodologias de estimação de falhas e de adaptação de controle.

METODOLOGIA:

O trabalho foi realizado em duas fases complementares: uma mais teórica e outra mais associada à implementação computacional. Para a primeira etapa do desenvolvimento desse projeto foram realizados estudos e revisão bibliográfica sobre sistemas com falhas de sensores e atuadores, abordagens de FTC ativas e passivas e sobre a reconfiguração de controle com utilização de sensores e atuadores virtuais. Após essa etapa inicial, foram realizados estudos e análises de possíveis estratégias para proposição de metodologias de ocultação de falhas com sensores virtuais sem a necessidade de utilização de um módulo FDI adicional para compensação de falhas de sensor. Além disso, para falhas de atuador, foi realizado o estudo e o desenvolvimento de um controlador PI híbrido adaptativo tolerante a falhas baseado no trabalho (SCOLA et al., 2019) e estudo de possíveis estratégias para estimar o valor da falha ocorrida no sistema. Dessa forma, para a segunda etapa foram realizadas simulações computacionais e análises dos resultados obtidos.

Na parte de implementação das abordagens de FTC desenvolvidas, foram realizadas simulações computacionais utilizando modelos e controladores selecionados e projetados, para análise e verificação dos resultados obtidos. Para isso, foram feitas diversas simulações, considerando o comportamento nominal do sistema e os diferentes cenários de falhas de sensor e atuador. Os resultados foram avaliados à luz das simulações, buscando verificar a consistência, adequação e eficiências dos projetos propostos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

A seguir são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento de sistemas de controle tolerante a falhas de sensores e atuadores.

Abordagem para compensar falhas de sensores: Sensor Virtual

Nesta parte do trabalho será abordado o desenvolvimento da estratégia para compensação de falhas de sensor de diferentes tipos e a implementação de um sensor virtual com estimação de falhas por meio de um exemplo computacional. Serão utilizadas as equações para o sistema nominal (sem falhas) em espaço de estados, dadas por:

$$\begin{aligned}\dot{x}_p(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}$$

em que $x_p(t)$ é o vetor das variáveis de estado, $y(t)$ é a saída, $u(t)$ a entrada, A é a matriz de dinâmica, B a matriz de entrada e C a matriz de saída.

A leitura da variável de saída por meio de sensor é dada por $y(t)$, que pode ser alterada em caso de falhas nos sensores do sistema. As falhas podem ser do tipo multiplicativa ou aditiva. Assim, para o sensor virtual não ter que trabalhar com diferentes tipos de falhas, o que resultaria no caso de ter que projetar diferentes observadores para falhas específicas, as falhas multiplicativas e aditivas são convertidas em apenas falhas aditivas. A saída do sistema com falhas multiplicativas e aditivas de sensor pode ser descrita por:

$$y_f(t) = C_f x(t) + Fb(t)$$

em que $y_f(t)$ é a saída com falha, $C_f = \gamma C$ a matriz de saída do sistema com falhas, em que $0 \leq \gamma \leq 1$ é o fator multiplicativo da falha, com $\gamma = 0$ sendo uma falha total, $\gamma = 1$ o caso nominal e para $0 < \gamma < 1$ valores de falhas parciais. Além disso, $Fb(t)$ é o termo da falha aditiva.

Para descrever as falhas multiplicativas e aditivas na forma de falhas aditivas, é necessário somar e subtrair o termo $Cx(t)$ na equação, assim não alterando o valor do cálculo, como:

$$y_f(t) = Cx(t) + (\gamma - I)Cx(t) + Fb(t) = Cx(t) + f_s(t)$$

em que I é a matriz identidade e $f_s(t) = (\gamma - I)Cx(t) + Fb(t)$ é o termo da falha aditiva que engloba as possíveis falhas multiplicativas e aditivas que possam ocorrer no sistema, com $F = I$.

Para que não seja necessário utilizar um módulo FDI para informar os valores de falhas de sensor, a estimação da falha $f_s(t)$ será realizada pelo próprio sensor virtual, por meio da utilização de um sistema aumentado, dado por:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= \bar{A}\hat{x}(t) + \bar{B}u(t) \\ y_f(t) &= \bar{C}\hat{x}(t) \\ \dot{f}_s(t) &= 0\end{aligned}$$

em que:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_p(t) \\ f_s(t) \end{bmatrix}; \bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}; \bar{C} = [C \quad F]$$

A partir disso, o sensor virtual pode ser descrito por:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t) &= \bar{A}\hat{x}(t) + \bar{B}u(t) + L[y_f(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y}(t) &= \bar{C}\hat{x}(t)\end{aligned}$$

em que $\hat{x}(t)$ é a estimação do estado aumentado do sistema, $\hat{y}(t)$ é a saída estimada pelo sensor virtual e L o ganho projetado para o sensor virtual.

Com o objetivo de verificar o desempenho do sistema para diferentes falhas de sensor, são realizadas simulações computacionais utilizando como exemplo o sistema nominal com as seguintes matrizes:

$$A = \begin{bmatrix} -0,1280 & 0,1280 \\ 0,0088 & -0,0131 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0,751 \\ 0 \end{bmatrix}; C = [1 \quad 0]$$

O primeiro passo é projetar o controlador pelo método de realimentação de estados com integrador, que consiste em aumentar o sistema de modo a incluir o estado da integral do erro de rastreamento da referência. Assim, o sinal de controle é dado por:

$$u(t) = -[K \quad k_i] \begin{bmatrix} x_p(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix}$$

com $\xi(t) = \int r(t) - y(t)$, em que $r(t)$ é o sinal de referência, K o ganho da realimentação de estados e k_i o ganho do integrador. Mais detalhes para o projeto do controlador podem ser apresentadas em (OGATA, 2010).

Os autovalores desejados de malha fechada são escolhidos de modo que o tempo de acomodação do sistema seja de 300 segundos e o sobressinal de 5%. Com a utilização do método de Ackerman, os ganhos obtidos são:

$$K = [-0,0636 \quad 0,0516]; \quad k_i = [0,0025]$$

Para o sensor virtual, os autovalores desejados utilizados para o projeto são escolhidos de modo que tenham partes reais 7 vezes menores que os autovalores dominantes de malha fechada. Por meio do método de Ackerman, o ganho do sensor virtual é dado:

$$L = \begin{bmatrix} -1,3382 \\ -1,2914 \\ 1,4771 \end{bmatrix}$$

Ao realizar as simulações com os dados apresentados, são obtidos os gráficos para análise do desempenho. Os gráficos superiores representam a saída do sistema e os inferiores o sinal de controle gerado pelo controlador. Considerando o sistema nominal (sem falhas de sensor), é obtido o gráfico da Figura 1.

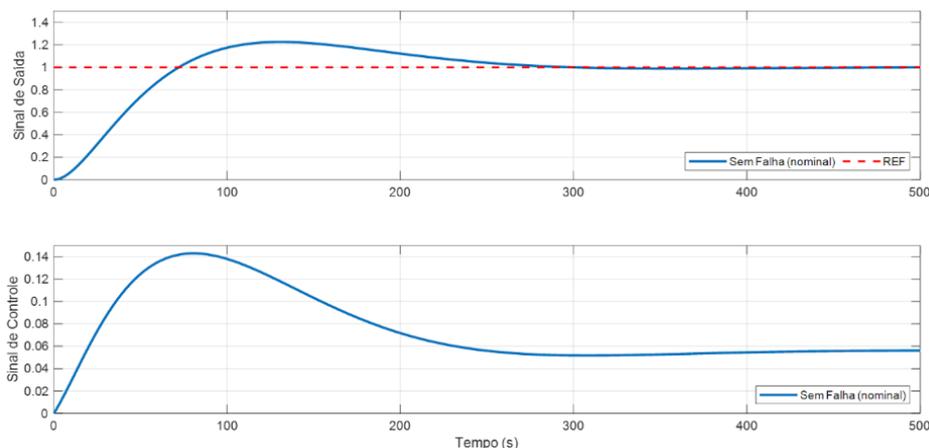


Figura 1 – Gráficos de simulação para o sistema nominal.

A Figura 2 apresenta os gráficos considerando uma falha multiplicativa de 5% ($\gamma = 0,95$) e para o tempo $t \geq 500$ segundos. Como é possível observar, com a utilização apenas do controlador sem o sensor virtual (linha em rosa), o sistema apresenta um erro de regime permanente para seguimento de referência, não sendo capaz de compensar a falha. Por outro lado, com implementação do sensor virtual, o sistema (linha em azul) oculta a falha do controlador, fazendo com que o erro para seguimento de referência se torne nulo após um período de tempo.

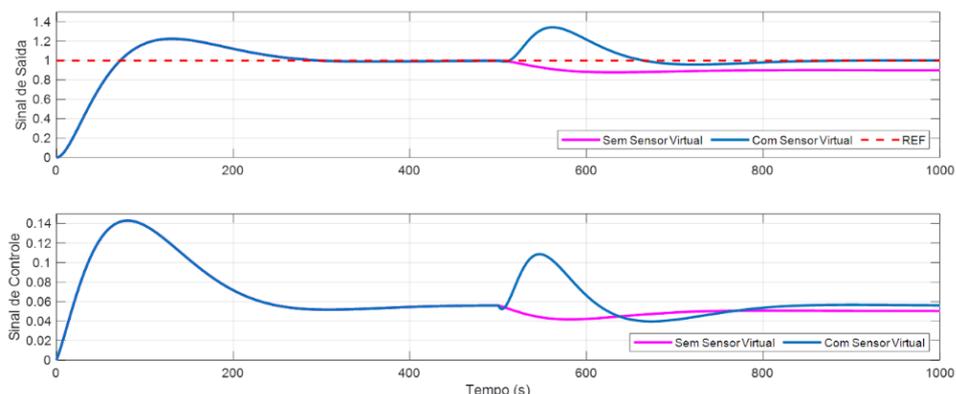


Figura 2 – Gráficos de simulação para o sistema com falha multiplicativa de sensor.

A Figura 3 mostra os resultados obtidos para uma falha multiplicativa de 5% ($\gamma = 0,95$) para o tempo $t \geq 500$ segundos e uma falha aditiva de $b(t) = 0,1$ para $500 < t \leq 1000$ segundos. Novamente, é possível notar que o sistema com sensor virtual (linhas em azul) é capaz de rejeitar as falhas de sensor, mantendo o seguimento de referência, enquanto o sistema somente com o controlador (linhas em rosa) apresenta uma perda de desempenho significativa.

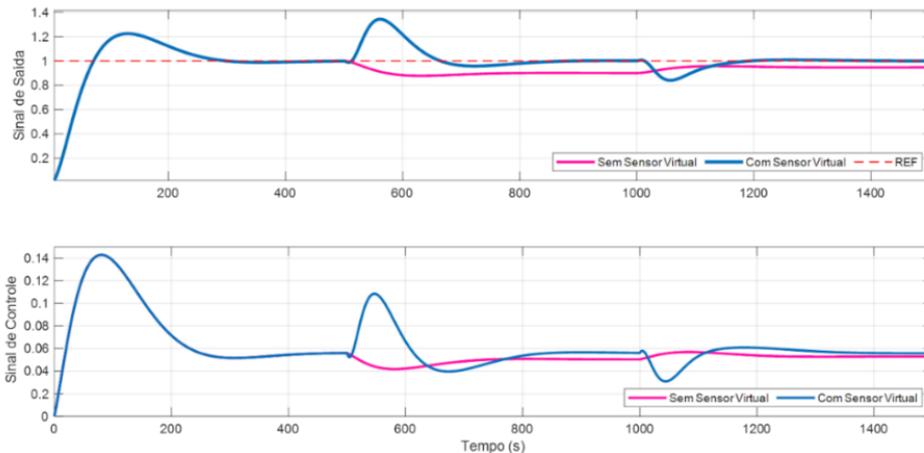


Figura 3 – Gráficos de simulação para o sistema com falha multiplicativa e aditiva de sensor.

Abordagem para compensar falhas de atuadores: Controlador PI Híbrido Adaptativo

Nesta parte do trabalho será abordada a compensação de falhas de atuadores utilizando o controlador PI híbrido adaptativo tolerante a falhas. É importante ressaltar que para a simulação de falhas de atuadores será considerado apenas falhas multiplicativas, de modo a matriz de entrada B do sistema seja substituída por $B_f = B\phi$, em que $0 \leq \phi \leq 1$ é o fator multiplicativo da falha, com $\phi = 0$ sendo uma falha total, $\phi = 1$ o caso nominal e para $0 < \phi < 1$ valores de falhas parciais. Para as simulações realizadas, foi considerado o sistema com as matrizes dadas por $A = -0,0106$, $B = 1$ e $C = 0,0015$.

Desse modo, para a implementação do controlador PI híbrido adaptativo no modelo de simulação, é necessário primeiramente obter a sintonia de um controlador PI linear comum. A sintonia utilizada será pelo método de alocação de polos para sistemas de primeira ordem sem tempo morto. Para as especificações de projeto são para obtenção de sobressinal de 50% e tempo de acomodação próximo de 350 segundos. Assim, o ganho proporcional e o tempo integral do controlador são dados por:

$$K_p = 8,4530; T_i = 4,3380$$

Assim, a partir do controlador PI linear obtido, é possível desenvolver o controlador PI híbrido adaptativo tolerante a falhas. Para isso, os parâmetros que precisam ser determinados para implementação do controlador são K_p , K_i e F , conforme Scola et al. (2017) e Quadros et al. (2019). O ganho proporcional K_p é o mesmo utilizado no controlador linear e o ganho integral K_i é definido por K_p/T_i , em que T_i também é mesmo do caso linear. A variável F é utilizada na reiniciação do integrador e pode ser determinada como sendo o inverso do ganho estático da planta. Desse modo, os valores para os parâmetros do controlador PI Híbrido adaptativo são:

$$K_p = 8,4530; K_i = 1,9486; F = 7,0175$$

A estratégia de sistemas híbridos faz com que a resposta do sistema tenha um tempo de subida igual à do PI linear correspondente, no entanto sem apresentar sobressinal, assim reduzindo o tempo de acomodação. Sendo assim, um dos maiores benefícios é a eficiência energética obtida, pois o valor de saída desejado é alcançado em menor tempo e com menos variações no sinal de controle.

Para verificar o desempenho do sistema foi aplicado um degrau unitário no sistema em malha fechada com o controlador PI e com o PI híbrido adaptativo tolerante a falhas, sujeitos a falhas de atuadores. Em um primeiro momento, não há falha de atuador entre o intervalo de tempo de 0 a 500 segundos, sendo assim o atuador trabalha de forma nominal. Em um segundo momento, o valor da falha de atuador entre o intervalo de tempo de 501 a 900 segundos é $\phi = 0,8$, apresentando falha parcial de 20%. E em um terceiro cenário, o valor da falha entre o intervalo de tempo de 901 a 1200 segundos é igual a $\phi = 0,5$, tendo uma perda de 50% de sua eficiência.

Pode-se observar na Figura 4 as respostas temporais obtidas pela simulação do sistema linear com o controlador PI linear (linhas em azul) e com o controlador PI híbrido adaptativo tolerante a falhas (linhas em rosa). Com base no superior, pode-se observar no primeiro momento (0 a 500s) um comportamento semelhante dos dois sistemas. No segundo momento (501 a 900s), ocorre a falha de atuador equivalente a 20% de perda de eficiência e pode-se observar que o controlador PI apresenta oscilações significativas, mas é capaz de manter o segmento de referência e de compensar as falhas. Já o controlador PI híbrido adaptativo, devido à adaptação da lei de controle consegue manter o segmento de referência e compensar as falhas de atuador. No terceiro momento (901 a 1200s), ocorrendo o mesmo comportamento descrito no segundo momento, porém as respostas dos sistemas de controle apresentam oscilações de maior amplitude do que no cenário anterior.

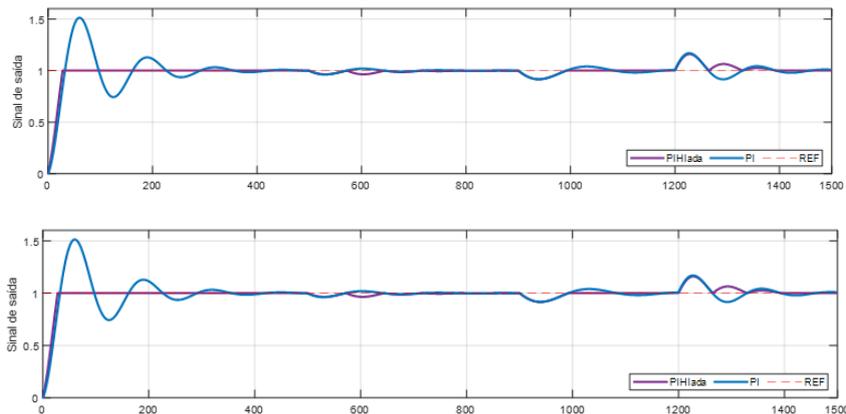


Figura 4 - Gráficos de simulação para o sistema com falha multiplicativa de atuador.

A partir da utilização do controlador PI híbrido adaptativo, também é possível estimar o valor da falha de atuador ϕ , conforme mostrado na Figura 5.

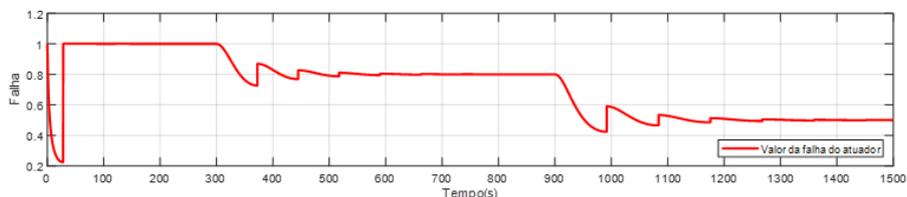


Figura 5 – Estimação de atuador pelo controlador híbrido adaptativo tolerante a falhas.

Mais detalhes do desenvolvimento do controlador PI híbrido tolerante a falhas podem ser encontrados no artigo dos autores publicado no Congresso Brasileiro de Automática 2023 (CBA 2023) em (MARTINS et al., 2022).

CONCLUSÕES:

Portanto, através de simulações computacionais, foi possível verificar que o sensor virtual agiu conforme o esperado, ocultando a falha de sensor do controlador após sua ocorrência e permitindo que o sistema continuasse operando com um seguimento de referência adequado e com desempenho satisfatório. Os gráficos obtidos demonstraram a eficiência do sensor virtual na estimação e compensação das falhas de sensor. Pode-se concluir também, que o controlador PI híbrido adaptativo é o mais adequado para controlar o sistema com falhas de atuador, pois nos testes de seguimento de referência apresenta melhor desempenho comparado ao controlador PI linear. É importante ressaltar que embora o PI linear tenha se mostrado capaz de compensar as falhas de atuador, o seu projeto não dá garantias matemáticas da manutenção de estabilidade do sistema após a ocorrência de falhas.

Em suma, o uso de sensor virtual mostrou-se uma abordagem promissora para lidar com falhas em sensores, garantindo o funcionamento adequado do sistema mesmo diante dessas falhas. O PI híbrido adaptativo apresenta-se como um controlador eficiente para controle de sistemas, por apresentar um desempenho satisfatório mesmo na presença de falha de atuadores. Essa tecnologia tem o potencial de

umentar a confiabilidade e robustez dos sistemas em diversas aplicações, além de dispensar a utilização de um módulo de detecção e isolamento de falhas (FDI) adicional ao sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- BOUNEMEUR, Abdelhamid; CHEMACHEMA, Mohamed; ESSOUNBOULI, Najib. **Indirect adaptive fuzzy fault-tolerant tracking control for MIMO nonlinear systems with actuator and sensor failures**. ISA transactions, v. 79, p. 45-61, 2018.
- COSME, Luciana Balieiro et al. **A novel fault-prognostic approach based on interacting multiple model filters and fuzzy systems**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 66, n. 1, p. 519-528, 2018.
- FLEPS-DEZASSE, Michael; SVARICEK, Ferdinand; BREMBECK, Jonathan. **Design and experimental assessment of an active fault-tolerant LPV vertical dynamics controller**. IEEE Transactions on Control Systems Technology, v. 27, n. 3, p. 1267-1274, 2018.
- LUNZE, Jan; RICHTER, Jan H. **Reconfigurable fault-tolerant control: a tutorial introduction**. European journal of control, v. 14, n. 5, p. 359-386, 2008.
- LUNZE, Jan; STEFFEN, Thomas. **Control reconfiguration after actuator failures using disturbance decoupling methods**. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 51, n. 10, p. 1590-1601, 2006.
- MARTINS, O. V. S. et al. **Controle Híbrido Adaptativo Tolerante a Falhas**. In: Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Automática, Fortaleza, 2022.
- NAKAMURA, Thiago A. et al. **Adaptive fault detection and diagnosis using parsimonious Gaussian mixture models trained with distributed computing techniques**. Journal of the Franklin Institute, v. 354, n. 6, p. 2543-2572, 2017.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010
- PIZZI, Noelia et al. **Actuator fault tolerant control based on probabilistic ultimate bounds**. ISA transactions, v. 84, p. 20-30, 2019.
- QUADROS, Mariella Maia et al. **Fault tolerant control for linear parameter varying systems: an improved robust virtual actuator and sensor approach**. ISA transactions, v. 104, p. 356-369, 2020.
- QUADROS, Mariella Maia; LEITE, Valter J. S.; PALHARES, Reinaldo Martínez. **Robust Fault Hiding Approach for T-S Fuzzy Systems with Unmeasured Premise Variables**. Information Sciences, v. 589, p. 690-715, 2022.
- QUADROS, Mariella M. et al. **A plug-in procedure for hybridization of PI controllers**. IFAC PapersOnLine, v. 52, n. 1, p. 892-897, 2019.
- RITCHER, Jan H. **Reconfigurable control of nonlinear dynamical systems: a fault-hiding approach**. Springer, 2011.
- ROTONDO, Damiano; CRISTOFARO, Andrea; JOHANSEN, Tor Arne. **Fault tolerant control of uncertain dynamical systems using interval virtual actuators**. International Journal of Robust and Nonlinear Control, v. 28, n. 2, p. 611-624, 2018.
- ROTONDO, Damiano et al. **A fault-hiding approach for the switching quasi-LPV fault-tolerant control of a four-wheeled omnidirectional mobile robot**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 62, n. 6, p. 3932-3944, 2014.
- SCOLA, Ignacio Rubio; QUADROS, Mariella M.; LEITE, Valter J. S. **Robust Hybrid PI Controller with a Simple Adaptation in the integrator reset state**. IFAC-PapersOnLine, v. 50, n. 1, p. 1457-1462, 2017.
- SERON, Maria M.; BRASLAVSKY, Julio H.; GOODWIN, Graham C. **Fundamental limitations in filtering and control**. Springer Science & Business Media, 2012.
- STEFANOVSKI, Jovan D. **Fault tolerant control of descriptor systems with disturbances**. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 64, n. 3, p. 976-988, 2018.
- STEFFEN, Thomas. **Control reconfiguration of dynamical systems: linear approaches and structural tests**. Springer Science & Business Media, 2005.
- SUN, Shaoxin et al. **Dynamic output feedback-based fault-tolerant control design for TS fuzzy systems with model uncertainties**. ISA transactions, v. 81, p. 32-45, 2018.
- TABATABAEIPOUR, S. Mojtaba; STOUSTRUP, Jakob; BAK, Thomas. **Fault-tolerant control of discrete-time LPV systems using virtual actuators and sensors**. International journal of Robust and nonlinear Control, v. 25, n. 5, p. 707-734, 2015.