

Controle Híbrido Adaptativo Tolerante a Falhas

Orlando Vinicyus Santos Martins* Rodrigo Hiroshi Murofushi*
Valter J. S. Leite** Mariella Maia Quadros*

* *Área de Controle e Processos Industriais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG Campus Sabará, (e-mails: ovinicyus@gmail.com, rodrigo.hiroshi@ifmg.edu.br, mariella.quadros@ifmg.edu.br)*

** *Departamento de Engenharia Mecatrônica, CEFET-MG - Campus Divinópolis, (e-mail: valter@ieee.org)*

Abstract: When designing a control system for an industrial process, it is desirable for it to satisfy the performance specifications, to be reliable, safe, and to have guaranteed stability. However, in the occurrence of components' faults, such as sensors and actuators, system performance can deteriorate, resulting in loss of functionality, or even instability. Thus, it is important to design Fault Tolerant Control (FTC) systems, so that, even in the presence of faults, it is possible to guarantee the stability of the closed-loop system and ensure acceptable performance. This paper proposes a fault tolerant control approach using an adaptive hybrid PI (Proportional-Integral) controller for systems subject to actuator faults without the need to use a Fault Detection and Isolation (FDI) module. To verify the proposed methodology, computer simulations are performed considering different fault scenarios and comparisons with a classic PI and a hybrid controller without adaptation found in the literature.

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 do processo, 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. Portanto, neste artigo é proposta uma abordagem de controle tolerante a falhas com utilização de controlador PI (Proporcional-Integral) híbrido adaptativo, para sistemas sujeitos a falhas de atuadores sem a necessidade de utilização de um módulo de detecção e isolamento de falhas (FDI, do inglês *Fault Detection and Isolation*). Para verificação da metodologia desenvolvida, são realizadas simulações computacionais considerando diferentes cenários de falhas e comparações com um PI clássico e um controlador híbrido sem adaptação encontrado na literatura.

Keywords: Fault Tolerant Control; Hybrid Control; Adaptive Control; Fault Accommodation; Actuator Faults.

Palavras-chaves: Controle Tolerante a Falhas; Controle Híbrido; Controle Adaptativo; Acomodação de Falhas; Falhas de Atuador.

1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade e automação de dispositivos e processos industriais exigem cada vez mais 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, do inglês *Fault Tolerant Control*) é crucial para garantir a manutenção da estabilidade e desempenho. As técnicas de FTC podem ser passivas (Yang and Ye, 2009; Sun et al., 2018; Stefanovski, 2019) ou ativas (Lunze and Steffen, 2006; Lunze and Richter, 2008; Bounemeur et al., 2018; Pizzi et al., 2019). As técnicas passivas lidam com as falhas como se fossem

perturbações desconhecidas a serem rejeitadas e que são consideradas no projeto do controlador. Nesse caso, por exemplo, são utilizadas técnicas de controle robustas e não é realizada nenhuma modificação no sistema. As técnicas ativas alteram a malha de controle após a detecção e diagnóstico das falhas e, portanto, exigem informações provenientes de um sistema de detecção e isolamento de falhas (FDI, do inglês *Fault Detection and Isolation*) (Nakamura et al., 2017; Cosme et al., 2019).

Sendo assim, o controlador a ser implementado possui um importante papel, principalmente quando é o responsável por garantir a estabilidade e o desempenho do sistema sujeito à ocorrência de falhas. Nos processos industriais, os controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) são muito utilizados, principalmente os do tipo

PI (Proporcional-Integral). Isso se deve ao fato de apresentarem desempenho satisfatório para muitas aplicações de controle, particularmente quando as dinâmicas do processo são simples e as especificações de desempenho pouco exigentes. Entretanto, esses controladores lineares possuem certas limitações, sendo necessário definir as prioridades de controle e compromissos entre a velocidade do sistema, valor máximo de sobressinal, gasto de energia e margens de estabilidade (Åström and Hägglund, 2006; Desborough and Miller, 2002).

Nesse contexto, surgiram os controladores não lineares com reiniciação ou chaveados, denominados controladores híbridos, capazes de superar as principais limitações dos controladores lineares (Feuer et al., 1997; Beker et al., 2001; Zhao et al., 2013). Especificamente, um controlador PI híbrido se comporta como um PI convencional durante a maior parte da execução do algoritmo de controle, mas em determinados instantes, definidos como saltos, tem o estado do integrador reiniciado. Isso proporciona uma considerável melhora no desempenho do sistema, sendo possível a obtenção de uma resposta temporal com baixos tempos de subida e acomodação e, simultaneamente, com pequeno ou nenhum sobressinal (Zaccarian et al., 2005; Rubio-Scola et al., 2017; Quadros et al., 2019). Para mais detalhes sobre a teoria de sistemas híbridos, veja os trabalhos de Goebel et al. (2012) e Lunze and Lamnabhi-Lagarrigue (2009).

Os trabalhos de Rubio-Scola et al. (2017) e Quadros et al. (2019) propõem controladores PI híbridos adaptativos de simples implementação em processos industriais, capazes de obter uma maior eficiência energética que os controladores PI convencionais, além de rejeitar perturbações e serem robustos a incertezas paramétricas do modelo, frequentemente presentes nesses processos. No entanto, é importante ressaltar que esses trabalhos apresentam o projeto e a implementação dos controladores para condições nominais de funcionamento (sem a ocorrência de falhas).

Embora as abordagens de FTC ativas sejam eficientes para lidar com falhas de atuadores, com utilização, por exemplo, de técnicas de acomodação de falhas e reconfiguração de controle, possuem a exigência de inclusão de um módulo FDI adicional ao sistema que seja capaz de detectar e estimar as falhas de forma precisa (Tabatabaeipour et al., 2015; Quadros et al., 2020; Zhang et al., 2020; Quadros et al., 2022; Xu et al., 2022). Entretanto, isso pode não ser possível, uma vez que o módulo FDI pode indicar falsos alarmes, estimar as falhas com erros devido à perturbações e ruídos, ou até mesmo podem não indicar um evento de falha (Richter, 2011). Assim, o desempenho do sistema de malha fechada pode ser deteriorado e a sua estabilidade não ser mais garantida.

Este trabalho utiliza a técnica do controlador PI híbrido adaptativo proposto por Rubio-Scola et al. (2017) e Quadros et al. (2019) para tratar o problema de controle de sistemas com falhas de atuador. Para isso, as possíveis falhas são inseridas no modelo do sistema híbrido como incertezas paramétricas e a adaptação de controle é responsável por compensar seus efeitos, sem a exigência de utilização de um módulo FDI, ao contrário das abordagens de FTC ativas encontradas na literatura. O trabalho mostra que a técnica do controlador PI híbrido adaptativo é uma alternativa

viável para o tratamento de falhas de atuadores, as quais são levadas em consideração na modelagem do sistema.

Notações: As notações referentes aos sistemas híbridos são as mesmas utilizadas em Goebel et al. (2012), em que a variável independente do sistema (tempo híbrido) é definido como subconjunto de $[0, \infty) \times \mathbb{N}_0$, dado pela união finita ou infinita $[t_i, t_{i+1}) \times \{i\}$. Os instantes i e $[t_i, t_{i+1})$ se referem, respectivamente, aos momentos de saltos e aos períodos de fluxo da dinâmica do sistema. $x(t, i)$ é o vetor de estados que depende do tempo híbrido (t, i) . Como forma de simplificar a notação, sempre que possível, a dependência temporal é omitida. Ou seja, $x \equiv x(t, i)$ e uma função $f(x(t, i)) \equiv f(x)$. O estado após um salto é dado por $x^+ \equiv x(t_{i+1}, i + 1)$. Além disso, $\mathbb{R}^{m \times n}$ denota o conjunto de matrizes com entradas reais e dimensões $m \times n$. A matriz $J(\rho) = \sum_{i=1}^D \rho_i J_i$ é uma combinação convexa de D matrizes, com J_i denotando os vértices, em que $\rho = [\rho_1 \dots \rho_D]^T$ é o vetor de parâmetros incertos que pertence ao simplex unitário $\Xi_D(\rho) = \{\rho \in \mathbb{R}^D : \sum_{i=1}^D \rho_i = 1, \rho_i \geq 0\}$, $\forall i = 1, \dots, D$. $\Omega_D(J) = \{J_1, J_2, \dots, J_D\}$ denota o politopo de D vértices das matrizes conhecidas J_i .

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA COM FALHAS

Considere o sistema nominal com uma entrada e uma saída (SISO, do inglês *Single-Input/Single-Output*) dado por:

$$\Sigma_P = \begin{cases} \dot{x}(t) = A_p(\zeta)x(t) + B_p(\zeta)(u(t) + d(t)), \\ y(t) = C_p(\zeta)x(t), \end{cases} \quad (1)$$

em que $x(t) \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados, $u(t) \in \mathbb{R}$ é o sinal de controle, $y(t) \in \mathbb{R}$ é a saída do sistema e $d(t) \in \mathbb{R}$ é uma perturbação de energia finita, com $d(t) \in \mathcal{L}_2$. As matrizes $A_p(\zeta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_p(\zeta) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ e $C_p(\zeta) \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ relacionam a dinâmica e a saída do sistema e pertencem aos politopos cujos vértices são conhecidos. Então $A_p(\zeta) \in \Omega_N(A_p)$, $B_p(\zeta) \in \Omega_N(B_p)$ e $C_p(\zeta) \in \Omega_N(C_p)$.

Quando o sistema (1) é sujeito a falhas de atuador, é denotado por Σ_{P_f} , em que a indicação de falha $\phi \in \mathbb{R}$ é inserida como um parâmetro de incerteza na matriz de entrada. Assim, o modelo com falhas é:

$$\Sigma_{P_f} = \begin{cases} \dot{x}_f(t) = A_p(\zeta)x_f(t) + B_f(\zeta, \phi)(u_f(t) + d(t)), \\ y_f(t) = C_p(\zeta)x_f(t), \end{cases} \quad (2)$$

em que $\phi \in (0, 1]$, com $\phi = 1$ indicando o funcionamento nominal (sem falha) do atuador e $0 < \phi < 1$ a perda parcial de sua eficiência. Note que o sistema não possui falhas de sensor e que $y_f(t)$ é definido como a saída do sistema com falhas de atuador. Além disso, a matriz de entrada pode ser calculada por:

$$B_f(\zeta, \phi) = B_p(\zeta)\phi. \quad (3)$$

Evidentemente, a indicação de falha ϕ pertence ao domínio politópico, com $\phi \in \Omega_2(\phi)$, contemplando todos os possíveis cenários de falhas de atuador. Portanto, as matrizes do sistema com falhas (2) são incluídas no novo politopo $\Omega_{\bar{N}}([A_p, B_f, C_p])$, dado por:

$$\Omega_{\bar{N}} = \Omega_N([A_p, B_f, C_p]) \times \Omega_2(\phi), \quad (4)$$

com $\bar{N} = 2N$. A partir disso, é possível representar o sistema com falhas (2) com utilização de um único vetor de parâmetros incertos denominado por $\theta \in \Xi_{\bar{N}}(\theta)$, composto pelos parâmetros ζ e ϕ , ou seja, $\theta = [\zeta \ \phi]^T$. Dessa forma,

o sistema Σ_{P_f} possui as matrizes pertencentes ao politopo em (4) e pode ser descrito por:

$$\Sigma_{P_f} = \begin{cases} \dot{x}_f(t) = A_p(\theta)x_f(t) + B_f(\theta)(u_f(t) + d(t)), \\ y_f(t) = C_p(\theta)x_f(t). \end{cases} \quad (5)$$

3. CONTROLADOR HÍBRIDO ADAPTATIVO TOLERANTE A FALHAS

Considere o controlador PI linear com o seguinte sinal de controle:

$$u_f(t) = k_P e(t) + k_I x_I(t), \quad (6)$$

em que k_P e k_I são escalares e representam os ganhos proporcional e integral, respectivamente, $e(t) = r(t) - y_f(t)$ é o erro de regulação para o sistema com falhas, $r(t)$ é o sinal de referência assumido constante por partes e $x_I(t)$ é o estado do integrador.

Os controladores PI híbridos adaptativos propostos por Rubio-Scola et al. (2017) e Quadros et al. (2019) utilizam como base o PI linear em (6) e a partir da reiniciação adaptativa do estado do integrador x_I , se tornam capazes de melhorar o desempenho do sistema de malha fechada, rejeitar perturbações e proporcionar robustez a incertezas paramétricas do modelo, ao contrário de outras abordagens sem adaptação, como por exemplo, a proposta em Nešić et al. (2011).

Como as falhas de atuador podem ser representadas como incertezas paramétricas no modelo do sistema com falhas (5), o projeto do controlador PI híbrido adaptativo proposto por Rubio-Scola et al. (2017) pode ser modificado, de modo que se torne tolerante a falhas de atuador.

Dessa forma, considerando o caso de regulação, ou seja, $\dot{r}(t) = 0$, e omitindo a dependência do tempo, o sistema de malha fechada híbrido, composto pelo sistema com falhas (5) e pelo controlador baseado em Rubio-Scola et al. (2017), pode ser definido como:

Equações de fluxo:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_f &= (A_p(\theta) - B_f(\theta)C_p(\theta)k_P)x_f \\ &\quad + B_f(\theta)(k_I x_I + k_P r + d) \\ \dot{e} &= C_p(\theta)B_f(\theta)(-k_P e - k_I x_I - d) \\ &\quad - C_p(\theta)A_p(\theta)x_f \\ \dot{x}_I &= e \\ \dot{\xi} &= e \\ \dot{\tau} &= 1 \end{aligned} \right\} \eta \geq 0 \text{ ou } \tau \leq \rho, \quad (7)$$

Equações de salto:

$$\left. \begin{aligned} x^+ &= x \\ e^+ &= e \\ x_I^+ &= x_I - \alpha \xi \\ \xi^+ &= 0 \\ \tau^+ &= 0 \end{aligned} \right\} \eta \leq 0 \text{ e } \tau \geq \rho, \quad (8)$$

em que

$$\eta = 2e\xi + \epsilon_1 - \epsilon_2 \xi^2, \quad (9)$$

ϵ_1 e ϵ_2 são constantes suficientemente pequenas, $\rho > 0$ é uma constante dada e $\tau \geq 0$ é um estado auxiliar para regularização temporal, em que $\dot{\tau} = 1$ para $\tau \in [0, 2\rho)$, mantendo τ limitado e para evitar as soluções do tipo Zeno. Além disso, ξ é um estado auxiliar do controlador híbrido adaptativo que possui a dinâmica do erro durante o fluxo e que é reiniciado para zero nos saltos, sendo

utilizado no termo adaptativo da reiniciação do estado do integrador. $\alpha \in [0, 1]$ representa a taxa de adaptação ajustável do controlador, sendo capaz de recuperar o comportamento do PI linear, se definida como $\alpha = 0$ e de recuperar o PI híbrido sem adaptação proposto em Zaccarian et al. (2007), se definida como $\alpha = 1$. Se definida com valores na faixa $0 < \alpha < 1$, o controlador apresenta tanto as características do controlador PI linear quanto a do PI híbrido, possibilitando uma melhora significativa no desempenho do sistema.

Baseado em Rubio-Scola et al. (2017), note que a descrição apresentada em (7) e (8) pode ser escrita como na estrutura proposta em Goebel et al. (2012), resultando no sistema híbrido de malha fechada definido como:

Equações de fluxo:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_a &= A(\theta)x_a + B(\theta)w \\ \dot{\tau} &= 1 \end{aligned} \right\} x_a \in \mathbf{C} \text{ ou } \tau \leq \rho, \quad (10)$$

Equações de salto:

$$\left. \begin{aligned} x_a^+ &= A_r x_a \\ \dot{\tau} &= 0 \end{aligned} \right\} x_a \in \mathbf{D} \text{ e } \tau \geq \rho, \quad (11)$$

em que x_a é um vetor de estados aumentado dado por:

$$x_a = [x_f^T \ e^T \ x_I^T \ \xi^T]^T, \quad (12)$$

e

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} A_p(\theta) - B_f(\theta)C_p(\theta)k_P & 0 \\ -C_p(\theta)A_p(\theta) & -C_p(\theta)B_f(\theta)k_P \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ B_f(\theta)k_I & 0 \\ -C_p(\theta)B_f(\theta)k_I & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_r = \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_d(\theta) = \begin{bmatrix} B_f(\theta) \\ -C_p(\theta)B_f(\theta) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_r(\theta) = \begin{bmatrix} B_f(\theta)k_P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

com $B(\theta) = [B_r(\theta) \ B_d(\theta)]$ e $w = [r \ d]^T$. Os conjuntos $\mathbf{C} \subset \mathbb{R}^n$ e $\mathbf{D} \subset \mathbb{R}^n$ são fechados e representam, os conjuntos de fluxo e saltos, respectivamente, verificando $\mathbf{C} \cup \mathbf{D} = \mathbb{R}^n$, de modo que:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &:= \{x_a \in \mathbb{R}^n : x_a^T M x_a \geq 0\}, \\ \mathbf{D} &:= \{x_a \in \mathbb{R}^n : x_a^T M x_a \leq 0\}, \end{aligned} \quad (14)$$

com:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\epsilon_2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Como a estrutura do sistema híbrido de malha fechada (10) e (11) é semelhante à proposta por Rubio-Scola et al. (2017), a mesma análise de estabilidade robusta pode ser utilizada para garantir a estabilidade do controlador híbrido tolerante a falhas proposto neste artigo. Dessa forma, o seguinte teorema pode ser estabelecido.

Teorema 1. (Adaptado do Teorema 1 proposto por Rubio-Scola et al. (2017)) Considere o sistema de malha fechada descrito por (10)-(11) com matrizes dadas por (13). Se existem as matrizes simétricas definidas positivas $P_i \in$

$\mathbb{R}^{(n+3) \times (n+3)}$, $i = 1, \dots, \bar{N}$, matrizes F_1, F_2, G_1, G_2 pertencentes a $\mathbb{R}^{n \times n}$, constantes $\lambda_F > 0, \lambda_J > 0, \epsilon_1 > 0$ e $\epsilon_2 > 0$, tais que:

$$\Theta_{J,i} \equiv \begin{bmatrix} F_2 A_r + A_r^T F_2^T - P_i - \lambda_J M & \star \\ G_2 A_r - F_2^T & P_i - (G_2 + G_2^T) \end{bmatrix} \leq 0, \quad (16)$$

$$\Theta_{F,i} \equiv \begin{bmatrix} \lambda_F M + F_1 A_i + A_i^T F_1^T & \star \\ P_i + G_1 A_i - F_1^T & -(G_1 + G_1^T) \end{bmatrix} < 0, \quad (17)$$

$\forall i = 1, \dots, \bar{N}$, e se $x_f \in \mathbf{D} \Rightarrow A_r x_a \in \mathbf{C}$, então existe um ρ suficientemente pequeno de modo que o sistema considerado é exponencialmente estável, o que é assegurado por uma função de Lyapunov, dada por:

$$V(x_a) = x_a^T P(\theta) x_a, \quad (18)$$

com $P(\theta) = \sum_{i=1}^{\bar{N}} \theta_i P_i$.

Prova. A prova do teorema segue um procedimento semelhante ao apresentado no Teorema 1 proposto por Rubio-Scola et al. (2017), considerando-se o sistema de malha fechada com falhas descrito por (10) e (11), com matrizes dadas em (13) e substituindo-se $x(t)$ por $x_a(t)$ e ζ por θ .

4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS - SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS

Para verificação da eficiência da metodologia proposta neste artigo e realização de comparações com outras abordagens, são utilizadas simulações computacionais considerando o sistema não linear de tanques acoplados apresentado na Figura 1, inspirado no sistema físico já utilizado em outros trabalhos (Rubio-Scola et al., 2017; Quadros et al., 2018, 2020, 2022; Lopes et al., 2020). O sistema é composto de dois tanques com altura de 80 cm, diâmetro de 62 cm e capacidade de 200 litros. Um sólido não linear é inserido no primeiro tanque, que também recebe a vazão de entrada fornecida por uma bomba hidráulica. A válvula V_1 é mantida fechada e a válvula V_2 é mantida com abertura constante, de modo que a vazão de saída é direcionada para o segundo tanque.

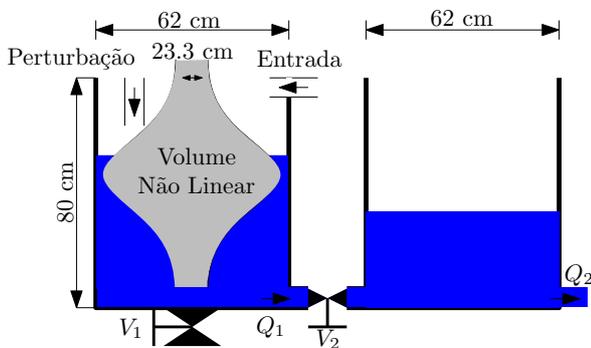


Figura 1. Diagrama do sistema de tanques acoplados.

O modelo do sistema pode ser descrito por:

$$\begin{cases} \delta \dot{h} = \begin{bmatrix} \zeta_1 \zeta_2 (-1 + 412 q_{io}) & \zeta_1 \zeta_2 (1 - 412 q_{io}) \\ \frac{\zeta_2}{S_2} (1 - 412 q_{oo}) & \frac{\zeta_2}{S_2} (-1 + 412 q_{oo}) - \frac{g}{S_2} \end{bmatrix} \delta h \\ \quad + \begin{bmatrix} K_b \zeta_1 \\ 0 \end{bmatrix} \delta u, \\ \delta y = [1 \ 0] \delta h, \end{cases} \quad (19)$$

em que $\delta h = [\delta h_1 \ \delta h_2]^T = [h_1 - h_{1o} \ h_2 - h_{2o}]^T$, com h_1 e h_2 sendo os níveis do primeiro e do segundo tanque, respectivamente, e $h_{1o} = 0.53$ m e $h_{2o} = 0.28$ m os seus valores de equilíbrio. A área do segundo tanque é $S_2 = 0.3019$ m², $\delta u = u - u_o$, com u sendo o sinal de controle e $u_o = 0.5635$ seu valor de equilíbrio. $K_b = 15,5980 \times 10^{-4}$ representa o ganho estático da bomba, $q_{io} = K_b u_{io} + 270,3400 \times 10^{-6}$ m³/s o valor de equilíbrio da vazão de entrada, $q_{oo} = g h_{2o} + 787,5860 \times 10^{-6}$ m³/s o valor de equilíbrio da vazão de saída, com $g = 12,9410 \times 10^{-4}$. Além disso, os parâmetros incertos são definidos por ζ_1 e ζ_2 , que podem ser agrupados no vetor $\zeta = [\zeta_1 \ \zeta_2]^T$ e $0 \leq (h_1, h_2) \leq 80$ e $0 \leq u \leq 1$. Para mais detalhes sobre o processo e sua modelagem, veja Quadros et al. (2020, 2022).

Considerando $0,38 \leq h_1 \leq 0,68$ m e $0,179 \leq h_2 \leq 0,373$ m, os valores máximos e mínimos dos parâmetros incertos são $a_1 = \max \zeta_1 = 48,1534$, $b_1 = \max \zeta_2 = 5,0479 \times 10^{-3}$, $a_2 = \min \zeta_1 = 6,4234$ e $b_2 = \min \zeta_2 = 4,1431 \times 10^{-3}$. Combinando os esses valores máximos e mínimos, é possível obter um modelo incerto (1) com $N = 4$ vértices, com as seguintes matrizes:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} -0,1280 & 0,1280 \\ 0,0088 & -0,0131 \end{bmatrix}; & A_2 &= \begin{bmatrix} -0,1050 & 0,1050 \\ 0,0072 & -0,0115 \end{bmatrix}; \\ A_3 &= \begin{bmatrix} -0,0171 & 0,0171 \\ 0,0088 & -0,0131 \end{bmatrix}; & A_4 &= \begin{bmatrix} -0,0140 & 0,0140 \\ 0,0072 & -0,0115 \end{bmatrix}; \\ B_1 = B_2 &= \begin{bmatrix} 0,0751 \\ 0 \end{bmatrix}; & B_3 = B_4 &= \begin{bmatrix} 0,0100 \\ 0 \end{bmatrix}; & C &= [1 \ 0]. \end{aligned} \quad (20)$$

4.1 Sistema com Falhas de Atuador

Considere que o sistema é sujeito a falhas de atuador na faixa $\underline{\phi} \leq \phi \leq \bar{\phi}$, com $\underline{\phi} = 0,3$ e $\bar{\phi} = 1$. Ou seja, a bomba pode ter uma perda de até 70% em sua eficiência. A indicação de falha ϕ é descrita como uma incerteza paramétrica no modelo, sendo incluída no vetor de parâmetros incertos $\theta = [\zeta_1 \ \zeta_2 \ \phi]^T$. Combinando os valores máximos e mínimos dos parâmetros, é possível obter um modelo do sistema com falhas (5), com $\bar{N} = 8$ vértices.

O projeto do controlador PI linear utilizado como base do híbrido adaptativo tolerante a falhas é realizado conforme a metodologia proposta por Quadros et al. (2019), de modo que seja garantida a ativação da condição de reiniciação do integrador. Dessa forma, o PI é sintonizado de modo que a resposta de malha fechada do sistema com falhas possua sobressinal de aproximadamente 50% e tempo de acomodação de 115 segundos, com polos desejados de $-0,04 \pm j0,2$, resultando nos ganhos $k_P = 0,8189$ e $k_I = 1,9819$. Por meio do Teorema 1, é possível verificar

a estabilidade do sistema com falhas com implementação dos controladores PI (**PI**, com linhas em azul e $\alpha = 0$), PI híbrido sem adaptação apresentado por Zaccarian et al. (2007) (**PIH**, com linhas em vermelho e $\alpha = 1$) e PI híbrido adaptativo tolerante a falhas proposto neste trabalho (**PIHA_{FTC}**, com linhas em verde e $\alpha = 0,6$).

Primeiramente, são realizadas simulações computacionais para o rastreamento de referência do sistema nominal (sem falhas) para os três sistemas de controle (**PI**, **PIH** e **PIHA_{FTC}**), como mostra a Figura 2. Como é possível observar, a resposta do sistema com o controlador **PI** apresenta sobressinal de aproximadamente 55% nos dois primeiros degraus e de 71% no último, com tempo de acomodação de cerca de 68 segundos, 91 segundos e 52 segundos, respectivamente. Já o controlador **PIH** praticamente não apresenta sobressinal, mas devido às ondulações nas proximidades da referência, possui tempo de acomodação de aproximadamente 159 segundos para o primeiro degrau, 145 segundos para o segundo e 160 segundos para o terceiro. Por outro lado, o **PIHA_{FTC}** praticamente não possui sobressinal e o tempo de acomodação obtido é de cerca de 24 segundos, 26 segundos e 24 segundos, respectivamente.

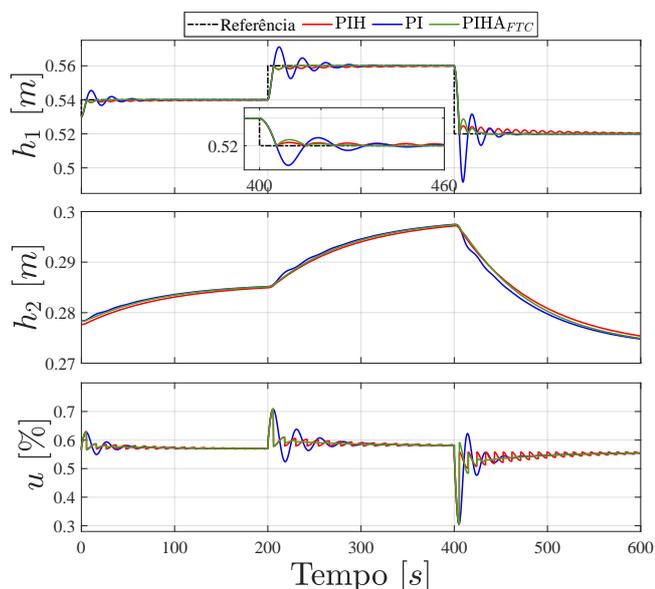


Figura 2. Simulações computacionais para seguimento de referência: Nível do primeiro tanque (h_1 - gráfico superior), nível do segundo tanque (h_2 - gráfico intermediário) e sinal de controle aplicado ao sistema (u - gráfico inferior).

Em seguida, são realizadas simulações para falhas de atuador constantes por partes, referentes à perda de 20%, 30% e 42% de eficiência, respectivamente, cujas respostas temporais são apresentadas na Figura 3. Assim, a indicação de falha é considerada como:

$$\begin{cases} \phi = 1, & t < 100, \\ \phi = 0,8, & 100 \leq t < 300, \\ \phi = 0,7, & 300 \leq t < 500, \\ \phi = 0,58, & t \geq 500. \end{cases} \quad (21)$$

Após a ocorrência de falhas de atuador, nota-se que o controlador **PI** é capaz de rejeitá-las com perda de desempenho, mas consegue manter o rastreamento da

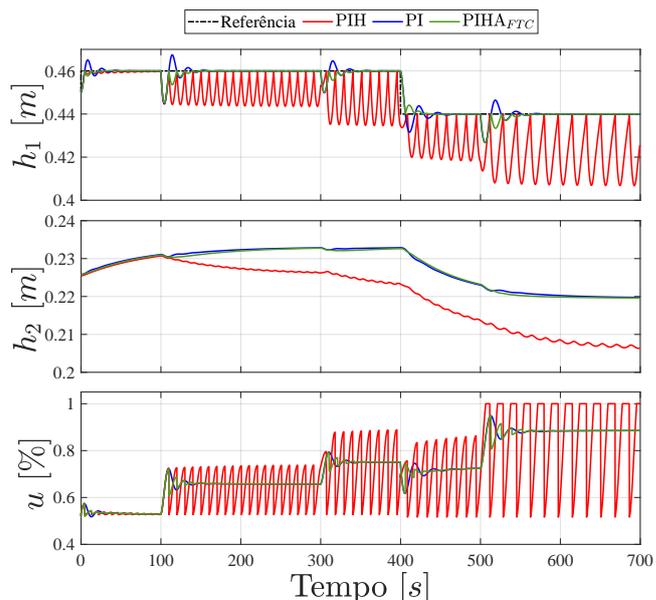


Figura 3. Simulações computacionais do sistema controlado com falhas de atuador: Nível do primeiro tanque (h_1 - gráfico superior), nível do segundo tanque (h_2 - gráfico intermediário) e sinal de controle aplicado ao sistema (u - gráfico inferior).

	IAE	ISE	IVU
PI	1	1	1
PIH	0,7333	0,5376	0,8122
PIHA_{FTC}	0,4153	0,5200	0,8149

Tabela 1. Índices de desempenho para seguimento de referência.

referência, por meio de um aumento no sinal de controle. Já o controlador **PIH** mostra-se incapaz de compensar as falhas de atuador, apresentando oscilações significativas nas proximidades da referência. Isso ocorre devido às reiniciações do integrador que são realizadas para um valor incorreto para o sistema nominal (sem falhas). Por último, o controlador **PIHA_{FTC}** proposto neste trabalho é capaz de compensar as diferentes falhas de atuador, obtendo um desempenho satisfatório e sem a necessidade de utilização de um módulo FDI, devido à ação adaptativa do controlador híbrido.

O desempenho obtido por cada controlador para rastreamento de referência e falhas de atuador pode ser comparado de forma quantitativa por meio dos índices clássicos da integral do erro absoluto (*IAE*), da integral do quadrado do erro (*ISE*) e do desvio padrão do sinal de controle (*IVU*), apresentados nas tabelas 1 e 2, respectivamente. Note que o melhor desempenho é representado pelos menores valores dos índices, que foram normalizados em relação ao controlador **PI**. Sendo assim, é possível observar que para as simulações realizadas, o controlador **PIHA_{FTC}** apresenta o melhor desempenho quando comparado aos demais controladores em todos os índices avaliados. Portanto, é possível verificar que para o sistema analisado sujeito a falhas de atuador, o controlador mais adequado para implementação é o **PIHA_{FTC}**, seguido pelo controlador **PI**.

	IAE	ISE	IVU
PI	1	1	1
PIH	11,5455	31,7704	1,3535
PIHA _{FTC}	0,8494	0,8762	0,9958

Tabela 2. Índices de desempenho para falhas de atuador.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposta uma nova abordagem de controle tolerante à falhas de atuador com utilização de controlador PI híbrido adaptativo. Ao contrário de diversas metodologias encontradas na literatura, o projeto do controlador adaptativo com inclusão das falhas como incertezas paramétricas de modelo descarta a exigência de utilização de um sistema de detecção e isolamento de falhas adicional, eliminando assim, possíveis perdas de desempenho e estabilidade causadas por erros na estimação de falhas por parte do módulo FDI. Por meio das simulações computacionais e do cálculo dos índices de desempenho, é possível verificar que o controlador PI híbrido adaptativo tolerante à falhas possui melhor desempenho que os controladores PI linear e PI híbrido proposto por Zaccarian et al. (2007), tanto no seguimento de referência, quanto na compensação de falhas de atuadores. Além disso, com algumas modificações, um controlador PI linear já implementado no processo pode ser transformado em um controlador PI híbrido adaptativo tolerante à falhas de atuador. Como trabalhos futuros, serão investigadas estratégias de FTC para sistemas sujeitos a falhas estruturais e falhas de sensores e atuadores que possam ser utilizadas em conjunto com o controlador utilizado, além de estudos para implementação de controladores híbridos tolerantes a falhas em sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio recebido pelo IFMG Campus Sabará e IFMG Reitoria (PRPPG).

REFERÊNCIAS

Åström, K.J. and Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. Instrumentation Systems and Automation Society.

Beker, O., Hollot, C.V., and Chait, Y. (2001). Plant with integrator: an example of reset control overcoming limitations of linear feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(11), 1797–1799.

Bounemour, A., Chemachema, M., and Essounbouli, N. (2018). Indirect adaptive fuzzy fault-tolerant tracking control for MIMO nonlinear systems with actuator and sensor failures. *ISA Transactions*, 79, 45–61. doi:10.1016/j.isatra.2018.04.014.

Cosme, L.B., Caminhas, W.M., D’Angelo, M.F.S.V., and Palhares, R.M. (2019). A novel fault-prognostic approach based on interacting multiple model filters and fuzzy systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 519–528.

Desborough, L. and Miller, R. (2002). Increasing customer value of industrial control performance monitoring—Honeywell’s experience. In *AICHE symposium series*, 326, 169–189. New York; American Institute of Chemical Engineers; 1998.

Feuer, A., Goodwin, G.C., and Salgado, M. (1997). Potential benefits of hybrid control for linear time invariant plants. In *American Control Conference, 1997. Proceedings of the 1997*, volume 5, 2790–2794. IEEE.

Goebel, R., Sanfelice, R.G., and Teel, A. (2012). *Hybrid Dynamical Systems: Modeling, Stability and Robustness*. Princeton University Press.

Lopes, A.N.D., Leite, V.J.S., Silva, L.F.P., and Guelton, K. (2020). Anti-windup TS Fuzzy PI-like Control for Discrete-Time Nonlinear Systems with Saturated Actuators. *International Journal of Fuzzy Systems*, 46–61. doi:10.1007/s40815-019-00781-0.

Lunze, J. and Lamnabhi-Lagarrigue, F. (2009). *Handbook of Hybrid Systems Control: Theory, Tools, Applications*. Cambridge University Press.

Lunze, J. and Richter, J. (2008). Reconfigurable fault-tolerant control: A tutorial introduction. *European Journal of Control*, 14(5), 359–386. doi:10.3166/ejc.14.359-386.

Lunze, J. and Steffen, T. (2006). Control reconfiguration after actuator failures using disturbance decoupling methods. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(10), 1590–1601. doi:10.1109/TAC.2006.882938.

Nakamura, T.A., Palhares, R.M., Caminhas, W.M., Menezes, B.R., de Campos, M.C.M., Fumega, U., Bomfim, C.H., and Lemos, A.P. (2017). Adaptive fault detection and diagnosis using parsimonious gaussian mixture models trained with distributed computing techniques. *Journal of the Franklin Institute*, 354(6), 2543–2572.

Nešić, D., Teel, A.R., and Zaccarian, L. (2011). Stability and performance of siso control systems with first-order reset elements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(11), 2567–2582.

Pizzi, N., Kofman, E., De Doná, J.A., and Seron, M.M. (2019). Actuator fault tolerant control based on probabilistic ultimate bounds. *ISA Transactions*, 84, 20–30. doi:10.1016/j.isatra.2018.08.021.

Quadros, M.M., Leite, V.J., and Palhares, R.M. (2022). Robust fault hiding approach for T–S fuzzy systems with unmeasured premise variables. *Information Sciences*, 589, 690–715. doi:https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.12.129.

Quadros, M.M., Rubio-Scola, I., and Leite, V.J. (2018). Compensated hybrid pi controllers for sampled-data controlled systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51(25), 240–245.

Quadros, M.M., Rubio-Scola, I., Leite, V.J., and Tarbouriech, S. (2019). A plug-in procedure for hybridization of pi controllers. *IFAC-PapersOnLine*, 52(1), 892–897.

Quadros, M.M., Bessa, I.V., Leite, V.J.S., and Palhares, R.M. (2020). Fault tolerant control for linear parameter varying systems: An improved robust virtual actuator and sensor approach. *ISA Transactions*, 104, 356–369. doi:10.1016/j.isatra.2020.05.010.

Richter, J. (2011). *Reconfigurable control of nonlinear dynamical systems: A fault-hiding approach*. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer Berlin Heidelberg.

Rubio-Scola, I., Quadros, M.M., and Leite, V.J.S. (2017). Robust hybrid PI controller with a simple adaptation in the integrator reset state. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 1457–1462.

- Stefanovski, J.D. (2019). Fault tolerant control of descriptor systems with disturbances. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(3), 976–988. doi:10.1109/TAC.2018.2827702.
- Sun, S., Zhang, H., Wang, Y., and Cai, Y. (2018). Dynamic output feedback-based fault-tolerant control design for T–S fuzzy systems with model uncertainties. *ISA Transactions*, 81, 32–45. doi:10.1016/j.isatra.2018.07.022.
- Tabatabaeipour, S.M., Stoustrup, J., and Bak, T. (2015). Fault-tolerant control of discrete-time LPV systems using virtual actuators and sensors. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 25(5), 707–734. doi:10.1002/rnc.3194.
- Xu, N., Zhu, Y., Yang, R., Chen, X., Su, C.Y., and Shi, Y. (2022). Finite-frequency fault estimation and accommodation for continuous-time Markov jump linear systems with imprecise statistics of modes transitions. *Information Sciences*, 585, 594–608.
- Yang, G. and Ye, D. (2009). Reliable H_∞ control of linear systems with adaptive mechanism. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 55(1), 242–247. doi:10.1109/TAC.2009.2036293.
- Zaccarian, L., Nesic, D., and Teel, A.R. (2007). Set-point stabilization of siso linear systems using first order reset elements. In *American Control Conference, 2007. ACC'07*, 5808–5809. IEEE.
- Zaccarian, L., Nešić, D., and Teel, A.R. (2005). First order reset elements and the clegg integrator revisited. In *American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005*, 563–568. IEEE.
- Zhang, C., Yang, H., and Jiang, B. (2020). Fault estimation and accommodation of fractional-order nonlinear, switched, and interconnected systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52, 1443–1453.
- Zhao, G., Nešić, D., Tan, Y., and Wang, J. (2013). Open problems in reset control. In *Decision and Control (CDC), 2013 IEEE 52nd Annual Conference on*, 3326–3331. IEEE.