

# IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE UM ALGORITMO DE CONTROLE TOLERANTE A FALHAS COM CONSIDERAÇÕES SOBRE RESTRIÇÕES OPERACIONAIS

K. L. RESENDE<sup>1</sup> e T. V. DA COSTA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais – Engenharia Química  
E-mail para contato: karinelresende@gmail.com

**RESUMO** – As indústrias químicas estão sujeitas à ocorrência de falhas que afetam seu desempenho e segurança. O sistema de controle da planta possui malhas integradas e uma falha pode encadear prejuízos a todo o processo. Assim, as indústrias têm se dedicado a implementar controladores tolerantes para manter um desempenho aceitável em cenários de falha. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi aplicar a teoria dos atuadores virtuais considerando restrições operacionais aplicadas no desvio entre as saídas do processo em falha e seu comportamento nominal. O algoritmo proposto foi aplicado a um reator contínuo agitado (CSTR) sujeito a falha na malha de controle. Os resultados indicaram que, mesmo sob falha, o algoritmo desenvolvido mantém o desempenho do processo aceitável, dentro dos limites definidos para o desvio em relação a uma referência.

## 1. INTRODUÇÃO

As plantas e equipamentos inerentemente seguros são projetados para evitar ou conter condições anormais de operação, minimizando a ocorrência de acidentes. Neste contexto, as indústrias estão investindo cada vez mais em técnicas capazes de impedir que a propagação de uma falha afete a segurança e o desempenho do processo.

O controle da produção é realizado por sistemas de controle com malhas integradas e acopladas e uma única falha pode prejudicar todo o processo. Deste modo, uma das formas para garantir o desempenho aceitável do processo mesmo em cenário de falhas é introduzir aspectos de segurança aos sistemas de controle, tornando-os uma das camadas de proteção do processo.

O controle tolerante a falha é uma classe de controlador cuja função é conter o avanço da falha e manter o desempenho do processo satisfatório e estável. Este controlador ainda não é muito utilizado por precisar de algoritmos complexos e de instrumentação e processadores de alto desempenho (ZUBEN, 2003). Entretanto, ele vem ganhando espaço na aplicação fabril.

Dentre as estratégias de controle tolerante está o atuador virtual, utilizado quando existe mal funcionamento ou perda de atuadores. Este método fundamenta-se na redistribuição dos sinais de controle para os atuadores ainda disponíveis e no ocultamento da falha do controlador nominal através do desvio entre as saídas reais e estimadas da planta (BLANKE, 2006).

Desse modo, o objetivo desse trabalho foi desenvolver no *software Scilab* um algoritmo de controle tolerante adotando a estratégia de atuador virtual na forma de um problema de

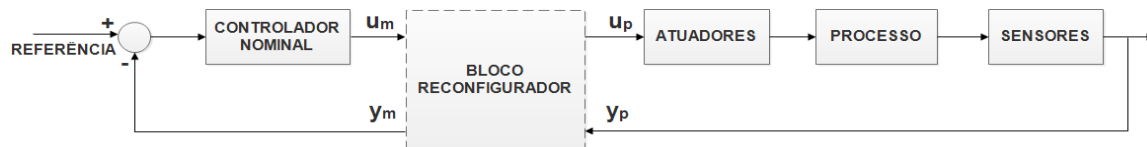
otimização, com foco na aplicação de restrições operacionais (rígida e com folga) no desvio entre o processo em falha e nominal. Para validação, implementou-se o código no sistema de controle multivariável de um reator CSTR com falha em uma de suas malhas de controle.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Fundamentação Teórica

O método de reconfiguração baseado em atuadores virtuais, ilustrado na Figura 1, oculta a falha do controlador nominal através do sinal de saída  $y_m$ , reconstruído a partir do sinal original  $y_p$ . Para isso, um bloco reconfigurador é inserido entre o controlador nominal e o processo. Esse bloco compara as saídas reais com as teóricas e calcula o desvio entre elas.

Figura 1 – Esquema do controle tolerante com bloco reconfigurador



A interpretação da técnica dos atuadores virtuais com horizonte móvel (*MHVA, Moving Horizon Virtual Actuators*) permite reescrever a equação original proposta por Steffen (2005) como uma otimização (Equação 1), que minimiza o desvio da planta em falha de sua operação normal a partir do vetor  $x_\Delta$ , ponderado pela matriz  $Q_F$ , somado ao esforço de controle dos atuadores remanescentes, ponderados pela matriz  $R_F$  (Costa *et al*, 2013).

$$\begin{aligned} \min_{u_p} J &= \sum_{i=1}^N \hat{x}_\Delta^T(k+i|k) Q_F \hat{x}_\Delta(k+i|k) + u_p^T(k+i-1|k) R_F u_p^T(k+i-1|k) \\ \text{sujeito à: } \quad &\hat{x}_m(k+i|k) = A_m \hat{x}_m(k+i-1|k) + B_m u_m(k+i-1|k) \\ &\hat{x}_p(k+i|k) = A_p \hat{x}_p(k+i-1|k) + B_p u_p(k+i-1|k) \\ &\hat{x}_\Delta(k+i|k) = \hat{x}_m(k+i|k) - \hat{x}_p(k+i|k) \\ &\hat{x}_\Delta(k|k) = 0 \\ &u_{\min} \leq u_p(k+i-1|k) \leq u_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

No problema de otimização,  $x_m$  e  $u_m$  são os estados e as entradas do modelo nominal (livre de falhas),  $x_p$  e  $u_p$  os estados e entradas da planta em situação de falha e  $x_\Delta$  o desvio com relação ao comportamento nominal. As matrizes  $A_m$ ,  $A_p$ ,  $B_m$  e  $B_p$  são as matrizes dos estados e saídas dos respectivos modelos em espaço de estados. O problema é sujeito às restrições de igualdade que incluem os modelos citados, ao desvio  $x_\Delta$  considerado nulo (em variável desvio) para situações normais de operação e às faixas dos atuadores remanescentes (limites  $u_{\max}$  e  $u_{\min}$ ).

Para a reconstrução do sinal, considera-se as equações de saída do espaço de estados para os modelos com e sem falha, onde se soma o desvio  $x_\Delta$  no sinal de saída do processo, ocultando a falha do controlador nominal, conforme a Equação 2.

$$y_m(k) = y_p(k) + C x_\Delta(k) \quad (2)$$

Neste trabalho, além das restrições impostas nas variáveis manipuladas, impedindo a sobrecarga dos atuadores remanescentes, propôs-se o uso de restrições no vetor  $x_\Delta$  como forma

de impor limites considerados seguros para o desvio da planta com relação à sua operação normal. Assim, restrições do tipo  $x_{\Delta} \in \mathbb{X}$  (Equação 3) foram acrescentadas ao atuador virtual.

$$\mathbb{X} := \{x_{\Delta}(k+i|k) \mid x_{\Delta,min} \leq x_{\Delta}(k+i-1|k) \leq x_{\Delta,max}\} \quad (3)$$

O problema apresentado em Costa *et al.* (2013) foi acrescido de limites na variável  $x_{\Delta}$  e as restrições (Equação 3) de variáveis folga. A consideração da não factibilidade da solução consiste na adição de um termo de penalização na Equação 1, resultando nas Equações 4 e 5.

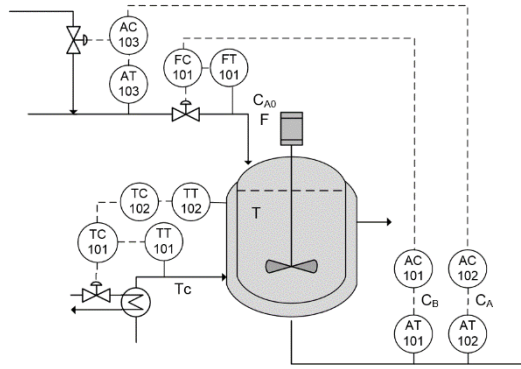
$$J = \sum_{i=1}^N \hat{x}_{\Delta}^T(k+i|k) Q_F \hat{x}_{\Delta}(k+i|k) + u_p^T R_F u_p^T + \epsilon^T W \epsilon \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x_{\Delta,min} - \epsilon &\leq \hat{x}_{\Delta}(k+i-1|k) \leq x_{\Delta,max} + \epsilon \\ \epsilon &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

## 2.2. Aplicação em um Reator Contínuo Agitado

O exemplo ilustrado na Figura 2 (HOVD E SKOGESTAD, 1994), foi selecionado para análise do atuador virtual projetado e considera restrições nos atuadores remanescentes e limites no desvio das variáveis de saída em relação ao desempenho nominal. O processo consiste em um reator contínuo agitado (CSTR) encamisado, onde ocorre a reação exotérmica  $A \rightarrow B$ .

Figura 2 – Diagrama de instrumentação do CSTR com camisa de resfriamento



O objetivo do controlador nominal é manter a concentração do reagente  $C_A$  (kmol/m<sup>3</sup>), do produto  $C_B$  (kmol/m<sup>3</sup>) e a temperatura do reator  $T$  (K) em suas referências, manipulando a vazão de alimentação  $F$  (m<sup>3</sup>/min), a concentração inicial de reagente  $C_{A0}$  (kmol/m<sup>3</sup>) e a temperatura da água de resfriamento da camisa  $T_c$  (K). O pareamento sugerido foi: Malha 1 ( $C_A$ - $C_{A0}$ ), Malha 2 ( $C_B$ - $F$ ) e Malha 3 ( $T$ - $T_c$ ). Adotou-se controladores nominais do tipo PID, com os parâmetros  $K_{c1} = 10$ ;  $\tau_{i1} = 10$ ;  $\tau_{d1} = 0$  para a primeira malha,  $K_{c2} = -10$ ;  $\tau_{i2} = 10$ ;  $\tau_{d2} = 0$  para a segunda malha e  $K_{c3} = 40$ ;  $\tau_{i3} = 10$ ;  $\tau_{d3} = 0$  para a terceira malha.

Além disso, aplicou-se restrições nas variáveis de entrada:  $-2,619 \text{ kmol/m}^3 \leq u_1 \leq 15 \text{ kmol/m}^3$ ,  $-3 \text{ m}^3/\text{min} \leq u_2 \leq 1 \text{ m}^3/\text{min}$  e  $-12 \text{ K} \leq u_3 \leq 6,4 \text{ K}$  e incorporou-se ao problema de otimização restrições no desvio da planta em relação ao seu estado nominal, o que pode representar limites de segurança para essas variáveis em um sistema real. Isto implica em acrescentar restrições no estado  $x_{\Delta}$  ao problema de programação quadrática (QP, *Quadratic Programming*) originalmente concebido para o MHVA. As restrições adotadas foram:  $-1 \text{ kmol/m}^3 \leq x_{\Delta 1} \leq 0,2 \text{ kmol/m}^3$ ,  $-0,01 \text{ kmol/m}^3 \leq x_{\Delta 2} \leq 0,02 \text{ kmol/m}^3$  e  $-2 \text{ K} \leq x_{\Delta 3} \leq 1 \text{ K}$ .

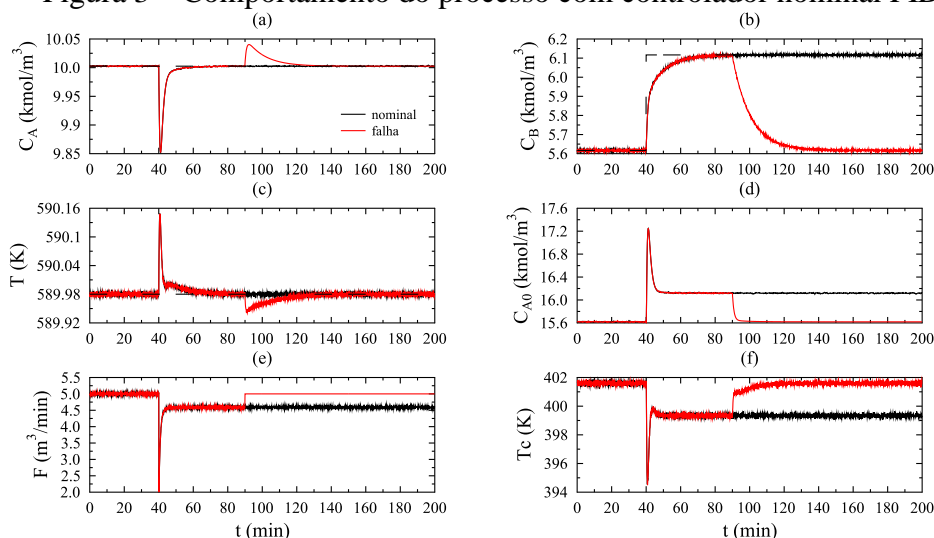
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Desempenho do Processo Nominal e em Cenário de Falha

A falha adotada neste estudo consistiu na perda total do atuador de vazão da malha de controle 2 com bloqueio no estado estacionário. Neste caso, o atuador virtual tem então apenas dois atuadores disponíveis (referentes à  $C_{A0}$  e  $T_c$ ) para manter  $C_B$  na referência.

A Figura 3 ilustra em (a), (b), (c) as variáveis controladas e em (d), (e), (f) as manipuladas, para o controlador nominal PID em condições de operação normal (curva preta) e em cenário de falha (curva vermelha). A simulação considerou um tempo de amostragem de  $T_s = 0,1$  min e partiu de condições iniciais iguais ao estado estacionário do processo.

Figura 3 – Comportamento do processo com controlador nominal PID



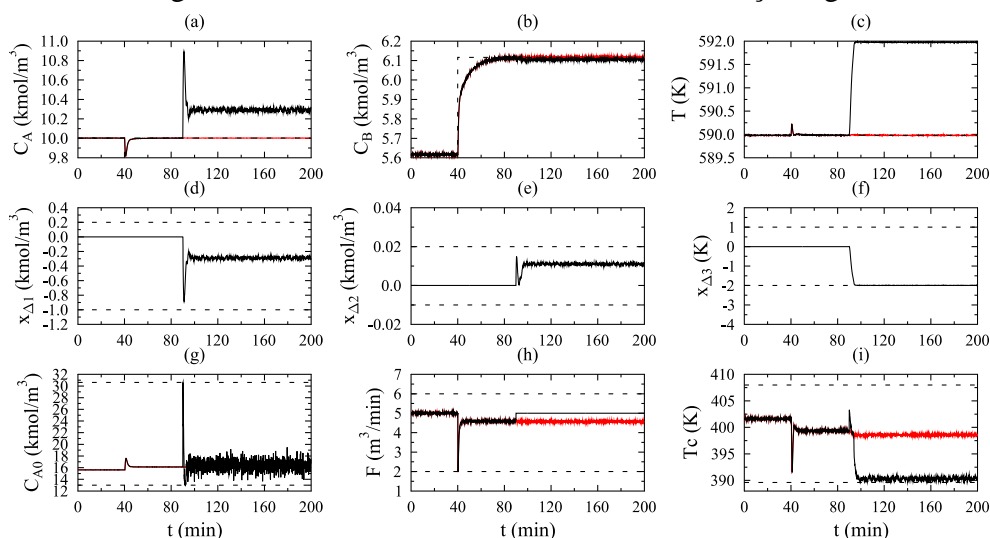
Constata-se das figuras 3a, 3b e 3c que os controladores PID estavam bem sintonizados, pois as variáveis de saída ( $C_A$ ,  $C_B$  e  $T$ ) atingiram suas referências. A interação entre as malhas de controle é percebida devido à alteração na referência de  $C_B$  ter afetado  $C_A$  e  $T$ . Apesar disso, foi possível manter  $C_A$  e  $T$  em suas referências, pois os controladores estão bem sintonizados.

Como as malhas de controle são acopladas, a falha afetou todas as variáveis, sendo perceptível o momento de sua ocorrência ( $t = 90$  min) nas figuras 3 (b), (d), (e) e (f). Os PID's conseguiram manter  $C_A$  e  $T$  em suas referências, mas  $C_B$  se afastou do valor desejado. Logo, o controlador PID não conseguiu manter um desempenho satisfatório após a ocorrência da falha.

### 4.2. Implementação do Atuador Virtual com Restrições em $x_\Delta$

Para manter a concentração  $C_B$  na referência mesmo no cenário de falha, implementou-se o atuador virtual com restrições em  $x_\Delta$ . A restrição na variável desvio ( $x_\Delta$ ) define o quanto a variável controlada pode se afastar do seu desempenho nominal. Mesmo com um menor número de atuadores disponíveis, as saídas do sistema devem respeitar a faixa de operação e os limites considerados seguros para o processo. Na Figura 4, (a), (b), (c), (g), (h) e (i) ilustram o processo reconfigurado a partir do atuador virtual e (d), (e) e (f), a aplicação da restrição rígida em  $x_\Delta$ .

Figura 4 – Processo com atuador virtual e restrição rígida

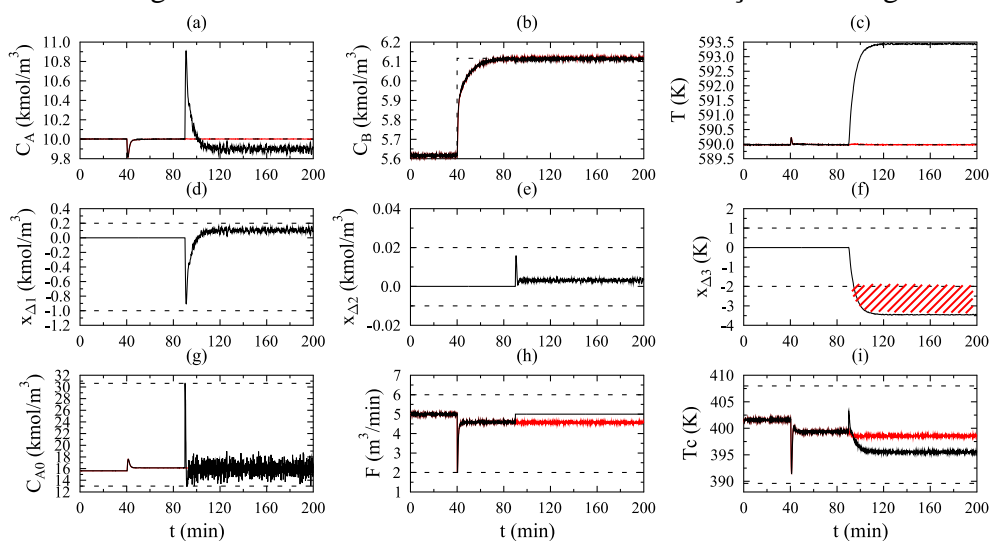


Nas figuras 4 (g), (h) e (i) a curva preta representa o valor real das variáveis manipuladas e a curva vermelha, o sinal reconstruído pelo atuador virtual para ocultar a falha do controlador nominal. O atuador virtual manteve a variável  $C_B$  no valor esperado (figura 4b) mesmo sob falha. A esta variável ( $C_B$ ) foi atribuída maior importância, afastando os demais estados ( $C_A$  e  $T$ ) de suas referências (figuras 4 a e c). Os atuadores remanescentes se dedicaram então a manter  $C_B$  na referência, deixando as demais variáveis controladas em segundo plano.

Para controlar  $C_B$  com a variável de entrada da malha 3 ( $T_c$ ), a temperatura teria que ultrapassar o limite imposto. Como a restrição é rígida, isso não é possível (figura 4 f) e agora resta apenas o atuador de  $C_{A0}$  para controlar  $C_B$ . Esse tipo de restrição pode tornar o problema de otimização infactível, pois pode não existir valor possível que não viole a restrição imposta.

Analogamente, a figura 5 (d), (e), (f) ilustra a aplicação da restrição com folga em  $x_A$  e 5 (a), (b), (c), (g), (h), (i), o processo com a implementação do atuador virtual.

Figura 5 – Processo com atuador virtual e restrição com folga





Nota-se que a variável folga permite que a variável controlada ( $T$ ) ultrapasse a restrição quando necessário (área hachurada na figura 5f), penalizando a função objetivo do projeto do controlador tolerante. Isto evita a não factibilidade da otimização, pois a folga permite a ultrapassagem do limite estabelecido, garantindo que uma nova solução seja calculada.

Portanto, o controlador tolerante desenvolvido foi eficiente, pois manteve o desempenho satisfatório na presença de falha. A implementação de restrição nos desvios em relação ao comportamento nominal permitiu simular restrições operacionais reais, sendo que a restrição com folga evita a infactibilidade do problema de otimização do atuador virtual.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho consistiu no desenvolvimento e avaliação de um algoritmo de controle tolerante baseado na estratégia de atuador virtual com horizonte móvel, considerando a imposição de restrições no desvio entre a planta com falha e seu comportamento nominal. O algoritmo desenvolvido ocultou a falha do controlador nominal e manteve as variáveis próximas às referências mesmo com a perda de um atuador. Os resultados demonstram que a abordagem é viável e permite que restrições operacionais sejam acrescentadas à reconfiguração do controlador. As restrições rígidas podem deixar o problema de otimização aqui apresentado sem solução, ao passo que as restrições com folga garantem sua factibilidade.

A escolha do tipo (rígida ou não rígida) e das faixas das restrições deve ser feita segundo a análise das variáveis controladas, observando os aspectos econômicos e principalmente a segurança do processo. As variáveis críticas com relação a esses critérios devem ser priorizadas para que permaneçam em suas referências ou em faixas pré-determinadas sem o uso de variáveis folga. Para as variáveis não críticas (permitem perda de desempenho) pode-se utilizar restrições não rígidas, resultando em maior flexibilidade em caso de falhas. Neste sentido, os trabalhos futuros contemplam, com base em critérios de segurança, desempenho e operabilidade, estabelecer prioridades para as variáveis do processo, especificar quais devem ser mantidas em suas referências e a faixa do desvio permitido para as demais variáveis.

## REFERÊNCIAS

- BLANKE, M., KINNAERT, M., LUNZE, J., STAROSWIECKI, M. & SCHRÖDER, J. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer. Berlin, 2006.
- COSTA, T.; FILETI, A.; SILVA F.; OLIVEIRA-LOPES, L. Control Reconfiguration of Chemical Processes Subjected to Actuator Faults: A Moving Horizon Approach. In: *Intelligent Systems and Control*. Marina del Rey. Calgary: Actapress. 2013.
- HOVD, M.; SKOGESTAD, S. *Pairing Criteria for Decentralized Control of Unstable Plants*. Chemical Engineering University of Trondheim (NTH). Trondheim, 1994.
- STEFFEN, T. Control Reconfiguration of Dynamical Systems: Linear Approaches and Structural Tests. *Springer*. Heidelberg, 2005.
- ZUBEN, J. V. *Tópicos Avançados: Controle Robusto, Controle Adaptativo e Controle Inteligente*. DCA, FEEC – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.