

# Controle PID Descentralizado com Desacoplador Aplicado aos Reatores de uma Unidade de Hidrotratamento de Diesel

Anna Paula V. de A. Aguiar\* Antonio Zani\*\*  
 Luís Gustavo S. Longhi\*\* Moisés Tavares Silva\*  
 George Acioli Júnior\* Maiker Marchiori\*\*  
 Mario Cesar M. M. de Campos\*\* Péricles R. Barros\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de  
 Campina Grande

Campina Grande, Paraíba, Brasil (e-mail:

[anna.aguiar,moises.silva]@ee.ufcg.edu.br,[georgeacioli,prbarros]@dee.ufcg.edu.br)

\*\* Petrobras, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (e-mail:

[azani,longhi,maiker,mariocampos]@petrobras.com.br).

**Abstract:** In this paper, a decentralized Proportional-Integral-Derivative (PID) control with inverted decoupling structure is designed and implemented in an industrial diesel hydrotreating unit. The hydrotreating unit consists of two reactors with two catalytic beds each. The temperature control of each catalytic bed is disturbed by fluctuations in the previous catalytic beds temperature, in addition to other inherent process disturbances. Neglecting this interaction in the controller design makes performance different than desired. Inverted decoupler implementation details in the digital control system are presented. Moreover, real results of comparing the temperature control loops performance are analyzed and discussed.

**Resumo:** Neste artigo, uma estrutura de controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) descentralizado com desacoplamento invertido é projetado e implementado em uma unidade industrial de Hidrotratamento (HDT) de Diesel. A unidade HDT é composta por dois reatores com dois leitos catalíticos cada. O controle de temperatura de cada leito é perturbado por flutuações nas temperaturas dos leitos anteriores, além de outras perturbações inerentes ao processo. Desconsiderar essa interação no projeto do controlador PID torna o desempenho diferente do desejado. Detalhes da implementação do desacoplador invertido no sistema digital de controle são apresentados. Além disso, resultados reais de comparação do desempenho das malhas de controle de temperatura são analisados e discutidos.

**Keywords:** HDT; Multivariable control; Inverted decoupler; Control structure; Decentralized control.

**Palavras-chaves:** HDT; Controle multivariável; Desacoplador invertido; Estrutura de controle; Controle descentralizado.

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos processos industriais são multivariáveis, ou seja, possuem múltiplas entradas e múltiplas saídas (*Multi-Input Multi-Output* - MIMO). Um exemplo de processo MIMO é um reator da unidade de hidrotratamento de diesel, no qual a temperatura de cada leito interfere na temperatura do leito seguinte.

O hidrotratamento (HDT) é utilizado para produzir combustíveis com baixo teor de impurezas (compostos de enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais pesados). Atualmente, o HDT desempenha um papel importante nas refinarias (Salvatore et al., 2009). Devido à reação exotérmica do HDT, a temperatura do reator tende a aumentar além do valor desejado. Dessa forma, é necessário um sistema de controle de temperatura adequado (Ancheyta, 2011).

As estruturas de controle para processos MIMO podem ser classificadas como controle centralizado ou descentralizado. O controle centralizado engloba estratégias de controle avançado, tais como: *Linear-Quadratic-Gaussian* (LQG), *Linear-Quadratic-Regulator* (LQR), controle preditivo (MPC) e controle robusto. No controle descentralizado utiliza-se o controlador proporcional-integral-derivativo (PID), sendo necessária a divisão do processo em malhas SISO (*Single-Input-Single-Output*). Entretanto, em processos com forte interação entre as malhas, o controle descentralizado não alcança desempenho desejado. Nesses casos, o controle com desacoplamento pode ser utilizado.

O controle com desacoplamento consiste em introduzir o desacoplador  $D(s)$  entre o controlador PID descentralizado  $C(s)$  e o processo MIMO  $G(s)$  de maneira a minimizar as interações. O desacoplador é projetado de forma que o



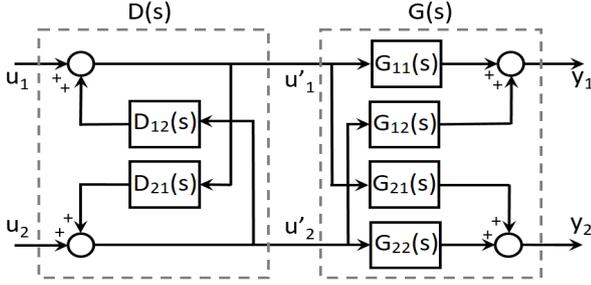


Figura 2. Sistema TITO com desacoplador invertido.

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

O projeto do desacoplador invertido é baseado na aproximação do processo por um modelo do tipo FOPTD (*First-Order plus Time Delay*):

$$\hat{\mathbf{G}}(s) = \begin{bmatrix} \hat{G}_{11}(s) & \hat{G}_{12}(s) \\ \hat{G}_{21}(s) & \hat{G}_{22}(s) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{G}}(s) = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}}{\tau_{11}s + 1} e^{-sL_{11}} & \frac{K_{12}}{\tau_{12}s + 1} e^{-sL_{12}} \\ \frac{K_{21}}{\tau_{21}s + 1} e^{-sL_{21}} & \frac{K_{22}}{\tau_{22}s + 1} e^{-sL_{22}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

onde:  $K_{ij}$ ,  $\tau_{ij}$  e  $L_{ij}$  são o ganho, a constante de tempo e o atraso de  $G_{ij}(s)$ .

Assim, o desacoplador invertido  $\mathbf{D}(s)$  é projetado tal que  $\mathbf{G}(s)\mathbf{D}(s)$  seja diagonal dominante. Considerando a estrutura invertida, ver Figura 2, o desacoplador invertido é dado por (Shinsky, 1996):

$$\mathbf{D}(s) = \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

sendo:

$$D_{12}(s) = -\frac{\hat{G}_{12}(s)}{\hat{G}_{11}(s)} = -\frac{K_{12}(\tau_{11}s + 1)}{K_{11}(\tau_{12}s + 1)} e^{-v\tau_{d12}s}, \quad (5)$$

$$D_{21}(s) = -\frac{\hat{G}_{21}(s)}{\hat{G}_{22}(s)} = -\frac{K_{21}(\tau_{22}s + 1)}{K_{22}(\tau_{21}s + 1)} e^{-v\tau_{d21}s}, \quad (6)$$

$$\tau_{d12} = L_{12} - L_{11}, \quad \tau_{d21} = L_{21} - L_{22} \text{ e}$$

$$v(L) = \begin{cases} 1; & \text{se } \tau_{dij} \geq 0 \\ 0; & \text{se } \tau_{dij} < 0 \end{cases}$$

#### 4. CONTROLE COM DESACOPLADOR INVERTIDO APLICADO AOS REATORES DO HDT

Como visto na Seção 2, a seção de reação do HDT possui 4 malhas de temperatura (uma para cada leito). A interferência entre essas malhas ocorre apenas em uma direção, por exemplo, a interferência entre as duas primeiras malhas ocorre apenas na direção da malha  $T1$  para a malha  $T2$ . Assim, o desacoplamento parcial é suficiente para esse processo. Na Figura 3, é mostrado o diagrama de blocos do controle PID descentralizado com desacoplador aplicado à seção de reação do HDT. Nesta figura, a malha fechada está indicada em preto, em azul está representado a interferência da malha  $i$  na malha  $i + 1$  e em vermelho o desacoplador invertido parcial.

Para projetar o desacoplador é necessário estimar o modelo da planta. Dessa forma, nesta Seção são apresentadas a

identificação de modelos FOPTD das malhas de temperatura ( $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$  e  $T4$ ), os desacopladores projetados e a implementação no Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD).

##### 4.1 Projeto do Desacoplador Invertido

Para identificar os modelos FOPTD foram realizados quatro experimentos em malha aberta, sendo um em cada malha de temperatura. Durante todos os experimentos as malhas permaneceram em modo manual. Apenas a malha de temperatura do forno ( $T5$ ), que não foi identificada, permaneceu em modo automático.

A identificação da malha  $T1$  foi realizada utilizando um experimento do tipo relé com pulso. O algoritmo de identificação e detalhes desse experimento são apresentados em Santos and Barros (2011). Com os dados desse experimento também foi possível identificar a dinâmica de interação da malha  $T1$  nas malhas  $T2$ ,  $T3$  e  $T4$ .

Contudo, devido a longa duração desse experimento (em torno de cinco horas e meia), os sinais de excitação aplicados nas demais malhas foram do tipo degrau malha aberta. Nesse caso, para a estimação dos modelos FOPTD utilizou-se o método de identificação apresentado em Coelho and Barros (2003).

Dessa forma, foi possível identificar o modelo da malha  $T2$  e sua dinâmica de interação nas malhas  $T3$  e  $T4$ , os modelos das malhas  $T3$  e  $T4$  e as dinâmicas de interação nas malhas  $T3$  em  $T4$ . Os modelos identificados de cada processo e das interações entre eles são apresentados na Tabela 1.

Nas Figuras 4-7 são apresentadas as simulações dos modelos estimados para as malhas  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$  e  $T4$ .

Para projetar os termos do desacoplador, conforme apresentado na Seção 3, o sistema foi dividido em processos  $2 \times 2$ , considerando os pares ( $TIC1, TIC2$ ), ( $TIC2, TIC3$ ) e ( $TIC3, TIC4$ ). Substituindo os modelos da Tabela 1 em (6) foram calculados os desacopladores mostrados na Tabela 2.

##### 4.2 Implementação no SDCD

A supervisão e o controle da unidade de HDT são realizados em um SDCD Emerson DeltaV. Para cada malha de controle regulatório, um controlador do tipo PID paralelo clássico é utilizado:

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right). \quad (7)$$

Durante todo o trabalho foram mantidas as sintonias existentes dos parâmetros dos controladores. Essas sintonias estão indicadas na Tabela 3.

Para a implementação dos desacopladores foi criado um novo módulo no SDCD. Este módulo usa como entrada as saídas dos controladores das malhas  $T1$ ,  $T2$  e  $T3$ . Cada uma dessas entradas é comparada com um valor de referência — as quais são rastreadas com as suas respectivas entradas enquanto os respectivos desacopladores estão desativados no módulo de cada controlador PID correspondente — e passa por uma função de transferência de avanço/atraso com tempo-morto correspondente ao

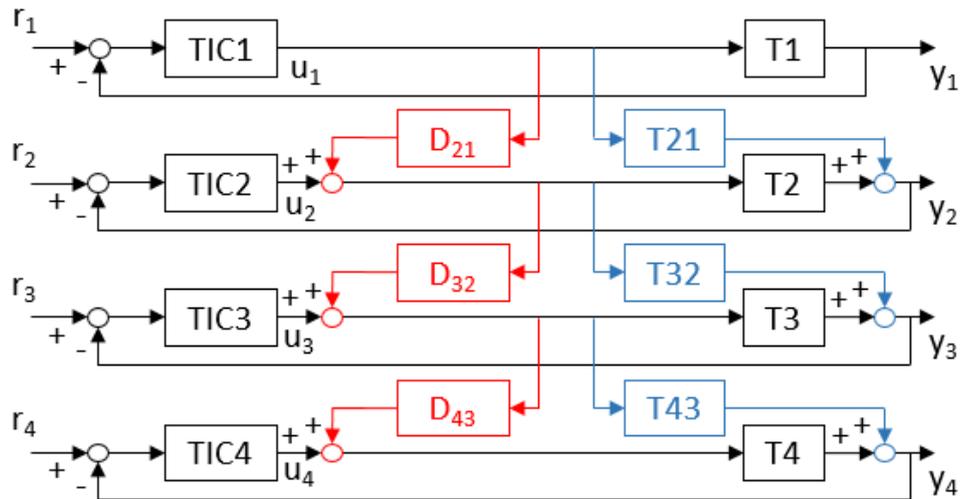


Figura 3. Diagrama de blocos do controle descentralizado com desacoplador.

Tabela 1. Modelos identificados

	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$
$T1$	$\frac{1,1215}{538,01s + 1} e^{-838s}$	-	-	-
$T2$	$\frac{0,8785}{882,82s + 1} e^{-1478s}$	$\frac{-0,1931}{433,16s + 1} e^{-612,78s}$	-	-
$T3$	$\frac{0,8770}{878,77s + 1} e^{-2646,46s}$	$\frac{-0,1647}{2378,17s + 1} e^{-1699,31s}$	$\frac{-0,0674}{455,03s + 1} e^{-473,21s}$	-
$T4$	$\frac{0,9321}{1052,2s + 1} e^{-3568s}$	$\frac{-0,1588}{1363,77s + 1} e^{-2299,74s}$	$\frac{-0,0572}{949,36s + 1} e^{-882,65s}$	$\frac{-0,0783}{693,15s + 1} e^{-475,87s}$

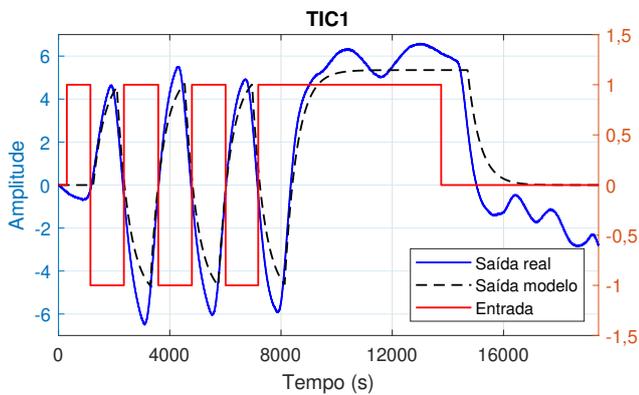


Figura 4. Simulação do modelo da malha T1.

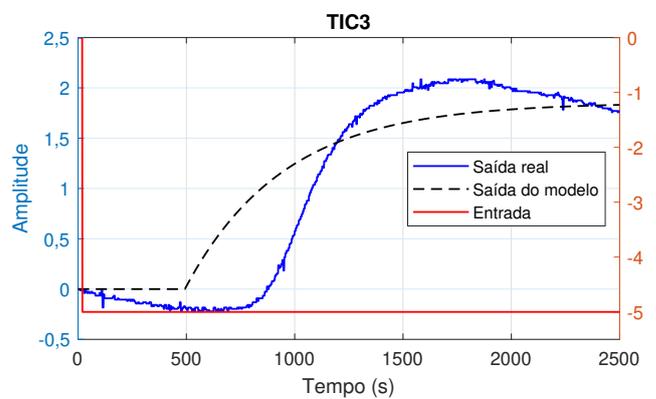


Figura 6. Simulação do modelo da malha T3.

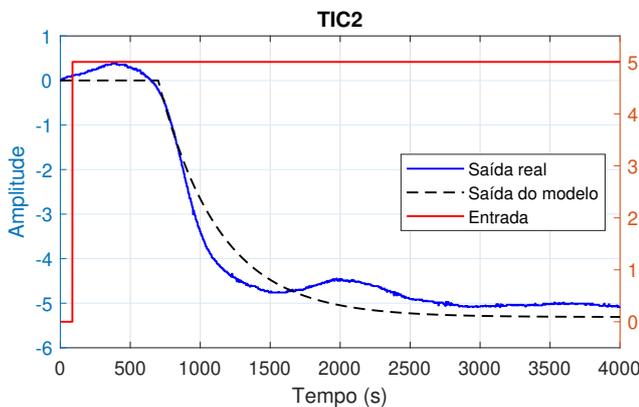


Figura 5. Simulação do modelo da malha T2.

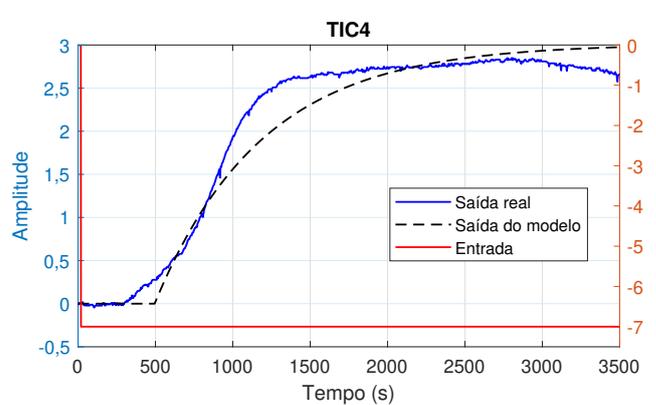


Figura 7. Simulação do modelo da malha T4.

Tabela 2. Termos dos desacopladores projetado

	$K$	$\tau_{num}$	$\tau_{den}$	$\tau_d$
$D_{21}$	4,549	433,46	882,83	865,22
$D_{32}$	-2,443	455,03	2378,17	1226,1
$D_{43}$	-0,7305	693,15	949,36	406,78

Tabela 3. Parâmetros dos controladores

	TIC1	TIC2	TIC3	TIC4
$K_p$	0,449	2,25	5	5,21
$T_i$	732,75	889	1691	629
$T_d$	243,17	0	83	58,17

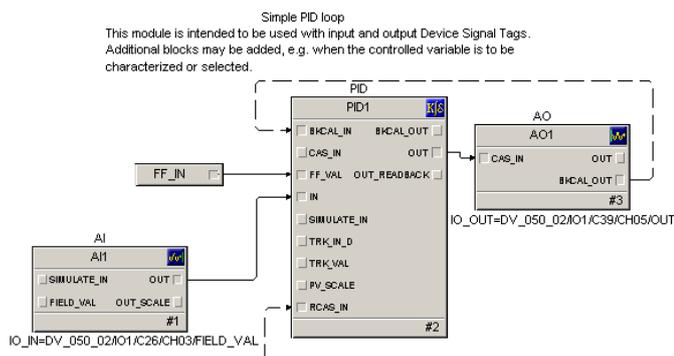


Figura 8. Diagrama do bloco de PID.

seu desacoplador. Cada um desses valores de saída, por questões de segurança, é limitado a faixa de  $-10\%$  a  $10\%$  antes de ser enviado para o respectivo bloco de PID. O valor enviado para o PID utiliza a entrada do *feedforward*, existente no PID do fabricante, e que consiste em um termo independente  $F(s)$  que é somado à (7). Deste modo, o sinal do desacoplador passa pelo tratamento de sinal do PID do fabricante antes de ser enviado para o elemento atuador, conforme Figura 8 (Blevins and Nixon, 2010).

Em termos operacionais, na IHM (Interface Homem-Máquina) dos blocos PIDs foi adicionado uma opção para habilitar ou desabilitar a entrada do *feedforward* no *face-plate* de detalhes de cada controlador. Essa condição de habilitação, ao mesmo tempo que permite o envio do sinal aditivo ao PID, fixa a saída atual do controlador anterior como a referência sob a qual os desvios da saída passam pelos desacopladores. Ao desmarcar a opção, o sinal do *feedforward* cessa o envio ao PID e inicia novamente o rastreamento da saída no seu respectivo desacoplador. Essas duas características evitam mudanças abruptas no sinal enviado para a válvula de controle ao se ligar ou desligar o desacoplador.

## 5. RESULTADOS

Após a implementação da modificação na configuração do SDCD dos controladores de temperatura das malhas T1-T4, foram realizados experimentos com e sem o desacoplador, com os controladores em modo automático. Em ambos os casos, foi aplicado um degrau de  $3\text{ }^\circ\text{C}$  na referência do controlador TIC1. Os resultados foram registrados através de um aplicativo historiador das variáveis de processo. Em função da aplicação de compressão e exceção destes dados, os valores obtidos são aperiódicos. Na Figura 9, pode-se observar a resposta ao degrau na malha T1, enquanto que

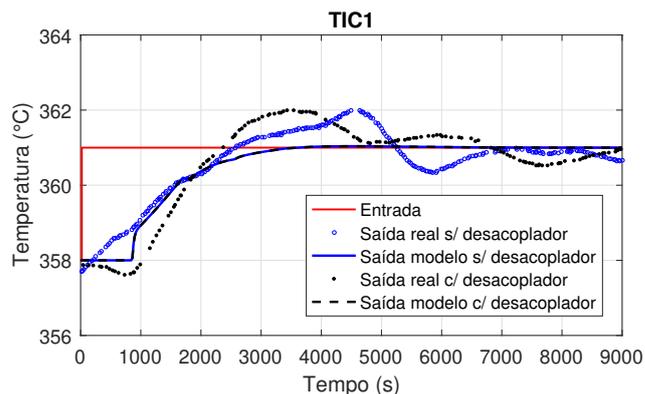


Figura 9. Resposta ao degrau no *setpoint* da malha TIC1.

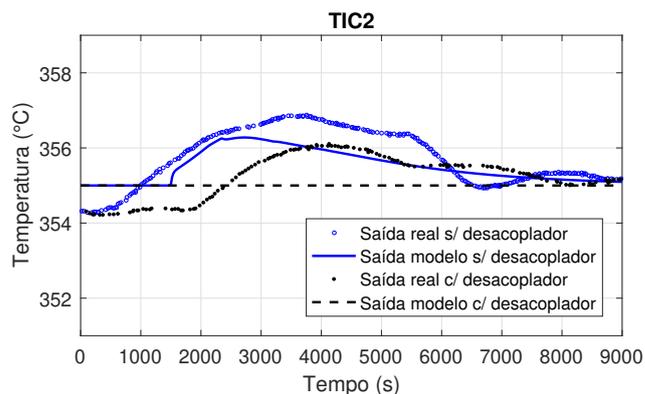


Figura 10. Perturbação na saída da TIC2.

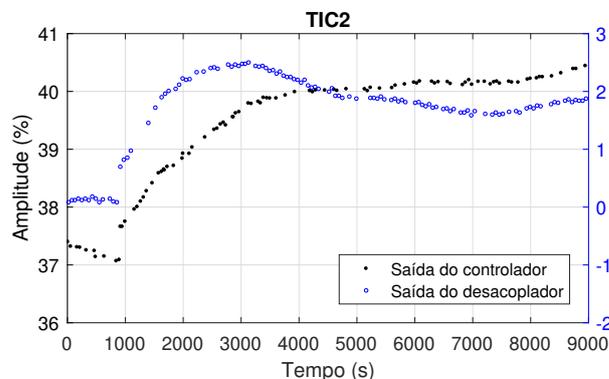


Figura 11. Ação do controlador da TIC2.

na Figura 10 é exibida a perturbação na malha seguinte T2.

Na Figura 9, os sinais de saída dos modelos com e sem desacoplador se sobrepõem, uma vez que não há contribuição do desacoplador. Entretanto, observa-se principalmente na Figura 10 que o efeito da variação no valor de referência da malha TIC1 causou uma perturbação maior na malha seguinte TIC2, sem o desacoplador. Enquanto que, quando habilitado o desacoplador, esta perturbação foi bastante atenuada. Na Figura 11, é possível observar a contribuição do desacoplador na saída do bloco PID, já somada ao controle *feedforward* do desacoplador. Observa-se também, analisando a amplitude da saída do desacoplador, que não houve grande variação no esforço de controle.

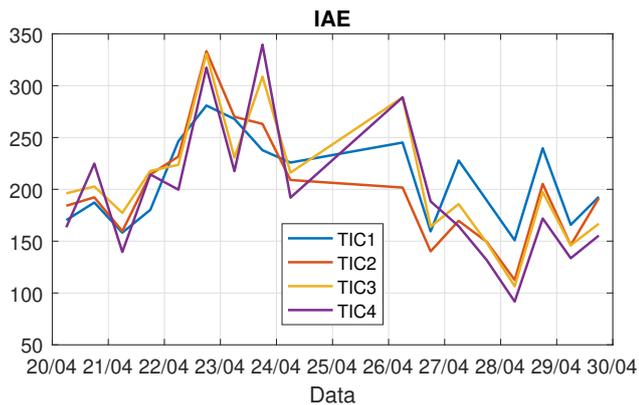


Figura 12. Integral do erro absoluto (IAE).

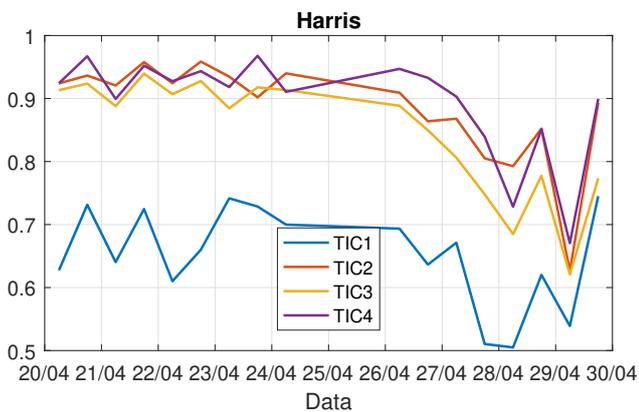


Figura 13. Índice de Harris.

Foram analisados também o desempenho das malhas de controle TIC1-TIC4 durante o período de 20 a 24 de abril (2020) antes da implementação do desacoplador, e de 26 a 30 de abril após a implementação deste, nas Figuras 12 e 13. Em ambos os casos, é possível observar uma melhora no desempenho com a aplicação do desacoplador, obtendo-se uma redução de 226 para 176 na integral do erro absoluto (IAE), e também uma redução de 0,87 para 0,76 no índice de Harris (Harris, 1989).

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram apresentados os resultados práticos do projeto de um desacoplador aplicado ao controle MIMO de temperatura dos leitos dos reatores de uma unidade de HDT de diesel. Com o objetivo de minimizar a interação característica das dinâmicas deste processo, um desacoplador invertido parcial foi projetado. Os modelos do tipo FOPTD das malhas T1-T4 foram identificados a partir de experimentos do tipo relé e de resposta ao degrau, e, então, os parâmetros do desacoplador foram calculados.

O desacoplador foi implementado no SDCD utilizando a entrada de controle *feedforward* do bloco PID. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar uma menor interação entre as malhas de temperatura, através da rejeição à perturbação na malha seguinte à malha onde foi aplicado um degrau na *setpoint* do controlador. Além disso, as malhas de controle apresentaram um melhor desempenho no período em que a planta operou com o desacoplador.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apoiado pela Petrobras, COPELE (Coord. de Pós-graduação em Eng. Elétrica da UFCG) e Capes (Coord. de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

## REFERÊNCIAS

- Ahmed, D.F. (2011). Decoupling control of fluid catalytic cracking unit. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 5(1).
- Ancheyta, J. (2011). *Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining*. John Wiley & Sons.
- Blevins, T. and Nixon, M. (2010). *Control Loop Foundation – Batch and Continuous Processes*. ISA.
- Coelho, F.S. and Barros, P.R. (2003). Continuous-time identification of first-order plus dead-time models from step response in closed loop. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(16), 393 – 398. doi:[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34793-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34793-6). 13th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 2003), Rotterdam, The Netherlands, 27-29 August, 2003.
- Freitas, M.S., Campos, M.C., and Lima, E.L. (1994). Dual composition control of a debutanizer column. *ISA Transactions*, 33(1), 19–25.
- Garrido, J., Lara, M., Ruz, M., Vázquez, F., Alfaya, J., and Morilla, F. (2018). Decentralized pid control with inverted decoupling and superheating reference generation for efficient operation: Application to the benchmark pid 2018. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 710–715.
- Garrido, J., Vázquez, F., and Morilla, F. (2011). An extended approach of inverted decoupling. *Journal of Process Control*, 21(1), 55 – 68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.10.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152410001903>.
- Harris, T.J. (1989). Assessment of control loop performance. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67(5), 856–861.
- Hsie, L. and McAvoy, T.J. (1991). Comparison of single loop and qdmc-based control of crude oil distillation towers. *Journal of Process Control*, 1(1), 15–21.
- Liu, L., Tian, S., Xue, D., Zhang, T., Chen, Y., and Zhang, S. (2019). A review of industrial mimo decoupling control. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 17(5), 1246–1254.
- Salvatore, L., de Souza Jr, M., Júnior, S., and Campos, M.C.M.D. (2009). Design and implementation of a neural network based soft sensor to infer sulfur content in a brazilian diesel hydrotreating unit. *Chemical Engineering Transactions*, 1389–1394. doi:10.3303/CET0917232.
- Sankar Rao, C. et al. (2019). Design of robust pi controller with decoupler for a fluid catalytic cracking unit. *Industrial & engineering chemistry process design and development*.
- Santos, J.B.M. and Barros, P.R. (2011). Time domain identification for first-order plus time-delay systems using frequency domain information. In *IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 775–780. IEEE.
- Shinsky, F.G. (1996). *Process control systems: application, design and tuning*. McGraw-Hill, Inc.