

ESTRUTURA COM REALIMENTAÇÃO POR RELÉ PARA PROCESSOS TITO SUJEITOS A PERTURBAÇÕES

MOISÉS TAVARES DA SILVA*, PÉRICLES REZENDE BARROS†

**Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande, Paraíba, Brasil*

†*Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande
Campina Grande, Paraíba, Brasil*

Emails: moises.silva@ee.ufcg.edu.br, prbarros@dee.ufcg.edu.br

Abstract— In this paper, a relay feedback structure which is robust to disturbances is applied to processes with two-inputs two-outputs (TITO). The relay structure is composed of a block to remove static disturbance or drift followed by a relay. This block consists of a high-pass filter followed by a relay plus an integrator. For different operating conditions, the effects of disturbances are demonstrated for a TITO process. In addition, the robust to disturbances relay feedback structure is applied to a four tanks process. From the simulated and experimental studies it is verified that the relay structure provides a symmetrical oscillation in the output of the TITO process, independent of the disturbance in the process input and iterations between the loops.

Keywords— Relay feedback, TITO processes, Disturbances.

Resumo— Neste trabalho, uma estrutura com realimentação por relé robusta à perturbações é aplicada em processos com duas entradas e duas saídas (TITO). A estrutura do relé é composta por um bloco para remover perturbações estáticas ou *drift*, seguido de um relé. Este bloco consiste em um filtro passa-alta, seguido por um relé e um integrador. Para diferentes condições de operação, os efeitos das perturbações são demonstrados para um processo TITO. Além disso, a estrutura do relé robusta a perturbação é aplicada para uma planta didática com quatro tanques acoplados. Através dos estudos simulados e experimentais verifica-se que a estrutura do relé fornece uma oscilação simétrica na saída do processo, independente da perturbação na entrada do processo e iteração entre as malhas.

Palavras-chave— Experimento do relé, Processos TITO, Perturbações.

1 Introdução

O método do relé para sistemas com uma entrada e uma saída (SISO) tem sido amplamente aplicado na indústria desde a sua introdução por Åström and Hägglund (1984). Este método é utilizado para gerar oscilações sustentadas na saída do processo, com o período de oscilação próximo ao período crítico.

Vários processos industriais são múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO). Para tais processos, pode ocorrer erros na estimativa da informação crítica devido a interação entre as malhas e entre as diversas variáveis do processo. Em ambientes industriais, outro problema é a perturbação inesperada durante os experimentos de identificação do processo. Diferentes técnicas que usam o método do relé foram propostas para superar esses problemas (Kalpana et al., 2015; Berner et al., 2017).

De acordo com Wang et al. (1997), existem três possíveis esquemas de realimentação por relé aplicados aos sistemas MIMO, conforme apresentado a seguir.

A primeira opção é o experimento do relé independente (*independent single relay*), onde apenas uma malha é sintonizada de forma independente, deixando as outras malhas abertas. Este

método não leva em consideração os acoplamentos cruzados do sistema e, portanto, não é uma boa opção para sistemas acoplados.

A segunda opção é denominada experimento do relé sequencial (*sequential relay feedback*), onde a primeira malha é sintonizada, enquanto as outras estão abertas. A malha seguinte é sintonizada com a primeira fechada, e assim por diante, até que todas as malhas sejam sintonizadas.

O terceiro esquema é o experimento do relé descentralizado (*decentralized relay feedback*). Neste caso, todas as malhas são sintonizadas simultaneamente. Este é um método completamente em malha fechada em que todos os acoplamentos cruzados influenciam o resultado. A desvantagem deste esquema é a necessidade de critérios adicionais para estimar o ponto crítico do sistema, uma vez que, devido a característica multivariável, vários pontos críticos podem surgir.

Diante de uma perturbação e independente do esquema com realimentação por relé aplicado aos processos MIMO, as técnicas de identificação confiáveis devem ser tão insensíveis às perturbações quanto possível. Para processos sob o efeito de perturbações, o método do relé padrão resulta em erros na estimativa da informação crítica. Diversas alternativas foram propostas a fim de superar tais erros (Hang et al., 1993; Park

et al., 1997; Sung et al., 2006; Lee et al., 2011). Dentre os vários métodos propostos, de particular interesse é a estrutura com realimentação por relé proposta por Silva and Barros (2017). Nesta abordagem, é obtida uma oscilação estável e simétrica na saída do processo SISO sujeito a perturbações estática ou *drift*.

Neste artigo, a aplicação da estrutura do relé robusta a perturbação, proposta por Silva and Barros (2017), é estendida para sistemas TITO. Esta é uma subclasse comum de sistemas MIMO que surge em muitos processos industriais. Assim, em diferentes condições de operação, os efeitos das perturbações são demonstrados para um processo TITO. Além disso, é realizada a aplicação da estrutura do relé robusta a perturbação para uma planta didática com quatro tanques. A partir dos estudos simulados e experimentais, verifica-se que a estrutura do relé fornece uma oscilação simétrica na saída do processo TITO, independente das perturbações e iterações entre as malhas.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2, a estrutura com realimentação por relé é apresentada; na Seção 3, é apresentada a aplicação da estrutura do relé para um processo TITO; na Seção 4, a estrutura do relé é aplicada para um processo com quatro tanques acoplados; na Seção 5, as conclusões são discutidas.

2 Estrutura com Realimentação por Relé Robusta a Perturbação

A estrutura com realimentação por relé utilizada é apresentada na Figura 1. Esta estrutura é composta por dois blocos. O primeiro bloco é usado para remover perturbações estáticas ou *drift* e consiste em um filtro passa-alta $F_1(s)$, seguido por um relé (R_1) e um filtro passa-baixa $F_2(s)$. O segundo bloco é um relé padrão (R_2).

O filtro passa-alta $F_1(s)$ é usado para remover perturbações estáticas ou *drift* e é escolhido como

$$F_1(s) = 1 - e^{-s\tau_f}, \quad (1)$$

em que τ_f é a constante de tempo do filtro e pode ser escolhido como o tempo de amostragem do processo.

Observe que $F_1(s)$ é uma derivada aproximada, pois usando uma aproximação por série de Taylor de primeira ordem para o termo $e^{-s\tau_f}$ da Eq. (1), tem-se

$$F_1(s) \approx 1 - (1 - s\tau_f) \approx s\tau_f. \quad (2)$$

A resposta em frequência de $F_1(s)$ é dada por

$$|F_1(j\omega)| = \left[(1 - \cos(\omega\tau_f))^2 + (\sin(\omega\tau_f))^2 \right]^{1/2}$$

$$\angle\theta_1(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\sin(\omega\tau_f)}{(1 - \cos(\omega\tau_f))} \right).$$

Observe que para baixas frequências e valores pequenos de τ_f , o filtro $F_1(s)$ tem um ângulo de fase de aproximadamente $+\pi/2$.

O filtro passa-baixa $F_2(s)$ é escolhido como um integrador, ou seja,

$$F_2(s) = \frac{1}{s}. \quad (3)$$

O integrador é usado para compensar a dinâmica do filtro passa-alta $F_1(s)$. Para separar a dinâmica de $F_1(s)$ e $F_2(s)$, é introduzido o relé R_1 . O relé R_2 é usado como o relé padrão para gerar uma oscilação estável na saída do processo.

O objetivo da estrutura do relé em estudo não é estimar a frequência crítica do processo, mas obter um ciclo limite insensível a perturbações.

Mais detalhes sobre esta estrutura do relé podem ser encontrados em (Silva and Barros, 2017).

3 A Estrutura com Realimentação por Relé aplicada para Processos TITO

Nesta seção, em diferentes condições, o desempenho da estrutura do relé descrita acima é ilustrado para um processo TITO. As condições de operação escolhidas são as mais utilizadas nos possíveis esquemas de realimentação por relé aplicados aos sistemas MIMO.

Os efeitos das perturbações são demonstrados para a coluna de destilação de Wood-Berry (Wood and Berry, 1973). Este processo é dada por:

$$G_{WB}(s) = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-s}}{16,7s+1} & \frac{-18,9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6,6e^{-7s}}{10,9s+1} & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Na Figura 2, é apresentado o diagrama esquemático da estrutura com realimentação por relé para uma processo TITO.

Em todos os casos, a amplitude do relé é igual a $h = \pm 1$, o tempo de amostragem é $T_s = 0,01s$ e a constante de tempo do filtro $F_1(s)$ é $\tau_f = 0,01$.

3.1 Caso 1: Malha 1 sob Relé e Malha 2 Aberta

Neste caso, a malha 1 é realimentada com relé e a malha 2 encontra-se aberta. A chave S_1 , representada na Figura 2, encontra-se aberta. Esta condição de operação do relé é utilizada nos experimentos do relé independente e sequencial.

Inicialmente, é realizada a simulação do processo de Wood-Berry com o relé padrão. Em seguida, é realizada uma simulação com a estrutura do relé robusta a perturbação.

Em ambos os testes com relé, uma perturbação estática com amplitude $d = 0,6$ é aplicada na entrada do processo no instante de tempo $t = 20s$. Além disso, em $t = 50s$, uma outra perturbação

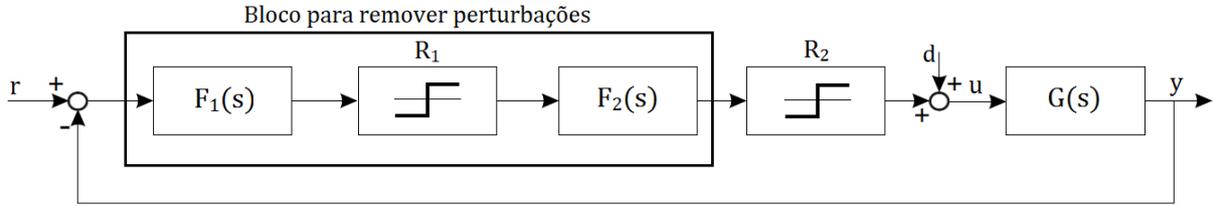


Figura 1: Diagrama esquemático da estrutura com realimentação por relé robusta a perturbação.

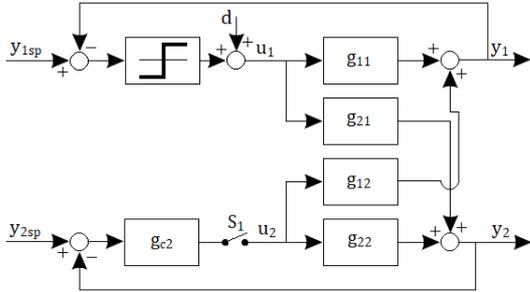


Figura 2: Diagrama esquemático de um sistema TITO.

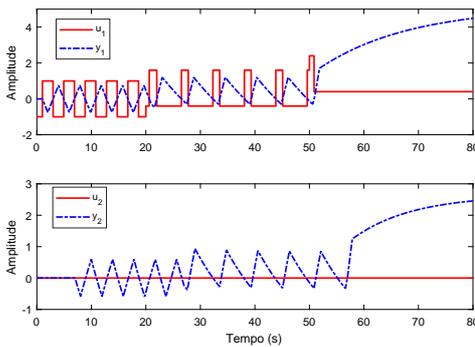


Figura 3: Curvas dos sinais de entrada (linha sólida) e saída (linha pontilhada) do processo para o relé padrão - Caso 1.

estática com amplitude $d = 0,8$ é aplicada na entrada do processo.

Para o relé padrão, os sinais de entrada e saída do processo são apresentados na Figura 3. Para a malha 1, antes da introdução da perturbação estática no sistema, o período de oscilação é $\hat{T}_{u1} = 3,92s$. Para a malha 2, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 3,90s$. A partir do tempo $t = 20s$, após a introdução da perturbação estática no sistema, a oscilação torna-se assimétrica. Para a malha 1, o período é $\hat{T}_{u1} = 5,77s$. Já para a malha 2, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 5,85s$. A partir do tempo $t = 50s$ ($d = 0,8$), o teste do relé padrão não é capaz de produzir uma oscilação sustentada.

Para a estrutura do relé robusta a perturbação, os sinais de entrada e saída do processo são apresentados na Figura 4. De acordo com a figura, esta estrutura do relé fornece uma saída do

relé simétrica sob perturbação estática. Para a malha 1, independente das perturbações estáticas introduzidas no sistema, o período de oscilação é $\hat{T}_{u1} = 4,06s$. Para a malha 2, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 4,09s$.

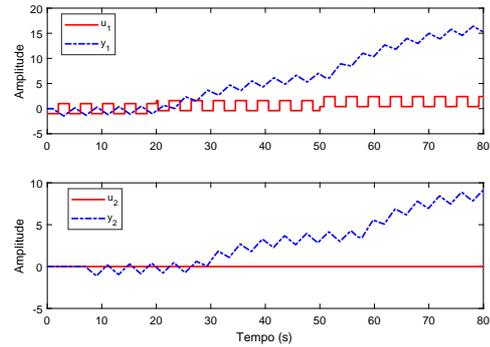


Figura 4: Curvas dos sinais de entrada (linha sólida) e saída (linha pontilhada) do processo para a estrutura do relé robusta a perturbação - Caso 1.

3.2 Caso 2: Malha 1 sob Relé e Malha 2 com Controlador

Considera-se neste caso o relé realimentado na malha 1 e a malha 2 realimentada com controlador. A chave S_1 , representada na Figura 2, encontra-se fechada. Esta condição de operação é utilizada durante o experimento do relé sequencial.

O seguinte controlador PI, proposto por (Loh et al., 1993), é utilizado

$$g_{c2} = -0,087 \left(1 + \frac{1}{10,4s} \right).$$

Novamente, uma perturbação estática com amplitude $d = 0,6$ é aplicada na entrada do processo no instante de tempo $t = 20s$. Uma outra perturbação estática com amplitude $d = 0,8$ é aplicada na entrada do processo no instante de tempo $t = 50s$.

Na Figura 5, os sinais de entrada e saída de processo são apresentados para o relé padrão. Para a malha 1, antes da introdução da perturbação estática no sistema, o período de oscilação é $\hat{T}_{u1} = 3,92s$. A partir do instante de tempo $t = 20s$, a oscilação torna-se assimétrica, com o

período $\hat{T}_{u1} = 5,54s$. Para a malha 2, antes da introdução da perturbação estática no sistema, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 3,90s$. A partir do tempo $t = 20s$, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 5,46s$. A partir de $t = 50s$, o teste do relé padrão não fornece uma oscilação sustentada.

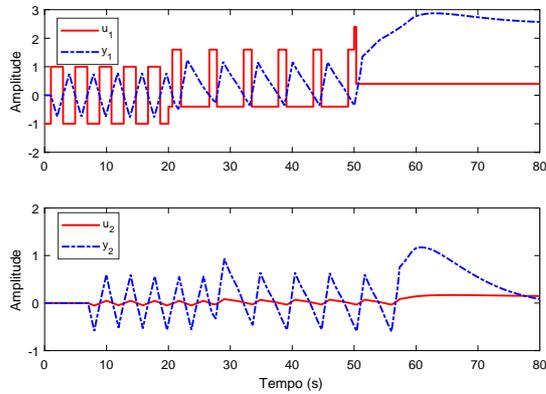


Figura 5: Curvas dos sinais de entrada (linha sólida) e saída (linha pontilhada) do processo para o relé padrão - Caso 2.

Na Figura 6, são apresentados os sinais de entrada e saída do processo para a estrutura do relé robusta a perturbação. Novamente, esta estrutura do relé fornece uma saída do relé simétrica sob perturbação. Neste caso, para a malha 1, o período de oscilação é $\hat{T}_{u1} = 4,06s$. Já para a malha 2, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 4,09s$.

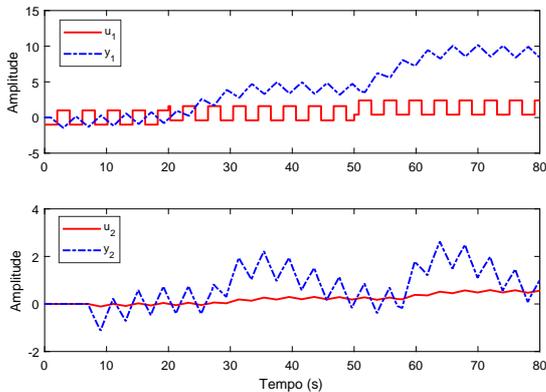


Figura 6: Curvas dos sinais de entrada (linha sólida) e saída (linha pontilhada) do processo para a estrutura do relé robusta a perturbação - Caso 2.

3.3 Caso 3: Malha 1 sob Relé e Malha 2 com Controlador mais Variação no Setpoint

Considera-se neste caso o relé realimentado na malha 1 e a malha 2 realimentada com controlador. Além disso, uma variação no *setpoint* é aplicada na malha 2 e a chave S_1 encontra-se fechada.

Na malha 2, é aplicada uma variação no *setpoint* de $y_{2sp} = 0$ para $y_{2sp} = 4$ no instante de tempo $t = 20s$. Outra variação no *setpoint* de $y_{2sp} = 4$ para $y_{2sp} = 8$ é aplicada em $t = 50s$.

Na Figura 7, os sinais de entrada e saída de processo são apresentados para o relé padrão. Para a malha 1, antes da variação do *setpoint* na malha 2, o período de oscilação é $\hat{T}_{u1} = 3,92s$. Para a malha 2, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 3,90s$. A partir de $t = 20s$, após a variação do *setpoint*, a oscilação torna-se assimétrica. Para a malha 1, o período é $\hat{T}_{u1} = 5,39s$. Já para a malha 2, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 5,69s$. Após um novo incremento na variação do *setpoint* ($t = 50s$), o teste do relé padrão não é capaz de produzir uma oscilação sustentada.

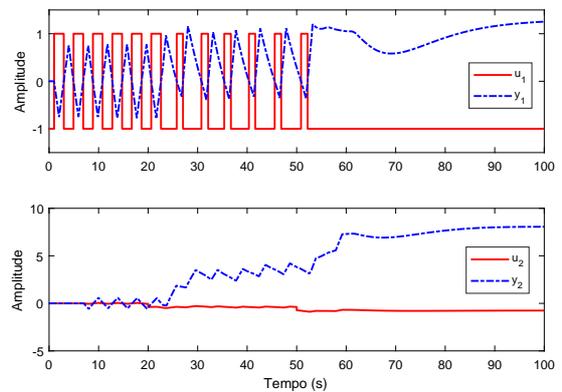


Figura 7: Curvas dos sinais de entrada (linha sólida) e saída (linha pontilhada) do processo para o relé padrão - Caso 3.

Para a estrutura do relé robusta a perturbação, os sinais de entrada e saída do processo são apresentados na Figura 8. Neste caso, independente da variação no *setpoint*, não houve mudança no período de oscilação da saída do processo. Para a malha 1, o período de oscilação é $\hat{T}_{u1} = 4,06s$, enquanto, para a malha 2, o período de oscilação é $\hat{T}_{u2} = 4,09s$.

4 Aplicação da Estrutura do Relé em um Planta com Quatro Tanques

Nesta seção, a estrutura do relé robusta a perturbação é aplicada para estimação do período de oscilação de um processo TITO. O objetivo é avaliar experimentalmente o desempenho da estrutura do relé quando sujeita a uma perturbação. Além disso, os resultados obtidos com a estrutura do relé são comparados com o relé padrão. A informação de frequência obtida a partir da oscilação pode ser usada, por exemplo, para estimar um modelo de primeira ordem com atraso (FOPTD) ou no projeto de controladores PID.

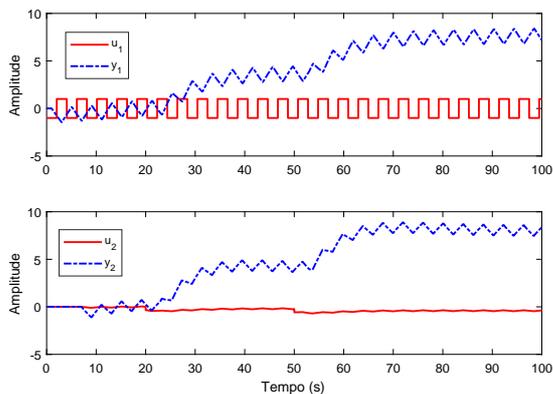


Figura 8: Curvas dos sinais de entrada (linha sólida) e saída (linha pontilhada) do processo para a estrutura do relé robusta a perturbação - Caso 3.

4.1 Planta com Quatro Tanques Acoplados

A planta piloto é composta por quatro tanques, duas bombas hidráulicas cada uma acionada através de inversores de frequência, duas válvulas globo elétricas, seis transmissores diferenciais de pressão, um CLP e um computador com um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

Os transmissores diferenciais de pressão são interligados no cartão de entrada analógica do CLP utilizando o padrão de comunicação 4-20mA. Quatro transmissores são utilizados para medição do nível de líquido em cada um dos tanques. A tomada de pressão para medição do nível é feita no fundo do tanque. Como os tanques não são pressurizados, a pressão de referência é a atmosférica. Os outros dois transmissores são utilizados para medição de vazão de líquido. O elemento primário para medição de vazão é a placa de orifício.

Na Figura 9 é apresentado o diagrama esquemático do processo de quatro tanques acoplados.

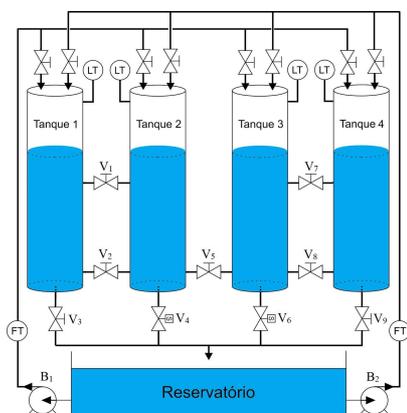


Figura 9: Diagrama da planta com quatro tanques acoplados.

O arranjo das válvulas localizadas no pro-

cesso permite selecionar diferentes configurações como tanques em cascata, tanques acoplados, tanques com realimentação entre outras possíveis. Isso possibilita a realização de experimentos SISO, TITO e MIMO.

Neste artigo, é utilizado os tanques 2 e 3. Estes tanques são acoplados através da válvula V_5 . As válvulas V_1 a V_3 e V_7 a V_9 permanecem fechadas. Durante os experimentos são utilizadas apenas as malhas de nível. Neste caso, o nível do tanque é controlado por meio da sua vazão de entrada (velocidade das bombas).

Mais detalhes sobre a planta didática com quatro tanques podem ser encontrados em (Santos et al., 2009).

4.2 Resultados Experimentais

Com o propósito de obter o estado estacionário do processo, a frequência da bomba B_1 foi definida em 30%. Já a frequência da bomba B_2 foi ajustada em 15%. As válvulas V_4 e V_6 foram ajustadas em 30% durante todo experimento. O valor no estado estacionário do nível do tanque 2 foi de aproximadamente 70,50%. Em estado estacionário, o nível do tanque 3 foi de 68,50%.

Para a estrutura do relé robusta a perturbação, a constante de tempo do filtro (τ_f) foi definida igual ao tempo de amostragem, ou seja 1s. A amplitude do relé R_1 foi definida em $h = \pm 1$ e o relé R_2 foi ajustado para oscilar em torno da referência MV com uma amplitude $h = \pm 10$.

A fim de avaliar experimentalmente o desempenho da estrutura do relé robusta a perturbação, é escolhido o caso 1 da Seção 3 (Malha 1 sob Relé e Malha 2 Aberta). Assim, um degrau com amplitude $d = 0,8$ foi aplicado na entrada do processo no instante de tempo $t = 65s$. Esta perturbação foi aplicada na entrada do processo da estrutura do relé robusta a perturbação e do relé padrão.

Os sinais de entrada do processo (u) e saída (y) obtidos através do experimento com a estrutura do relé robusta a perturbação são apresentados na Figura 10. Os sinais obtidos através do experimento de relé padrão são mostrados na Figura 11.

Para a estrutura do relé robusta a perturbação, o período de oscilação da malha 1 é $\hat{T}_{u1} = 16s$, independente da perturbação aplicada na entrada do processo. Para o relé padrão, antes da introdução da perturbação na entrada do processo, o período de oscilação da malha 1 é $\hat{T}_{u1} = 11s$. Já para o processo sujeito a perturbação, a oscilação torna-se assimétrica, com período $\hat{T}_{u1} = 33s$.

5 Conclusões

Uma estrutura com realimentação por relé robusta a perturbação foi aplicada para processos TITO.

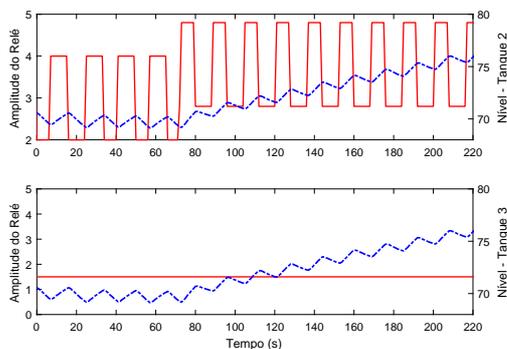


Figura 10: Curvas dos sinais de entrada (linha sólida) e saída (linha pontilhada) do processo para a estrutura do relé robusta a perturbação - Quatro Tanques.

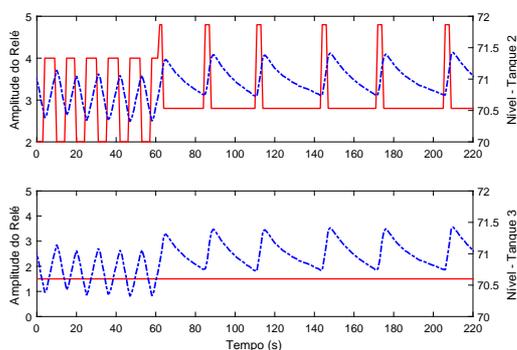


Figura 11: Curvas dos sinais de entrada (linha sólida) e saída (linha pontilhada) do processo para o relé padrão - Quatro Tanques.

Através desta estrutura do relé foi obtida uma oscilação simétrica da saída do processo, sob diferentes condições e perturbações. Além disso, o efeito do acoplamento entre as malhas de um processo TITO não interferiu no desempenho da estrutura do relé. Os resultados simulados e experimentais demonstram a capacidade da estrutura do relé de rejeitar perturbações na entrada do processo e iterações entre as malhas.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Referências

- Åström, K. J. and Hägglund, T. (1984). Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins, *Automatica* **20**(5): 645–651.
- Berner, J., Soltesz, K., Hägglund, T. and Åström, K. J. (2017). Autotuner identification of tito

systems using a single relay feedback experiment, *20th IFAC World Congress, 2017, IFAC*.

- Hang, C. C., Åström, K. J. and Ho, W. K. (1993). Relay auto-tuning in the presence of static load disturbance, *Automatica* **29**(2): 563–564.
- Kalpna, D., Thyagarajan, T. and Gokulraj, N. (2015). Modeling and control of non-square mimo system using relay feedback, *ISA transactions* **59**: 408–417.
- Lee, J., Kim, J.-S., Byeon, J., Sung, S. W. and Edgar, T. F. (2011). Relay feedback identification for processes under drift and noisy environments, *AIChE Journal* **57**(7): 1809–1816.
- Loh, A. P., Hang, C. C., Quek, C. K. and Vasnani, V. U. (1993). Autotuning of multiloop proportional-integral controllers using relay feedback, *Industrial & engineering chemistry research* **32**(6): 1102–1107.
- Park, J. H., Sung, S. W. and Lee, I.-B. (1997). Improved relay auto-tuning with static load disturbance, *Automatica* **33**(4): 711–715.
- Santos, J. B., Júnior, G. A., Barroso, H. C. and Barros, P. R. (2009). A flexible laboratory-scale quadruple-tank coupled system for control education and research purposes, *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 27, Elsevier, pp. 2151–2156.
- Silva, M. T. and Barros, P. R. (2017). A relay feedback structure for processes under static disturbances or drift, *Control Technology and Applications (CCTA), 2017 IEEE Conference on*, IEEE, pp. 1171–1176.
- Sung, S. W., Lee, J., Lee, D. H., Han, J. H. and Park, Y. S. (2006). Two-channel relay feedback method under static disturbances, *Industrial & engineering chemistry research* **45**(12): 4071–4074.
- Wang, Q.-G., Zou, B., Lee, T.-H. and Bi, Q. (1997). Auto-tuning of multivariable pid controllers from decentralized relay feedback, *Automatica* **33**(3): 319–330.

Wood, R. and Berry, M. (1973). Terminal composition control of a binary distillation column, *Chemical Engineering Science* **28**(9): 1707–1717.