

Uma Estratégia de Controle Single-Input Two-Output (SITO) com Capacidade de Compensação de Tempo Morto^{*}

Gustavo Catusso Balbinot^{*} Diogo Silva Sales^{**}
Sérgio Paulo Neves dos Santos^{***}
José Diogo Forte de Oliveira Luna^{****}

^{*} Coordenação de Engenharia de Controle & Automação, Instituto Federal de Rondônia, RO (e-mail: gu.academico@gmail.com).

^{**} Coordenação de Engenharia de Controle & Automação, Instituto Federal de Rondônia, RO (e-mail: diogosilvasales1@gmail.com).

^{***} Coordenação de Eletrotécnica, Instituto Federal de Rondônia, RO (e-mail: sergio2020pvh@gmail.com).

^{****} Coordenação de Engenharia de Controle & Automação, Instituto Federal de Rondônia, RO (e-mail: jose.luna@ifro.edu.br).

Abstract: Multiple-output, single-input processes appear in the industrial scenario when multiple actuators acting in tandem upon the same process variable. Recent studies have shown systematic control techniques for such processes, but there is a gap concerning the presence of substantial dead time. In order to tackle that problem, the present work develops a PI SITO (single-input, two-output) control strategy with dead time compensation. The proposed technique is tested on both simulation and a practical experiment. The results show favorable performance when there is a small enough modelling error, posing itself as a viable control strategy for TISO (two-input, single-output) processes with dead time.

Resumo: Processos com múltiplas entradas e uma única saída são comuns nas indústrias, quando se tem mais de um atuador agindo sobre uma única variável de processo. Na literatura recente foi mostrada a possibilidade de desenvolver novas metodologias para controle desse tipo de processo, porém há uma lacuna para o caso onde o processo apresenta atraso de transporte significativo. Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma estratégia de controle PI SITO (*single input two output*) com capacidade de compensação de tempo morto. A sua validação foi feita através de simulações computacionais e aplicação em uma planta didática. A técnica proposta obteve desempenho satisfatório para casos onde exista pouco erro de modelagem e se coloca com uma alternativa viável para o controle de processos TISO (*two input single output*).

Keywords: TISO Process, Dead Time Compensation, Automatic Control.

Palavras-chaves: Processos TISO, Compensação de Tempo Morto, Controle Automático.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria, processos com múltiplas entradas e uma única saída são vistos quando se tem múltiplos atuadores operando em conjunto para afetar uma única variável de processo.

Para o caso de duas entradas, pode-se pensar nas situações onde se tem duas válvulas em paralelo ou dois trocadores de calor em série, por exemplo. No caso de duas válvulas, a vazão máxima é atingida quando se tem ambas as válvulas abertas. Para vazões intermediárias pode-se ter apenas uma aberta ou ambas parcialmente abertas. No caso de dois trocadores, o aquecimento máximo é obtido quando ambos operarem com a máxima vazão de vapor. Para operar com um aquecimento menor, apenas um deles pode

estar ativado ou, alternativamente, ambos operando com vazão de vapor reduzida (Nunes et al., 2010).

Uma técnica comumente utilizada para sistemas com múltiplos atuadores e uma única variável controlada é o controle split-range. Nesta técnica um único controlador deve comandar todos os atuadores. Para tanto, o sinal de saída do controlador é processado por um *splitter* (divisor), que normalmente é implementado por um conjunto de funções afim.

O controle split-range é conhecido desde os anos 40 (Eckman, 1945), porém tem voltado a receber atenção no meio acadêmico. Em Reyes-Lúa et al. (2019) foi mostrado que o controlador split-range pode ser projetado de forma sistemática, e que ele pode ser posto de modo a utilizar a ação de controle mais econômica possível. Ainda em 2019, os mesmos autores, em seu trabalho sobre controle avançado para câmbio de restrições ativas (Reyes-Lúa e Skogestad, 2019), destacaram que o controle split-range é uma boa

^{*} Os autores agradecem ao IFRO - Campus Calama, ao CNPq e a CAPES, pelo financiamento através do edital Nº 9/2020/REIT - PROPESP/IFRO.

escolha para processos onde exista troca de restrição ativa entre duas restrições sobre variáveis manipuladas. No ano seguinte, Reyes-Lúa e Skogestad (2020) propuseram um controle split-range generalizado, utilizando uma estratégia de passagem de bastão.

Outro trabalho recente, sobre o qual se fundamenta este estudo, é o artigo de Fatani et al. (2017), onde se discute uma variação do split-range com um controlador PI como controlador primário. Na abordagem estudada, utiliza-se ação proporcional pura num atuador e ação integral pura no outro, de modo que um faz um "controle fino" e o outro um "controle grosso". O trabalho mostra que, para o caso de constantes de tempos e atrasos similares entre os atuadores, o projeto do PI pode ser feito para um atuador equivalente. Este resultado implica que técnicas de projeto e análises de robustez e estabilidade para o sistema TISO (duas entradas, uma saída) podem ser feitas a partir do sistema SISO (uma entrada, uma saída) equivalente. O trabalho deixa pendente, porém, a aplicação de compensação de tempo morto.

O tempo morto, ou atraso de transporte, é uma característica de um sistema dinâmico que descreve o intervalo de tempo entre a aplicação de um estímulo e a percepção de uma reação a este estímulo. Este fenômeno pode ocorrer por atraso no transporte de energia, de massa ou de informação (Normey-Rico, 2007). Em termos de controle, um atraso de transporte adiciona atraso de fase crescente, conforme a frequência aumenta, reduzindo a margem de fase do sistema e facilitando que o mesmo se torne instável. Quando defrontado com atrasos significativos, em controle clássico, é normal que se opte por uma sintonia conservadora que garanta uma resposta robusta, ainda que lenta (da Silva et al., 2020).

Idealmente, desejar-se-ia de eliminar o atraso, com o controlador percebendo imediatamente a reação do sistema ao estímulo dado. Foi com esta perspectiva que Smith (1959) propôs o controlador que veio a ser chamado de Preditor de Smith (PS). O PS é uma técnica que utiliza um modelo do processo, sendo, portanto, como uma estratégia de controle por modelo interno. A grande vantagem do PS é decompor o sistema em um modelo rápido e em um atraso equivalente do canal, permitindo que o controlador primário faça o controle do modelo rápido, se antecipando ao atraso, enquanto a predição do modelo completo é comparada com a saída medida, para realimentar o erro de predição no controlador primário (Machado et al., 2019).

O artigo de Fatani et al. (2017) apresenta que um controlador PI equivalente pode ser obtido a partir do controle SITO (uma entrada, duas saídas) proposto, sob certas condições, a saber: constante de tempo e tempo morto similares. Esta possibilidade facilita a análise de estabilidade e robustez do controlador SITO bem como provê uma intuição para o projeto do controlador, permitindo que se aplique técnicas de sintonia bem desenvolvidas para o controlador PI SISO.

O trabalho foca na aplicação em válvulas, mas a proposta pode ser facilmente estendida para quaisquer dois atuadores trabalhando em conjunto. Adicionalmente, o estudo verifica que a equivalência se mantém, mesmo na presença de atraso de transporte (desde que tenham valores próximos entre os canais), o que abre portas para o emprego de

estratégias de compensação de tempo morto. Entretanto, o artigo original não envereda por este rumo, visto que, para malhas de vazão é usual que se tenha atrasos de transporte pequenos (Teixeira et al., 2010).

A oportunidade de complementação traça-se claramente: o estudo de Fatani trabalha, justamente com sistemas de primeira ordem com atraso de transporte. Assim, pretende-se, neste trabalho, utilizar-se das benesses do PS para adicionar capacidade de compensação de atraso à estratégia de controle SITO apresentada em Fatani et al. (2017).

O presente artigo encontra-se estruturado da seguinte forma: na segunda seção faz-se uma revisão do controlador SITO; na terceira seção apresenta-se a expansão daquele com a compensação de tempo morto; na quarta seção examina-se uma simulação simples da técnica proposta e uma aplicação prática da mesma; e, por fim, na última seção apresenta-se as conclusões e perspectiva de trabalhos futuros.

2. CONTROLADOR SITO

Fatani et al. (2017), discutem um método de controlador Proporcional-Integral split-range, que consiste em operar duas saídas simultaneamente, modificando a natureza SISO do controlador PI tradicional. Para isso, os autores propõem um PI composto de uma única entrada (o erro) e de duas saídas, sendo assim um controlador SITO.

É discutido o exemplo de um processo que é constituído de duas válvulas, sendo uma válvula maior que a outra. Nessa estratégia se utiliza a saída da parte proporcional (P) na válvula pequena, para que ela possa responder rapidamente a perturbação e parte integral (I) para a válvula grande, sendo ela responsável por obter uma resposta estável a perturbações grandes no fluxo.

Por fim, Fatani et al. (2017) afirma que com essa ação de controle dividida assegura-se que ambas as válvulas permaneçam na região de controle, posto que a válvula maior irá buscar rejeitar as perturbações lentas do regime permanente e que a válvula pequena rejeitará as perturbações rápidas, garantindo uma coordenação entre as válvulas com um único algoritmo de controle. A proposta de Fatani et al. (2017) é exemplificada na Figura 1.

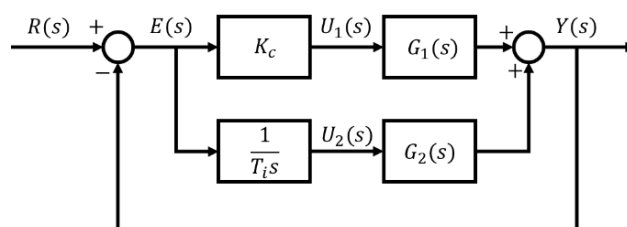


Figura 1. Estrutura de controle proposta em Fatani et al. (2017). $G_1(s)$ e $G_2(s)$ são as dinâmicas do processo TISO quanto afetados pelo atuador 1 e pelo atuador 2, respectivamente. K_c é o ganho proporcional e T_i é o tempo integral.

Considere que a dinâmica do processo seja descrita por:

$$G_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1}, G_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1}, \quad (1)$$

onde K_1 e K_2 são os ganho, τ_1 e τ_2 significam a constante de tempo do sistema.

Dessa forma temos que a saída de cada processo é descrita por:

$$Y_1(s) = G_1(s)U_1(s), Y_2(s) = G_2(s)U_2(s), \quad (2)$$

onde $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ são saídas parciais do sistema, $U_1(s)$ e $U_2(s)$ são os sinais do controlador.

Logo, a saída final do processo SITO pode ser descrita como:

$$Y(s) = Y_1(s) + Y_2(s), \quad (3)$$

onde $Y(s)$ é a saída do sistema.

O erro do sistema é definido como:

$$E(s) = R(s) - Y(s), \quad (4)$$

onde $E(s)$ é o erro entre o setpoint e a saída do sistema e $R(s)$ é o setpoint do sistema.

As ações de controle são:

$$U_1(s) = K_c E(s), U_2(s) = \frac{K_c}{T_i s} E(s). \quad (5)$$

Desta forma aplica-se (5) em (2) e (1) em (2):

$$Y_1(s) = \frac{K_1 K_c}{\tau_1 s + 1} E(s), Y_2(s) = \frac{K_2 K_c}{(\tau_2 s + 1) T_i s} E(s), \quad (6)$$

onde K_c é o ganho proporcional e T_i é o tempo integral do controlador.

Aplicando (6) em (3):

$$Y(s) = \left(\frac{K_1 K_c}{\tau_1 s + 1} + \frac{K_2 K_c}{(\tau_2 s + 1) T_i s} \right) E(s). \quad (7)$$

Assumindo que as duas constantes de tempo dos atuadores sejam iguais ou suficientemente próximas e que há uma relação entre os ganhos dos processos:

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau, K_2 = \alpha K_1 \mid \alpha > 1,$$

onde α é uma razão entre os ganhos do sistema e τ é constante de tempo equivalente.

Com as considerações têm-se:

$$Y(s) = K_c \left(1 + \frac{\alpha}{T_i s} \right) \frac{K_1}{\tau s + 1} E(s). \quad (8)$$

Considere que:

$$T'_i = \frac{T_i}{\alpha},$$

onde T'_i é razão entre o tempo integral e α .

Por fim, aplica-se (4) em (8) a fim de obter a equação que represente a saída:

$$Y(s) = \frac{K_c \left(1 + \frac{1}{T'_i s} \right) \frac{K_1}{\tau s + 1}}{1 + K_c \left(1 + \frac{1}{T'_i s} \right) \frac{K_1}{\tau s + 1}} R(s). \quad (9)$$

3. CONTROLADOR SITO COM COMPENSAÇÃO DE TEMPO MORTO

Partindo do estudo de Fatani et al. (2017), pode-se propor técnicas de compensação de tempo morto para casos de processos TISO, onde esse atraso é significativo.

Em particular, o preditor de Smith (PS) (da Silva et al., 2020) é uma técnica de compensação de tempo morto bastante estudada na literatura. Essa técnica pode ser vista na Figura 2, segundo Normey-Rico (2007), possui três características de destaque, sendo a primeira a compensação de tempo morto onde o PS é capaz de eliminar o tempo morto, ou seja: quanto mais próximo o modelo do atraso estiver do atraso real menor será o erro de predição. A segunda característica é a predição, onde o sinal da saída predita produzida pelo preditor é realimentado no controle que promove a antecipação ao comportamento do sistema após o atraso. E, por fim, a compensação dinâmica ideal: uma vez que a estrutura do PS divide a planta em dois termos: o processo com o atraso, ocasionado pelo tempo morto, e o processo “rápido” onde não há influência do tempo morto. Desta forma, o controlador irá controlar a planta “rápida” e o preditor irá encarregar-se de averiguar o de predição que será realimentado, atuando com uma perturbação.

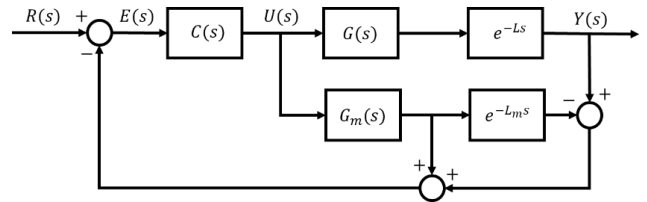


Figura 2. Diagrama de blocos do Preditor de Smith SISO.

Na Figura 3 é possível observar a expansão proposto deste trabalho a partir do estudo de Fatani et al. (2017) com a adição da compensação de tempo morto. Para este trabalho, estima-se que os atrasos de transporte nos dois canais sejam idênticos ou próximos suficiente para considerar iguais. Conforme o projeto Fatani et al. (2017) foi possível observar que os ganhos dos processos são distintos, isso implica que há dois modelos dinâmicos sem o atraso.

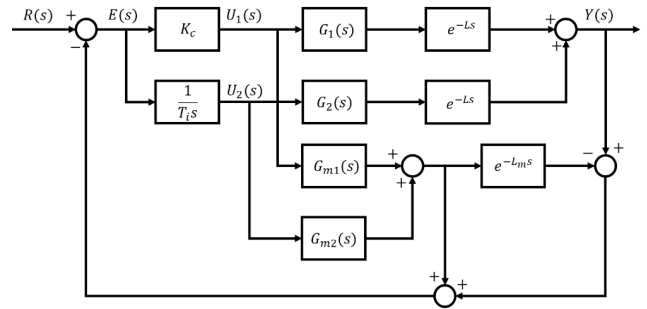


Figura 3. Estrutura de controle com compensação de tempo morto. G_{m1} e G_{m2} são os modelos rápidos do sistema, L é o atraso do sistema real e por fim L_m é o atraso do modelo.

Considera-se agora que se toma a estrutura de Fatani et al. (2017) e a dote das capacidades de predição e compensação de tempo morto do PS. Pode-se observar tal estratégia na Figura 3, sendo assim têm-se:

$$Y(s) = G_1(s)U_1(s)e^{-Ls} + G_2(s)U_2(s)e^{-Ls}, \quad (10)$$

$$U_1(s) = E(s)C_1(s), \quad (11)$$

$$U_2(s) = E(s)C_2(s), \quad (12)$$

$$Y_p(s) = E_p(s) + (G_{m1}(s)U_1(s) + G_{m2}(s)U_2(s)), \quad (13)$$

$$E_p(s) = Y(s) - (G_{m1}(s)U_1(s) + G_{m2}(s)U_2(s))e^{-Lms}, \quad (14)$$

$$E(s) = R(s) - Y_p(s), \quad (15)$$

onde $C_1(s)$ e $C_2(s)$ representam a dinâmica de controle, $Y_p(s)$ é a soma da reposta do modelo rápido com o erro de predição e $E_p(s)$ é o erro da predição.

A equação (10) descreve a saída efetiva da planta, (11) e (12) descreve os sinais de controles, (13) descreve o sinal que será subtraído da referência, (14) descreve o erro de predição e por fim (15) descreve o erro.

Aplicando (14) em (13):

$$Y_p(s) = Y(s) - (G_{m1}(s)U_1(s) + G_{m2}(s)U_2(s))e^{-Lms} + (G_{m1}(s)U_1(s) + G_{m2}(s)U_2(s)). \quad (16)$$

Aplicando (15) em (11) e (12) têm:

$$U_1(s) = R(s)C_1(s) - Y_p(s)C_1(s). \quad (17)$$

$$U_2(s) = R(s)C_2(s) - Y_p(s)C_2(s). \quad (18)$$

Aplicando (17) e (18) em (10) e reorganizando a equação:

$$Y(s) = (G_1(s)C_1(s) + G_2(s)C_2(s))e^{-Ls}R(s) - (G_1(s)C_1(s) + G_2(s)C_2(s))e^{-Ls}Y_p(s). \quad (19)$$

Aplicando (17) e (18) em (16) e reorganizando:

$$Y_p(s) - (e^{-Lms} - 1)(G_{m1}(s)C_1(s) + G_{m2}(s)C_2(s))Y_p(s) = Y(s) + (-e^{-Lms} - 1)(G_{m1}(s)C_1(s) + G_{m2}(s)C_2(s))R(s). \quad (20)$$

Considerando uma modelagem perfeita, ou seja, que os modelos são idênticos às dinâmicas dos processo:

$$G_1(s) = G_{m1}(s), G_2(s) = G_{m2}(s).$$

Uma vez que os atrasos sejam iguais aos modelos, é possível tirar o atraso do denominador da função de transferência de malha fechada. Substituindo-se (19) em (20) e considerando a exatidão do modelo, obtêm-se:

$$Y(s) = \frac{(G_1(s)C_1(s) + G_2(s)C_2(s))e^{-Ls}}{1 + (G_1(s)C_1(s) + G_2(s)C_2(s))}R(s). \quad (21)$$

Como visto em (9) e utilizando-se desta equivalência, têm-se:

$$Y(s) = \frac{G_{eq}(s)C_{eq}(s)e^{-Ls}}{1 + (G_{eq}(s)C_{eq}(s))}R(s), \quad (22)$$

onde $G_{eq}(s)$ e $C_{eq}(s)$ são a planta e o controlador equivalente, respectivamente, conforme (9).

4. EXPERIMENTO

Para validação da técnica proposta realizou-se um experimento por simulação computacional e para efeito prático em uma planta didática os quais são explorados a seguir.

4.1 Simulação

Para validação através da simulação computacional, considere as seguintes características do processo.

$$G_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} e^{-Ls}, G_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} e^{-Ls}.$$

Onde,

$$K_1 = 1, K_2 = 3, L = 2, \tau_1 = \tau_2 = 3.$$

Através de (9) pode-se sintonizar um controlador PI SISO através de uma equivalência, para esta sintonia utiliza-se a técnica SIMC (*Simple Internal Model Control*) (Skogestad, 2003).

Esta técnica consiste em realizar a sintonia do controlador baseado-se no modelo interno, utilizando a regra da metade para que haja uma aproximação do modelo encontrado, para um modelo de primeira ordem com atraso. Conforme apresentado por Fatani et al. (2017) a sintonia do controlador equivalente é baseado no modelo do processo que apresenta o menor ganho, dessa forma, a sintonia do controlador será baseado em G_1 , que por sua vez já é um modelo de primeira ordem com atraso.

Neste sentido para sintonizar o controlador, necessita-se escolher uma constante de tempo em malha fechada τ_c . Skogestad (2003) comenta que, para a escolha deste parâmetro é determinada através de um *trade-off* entre respostas rápidas, boa rejeição de distúrbio, estabilidade e robustez. Isso posto, escolhe-se τ_c igual a 5 neste exemplo, para a sintonia de K_c e T_i deve-se realizar:

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\tau_c + L} \text{ e } T_i' = \min(\tau, 4(\tau_c + L)).$$

Como proposto neste trabalho, o controlador irá contar com a compensação de tempo morto baseado no PS, desta forma, L será nulo, devido que somente o modelo rápido será controlado, logo os valores para K_c e T_i' , são:

$$C_{eq}(s) = K_c \left(\frac{T_i' s + 1}{T_i' s} \right) = 0.6 \left(\frac{3s + 1}{3s} \right).$$

Através das considerações realizadas para se obter (9) pode-se encontrar a equivalência deste controlador PI SISO para o PI-SITO, sendo assim:

$$\alpha = 3, T_i = 9, K_c = 0, 6.$$

Portanto os controladores do PI-SITO são descrito como:

$$U_1(s) = K_c E(s), U_2(s) = \frac{K_c}{T_i s} E(s).$$

Na Figura 4 pode-se observar a saída do sistema em malha fechada e em regime permanente, é possível observar também o atraso de transporte que o sistema apresenta, para tanto a saída do sistema foi de forma suave. Nota-se a presença do rastreamento de referência, onde a saída atinge a referência com ausência de erro nulo.

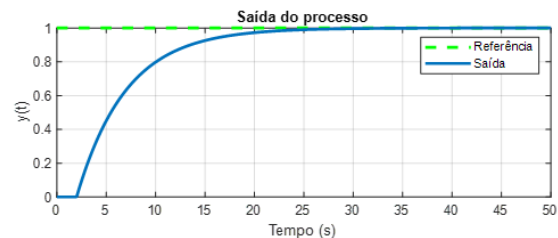


Figura 4. Resposta do sistema para uma entrada em degrau na referência.

A Figura 5 representa as ações individuais dos controladores, que atuam em paralelo. Nota-se que, pela compensação de tempo morto presente, bem como o fato de o modelo descrever perfeitamente o sistema, é possível

observar que a saída do sistema com atraso é igual à saída do sistema sem o atraso, mas defasada do período do atraso de transporte. Adicionalmente, os sinais de controle atuam como se não houvesse atraso no sistema, sendo assim, os sinais de controle são análogos para um processo onde não houvesse a presença de tempo morto. Na figura vê-se que a ação proporcional decai imediatamente após o degrau, apesar da saída medida ainda estar nula, por conta de a predição da saída se antecipar ao comportamento posterior ao atraso. Igualmente, a ação integral não cresce de forma linear durante o atraso, mas também desacelera, em acordo com o comportamento da saída predita.

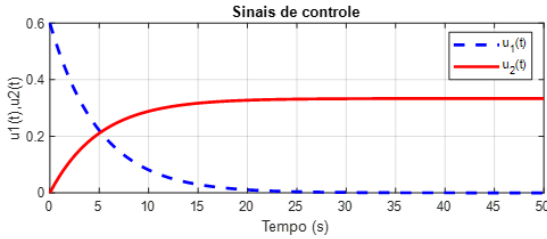


Figura 5. Sinais dos controladores, em malha fechada, com um degrau na referência.

4.2 Prática

Inspirado no módulo didático apresentado por de Lima et al. (2019) com a adaptação ao estudo realizado neste trabalho, propôs-se um módulo que consiste em dois transistores para aquecimento, uma chapa de alumínio, constituindo-se uma superfície termicamente condutiva, a qual irá permitir a propagação do calor até o único sensor LM35, que fará a medição da temperatura nesta superfície.

Este módulo que foi desenvolvido poderá ser utilizado com objetivos acadêmicos, tornando-o, assim, um módulo didático que servirá para lecionar teoria de controle bem como para outros trabalhos de pesquisa.

Desta forma foram realizados ensaios em malha aberta a fim de se obter a identificação do modelo. Para se obter os modelos, foram conduzidos experimentos individuais em cada transistor, onde o transistor receberia um sinal em degrau para obter a resposta a este estímulo. Os ensaios foram padronizados para ambos transistores, desta forma através da curva fornecida pela resposta houve a identificação dos modelos, sendo:

$$G_1(s) = \frac{14,7}{189s + 1} e^{-41s}, G_2(s) = \frac{18,67}{189s + 1} e^{-41s}.$$

Sendo assim, para sintonia do controlador equivalente como em (9), novamente utiliza-se a de Skogestad (2003). Para o experimento prático escolheu-se um τ_c igual à 25, para que a malha fechada respondesse de forma mais rápida do que em malha aberta. Sendo assim, os valores encontrados são:

$$K_c = 0,1978 \text{ e } T_i' = 189,$$

resultando no controlador PI SISO:

$$C_{eq}(s) = \frac{37,38s + 0,1978}{189s}.$$

Para realizar a conversão do PI SISO equivalente para o PI-SITO de Fatani et al. (2017) deve-se encontrar o valor de α , sendo assim:

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} = \frac{18,67}{14,7} = 1,2701,$$

desta forma pode-se definir o valor de T_i , sendo:

$$T_i = \alpha T_i' = 1,2701189 = 240,0429,$$

portanto pode-se definir os valores para os controladores, sendo:

$$U_1(s) = 0,1978E(s), U_2(s) = \frac{0,1978}{240,0429s} E(s).$$

A resposta do sistema em malha fechada pode ser observada na Figura 6, onde o sistema consegue rastrear a referência, resultando em um erro nulo. O sobressinal presente na figura é devido a escolha de se acelerar o processo, sendo assim, é natural de uma resposta agressiva haver o sobressinal. Pode-se observar que o sistema não se torna oscilatório como é comum acontecer com controladores que possuem a ação integral em sistemas com tempo morto, ainda que se tenha escolhido acelerar a malha fechada, desta forma observa-se que o controlador apresenta a característica de compensação de tempo morto.

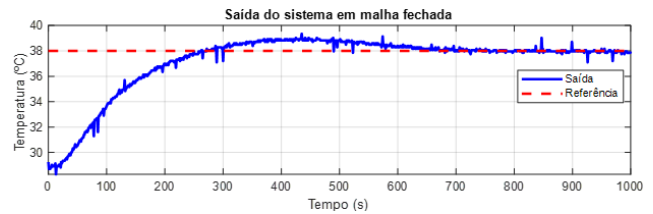


Figura 6. Resposta da temperatura do sistema em malha fechada um degrau na referência.

Os sinais de controles individuais podem ser vistos na Figura 7, onde é possível observar como a ação integral não estava agressiva pela presença do tempo morto, conforme esperado. Outro ponto a ser observado é que quem faz o esforço inicial é a ação proporcional, onde a mesma é usada até a sua saturação. À medida que o erro diminui a ação integral corrigi o sistema. Desta maneira, a ação proporcional irá corrigir erro mais drástico e a ação integral irá fazer a correção fina do erro.

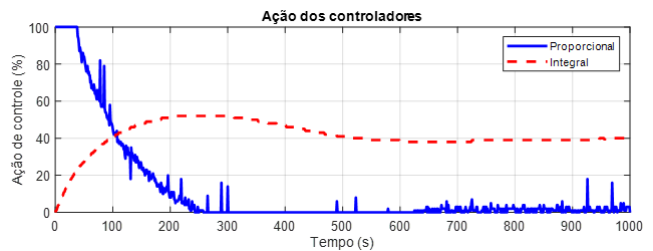


Figura 7. Variáveis manipuladas do sistema, em malha fechada, frente a um degrau na referência.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma expansão do trabalho de Fatani et al. (2017) incluindo uma compensação de tempo morto, no qual resultou na possibilidade de aplicar a técnica com o compensador. Para verificação de conceito, foi realizado a dedução matemática do estudo. A partir dela, houve a verificação da técnica através de uma simulação computacional. Por fim, realizou-se testes em

um ambiente prático utilizando uma adaptação do módulo didático de Lima et al. (2019), empregando apenas um sensor de temperatura.

Observando os resultados dos experimentos realizados por simulação e na planta didática, foi possível notar que, para ambos cenários, a técnica se comportou conforme esperado, conseguindo dotar de compensação de tempo morto o PI SITO, expandindo, assim, o trabalho original.

Desta forma a técnica proposta se coloca como promissora para um gama de aplicações na indústrias, onde haja sistemas com dois atuadores em conjunto, apresentando um atraso de transporte próximo entre os canais.

Em trabalhos futuros pretende-se discutir a escolha sistemática de bias na ação proporcional, bem como avaliar a possibilidade de adicionar ação derivativa nesse tipo de estratégia.

Teixeira, E.H.C.G. et al. (2010). *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. Editora Blucher.

REFERÊNCIAS

- da Silva, L.R., Flesch, R.C.C., e Normey-Rico, J.E. (2020). Controlling industrial dead-time systems: When to use a pid or an advanced controller. *ISA transactions*, 99, 339–350.
- de Lima, A.B., Barros, P.R., e Júnior, G.A. (2019). Módulo didático para ensino de teoria de controle. *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, 1(1).
- Eckman, D.P. (1945). Principles of industrial process control.
- Fatani, S.T., Patwardhan, R.S., e Andreu, M.A.L. (2017). A novel single-input two-output (sito) strategy for split range control. In *2017 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP)*, 348–353. IEEE.
- Machado, G.F., Pereira, R.D.O., Torrico, B.C., e et al., F.N. (2019). Porque não deveríamos esquecer o preditor de smith. In *4º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI)*. SBA.
- Normey-Rico, J.E. (2007). *Control of dead-time processes*. Springer Science & Business Media.
- Nunes, G.C., de Medeiros, J.L., e Araújo, O.d.Q.F. (2010). *Modelagem e controle da produção de petróleo: aplicações em Matlab*. Editora Blucher.
- Reyes-Lúa, A. e Skogestad, S. (2019). Systematic design of active constraint switching using classical advanced control structures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(6), 2229–2241.
- Reyes-Lúa, A. e Skogestad, S. (2020). Multi-input single-output control for extending the operating range: Generalized split range control using the baton strategy. *Journal of Process Control*, 91, 1–11.
- Reyes-Lúa, A., Zotică, C., Forsman, K., e Skogestad, S. (2019). Systematic design of split range controllers. *IFAC-PapersOnLine*, 52(1), 898–903.
- Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning. *Journal of Process Control*, 13(4), 291–309. doi: [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152402000628>.
- Smith, O.J. (1959). A controller to overcome dead time. *ISA J.*, 6, 28–33.