

Controle Multimodelo de um Processo FOPDT por uma Abordagem IMC - Preditor de Smith Aplicada a um Sistema de Nível via CLP

João Victor S. de Carvalho* Tiago G. de Oliveira*
Fadul F. Rodor* Luiz F. Pugliese*

* *Universidade Federal de Itajubá - Campus de Itabira*
Rua Irmã Ivone Drumond, 200 - Distrito Industrial II - 35903-087
Itabira, Minas Gerais, Brasil, (e-mail: j.victorsaraiva@hotmail.com,
tgaiiba@unifei.edu.br, fadulrodor@unifei.edu.br, pugliese@unifei.edu.br).

Abstract: This paper presents the implementation in a PLC (Programmable Logic Controller) of a multi-model control strategy. In the proposed methodology, a non-linear level system is linearized around different points of operation and a local PI (Proportional Integral) controller is designed via IMC (Internal Model Control) strategy in a Smith predictor structure. From the development of each local controller, based on a specific operating point, a gain schedule is used to select the best control performance at the operating point. As the level system has no transport delay, a delay will be added computationally, making it a FOPDT (First Order Plus Dead Time), in order to assess the effectiveness of the projected Smith predictor. The implementation of the multi-model control strategy is carried out on the Rockwell CompactLogix L30ERM PLC in order to act on the Exsto XC221 didactic plant.

Resumo: Este artigo apresenta a implementação em um CLP (Controlador Lógico Programável) de uma estratégia de controle multimodelo. Na metodologia proposta, um sistema de nível não linear é linearizado ao redor de diferentes pontos de operação e um controlador PI (Proporcional Integral) local é sintonizado via estratégia IMC (*Internal Model Control*) em uma estrutura de preditor de Smith. Do desenvolvimento de cada controlador local, baseado em um ponto de operação específico, um escalonamento de ganhos é utilizado para selecionar a melhor ação de controle no ponto de operação em questão. Como o sistema de nível não apresenta atraso de transporte, um atraso será adicionado computacionalmente, tornando-o um FOPDT (*First Order Plus Dead Time*), a fim de avaliar a eficácia do preditor de Smith projetado. A implementação da estratégia de controle multimodelo é realizada no CLP Rockwell CompactLogix L30ERM de forma a atuar sobre a planta didática de nível Exsto XC221.

Keywords: Process Control; Multimodel System; Smith Predictor; IMC Method; Programmable Logic Controller.

Palavras-chaves: Controle de Processos; Sistema Multimodelo; Preditor de Smith; Método IMC; Controlador Lógico Programável.

1. INTRODUÇÃO

Processos industriais modernos demandam controles precisos e eficientes, visando diminuir custos e tempo de fabricação. A qualidade de um processo industrial está diretamente relacionada com a capacidade de controlar as grandezas que o envolvem, tal como o nível de líquido em um reservatório por exemplo que possui não linearidades intrínsecas ao seu processo (Åström e Wittenmark, 1994). Durante o século XX, a implementação de sistemas com controle linear foi amplamente utilizada porém para sistemas não lineares, o método de controle linear utilizado pode resultar em imprecisões que irão distanciar os resultados obtidos dos resultados desejados.

Os controladores PID, são funcionais para vários processos industriais e sua sintonia pode ser elaborada de forma automática, utilizando algum método de *auto-tuning*, como o método de resposta ao degrau de Ziegler-Nichols ou o método do Relé por exemplo (Åström e Wittenmark, 1994). Outra estratégia de sintonia de controladores PID é conhecida como IMC (*Internal Model Control*), que ajusta os ganhos do controlador baseado em um modelo matemático que representa o processo (Rivera et al., 1986). Vale ressaltar que quanto melhor for o modelo obtido, melhor tendem a ser os resultados da atuação do controlador. No entanto, em casos em que incertezas estão presentes, é válido uma análise de robustez ou o uso de filtros de robustez à estratégia de controle (Machado et al., 2019).

Entretanto, o PID pode apresentar desvantagens quando o processo a ser controlado é mais complexo, como por

exemplo, em sistemas com atrasos de transporte (Normey-Rico e Camacho, 2007). Para tal problema tem-se o modelo proposto por Smith (1959), que consiste de uma estrutura composta pelo controlador e por um modelo do processo com o atraso de transporte a ser controlado. Para que o preditor funcione de maneira adequada, é necessário a obtenção de um modelo para o sistema e de um modelo para o atraso de transporte, que represente com certa fidelidade o processo real.

Quando o processo a ser controlado é não linear, uma alternativa para atenuar a não linearidade é o uso de uma estratégia multimodelo que é caracterizada pela definição de modelos locais correspondentes por pontos de operação distintos do sistema global. Desse modo, é possível representar um sistema não linear global através da união de modelos lineares locais. Assim, o uso de um controlador multimodelo é interessante, pois é capaz de solucionar o problema da não linearidade por meio de modelos lineares do processo através da parametrização de controladores locais que atuam em diferentes regiões do sistema não linear global (Pugliese, 2015).

Com o sistema multimodelo sendo representado por controladores locais, para diferentes regiões de operação, é necessário que a escolha da ação de cada controlador seja a melhor possível. Dessa forma, é viável a utilização de um escalonador de ganhos que se baseia nas condições atuais de operação do processo, no qual, a partir de uma condição específica, seja baseado no sinal de referência ou de saída, os ganhos do controlador são alterados para melhor atender o ponto de operação em questão (Almeida e Coelho, 2001).

Nesse contexto, a proposta deste trabalho é obter um controlador multimodelo por escalonamento de ganhos em que os controladores PI locais são sintonizados através do método IMC em uma estrutura de preditor de Smith. Para aplicação, é utilizado o CLP Rockwell CompactLogix L30ERM que permite programação em FBD (*Function Block Diagram*) e LD (*Ladder Diagram*) de acordo com a norma IEC61131-3, bem como uso de uma planta didática de nível Exsto XC221.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 apresenta-se uma contextualização teórica sobre a técnica IMC em uma estrutura de preditor de Smith. A Seção 3 dedica-se em apresentar a planta de processo, o desenvolvimento dos controladores locais e do controlador multimodelo por escalonamento de ganhos. A Seção 4 apresenta a aplicação e os resultados obtidos e a Seção 5 apresenta as conclusões sobre o trabalho.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

2.1 Preditor de Smith

Apesar de sua grande aceitação para a maioria dos processos industriais, o controlador PID pode se apresentar ineficiente quando se trata de processos FOPDT (*First Order Plus Dead Time*). Isso se dá pelo atraso de fase adicional causado pelo atraso de transporte, que pode desestabilizar o sistema em malha fechada. Uma alternativa para a compensação de atrasos de transporte longos se dá por meio da estrutura de preditor de Smith, a qual apresenta-

se como uma técnica de compensação baseada no modelo do sistema (Smith, 1959). A estrutura do preditor de Smith é apresentada na Figura 1.

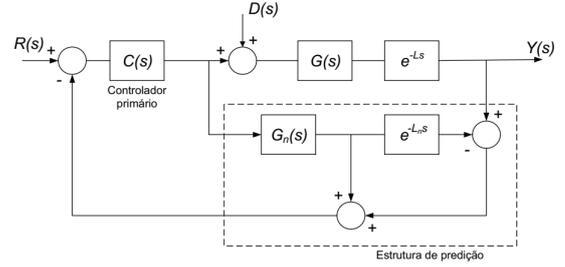


Figura 1. Estrutura do Preditor de Smith.

A função de transferência em malha fechada que descreve o sistema mostrado na Figura 1, é dado por

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)e^{-Ls}}{1 + C(s)[G_n(s) + G_a(s)]} \quad (1)$$

em que $G_a(s) = G(s)e^{-Ls} - G_n(s)e^{-L_n s}$, no qual $G(s)e^{-Ls}$, $G_n(s)e^{-L_n s}$ e $C(s)$ são respectivamente, o processo real, o modelo dinâmico identificado que representa o sistema e o controlador, que para esse trabalho será um PI.

A estabilidade de um sistema que utiliza uma estrutura de preditor de Smith está diretamente ligada à exatidão em que o modelo, $G_n(s)$, consegue representar o modelo real, tornando-o suscetível a erros de modelagem. Para um caso ideal, no qual o modelo é exatamente igual à dinâmica da planta, tem-se que $G_a(s) = 0$, desse modo a equação (1) resume-se a

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} e^{-L_n s} \quad (2)$$

É possível observar que a estrutura do preditor de Smith divide o modelo em uma parcela que representa a dinâmica do sistema e outra parcela contendo o atraso de transporte. Visto que, além da sintonia do controlador primário, $C(s)$, também é necessário sintonizar os parâmetros do modelo do preditor, conseqüentemente, o controlador baseado na estrutura de preditor de Smith torna-se mais complexo que os controladores tradicionais (de Oliveira, 2016).

2.2 IMC (Internal Model Control)

A sintonia utilizada para obter os controladores PI locais é feita através de uma estratégia IMC. O principal objetivo de um controlador é promover o rastreamento na referência, rejeitando distúrbios externos e garantindo a eficácia do controle para possíveis erros de modelagem do processo (Kaya, 2004). Um sistema em malha aberta é mostrado na Figura 2, em que, $C(s)$ é o controlador e $G(s)$ representa a dinâmica de um processo.

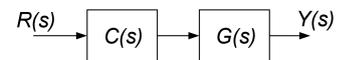


Figura 2. Controlador e Planta em malha aberta.

O processo pode ser controlado escolhendo-se um controlador tal que $C(s) = G(s)^{-1}$. Entretanto, este tipo de

abordagem apresenta algumas desvantagens como erros de modelagem que podem afetar diretamente o sistema, podendo levá-lo a instabilidade, bem como a incapacidade de rejeitar distúrbios externos. Desse modo, um sistema em malha fechada torna-se mais interessante frente às desvantagens apresentadas pelo sistema em malha aberta (Morari e Zafriou, 1989).

A estrutura IMC mostrada na Figura 3 apresenta as vantagens da malha aberta e da malha fechada. Assim, para um sistema sem erros de modelagem, no qual o processo real é fielmente representado pelo modelo, e sem a presença de distúrbios, a realimentação é desconsiderada e a estrutura da Figura 3 torna-se a mesma da Figura 2, em que $\tilde{G}(s)$ é o modelo da função de transferência do processo (Rodor, 2012).

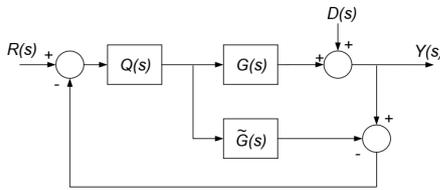


Figura 3. Estrutura IMC.

Da Figura 3, é possível obter a função de transferência em malha fechada do sistema, bem como a função de transferência do distúrbio, dadas, respectivamente, por

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)Q(s)}{1 + [G(s) - \tilde{G}(s)]Q(s)}, \quad (3)$$

$$\frac{Y_d(s)}{D(s)} = \frac{1 - \tilde{G}(s)Q(s)}{1 + [G(s) - \tilde{G}(s)]Q(s)}. \quad (4)$$

O controlador IMC apresenta duas principais propriedades segundo Rivera et al. (1986). Uma que relaciona-se com a estabilidade dual em que é pressuposto que o modelo do processo representa fielmente o sistema real, $G(s) = \tilde{G}(s)$, e assumindo que a planta e o controlador são estáveis, o sistema em malha fechada também é estável. A segunda relaciona-se com a ideia de um controlador ideal em que é pressuposto que existe um controlador tal que, $Q(s) = \tilde{G}(s)^{-1}$ é estável de forma que o sistema irá rastrear instantaneamente a referência, bem como rejeitar qualquer distúrbio $D(s)$.

Porém, no mundo real, é praticamente impossível assumir que a planta de processo e o modelo que a representa sejam perfeitamente iguais. Desse modo, $Q(s) = \tilde{G}(s)^{-1}$ não é válido. Assim, é necessário outra abordagem para o projeto do controlador IMC. Utilizando o modelo proposto por Kaya (2004), o projeto do controlador IMC é obtido através de dois passos principais que são descritos como:

- (1) Fatorar o modelo do processo como

$$\tilde{G}(s) = \tilde{G}_+(s)\tilde{G}_-(s) \quad (5)$$

em que $\tilde{G}_+(s)$ contém todos os atrasos de tempo e os zeros no semi plano direito, e $\tilde{G}_-(s)$ contém os elementos de fase mínima.

- (2) Definir um controlador IMC, $Q(s)$, tal que

$$Q(s) = \tilde{G}_-(s)^{-1}F(s) \quad (6)$$

em que $F(s)$ é um filtro passa baixa de ordem n , tal que o controlador torna-se causal, estável e próprio. Segundo Rivera et al. (1986) e Morari e Zafriou (1989) o filtro mais simples possível é dado por

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (7)$$

assim, substituindo a equação (6) em (3) e (4), tem-se

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)F(s)}{\tilde{G}_-(s) + [G(s) - \tilde{G}(s)]F(s)}, \quad (8)$$

$$\frac{Y_d(s)}{D(s)} = \frac{\tilde{G}_-(s)[1 - F(s)]}{\tilde{G}_-(s) - [G(s) - \tilde{G}(s)]F(s)}. \quad (9)$$

Como demonstrado em (Kaya, 2004), é possível sintonizar o controlador PI utilizando o método IMC em uma configuração de preditor de Smith. Assumindo que o modelo representa fielmente o processo real, a função de transferência do preditor de Smith é dado pela equação (2) e a função de transferência do IMC pode ser representada por

$$T_{IMC}(s) = Q(s)G_n(s)e^{-Ls} \quad (10)$$

em que $G_n(s)$ representa o modelo do processo sem atraso de transporte. O método IMC representado em uma estrutura de preditor de Smith pode ser observado na Figura 4.

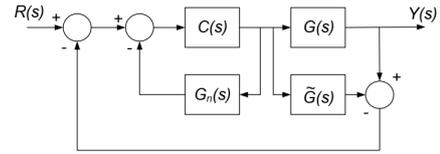


Figura 4. IMC em uma estrutura de preditor de Smith.

Da estrutura apresentada na Figura 4, é possível relacionar o controlador $C(s)$ com o controlador IMC, $Q(s)$, fazendo

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)G_n(s)}. \quad (11)$$

Para encontrar os parâmetros do controlador $C(s)$, para uma função de transferência FOPDT, é necessário separar o modelo do processo, $\tilde{G}(s)$, como apresentado na equação (5), em que $\tilde{G}_-(s)$ é parte livre de atraso de transporte dada por

$$\tilde{G}_-(s) = \frac{K_m}{\tau_m s + 1}. \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) em (6), e assumindo $n = 1$ para ordem do filtro representado pela equação (7), tem-se que

$$Q(s) = \frac{\tau_m s + 1}{K_m(\lambda s + 1)}. \quad (13)$$

Substituindo a equação (13) em (11) e assumindo os parâmetros para um PI ideal, tem-se por fim que o controlador $C(s)$ e seus parâmetros, K_p e T_i , são dados, respectivamente, por

$$C(s) = \frac{\tau_m s + 1}{K_m \lambda s}, \quad (14)$$

com

$$K_p = \frac{\tau_m}{K_m \lambda} \quad \text{e} \quad T_i = \tau_m. \quad (15)$$

Assumindo K_m e τ_m conhecidos, tem-se que o único parâmetro desconhecido para a sintonia dos controladores é

λ , que pode ser selecionado utilizando o critério de desempenho ISE (*Integral Square Error*), chegando à conclusão que $\lambda = L_m$ (Kaya, 2004).

3. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR MULTIMODELO POR ESCALONAMENTO DE GANHOS

3.1 Sistema de Nível - Modelos Locais

A planta de nível utilizada neste trabalho é uma Exsto XC221, apresentada na Figura 5. A planta é um sistema de nível de líquido composto por dois tanques de acrílico conectados que realizam troca de líquido entre si através de uma bomba localizada abaixo do tanque inferior. Além dos tanques e da bomba, o sistema também apresenta um sensor piezo-resistivo que é utilizado para medição do nível de líquido (Magalhães, 2012).



Figura 5. Planta didática XC221.

A equação dinâmica de um sistema de nível pode ser expressa como

$$\dot{h}(t) = \frac{q_{in}(t) - a\sqrt{2gh(t)}}{A} \quad (16)$$

em que, $\dot{h}(t)$, $q_{in}(t)$, a , $h(t)$ e A são, respectivamente, a derivada da altura no tempo, a vazão de líquido que entra no tanque superior, a área da seção transversal do tubo pelo qual ocorre a vazão do líquido do tanque superior para o inferior, a altura de líquido no tanque superior e a área da seção transversal do tanque superior (Åström e Wittenmark, 1994).

Nota-se da equação (16), que o sistema depende da raiz quadrada da altura, o que torna sua dinâmica não linear e faz com que sua identificação seja mais complexa. Com o intuito de atenuar os efeitos da não linearidade apresentada pelo sistema, foi utilizada uma abordagem multimodelo, em que foi feita a identificação de pontos de operação que representam a linearização do modelo não linear para cada região de operação.

As regiões escolhidas para a elaboração de cada ponto de operação foram 20, 25, 30, 35 e 40 [cm]. Cada ponto escolhido foi modelado através de uma identificação do tipo

caixa cinza, em que não há necessidade de conhecimento profundo a respeito do sistema, baseando-se apenas em como o sistema responde à dados de sinais de entrada, ou seja, a relação de causa e efeito (Aguirre, 2007).

Cada ponto de operação foi identificado a partir dos dados de entrada, tensão da bomba, dados de saída saída e tensão do sensor piezo-resistivo da planta relativo à altura da coluna de água no tanque superior. A técnica de mínimos quadrados é a utilizada para identificação de cada modelo local (Aguirre, 2007).

Vale ressaltar que, por si só, o sistema não apresenta atraso de transporte e, a fim de comprovar o funcionamento eficiente do preditor de Smith, tal atraso foi introduzido à planta computacionalmente.

Considera-se que o sistema em questão seja de primeira ordem e com atraso de transporte conforme apresentado por

$$\tilde{G}(s) = \frac{K_m}{\tau_m s + 1} e^{-L_m s} \quad (17)$$

Os parâmetros K_m , τ_m e L_m para os modelos locais identificados estão representados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para os modelos locais.

Região [cm]	K_m	τ_m [s]	L_m [s]
20	11,40	203	15
25	12,96	237	15
30	14,40	266	15
35	15,80	305	15
40	16,94	326	15

3.2 Controladores Locais e Escalonamento de Ganhos

O sistema de controle do tipo escalonador de ganhos é um sistema no qual os parâmetros do controlador são alterados de acordo com mudanças na dinâmica da planta. Para este trabalho, será empregado o escalonamento de ganhos por referência de saída (Martin, 2006).

Segundo Åström e Wittenmark (1994), as principais etapas para a implementação de um escalonador de ganhos são:

- (1) Seleção das variáveis de escalonamento que devem refletir as mudanças no modelo dinâmico;
- (2) Desenvolvimento de controladores locais para cada ponto de operação;
- (3) Definição das regras a serem utilizadas para as transições;
- (4) Verificação da performance, para validar o escalonamento e controladores projetados.

Então, visto que a saída do processo foi escolhida como variável de escalonamento, o passo seguinte é desenvolver os controladores locais para cada ponto de operação. Assim, utilizando a equação (15), é possível encontrar os parâmetros do tempo integral (T_i) e do ganho proporcional (K_p) para cada modelo local obtido conforme consta na Tabela 1. Tais parâmetros estão representados na Tabela 2.

Com os controladores locais, inicia-se o desenvolvimento do escalonador de ganhos. A variação dos ganhos utilizados

Tabela 2. Parâmetros dos controladores locais.

Região [cm]	K_p	T_i [s]
20	1,1868	203
25	1,2204	237
30	1,2296	266
35	1,2868	305
40	1,2825	326

no controle foram encontrados através da interpolação linear entre as cinco regiões de operação definidas. Para regiões abaixo do primeiro ponto de operação, bem como acima do último ponto de operação escolhidos, serão fixados os parâmetros das regiões de 20 e 40 [cm], respectivamente. A Figura 6 mostra as regiões com a interpolação linear para seu respectivo ganho proporcional, ganhos do modelo do preditor de Smith, tempo do preditor de Smith e tempo integral do controlador.

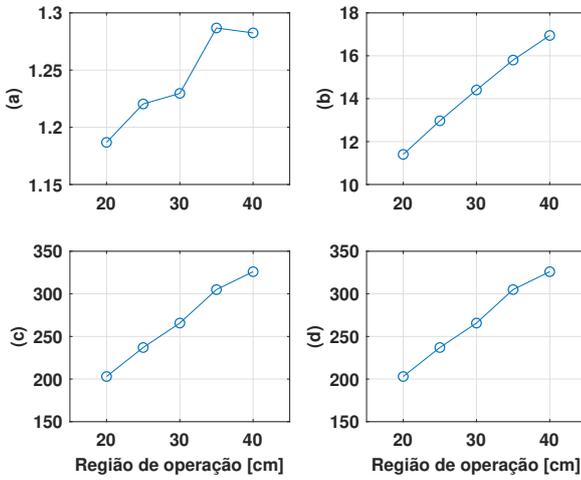


Figura 6. Interpolação linear para: (a) Ganho proporcional (K_p); (b) Ganho do modelo do preditor de Smith (K_m); (c) Tempo do preditor de Smith (τ_m) e (d) Tempo integral do controlador (T_i).

Vale ressaltar que, como é possível ver nas Figuras 6(b), 6(c) e 6(d), os pontos se aproximam de uma reta, desse modo foi feita uma aproximação linear, obtendo-se

$$K_m(h) = 0,28h + 5,95 \quad (18)$$

e

$$T_i(h) = \tau_m(h) = 6,27h + 79,26 \quad (19)$$

em que, h é altura de líquido do sistema de nível.

4. APLICAÇÃO NO SISTEMA DE NÍVEL

Em um primeiro momento, é realizado o projeto de um controlador PI-IMC em uma estrutura convencional para uma comparação com o controlador multimodelo proposto neste trabalho. Para isso, foi determinado o modelo do sistema de nível através de um ensaio em malha aberta, em que foi aplicado um degrau de 0,9 para 5 [V] na bomba. Do degrau aplicado, foi possível obter a resposta de saída do sistema conforme mostra a Figura 7 e, conseqüentemente, o modelo do sistema que é dado por

$$G(s) = \frac{11,83}{191s + 1} \quad (20)$$

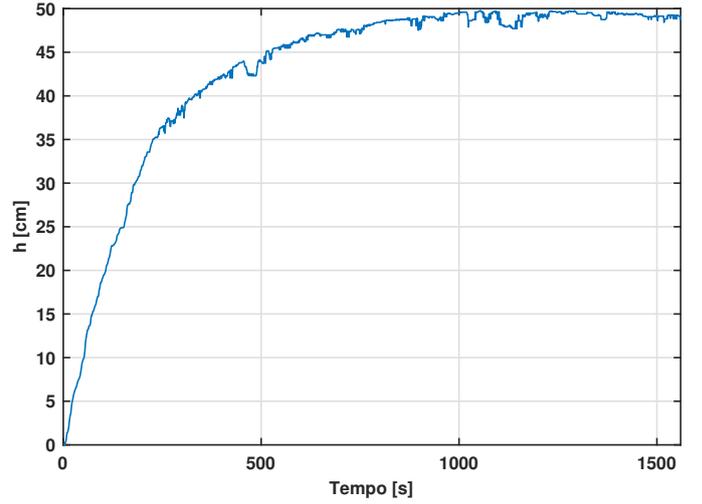


Figura 7. Resposta ao degrau em malha aberta.

Dos parâmetros do sistema obtidos da equação (20), da equação (15) e considerando $L_m = 15[s]$ é possível obter os ganhos do controlador PI-IMC sendo $K_p = 1,0764$ e $T_i = 191$ segundos. O controlador obtido foi implementado no CLP Rockwell CompactLogix L30ERM através da *software* de interface Studio 5000. Assim, na Figura 8, para fins de comparação, encontram-se os resultados obtidos com a implementação do controlador PI utilizando a técnica IMC, porém, sem a utilização da estrutura de preditor de Smith e sem a estratégia multimodelo. Também é mostrado o respectivo sinal de controle fornecido pelo atuador do sistema.

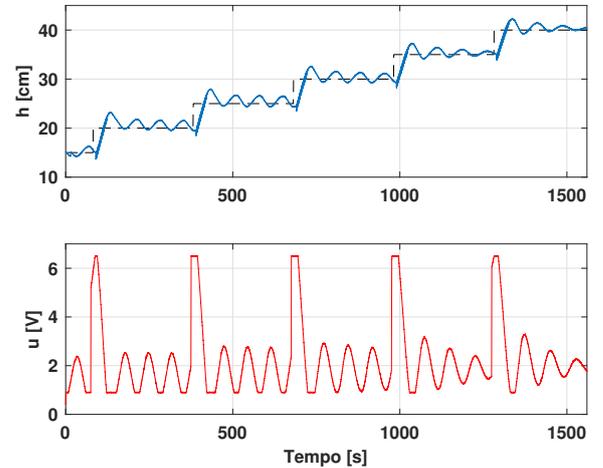


Figura 8. Resposta do sistema usando um PI-IMC sem preditor de Smith e seu respectivo sinal de controle.

Na Figura 8, tem-se em preto (tracejado) o valor de *setpoint*, em azul a resposta de saída com o uso do controlador PI-IMC e em vermelho o sinal de tensão, em volts, fornecido ao atuador. Observa-se que o erro em regime permanente não se estabiliza, pois a saída apresenta-se oscilatória bem como o sinal de controle aplicado ao sistema. Também é possível notar, que o sinal de controle chega a saturar em 6,5 [V].

Uma alternativa para tentar melhorar a resposta em um sistema com longos atrasos de transporte em relação a

constante de tempo da planta, é utilizar um controlador PI-IMC para diminuir os ganhos da parcela proporcional e integral. Porém, desta forma, mesmo não apresentando *overshoot*, o tempo de acomodação iria se tornar muito elevado, inviabilizando o uso de tal estratégia (Kaya, 2004).

Já em um segundo momento, foi implementado no CLP o controlador multimodelo utilizando-se uma técnica IMC em uma estrutura de preditor de Smith para os controladores locais e a escolha do controlador local feita pelo escalonamento de ganhos. Para a elaboração deste controlador no ambiente do CLP foi criado um código utilizando as linguagens FBD e LD. O programa pode ser consultado no link abaixo:

<https://tinyurl.com/yxrf4m75>

Na Figura 9 tem-se os resultados obtidos para o controlador multimodelo utilizando-se a estratégia IMC-Preditor de Smith para sintonia dos controladores locais. Assim como na Figura 8, o sinal preto (tracejado) representa o *setpoint*, a linha azul a resposta de saída do sistema e a linha vermelha o sinal de controle.

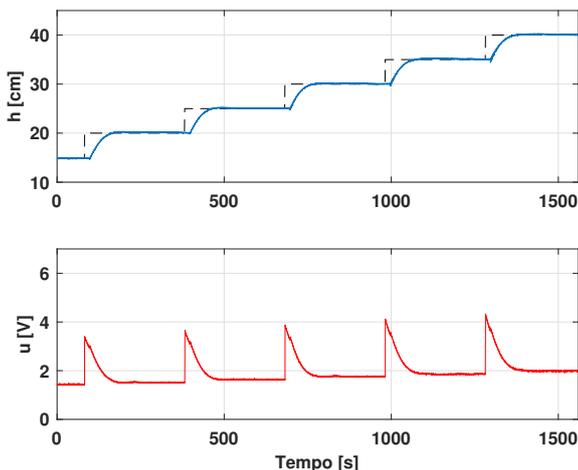


Figura 9. Resposta do sistema usando o controlador multimodelo por escalonamento de ganhos e seu respectivo sinal de controle.

Analisando a Figura 9, observa-se que a saída se comporta de forma satisfatória, visto que a referência é atingida com um *overshoot* relativamente pequeno e tempo de acomodação de aproximadamente 120 [s], mesmo levando em conta o tempo do atraso de transporte de 15 [s].

Outro fator que mostra a superioridade do controlador multimodelo para sistemas com atraso de transporte se dá ao analisar o sinal de controle. Como é mostrado na Figura 9, o valor do sinal de controle não ultrapassa 4,5 [V] no atuador e estabiliza-se com valores entre 1,5 [V] e 2 [V]. Assim, não exige que o atuador trabalhe em sua região de saturação.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo apresentou-se uma abordagem para a obtenção de um controlador multimodelo por escalonamento de ganhos, implementado em um CLP e aplicada a uma

planta didática de um sistema de nível considerando um atraso de transporte. A proposta de desenvolver controladores PI-IMC em uma estrutura de preditor de Smith locais e selecioná-los globalmente pelo escalonamento de ganhos, obteve um comportamento desejável pois foi capaz de rastrear a referência nos intervalos de variação da mesma.

Dos resultados obtidos percebe-se que o controlador PI-IMC em uma estrutura convencional não apresentou uma resposta desejável na saída quando comparado com o controlador multimodelo. Percebeu-se que o controlador multimodelo apresentou uma melhora significativa em seu desempenho com um esforço de controle relativamente menor. Dos resultados obtidos na aplicação, pode-se afirmar que a estratégia de controle multimodelo para sistema com atraso de transporte é viável e sua implementação pode ser realizada em ambientes industriais com o uso de um CLP.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A. (2007). *Introdução à identificação de sistemas*. 3ª Edição, Ed. UFMG, Minas Gerais, Brazil, 730p.
- Almeida, O.M. e Coelho, A.A. (2001). Controlador PID com escalonamento nebuloso dos ganhos: Auto-sintonia, análise e implementação. *V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-V SBAI*.
- Åström, K.J. e Wittenmark, B. (1994). *Adaptive Control*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- de Oliveira, F.S.S. (2016). *Controle PI/PID robusto baseado no preditor de Smith*. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Brasil.
- Kaya, I. (2004). IMC based automatic tuning method for PID controllers in a smith predictor configuration. *Computers & Chemical Engineering*, 28(3), 281–290.
- Machado, G.F., Pereira, R.D., Torrico, B.C., e Nogueira, F.G. (2019). Porque não deveríamos esquecer o preditor de Smith. In *Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 2141–2146. SBAI.
- Magalhães, J.B. (2012). *XC221 - Tanque: Manual de operações e caderno de experiências*. Exsto Tecnologia Ltda, Rua Juca Castelo, 219 - Maristela Santa Rita do Sapucaí - MG.
- Martin, P.A. (2006). *Modelagem e controle de um trocador de calor feixe tubular*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo - USP.
- Morari, M. e Zafriou, E. (1989). *Robust process control*. Morari.
- Normey-Rico, J.E. e Camacho, E.F. (2007). *Control of dead-time processes*. Springer Science & Business Media.
- Pugliese, L.F. (2015). *Uma estratégia de controle multimodelo LQG/LTR aplicada a um sistema não linear de levitação magnética*. Master's thesis, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Brasil.
- Rivera, D.E., Morari, M., e Skogestad, S. (1986). Internal model control: PID controller design. *Industrial & engineering chemistry process design and development*, 25(1), 252–265.
- Rodor, F.F. (2012). *Aplicação de Conceitos de Conjuntos Aproximados na Adaptação da Constante de Filtro de Controladores IMC*. Master's thesis, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Brasil.
- Smith, O.J. (1959). A controller to overcome dead time. *ISA J.*, 6, 28–33.