

Uma Estratégia de Controle Multimodelo Fuzzy Aplicada a um Sistema de Nível via Controlador Lógico Programável

Otávio da C. Seda* 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: otaviodacunhaseda@gmail.com,
tgaiba@unifei.edu.br, fadulrodor@unifei.edu.br, pugliese@unifei.edu.br).

Abstract: This paper presents the implementation of a multi-model control strategy for applications in non-linear systems using a PLC (Programmable Logic Controller). In the work proposal, a level system is linearized around different operation points and a PI (Proportional Integral) controller is designed for each operating point via the IMC (Internal Model Control) strategy. From the development of each controller, based on a specific operating point, the global control signal is obtained by fuzzyfication of all local control signals. In this way, a hybrid controller is developed that is able to overcome the nonlinearities present in a level system. The implementation of the multi-model control strategy is performed at the Rockwell CompactLogix L30ERM PLC in order to act on the Exsto XC221 didactic plant.

Resumo: Este artigo apresenta a implementação de uma estratégia de controle multimodelo para aplicações em sistemas não lineares utilizando um CLP (Controlador Lógico Programável). Na proposta do trabalho, um sistema de nível é linearizado ao redor de diferentes pontos de operação e um controlador PI (Proporcional Integral) é sintonizado para cada ponto linearizado via a estratégia IMC (*Internal Model Control*). Do desenvolvimento de cada controlador, baseado em um ponto de operação específico, o sinal de controle global é obtido pela fuzzyficação de todos os sinais de controle locais. Desta forma, é desenvolvido um controlador híbrido que é capaz de superar as não linearidades presentes em um sistema de nível. 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: Intelligent systems; Multimodel System; Fuzzy Logic; Programmable Logic Controller; IMC Method.

Palavras-chaves: Sistemas Inteligentes; Sistema Multimodelo; Lógica Fuzzy; Controlador Lógico Programável; Método IMC.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por eficiência e exatidão nos processos industriais tem exigido soluções de controle cada vez mais robustas e personalizadas. No entanto, o controlador PID ainda se mantém como a pedra fundamental nesses ambientes, seja pela familiaridade dos operadores ou pela sua simplicidade.

Apesar das características supracitadas, controladores PID podem não apresentar a performance esperada quando aplicados a sistemas não lineares, dadas as dificuldades inerentes na análise e controle desses. Para atacar essa classe, é comum aplicarmos técnicas de linearização em torno de diferentes pontos de operação de forma que o comportamento global possa ser aproximado pela união desses modelos lineares locais.

Considerando os diferentes modelos lineares locais que representam um sistema não linear global, é possível definir uma estratégia de controle que baseia-se em sistemas

multimodelo. Dessa maneira, estudos podem ser realizados sobre os sistemas locais e assim obter uma estratégia que realiza uma união das soluções locais, obtendo resultados desejáveis que atuarão também dessa maneira sobre o sistema não linear global (Foss et al., 1995; Murray-Smith e Johansen, 1997; Pugliese, 2015).

A proposta desse trabalho é obter um conjunto de modelos lineares locais para representar um sistema de nível com características não lineares. A partir desses modelos lineares locais (multimodelo) pode-se aplicar as técnicas de análise e projeto de controladores já conhecidas da teoria de controle clássico. Para cada modelo local, projeta-se um controlador PI com base na técnica conhecida como IMC (*Internal Model Control*) (Garcia e Morari, 1982).

Uma maneira de se obter um controlador PID *fuzzy* é utilizando o método de inferência de Mamdani conforme apresentado pelos autores em Osinski et al. (2019). No trabalho em questão, foi projetado um controlador PID *fuzzy* para o problema de carga e frequência de um sistema

elétrico de potência com objetivo de propor uma nova forma de definição do universo de discurso do sistema supervisorio *fuzzy*. Para este trabalho, o sistema multimodelo será representado por diferentes controladores PI locais e com isso, realiza-se a união dos sinais de controle através de uma inferência *fuzzy* TS (Takagi-Sugeno). Tal modelo consiste em um sistema de inferência capaz de descrever, de forma exata ou aproximada, sistemas dinâmicos não lineares por meio de um conjunto de sistemas dinâmicos lineares, localmente válidos, interpolados de forma suave, não linear e convexa. Sob o ponto de vista de controle, modelos TS permitem conciliar técnicas de controle não linear e, ao mesmo tempo, estender de forma rigorosa resultados da teoria de controle de sistemas lineares (Rodrigues, 2010; Pugliese, 2015).

Para avaliar a metodologia em estudo, o controlador em questão será implementado em um controlador lógico programável Rockwell CompactLogix L30ERM utilizando as linguagens FBD (*Function Block Diagram*) e LD (*Ladder Diagram*).

O trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção 2 apresenta-se o sistema de nível bem como a identificação dos modelos locais desejados. Na Seção 3 é apresentada a parametrização dos controladores locais bem como o controlador global multimodelo *fuzzy*. Na Seção 4 apresenta-se a implementação e os resultados obtidos. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões sobre o trabalho.

2. SISTEMA DE NÍVEL - MODELOS LOCAIS

A planta didática de nível Exsto XC221 é mostrada na Figura 1. A planta é composta por dois tanques de acrílico para armazenamento de líquido e a variação da quantidade de líquido entre esses dois tanques fica a cargo de uma bomba d'água e duas válvulas de escoamento. A variável de controle do processo é o nível do tanque superior, limitado entre 0 e 50 [cm]. A bomba d'água tem uma faixa de operação de 0 a 10 [V], porém, foi adotado a faixa de operação ente 0,9 e 6,5 [V]. Assim, compreende-se que o CLP atuará sobre a bomba d'água e receberá dados de um sensor piezo-resistivo presente no inferior do tanque superior para medição da pressão da coluna d'água e consequentemente da altura do nível de líquido (Magalhães, 2012).

O modelo não linear de um sistema de nível é dado por

$$V(t) = \int_0^h A(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = A \frac{dh(t)}{dt} = q_i(t) - a\sqrt{2gh(t)} \quad (2)$$

em que, V é o volume do tanque a ser controlado, h é a altura de líquido, q_i é o fluxo de entrada do tanque superior, A é a área da secção transversal do tanque superior e a é a área da seção transversal do tubo de saída que realiza o escoamento de líquido do tanque superior para o inferior. Deste modo entende-se que q_i é a entrada e h a saída do sistema, respectivamente (Åström e Wittenmark, 1994).

O sistema de nível em questão pode ser modelado por um sistema de primeira ordem dado por



Figura 1. Planta Didática XC221.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}, \quad (3)$$

em que K é o ganho DC e τ a constante de tempo do processo, respectivamente. Tal modelo dinâmico será utilizado para representar cada região de operação do sistema multimodelo.

Assim, ao optar por um sistema multimodelo como solução para contornar a não linearidade da planta em questão, deve-se definir as regiões de operação, bem como um modelo dinâmico para representar cada uma delas. Para efetuar a identificação das regiões de operação, optou-se por uma identificação em caixa cinza, em que não é necessário ter um conhecimento profundo do sistema e baseia-se apenas na relação de causa e efeito (Aguirre, 2007).

A determinação do modelo é feita através da descrição do sistema como uma equação a diferenças, que relaciona a entrada $u(k)$ com a saída $y(k)$ de cada região de operação. Um modelo genérico do sistema pode ser representado pela equação

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + v(k), \quad (4)$$

na qual q^{-1} é o operador de atraso unitário, de forma que $y(k)q^{-n} = y(k-n)$, $v(k)$ é um ruído branco com média zero e variância σ^2 , não correlacionado com a entrada (Lennart, 1999). Os polinômios $A(q)$ e $B(q)$ são da forma

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (5)$$

e

$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}. \quad (6)$$

O modelo em questão é o ARX (*Autoregressive with Exogenous Inputs*) e neste trabalho, foi o modelo escolhido para a identificação (Lennart, 1999; Aguirre, 2007). Em notação matricial, mais compacta, tem-se que

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + v(k), \quad (7)$$

em que $\theta^T = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ \dots \ a_{n_a} \ b_1 \ \dots \ b_{n_b}]$ e $\varphi^T = [-y(k-1) \ -y(k-2) \ \dots \ -y(k-n_a) \ u(k-1) \ \dots \ u(k-n_b)]$, com θ sendo o vetor de parâmetros a estimar, enquanto que

o vetor φ contém os dados do sistema. Dessa forma, um conjunto de dados de tamanho N pode ser representado, em notação matricial, por

$$Y_N^T = [y(1) \ y(2) \ \dots \ y(N)] , \quad (8)$$

$$\phi_N^T = [\varphi(1) \ \varphi(2) \ \dots \ \varphi(N)] . \quad (9)$$

O vetor de parâmetros pode ser determinado através da estimação por mínimos quadrados dada por (Aguirre, 2007)

$$\hat{\theta}_N = [\phi_N^T \phi_N]^{-1} \phi_N^T Y_N . \quad (10)$$

A coleta de dados para a identificação dos modelos foi realizada com a implementação de um controlador PI no sistema de nível. A aquisição dos dados foi feita através do ambiente LabView e da placa NI USB 6218. Foram coletados 5000 pontos, com uma taxa de amostragem de 0,01 [s], para respostas ao degrau de cada região de operação escolhida para o sistema multimodelo. Assim, dos dados obtidos e após determinação do vetor de parâmetros, dado pela equação (10), obteve-se os valores de K e τ , conforme equação (3), para cada ponto de operação escolhido. A Tabela 1 apresenta as funções de transferência que correspondem aos modelos locais.

Tabela 1. Pontos de operação e suas respectivas funções de transferência.

Ponto de Operação [cm]	G(s)
20	$\frac{11,40}{203s + 1}$
25	$\frac{12,96}{237,4s + 1}$
30	$\frac{14,40}{265,7s + 1}$
35	$\frac{15,80}{305s + 1}$
40	$\frac{16,94}{326s + 1}$

Além das 5 regiões de operação identificadas para o projeto do controlador multimodelo, foi realizada a modelagem do sistema de nível em malha aberta. Foi aplicado um degrau de 0,9 para 5 [V] na entrada da planta obtendo, conforme Figura 2, a resposta dinâmica na saída do sistema.

Da Figura 2, foi possível obter os parâmetros de um sistema de primeira ordem, equação (3), da resposta dinâmica do sistema para um degrau em malha aberta. Para o ensaio em malha aberta, o parâmetro K e τ foram obtidos por

$$K = \frac{y_{max} - y_{min}}{u_{max} - u_{min}} , \quad \tau = t_{63\%y_{max}} \quad (11)$$

de maneira que, y_{max} é a altura máxima da saída atingida após a aplicação do degrau na entrada, y_{min} é a altura mínima da saída, u_{max} é a tensão máxima aplicada na bomba, u_{min} é tensão mínima aplicada na bomba. Assim, da Figura 2, obteve-se que $K = 11,83$ e $\tau = 191$. Este modelo será utilizado de base para sintonia de um controlador local PI via IMC, o qual é utilizado para

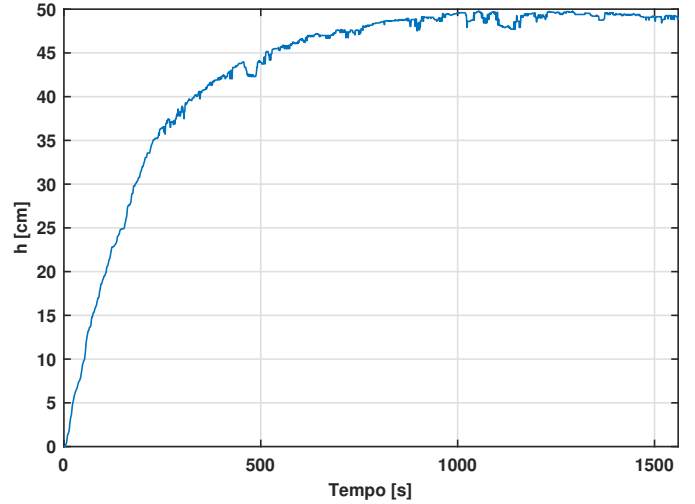


Figura 2. Resposta em malha aberta do sistema de nível. uma comparação com o controlador multimodelo *fuzzy* proposto neste trabalho.

3. PARAMETRIZAÇÃO E SINTONIA DO CONTROLADOR MULTIMODELO FUZZY

3.1 Desenvolvimento dos Controladores PI Locais via IMC

De posse dos modelos locais, o próximo passo consiste no projeto do controlador local. Neste trabalho, ao se utilizar a sintonia do controlador via método IMC em um sistema de primeira ordem e com a escolha de um filtro de primeira ordem, após reformulação da malha de controle, o controlador resultante PI é obtido (Rodor, 2012). O controlador PI local apresenta uma estrutura simples para implementação e possibilita que o erro entre a variável controlada e a referência definida pelo usuário tenda a zero em regime permanente para uma entrada em degrau de um sistema de primeira ordem (Teixeira et al., 2010).

O equacionamento para a sintonia dos controladores baseia-se na premissa de que o sistema a ser controlado é de primeira ordem como apresentado em (3) e conforme os modelos obtidos e apresentados pela Tabela 1.

O controlador local a ser obtido será do tipo PI com estrutura apresentada por

$$C_{PI}(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) , \quad (12)$$

em que, τ_i é o tempo de integração ou *reset* do controlador e K_C é o ganho proporcional. Desse modo, conforme apresentado por Rodor (2012), para um sistema de primeira ordem sem atraso de transporte tem-se que

$$K_C = \frac{\tau}{K\lambda} , \quad \tau_i = \tau . \quad (13)$$

A dinâmica da malha fechada tende a um sistema de primeira ordem com constante de tempo igual a λ . No entanto, ao se reduzir de maneira significativa o valor de λ o sistema pode vir a diminuir sua característica de robustez a perturbações ou variações do processo controlado (Levine, 2018). Assim, a constante do filtro deve ser escolhida como uma relação de compromisso entre velocidade de resposta e robustez, sempre tendo em vista as limitações físicas do processo.

Desse maneira, optou-se por incorporar um filtro para sistemas de primeira ordem com constantes de tempo lentas dado por

$$F(s) = \frac{\beta s + 1}{\lambda s + 1}, \quad (14)$$

em que o parâmetro β deve ser escolhido a fim de eliminar o polo da dinâmica do distúrbio na entrada da planta (Rodor, 2012). Deste modo, os parâmetros do controlador PI são calculados por

$$\beta = 2\lambda - \frac{\lambda^2}{\tau} \quad (15)$$

e

$$K_C = \frac{2\tau - \lambda}{K\lambda}, \quad \tau_i = \frac{2\tau\lambda - \lambda^2}{\tau}. \quad (16)$$

Após testes, os quais tinham por objetivo obter sintonia desejável para os controladores PI, optou-se por utilizar $\lambda = 60$. Assim, obteve-se os parâmetros dos controladores locais conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros dos controladores locais.

Ponto de Operação [cm]	Parâmetros
20	$K_C = 0,507, \tau_i = 102,3$
25	$K_C = 0,533, \tau_i = 104,8$
30	$K_C = 0,545, \tau_i = 106,4$
35	$K_C = 0,579, \tau_i = 108,2$
40	$K_C = 0,582, \tau_i = 108,9$

Os parâmetros do controlador PI via IMC obtido para o modelo determinado pelo ensaio em malha aberta foram calculados da mesma maneira e resultaram em $K_C = 0,454$ e $\tau_i = 101,2$. Tais parâmetros representam o controlador que será comparado com o controlador multimodelo *fuzzy*.

Atenta-se para um fenômeno conhecido como *windup*. O mesmo ocorre quando a variável a ser controlada atinge o seu valor máximo ou mínimo, o que acarreta na saturação do sinal de controle. Quando este fenômeno ocorre perante a controladores com ação integral, o erro será integrado demasiadamente. Deste modo, o controlador só voltará a atuar na sua região linear de atuação após a redução da parcela integral (Neto, 2005).

Para contornar este problema, utiliza-se a técnica *integrator clamping*. Nesta metodologia *anti-windup*, o termo integral acumulado permanece constante até que a variável de controle seja reduzida abaixo do limite máximo, ou elevada além do limite mínimo (Li et al., 2011). Assim, os ensaios presentes neste artigo tiveram o seu sinal de controle variando entre 0,9 e 6,5 [V].

Por fim, obteve-se um controlador PI-IMC, com *anti-windup* para cada região de operação, de modo que cada

controlador local será responsável por gerar um sinal de controle u_i , em que i equivale a região de operação.

3.2 Desenvolvimento do Controlador Multimodelo via Lógica Fuzzy

Com o desenvolvimento dos controladores locais para os pontos de operação desejados, pode-se realizar a união destes via lógica *fuzzy* para que dessa forma, a aplicação deixe de ser local fazendo com que o sistema não linear seja controlado globalmente. Essa união favorece a aplicação do controle multimodelo em uma ampla faixa de operação, fazendo com que os controladores PI-IMC locais atuem sobre a planta de processo global através de um grau de pertinência dos controladores locais em cada região de operação.

O grau de pertinência é calculado por funções que representam as faixas de operação, e através de regras IF-THEN, o sinal de saída, que irá atuar sobre a planta de processo global não linear, é determinado (Pugliese, 2015). Uma malha de controle para atuação de um controlador global é determinada como mostra a Figura 3.

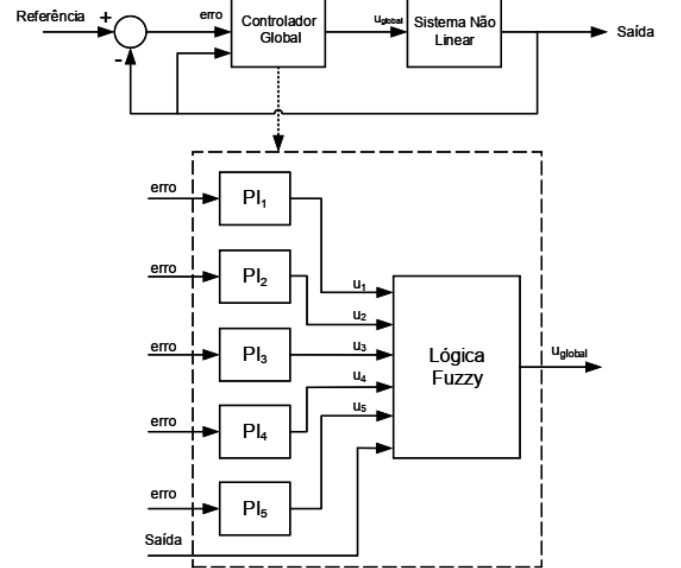


Figura 3. União dos controladores locais.

Da Figura 3, percebe-se que cada controlador local gera um sinal de controle próprio que atuará melhor próximo ao seu ponto de operação. Como cada controlador está configurado para operar em um determinado ponto de operação, estabelece-se ao redor deste ponto uma função de pertinência do controlador. As funções de pertinência *fuzzy* utilizadas são trapezoidais e triangulares como pode ser visto na Figura 4 e possuem como entrada, todos os sinais dos controladores locais desenvolvidos ($u_i, i = 1, 2, \dots, 5$) junto a uma referência que é o ponto de operação real do sistema (y), e como saída, o sinal de controle global (u_{global}), que atuará na planta não linear. Dessa maneira, cada sinal de controle segue uma função de pertinência que é responsável por determinar o grau de ativação de cada controlador local sobre a ação de controle global, ou seja, u_i terá grau de pertinência $\mu_i(h(t))$, com $i = 1, 2, \dots, 5$.

Portanto, cada controlador local terá uma atuação de maior ou menor influência que depende diretamente do ponto de operação real do sistema, pois cada sinal de controle local irá atuar de forma proporcional sobre o sistema global devido ao seu respectivo grau de ativação que segue sua própria função de pertinência. Cada regra, é ajustada de acordo com os pontos de operação e as curvas que seguem as intersecções entre cada ponto de operação são as retas mostradas na Figura 4.

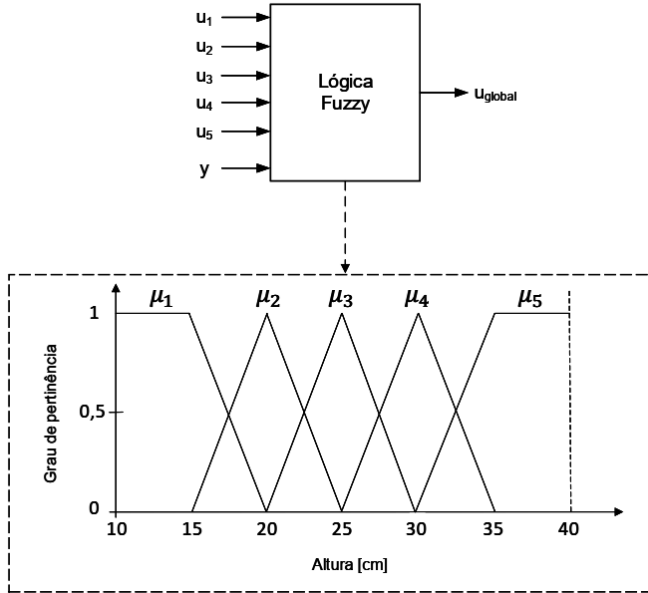


Figura 4. Funções de pertinência fuzzy.

A ação de controle global é obtida pela inferência fuzzy, que no caso é uma combinação ponderada pelo modelo fuzzy Takagi-Sugeno e das ações de cada controlador PI-IMC local. Desta forma, a ação de controle global é calculada por

$$u_{global} = \frac{\sum_{i=1}^5 \mu_i(h(t)) u_i}{\sum_{i=1}^5 \mu_i(h(t))} \quad (17)$$

em que, $\mu_i(h(t))$ é o valor da ativação da i-ésima regra (modelo local), u_i , equivale a ação de controle determinada pelo i-ésimo controlador e i equivale ao número de modelos ou controladores locais (Machado, 2007).

4. APLICAÇÃO NO SISTEMA DE NÍVEL

4.1 Implementação no Controlador Lógico Programável

A implementação do controlador PI-IMC obtido a partir do modelo do sistema em malha aberta e do controlador multimodelo fuzzy foi realizada no CLP Rockwell CompactLogix L30ERM. Para tal feito, foi utilizado o software Studio 5000, o qual é disponibilizado pelo fabricante do CLP utilizado.

Para garantir a confiabilidade e reduzir o tempo de projeto, recorreu-se a blocos funcionais pré-definidos pelo fabricante. Os blocos utilizados na lógica desta implementação estão representados na Figura 5.

O bloco PIDE foi utilizado para efetuar toda a sintonia dos controladores PI-IMC e gerar os sinais de controle

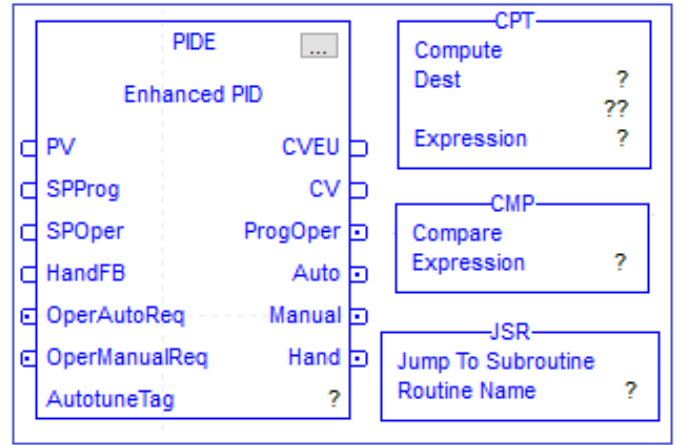


Figura 5. Blocos utilizados para a implementação no CLP.

referentes a cada controlador local. Para a confecção da lógica fuzzy utilizou-se apenas os blocos de comparação (CMP) e de expressões matemáticas (CPT). Ao final do código foi necessário utilizar o bloco JSR para acesso às sub rotinas criadas.

Uma vez compreendido o funcionamento destes blocos, foi possível implementar o código para atuação no sistema de forma confiável, visto o número reduzido de funções utilizadas. Nesta implementação utilizou-se duas linguagens de programação, FBD e LD.

Uma vez sintonizado todo o sistema de controle no ambiente de programação e garantida a comunicação entre o sistema de nível, CLP e software de comando, realizou-se uma implementação utilizando como referência de entrada, uma varredura entre todas as possíveis regiões de operação do sistema, ou seja, entre 15 e 40 [cm].

4.2 Resultados

A Figura 6 apresenta uma comparação entre as respostas dinâmicas do controlador PI-IMC local, que foi projetado baseando-se no modelo obtido através do ensaio em malha aberta, e do controlador PI-IMC multimodelo fuzzy proposto.

Informa-se que o sistema foi excitado de forma a dar um degrau de 5 [cm] para cada região de interesse, ou seja, cada ponto de operação local utilizado. Da Figura 6 é possível notar que ambos os controladores realizam o rastreamento do sistema de forma desejável, porém, nota-se que o controlador multimodelo realiza esse feito utilizando um esforço menor do atuador quando o degrau é aplicado, pois os picos do sinal de controle são menores quando comparados com os picos do sinal de controle do PI-IMC local.

A Figura 7 tem o objetivo de apresentar uma análise mais minuciosa. É possível notar que o controlador multimodelo apresenta M_p (Máximo pico) de menor magnitude quando comparado ao controlador local. Ao se observar o T_a (Tempo de acomodação), também é possível perceber que o controlador global apresenta-se mais constante e demandando menos tempo para levar o sistema ao estado de regime quando comparado com o controlador local.

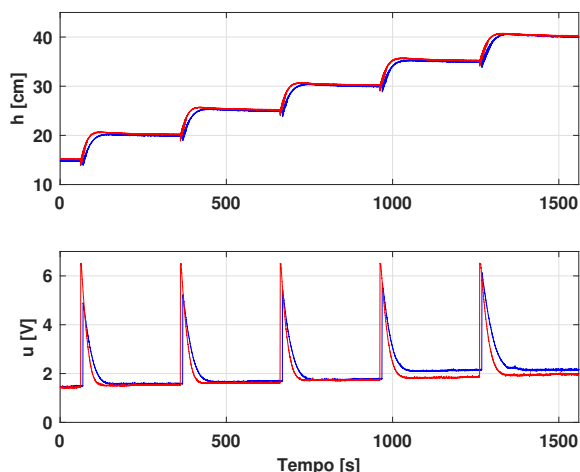


Figura 6. Resposta do sistema e sinal de controle aplicado, via controlador PI-IMC multimodelo *fuzzy* (em azul) e controlador PI-IMC local (em vermelho).

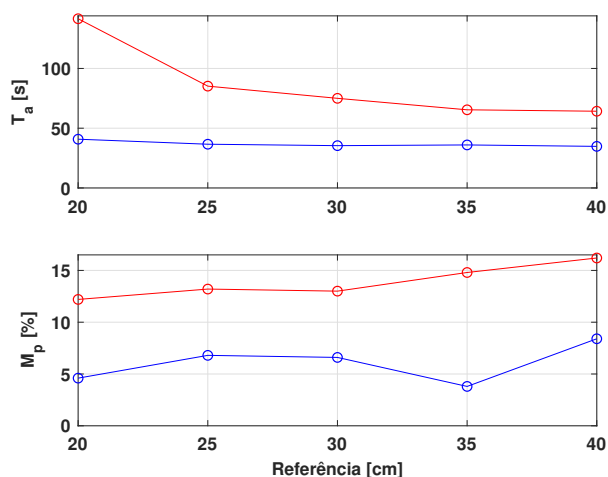


Figura 7. Comparação entre os resultados obtidos via controlador PI-IMC multimodelo *fuzzy* (em azul) e controlador PI-IMC local (em vermelho).

5. CONCLUSÃO

Neste artigo apresentou-se uma abordagem para a obtenção de um controlador multimodelo não linear, implementado em um CLP e aplicado a uma planta didática de um sistema de nível. A proposta de desenvolver controladores PI-IMC locais e unir globalmente os sinais de controle pela lógica *fuzzy*, obteve resultado desejável pois foi capaz de realizar o rastreamento da referência nos intervalos em que a variação foi realizada.

A partir dos resultados obtidos, pode-se perceber que tanto o controlador local como o controlador global obtiveram uma resposta desejável na saída do sistema de nível. Deste resultado obtido na aplicação do controlador global resultante, pode-se afirmar que a estratégia de controle multimodelo é funcional e sua implementação pode ser realizada em ambientes industriais e com um nível simples de programação no controlador lógico programável que é o controlador mais difundido na indústria.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A. (2007). *Introdução à identificação de sistemas*. 3ª Edição, Ed. UFMG, Minas Gerais, Brazil, 730p.
- Åström, K.J. e Wittenmark, B. (1994). *Adaptive control*, volume 395. Courier Corporation.
- Foss, B.A., Johansen, T.A., e Sørensen, A.V. (1995). Nonlinear predictive control using local models—applied to a batch fermentation process. *Control Engineering Practice*, 3(3), 389–396.
- Garcia, C.E. e Morari, M. (1982). Internal model control. a unifying review and some new results. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 21(2), 308–323.
- Lennart, L. (1999). *System identification: theory for the user*. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Levine, W.S. (2018). *The control handbook: control system applications*. CRC press.
- Li, X.L., Park, J.G., e Shin, H.B. (2011). Comparison and evaluation of anti-windup PI controllers. *Journal of Power Electronics*, 11(1), 45–50.
- Machado, J.B. (2007). *Modelagem e controle preditivo utilizando multimodelos*. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil.
- 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.
- Murray-Smith, R. e Johansen, T. (1997). *Multiple model approaches to nonlinear modelling and control*. CRC press.
- Neto, A.H. (2005). *Técnicas anti-windup em estruturas de controle PID, RST e GPC*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Brasil.
- Osinski, C., Leandro, G.V., e da Costa Oliveira, G.H. (2019). Fuzzy pid controller design for lfc in electric power systems. *IEEE Latin America Transactions*, 17(01), 147–154.
- 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.
- 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.
- Rodrigues, M.C. (2010). *Identificação fuzzy-multimodelos para sistemas não lineares*. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Brasil.
- Teixeira, E.H.C.G. et al. (2010). *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. Editora Blucher.