

Identificação e Controle de uma Planta de Nível Utilizando Controlador Lógico Programável

Francisco H. V. Silva* Josias G. Batista** José L. N. Silva**
Darieslson A. Souza*** Felipe J. S. Vasconcelos***

* SENAI - Departamento Regional do Ceará - Fortaleza, CE
(e-mail: fhsilva@educar.sfipec.org.br).

** IFCE - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará
- Fortaleza, CE

(e-mail: josiasbatista@ifce.edu.br/leonardo.silva@ifce.edu.br)

*** UFC - Universidade Federal do Ceará - Fortaleza, CE

(darieslson@dee.ufc.br/felipe.sousa.vasconcelos@dee.ufc.br)

Abstract: Level control is one of the forms of control most common in the industry. There are several methods for identifying the plant model in order to be used in a closed loop system with the controller. This work presents the identification and control of a level plant using a Programmable Logic Controller (PLC). The identification of the plant is performed by the parametric model First Order Plus Delay Time (FOPDT), using the following methods: Ziegler/Nichols, Hägglund, Smith e Sundareshan/Krishnaswamy. The experimental data collection of the model is obtained through the Modbus communication between PLC and supervisory system, and after that, the data are exported to Excel® to perform the in open loop comparisons. The Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is applied to the system and its tuning is performed by the Ziegler/Nichols method. To compare the experimental results in closed loop, the following performance criteria are used: rise time (t_r), settling time (t_s) and overshoot. At the end, it is concluded that Smith's method of identification obtains the best results.

Resumo: O controle de nível é uma das formas de controle mais comuns na indústria. Existem vários métodos para identificar o modelo da planta, a fim de ser usado em um sistema de malha fechada com o controlador. Este trabalho apresenta a identificação e controle de uma planta de nível utilizando um Controlador Lógico Programável (CLP). A identificação da planta é realizada pelo modelo paramétrico *First Order Plus Delay Time* (FOPDT), usando os seguintes métodos: *Ziegler/Nichols*, *Hägglund*, *Smith* e *Sundareshan/Krishnaswamy*. A coleta de dados experimentais do modelo é obtida através da comunicação *Modbus* entre CLP e sistema supervisor, após isso, os dados são exportados para o *Excel*® para realizar as comparações em malha aberta. O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é aplicado ao sistema e sua sintonia é realizada pelo método de *Ziegler/Nichols*. Para comparar os resultados experimentais são utilizados os seguintes critérios de desempenho: tempo de subida (t_r), tempo de acomodação (t_s) e *overshoot*. Ao final, conclui-se que o método de identificação de *Smith* obtém os melhores resultados.

Keywords: Systems Identification; Level Plant; Programmable Logical Controller; Proportional-Integral-Derivative Controller; Smith identification method.

Palavras-chaves: Identificação de Sistemas; Planta de nível; Controlador Lógico Programável; Controlador Proporcional-Integral-Derivativo; Método de identificação *Smith*.

1. INTRODUÇÃO

A identificação de um sistema determina um modelo matemático capaz de representar seus aspectos essenciais para utilização em controle. Segundo Ljung and Glad (1994), os procedimentos envolvidos na elaboração de modelos matemáticos são: análise físico-matemática e análise experimental. Estes procedimentos propiciam a obtenção de modelos que representam a dinâmica da planta. Na utilização em controle de processos não se pretende obter um modelo

matemático exato, mas um modelo adequado à aplicação (Coelho and dos Santos Coelho, 2004).

Para o controle desses modelos é comum utilizar-se dos controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Segundo Ribeiro et al. (2017), o controlador PID é uma das topologias de controle mais utilizadas na indústria, chegando a 95% das malhas de controle. É importante que os ganhos proporcional, integral e derivativo sejam ajustados corretamente com base no ponto de operação desejado no

processo. De acordo com Batista et al. (2014b), um ajuste errado desses parâmetros pode levar o processo a condições indesejadas.

Os sistemas de nível de líquido são importantes em muitas aplicações industriais e acadêmicas, com isso, os sistemas de medição e controle precisam ser o mais preciso possível para esse tipo de processo (de Sousa Vasconcelos and de Sá Medeiros, 2019). No artigo de Reis et al. (2016), foi desenvolvido um protótipo de controle de nível utilizando a plataforma do Arduino e uma interface no computador para monitoramento. A identificação da função de transferência da planta foi obtida através da curva de reação ao degrau. Após isso, foi realizada a comparação dos métodos de ajuste do controlador Proporcional-Integral (PI), utilizando os seguintes métodos: *Internal Model Control (IMC)*, *Ziegler-Nichols (ZN)*, *Cohen-Coon (CC)* e *Haalman*. Ao final, o método de *Haalman* foi o mais satisfatório para o controle de nível, visto que foram testados três diferentes pontos de operação, e em todos, os resultados foram satisfatórios.

Em Srinivas et al. (2014), foi proposta uma análise de desempenho do controlador PID baseado em algoritmo genético, comparado com o controlador PID convencional para várias técnicas de ajuste. Três processos de primeira ordem foram conectados em série formando um sistema de nível de três tanques. A modelagem do processo foi obtida através da análise físico-matemática. Os parâmetros ideais para ajuste do controlador PID foram estimados pelos métodos *ZN*, *CC*, critérios de erros mínimos e algoritmos genéticos. Os resultados da simulação indicam que a resposta do controlador apresenta melhor desempenho utilizando o método de ajuste baseado em algoritmos genéticos, proporcionando menor *overshoot*.

Ribeiro et al. (2017) fizeram a comparação entre técnicas analíticas/clássicas versus otimização de algoritmos para o ajuste do controlador PI/PID de uma planta de nível. A planta foi identificada pelo modelo paramétrico *First Order Plus Delay Time (FOPDT)*. Na sintonia dos controladores foram utilizados os métodos clássicos: *CC*, *Haalman*, *IMC* e *Chien-Hrones-Reswick (CHR)*; técnicas analíticas: *Integral of Absolute Error (IAE)* e *Integral of time absolute error (ITAE)*; e otimização de algoritmos: *Genetic Algorithm (GA)*, *Ant Colony Optimization (ACO)*, *Bat Algorithm (BA)*, *Bacterial Foraging Optimization (BFO)*, *Particle Swarm Optimization (PSO)* e *Shuffled Frog-Leaping (SFL)*. Percebeu-se que os métodos de otimização de algoritmos foram mais satisfatórios que os métodos analíticos/clássicos, sendo o método *SFL* o mais eficiente.

O objetivo deste trabalho é realizar a identificação de um sistema de medição de nível de forma experimental utilizando o modelo paramétrico FOPDT e aplicar um controlador PID utilizando um Controlador Lógico Programável (CLP). Além disso, é realizada uma comparação entre os métodos de identificação em malha aberta, e posteriormente aplicação do controlador PID e sintonia realizada pelo método *ZN*. Nos testes experimentais é realizada a comparação entre os métodos de identificação em malha fechada para o ponto de operação utilizado na identificação da planta, como também em novos pontos de operação para ser verificado a robustez do modelo.

A motivação para a realização deste trabalho é a de determinar um modelo para um sistema de controle de nível com CLP, onde seja possível realizar a implementação de um controlador PID e controlar o nível de forma eficiente. Este artigo traz como contribuição principal a implementação de um controlador PID aplicado a um sistema de medição de nível utilizando um CLP. É apresentada como é realizada a coleta de dados da curva de reação do processo para a identificação do modelo da planta de nível através do modelo paramétrico FOPDT. Traz a configuração da função PID na plataforma de programação *TwidoSuite®* da *Schneider Electric®*.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta o assunto relacionado à fundamentação teórica. A Seção 3 apresenta o sistema de medição de nível, a metodologia para a execução da identificação do modelo da planta, a programação do CLP e a sintonia do controlador PID. Na Seção 4 são apresentados os resultados experimentais e as discussões sobre o trabalho. As conclusões e trabalhos futuros são mencionados na Seção 5.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será dissertada a fundamentação teórica utilizada neste trabalho. Serão abordados os controles de nível, os métodos de identificação utilizados, as características gerais do controlador PID e, por fim, será apresentado o controlador PID do CLP *TWIDO* da *Schneider Electric®*.

2.1 Controle de nível

Nível é uma das variáveis mais presentes nos processos industriais. A medição de nível é definida como a interface entre dois meios. Geralmente esses meios são líquidos, mas podem ser sólidos ou a combinação entre eles. A interface pode ser entre um líquido e um gás, dois líquidos ou entre um sólido e um gás (EGÍDIO et al., 2006).

O controle de nível é uma das formas de controle mais presentes na indústria. Para manter o nível de um tanque ou vaso constante, é necessário que a vazão mássica de entrada (Me) seja igual à de saída (Ms), conforme a Figura 1. Com isso, quando ocorre um aumento na vazão de entrada, o controle de nível deve aumentar a vazão de saída para manter a estabilidade do sistema (Teixeira et al., 2010).

Contudo, este aumento não precisa ser no mesmo instante. É recomendado sintonizar a malha de nível de forma a usar o volume do tanque para amortecer as variações da vazão de saída (Ms). Isto é, ao ocorrer um aumento da vazão de entrada (Me), o controle deve permitir um aumento temporário do nível, para que o aumento da vazão de saída ocorra mais lentamente. Isto permite atenuar a interferência de uma parte da planta em outra que seja subsequente (Teixeira et al., 2010).

2.2 Identificação de sistemas

A identificação de sistemas tem por objetivo construir modelos matemáticos de processos dinâmicos a partir de dados experimentais observados na planta. Nestes modelos

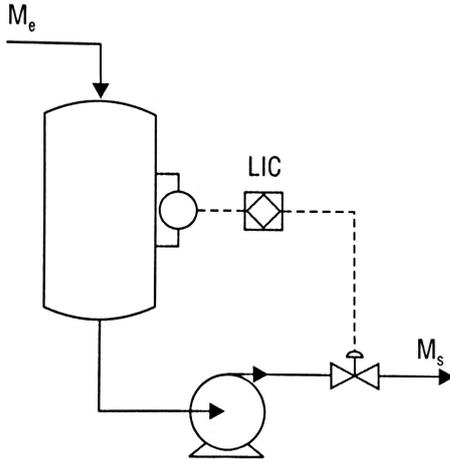


Figura 1. Exemplo de controle de nível.

se está interessado nas relações entre as entradas e as saídas do processo. A vantagem é que este método pode ser o mais rápido e prático de se obter um modelo da dinâmica do processo (Teixeira et al., 2010).

Para a identificação das características de um processo sob avaliação, é possível utilizar uma entrada a degrau. Com isso, o chaveamento através de um acréscimo ou decréscimo na magnitude do degrau pode ser realizado pela variação de tensão, corrente ou abertura/fechamento de uma válvula (Coelho and dos Santos Coelho, 2004). Segundo Aguirre (2007), a resposta ao degrau pode ser obtida de acordo com os passos abaixo:

- (1) Ajustar o regulador para o modo manual;
- (2) Modificar a magnitude da variável controlada (acréscimo ou decréscimo);
- (3) Plotar o gráfico da variável de saída do processo.

Segundo Ribeiro et al. (2017), os métodos clássicos de identificação (FOPDT) consistem em obter uma representação matemática do sistema experimental baseada na curva de reação do processo. O sistema é representado por uma função de primeira ordem com atraso, como visto na Eq. (1),

$$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (1)$$

onde K é o ganho estático, τ é a constante de tempo e θ é o atraso de transporte. De acordo com Teixeira et al. (2010), é necessário aplicar um degrau na variável manipulada para obter a curva de reação do processo. A partir dessa curva, é possível calcular os parâmetros do modelo K , τ e θ . Existem vários métodos na literatura para se encontrar os valores desses parâmetros. Neste trabalho são utilizados os métodos de Ziegler/Nichols (ZN), Hägglund (HAG), Smith e Sundaresan/Krishnaswamy (Sun/Krish). Todos estes métodos podem ser observados em Coelho and dos Santos Coelho (2004).

2.3 Controlador PID

O controlador PID é o algoritmo de controle mais empregado em meio acadêmico e industrial (dos Santos et al., 2014; Batista et al., 2019). Esta popularidade se deve principalmente à simplicidade no ajuste dos seus parâmetros para se obter um bom desempenho e do fato de

este algoritmo estar disponível em boa parte dos principais equipamentos de controle industrial, como os CLP's e outros dispositivos disponíveis comercialmente (Kaster et al., 2011). Há uma variação na implementação prática deste algoritmo a depender do fabricante, no entanto a essência do controlador PID continua a mesma (Teixeira et al., 2010; Batista et al., 2014a).

Segundo Ogata (2010), a utilidade dos controles PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Quando o modelo matemático da planta não é conhecido e os métodos analíticos não podem ser utilizados, controles PID se mostram mais úteis. No entanto, quando a planta controlada apresenta dinâmica complexa e limitações operacionais, o desempenho do controlador PID torna-se inadequado e em alguns casos não assegura a estabilidade do sistema (Knihs et al., 2010; Souza et al., 2020).

O controlador PID gera a sua saída proporcionalmente ao erro, proporcionalmente à integral do erro e proporcionalmente à derivada do erro (Teixeira et al., 2010). Segundo Åström and Hägglund (1995), a equação deste controlador no domínio do tempo é mostrada a seguir:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (2)$$

onde $u(t)$ é a variável de controle, $e(t)$ o erro, K_p é o ganho proporcional T_i é o tempo integrativo e T_d é o tempo derivativo.

Fazendo a relação entre a variável de controle $u(t)$ e o sinal de erro atuante $e(t)$, e aplicando a transformada de Laplace na Eq.(2), obtemos a função de transferência do controlador PID no domínio da frequência Ogata (2010):

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3)$$

O CLP *TWIDO* da *Schneider Electric*® implementa uma correção PID mista (serial/paralela). A forma mista do modelo do controlador PID é apresentada na Figura 2 a seguir (Schneider, 2009).

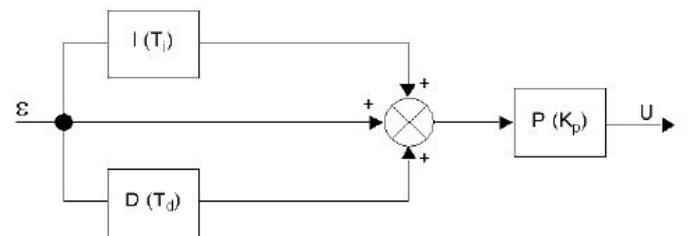


Figura 2. Diagrama de blocos de um controlador PID do CLP *TWIDO*.

em que:

- I = Ação integral (atuando de forma independente e paralela à ação derivada);
- D = Ação derivada (atuando de forma independente e paralela à ação integral);
- P = Ação proporcional (atuando em série na saída combinada das ações integrais e derivadas);

- U = A saída do controlador PID (posteriormente alimentada como entrada no processo controlado).

A lei de controle PID na forma discreta usada no CLP *TWIDO* tem a seguinte forma:

$$u(i) = K_p \left[\epsilon(i) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=1}^i \epsilon(j) + \frac{T_d}{T_s} [\epsilon(i) - \epsilon(i-1)] \right] \quad (4)$$

onde K_p é o ganho proporcional, T_i é a constante de tempo integral, T_d é a constante de tempo derivada, T_s é o período de amostragem, $u(i)$ é a variável de controle e $\epsilon(i)$ é o desvio (Schneider, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será descrito o sistema de medição de nível, o método para a execução da identificação dos modelos de primeira ordem com atraso da planta, a metodologia de simulação e experimento, a programação do CLP e o projeto de sintonia do controlador PID aplicados neste trabalho.

3.1 Descrição do sistema de medição de nível

A bancada utilizada neste projeto foi desenvolvida pela empresa *Automatus*® para serem realizados testes didáticos em malhas de controle de nível, pressão, vazão e temperatura *Automatus* (2014). Neste trabalho é utilizado apenas a malha de nível. Na Figura 3 temos uma imagem ilustrativa da bancada.

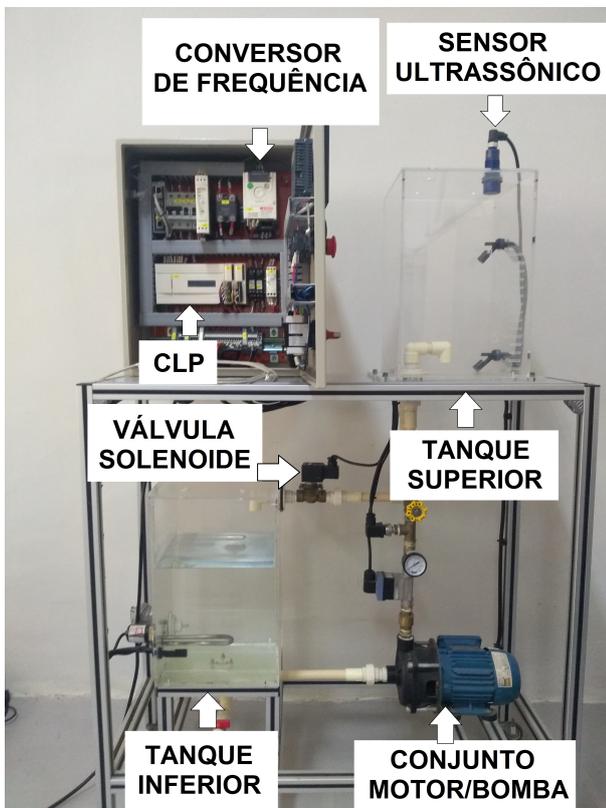


Figura 3. Bancada didática de medição de nível.

A bancada é composta por um CLP da linha *TWIDO* da *Schneider Electric*® de referência **TWDLCAE40DRF**

e dois cartões de expansão analógico de 12 bits, referência **TM2AMM3HT**, que podem ser usados para implementar os controladores PI e PID. Além disso, possui um painel de acionamento equipado com botões, sinalizadores e uma Interface Homem-Máquina (IHM) da linha *Magelis* de referência *HMIS5T* também da *Schneider Electric*®, para serem realizados os acionamentos, monitoramentos e ajustes das malhas de controle.

Os equipamentos presentes na bancada para utilização na malha de controle de nível são:

- 02 tanques retangulares com dimensões 250 x 250 x 400 mm;
- Motor de indução trifásico (MIT) de 0,5 cv, tensão nominal de 220 V, corrente nominal de 1,86 A e fechamento em delta;
- Bomba centrífuga de 0,5 cv com vazão de 4,91 m³/h;
- Conversor de frequência de 0,5 cv, modelo Altivar 12, da *Schneider Electric*®¹;
- Sensor ultrassônico analógico de 0 à 10 V²;
- Válvula solenoide *ON/OFF*³

O tanque superior possui um sensor ultrassônico para medição do nível. A saída deste sensor é um sinal analógico de 0 à 10 V, proporcional ao nível da água no tanque (0 à 15,0 l), que funciona como uma entrada para o CLP. O tanque inferior é utilizado como reservatório de água, nele está instalado a bomba centrífuga. O MIT que está acoplado a bomba centrífuga é acionado pelo conversor de frequência que varia a vazão da bomba para enchimento do tanque superior e controle do nível. Entre o tanque superior e inferior há uma válvula solenoide instalada para simular distúrbios no nível e o controlador do sistema poder atuar.

Devido a lei de controle PID do CLP *TWIDO* ser discreta, os cartões de expansão analógicos do CLP fazem a interface de conversão dos dados da planta com o controlador, de tal forma que a entrada analógica passa por um conversor analógico-digital (A/D) para os dados serem enviados ao controlador PID. Já a saída analógica recebe os sinais do controlador PID discretos e os transferem para um conversor digital-analógico (D/A), para assim serem enviados ao processo. A Figura 4 mostra o diagrama de blocos desse processo.

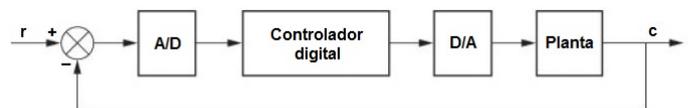


Figura 4. Diagramas de blocos de um controlador digital com conversores A/D e D/A.

3.2 Métodos de identificação

Para a identificação do modelo da planta é utilizado o modelo paramétrico FOPDT. Com isso, é aplicado um degrau em malha aberta a variável nível para se obter a

¹ Manual disponível em: <https://www.se.com/br/pt/faqs/FA279300/>

² Data sheet disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product/XX930A1A1M12/sensor>

³ Data sheet disponível em: http://www.ascoval.com.br/literatura/FluidControl/31B/catalogo/015_8210.pdf

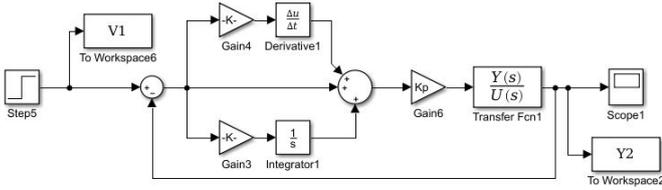


Figura 8. Diagrama de blocos do controlador PID do CLP *TWIDO* utilizado nas simulações.

aplicada a plataforma *TwidoSuite*® para a programação do processo em *ladder* e toda a configuração do controlador PID disponibilizado pelo fabricante *Schneider Electric*®. Na Figura 9 é mostrada a tela de programação do *software TwidoSuite*®.

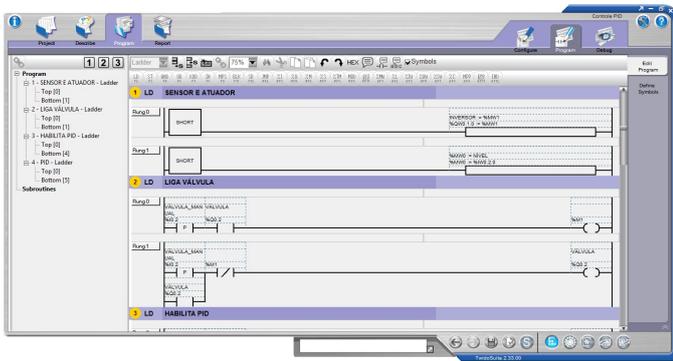


Figura 9. *Software* de programação *TwidoSuite*®.

A Figura 10 mostra a aba *PID*, na qual é realizada a escolha do *setpoint*, valor desejado de nível, através da palavra de memória *%MW2*. Os ganhos K_p , T_i e T_d são inseridos, respectivamente, nas palavras de memória *%MW10*, *%MW11* e *%MW12*, já o período de amostragem (T_s) é definido em 500 ms. É recomendado pelo fabricante definir o tempo de varredura do CLP *TWIDO* para que o valor do período de amostragem (T_s) do controlador PID seja um múltiplo exato e, para a operação correta da regulação, o tempo de varredura é colocado em modo periódico Engin and Engin (2013). Neste projeto, o tempo de varredura utilizado é de 100 ms, múltiplo exato do período de amostragem (T_s) de 500 ms, atendendo a recomendação do fabricante.

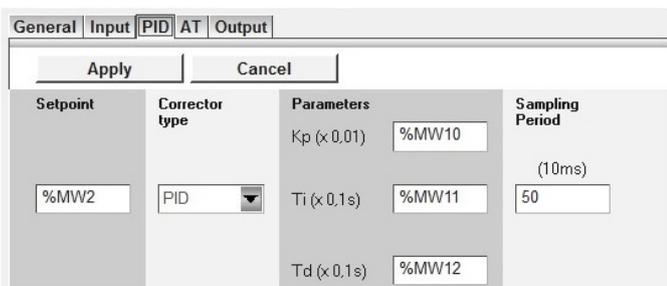


Figura 10. Configuração da aba *PID* da função PID no *Software* de programação *TwidoSuite*®.

3.4 Sintonia do controlador PID

Para Reis et al. (2016), as técnicas de sintonia do controlador PID tem como objetivo obter uma especificação de ganhos apropriados para controlar o modelo do processo. *ZN* sugeriram regras para a sintonia de controladores PID baseados na resposta experimental ao degrau Junior et al. (2019). Essas regras indicam um conjunto de valores de K_p , T_i e T_d que vão proporcionar uma operação estável do sistema. Contudo, o sistema resultante pode exibir um sobressinal máximo grande na resposta ao degrau, o que é inaceitável. Nesse caso, precisamos fazer uma série de sintonias finas até que um resultado aceitável seja obtido.

Os valores dos ganhos do controlador PID para a análise simulada e experimental são calculados com base na Tabela 1, que mostra a sintonia do controlador do tipo PID pelo método de *ZN*, em função dos parâmetros do modelo de primeira ordem com atraso.

Tabela 1. Sintonia PID por *ZN*.

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$1,2 \frac{\tau}{K\theta}$	2θ	$0,5\theta$

Os ganhos do PID, utilizando a técnica de sintonia *ZN* para o controle de Nível em malha fechada são mostrados, para todos os métodos de identificação do modelo da planta utilizados neste projeto, na Tabela 2.

Tabela 2. Ganhos PID dos métodos de identificação por método *ZN*.

Método	K_p	T_i	T_d
ZN	2,05	2,56	0,64
HAG	1,36	2,56	0,64
Smith	0,33	8,52	2,13
Sun/Krish	0,13	13,32	3,33

Após a sintonia fina, os valores dos ganhos do controlador, para todos os métodos de identificação utilizados, são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Ganhos PID dos métodos de identificação após sintonia fina.

Método	K_p	T_i	T_d
ZN	3,00	15,00	0,10
HAG	3,20	14,00	0,10
Smith	3,50	13,00	0,10
Sun/Krish	4,00	10,00	0,10

Podemos verificar que os ganhos utilizados no CLP diferem um pouco dos ganhos calculados pelo método *ZN*, isso acontece devido a necessidade de ajustes em campo para melhores tempo de subida (t_r), tempo de acomodação (t_s) e *overshoot* (%).

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais, a comparação entre os métodos de identificação em malha fechada e as discussões relativas a este trabalho.

4.1 Resultados Experimentais

Após a sintonia fina do controlador PID, é realizado o teste experimental em malha fechada para os 04 métodos de

identificação da planta. Em todos os métodos o sistema de nível alcança o *setpoint*. É importante citar que estes testes são realizados com a válvula solenoide entre o tanque superior e inferior aberta para ser analisado a atuação do controlador. A comparação dos métodos em malha fechada para um nível de 10,0 l pode ser visto na Figura 11.

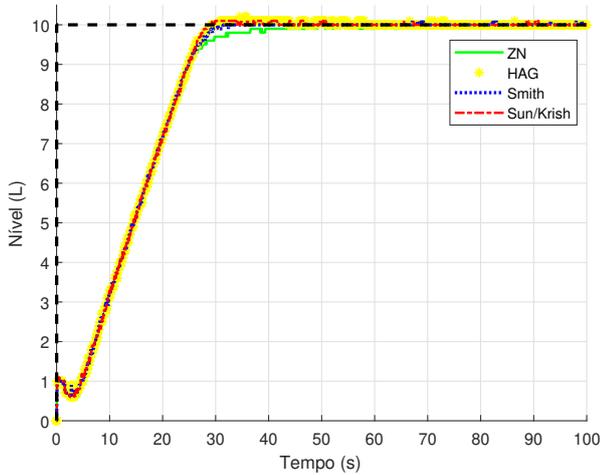


Figura 11. Comparação dos métodos de identificação em malha fechada.

Analisando o gráfico da Figura 11, percebe-se que no início do processo, há uma variação de aproximadamente 1,0 l no nível em todos os métodos propostos. Isso acontece devido a turbulência causada pelo enchimento abrupto do tanque superior, e também, pelo fato do conversor de frequência ter uma rampa de aceleração de 2,0 s, o que faz com que a bomba não tenha vazão constante no início de operação, causando um erro na leitura do sensor analógico.

4.2 Comparação entre os métodos

É necessário realizar uma comparação detalhada entre os métodos identificados em malha fechada. Os critérios de desempenho para o controlador PID aplicado em cada modelo da planta encontrado, são apresentados aqui: tempo de subida (t_r), tempo de acomodação (t_s) e *overshoot* (%). Estes critérios são extraídos do gráfico em malha fechada, Figura 11, e são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Critérios de desempenho do controlador PID para cada método.

PID/Método	t_r (s)	t_s (s)	<i>Overshoot</i> (%)
ZN	24,9	32,0	0,0
HAG	24,7	27,8	2,0
Smith	24,8	28,6	0,0
Sun/Krish	24,7	27,3	1,0

De acordo com a análise dos dados da Tabela 4, o sistema de medição de nível tem um comportamento lento, que é característico desse tipo de sistema. Os critérios de desempenho variam de acordo com o modelo da planta estudado e a sintonia do controlador. A resposta do modelo de identificação da planta por *ZN* apresenta o maior t_s , porém sem *overshoot*, que é um requisito importante em muitos sistemas de controle. Já os métodos de *HAG* e *Sun/Krish* apresentam os melhores t_r e t_s , porém com

overshoot. Por fim, o método de *Smith* apresenta bons tempo de subida, acomodação e sem *overshoot*.

São realizados testes experimentais com variação de *setpoint* no sistema para verificação do comportamento do controlador, seja no acréscimo ou decréscimo do nível. São aplicados *setpoint* de 5,0 l, 10,0 l e 7,0 l e verificado o comportamento do sistema. A Figura 12 mostra a comparação dos métodos de identificação em malha fechada para a variação do *setpoint*.

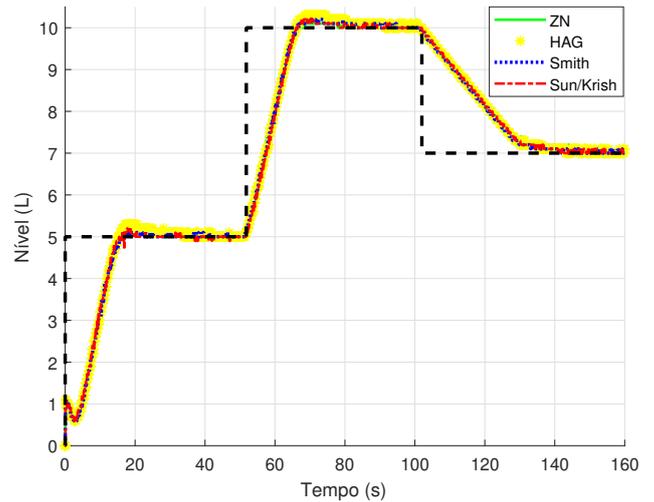


Figura 12. Comparação das variações de *setpoint* dos métodos de identificação em malha fechada

Percebe-se que com a mudança do ponto de operação da planta, o controlador PID tem um comportamento diferente em relação ao ponto de operação (degrau de 10,0 l). Embora consiga atingir em regime permanente, em todos os métodos propostos, o valor desejado. Nos *setpoint* de 5,0 l e 10,0 l ocorrem *overshoot* em todos os métodos de identificação utilizados, apesar do degrau ser o mesmo, o comportamento do sistema é diferente. No *setpoint* de 7,0 l percebe-se um tempo de acomodação alto devido a vazão da válvula ser baixa e dependente da altura da coluna d'água do tanque superior, contudo o sistema não apresentou *overshoot*.

4.3 Discussões

Um sistema de controle real apresenta perturbações que, às vezes, não são consideradas no processo de identificação do modelo do sistema. No processo de identificação da planta pelo modelo paramétrico FOPDT apresentado neste trabalho, percebe-se que os modelos encontrados são aproximações importantes do modelo da planta, fazendo com que o processo de controle seja menos complexo.

A utilização do CLP torna o processo mais simples, pois o mesmo já tem o bloco de função PID para ser configurado os ganhos do sistema modelado em malha fechada, o que facilita a implementação no chão de fábrica. No entanto, como na configuração do bloco PID no CLP só inserimos os ganhos do controlador, o processo de sintonia deve ser eficaz para não gerar problemas. Com isso, neste trabalho é utilizado o método de sintonia de *ZN* que permite um ponto de partida para a sintonia do controlador, e com

poucos ajustes, encontrarmos os valores mais adequados ao processo. Neste caso, isso só é possível devido a realização de simulação do processo para análise dos resultados com a mudança dos ganhos do controlador.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a modelagem de um sistema de medição de nível e a aplicação de um controlador PID utilizando um CLP. O protocolo de comunicação *Modbus* se fez útil para a comunicação entre CLP e *software* de supervisão, permitindo o levantamento da curva de reação da planta com os dados do processo enviados para uma planilha no *Excel*®.

Os métodos de identificação utilizados, se mostraram próximos da curva de reação de nível experimental em malha aberta, o que comprova a eficácia dos mesmos para o levantamento da função de transferência da planta. A sintonia do controlador PID pelo método *ZN* se mostrou ter valores iniciais para início da sintonia fina do controlador, necessitando de ajustes para um melhor funcionamento do sistema. Analisando os resultados encontrados, percebeu-se que o modelo da planta pelo método de *Smith* teve o melhor comportamento do sistema de medição de nível em malha fechada, com critérios de desempenho satisfatórios, o que torna o modelo utilizado mais apropriado para o sistema de medição de nível estudado.

Como trabalhos futuros, pretende-se modelar a planta utilizando a vazão e nível e a implementação dos controladores *Linear Quadratic Regulator* (LQR), *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) e *Fuzzy*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao SENAI, IFCE e UFC pela utilização dos equipamentos e espaço.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A. (2007). *Introdução à Identificação de Sistemas-Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. Editora UFMG.
- Åström, K.J. and Hägglund, T. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning*, volume 2. Instrument society of America Research Triangle Park, NC.
- Automatus (2014). *Caderno de Exercícios simmaq 3D*. Automatus, Caxias do Sul.
- Batista, J.G., Santiago, T.S., Ribeiro, E.A., et al. (2014a). Modeling of ac servomotor using genetic algorithm and tests for control of a robotic joint. *International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering*, 8(2).
- Batista, J.G., Souza, D.A., dos Reis, L.L., Filgueiras, L.V., Ramos, K.M., Junior, A.B., and Correia, W.B. (2019). Performance comparison between the pid and lqr controllers applied to a robotic manipulator joint. In *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, volume 1, 479–484. IEEE.
- Batista, L.C.F., Fernandes, G.Q., and Maia, A.A.T. (2014b). Estudo comparativo de técnicas de sintonia de controladores pid para sistemas de primeira ordem com atraso.
- Coelho, A.A.R. and dos Santos Coelho, L. (2004). *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*.
- de Sousa Vasconcelos, F.J. and de Sá Medeiros, C.M. (2019). Performance comparison between pi digital and fuzzy controllers in a level control system. *Journal of Mechatronics Engineering*, 2(3), 10–18.
- dos Santos, C.M., Costa, B.L., Silva, R.A., and Scalassara, P.R. (2014). Desenvolvimento de um módulo de controle de nível utilizando o kit arduino uno. In *XX Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte, Brasil*.
- EGÍDIO, A.B., DELMEÉ, G.J., et al. (2006). Instrumentação industrial. 2ª edição, Editora Inter.
- Engin, D. and Engin, M. (2013). Auto-tuning of pid parameters with programmable logic controller. In *2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 1469–1474. IEEE.
- Junior, E.S.S., de Carvalho, J., da Silva Junior, N.F., and da Silva, A.M.H. (2019). Desenvolvimento de um controlador pid aplicado no controle de temperatura de uma impressora 3d. In *IV Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica-EnICT (ISSN: 2526-6772)*.
- Kaster, M., Cunha, G., Burgardt, I., and Nascimento, C. (2011). Análise do uso de controle pid não linear aplicado a conversor buck. In *Proceedings of the X Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações*.
- Knihs, V.L., Franca, A.A., Silveira, A.S., Gomes, F.J., and Coelho, A.A. (2010). Aplicação da sintonia imc no controlador pid em sistemas não-lineares simulados com scicoslab. In *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications-INDUSCON 2010*, 1–6. IEEE.
- Ljung, L. and Glad, T. (1994). Modeling of dynamic systems.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de controle moderno*. Prentice Hall do Brasil.
- Reis, V., Santos, M., Carmo, M., and Ferreira, F. (2016). Control of level systems by arduino via pc platform. In *2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 251–256. IEEE.
- Ribeiro, J.M., Santos, M.F., Carmo, M., and Silva, M. (2017). Comparison of pid controller tuning methods: analytical/classical techniques versus optimization algorithms. In *2017 18th international Carpathian control conference (ICCC)*, 533–538. IEEE.
- Schneider, E. (2009). *TwidoSuite V2.2 Programming Guide*. Schneider Electric, Fortaleza.
- Souza, D.A., de Mesquita, V.A., Reis, L.L., Silva, W.A., and Batista, J.G. (2020). Optimal lqi and pid synthesis for speed control of switched reluctance motor using metaheuristic techniques. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 1–9.
- Srinivas, P., Lakshmi, K.V., and Kumar, V.N. (2014). A comparison of pid controller tuning methods for three tank level process. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(1), 6810–6820.
- Teixeira, E.H.C.G. et al. (2010). *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. Editora Blucher.