

Construção de uma planta de nível monotanque, de baixo custo, para estudo de modelagem e controle de processos

Caio Vinicius Silva do Carmo * Rejane de Barros Araújo **
Raimundo Nonato das Mercês Machado ***

* *Universidade Federal do Pará, PA, (e-mail:
caiovsarmo@gmail.com).*

** *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, PA,
(e-mail: rejane.barros@ifpa.edu.br)*

*** *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, PA,
(e-mail: raimundo.machado@ifpa.edu.br)*

Abstract: This article describes the design and development of a mono-tank level plant to aid in teaching process control, systems identification, controller design. The use of accessible and low-cost materials allows other students to build their plant, also allowing the development of practical skills, relevant to the training of an engineer. In the context of control theory, level processes are found in different types of industry, such as petrochemicals, water distribution, chemicals, boilers, among others. Therefore, it becomes relevant to enable and encourage practical activities in the industrial processes area, providing the practical application of the concepts of process identification and control. The work presents the materials and points taken into account in the development of the real plant, as well as presents some of the identification and control techniques that can be applied to the plant, such as: classic identification techniques, PID (Proportional, Integral, Derivative) and GMV (Generalized Minimum Variance)-PID controllers.

Resumo: Este artigo descreve o projeto e desenvolvimento de uma planta de nível monotanque para auxílio no ensino de controle de processos, identificação de sistemas e projeto de controladores. A utilização de materiais de fácil acesso e baixo custo permitem que outros alunos construam sua planta, permitindo também o desenvolvimento de habilidades práticas, pertinentes a formação de um engenheiro. No contexto da teoria de controle, os processos de nível são encontrados em diferentes tipos de indústria, como petroquímica, distribuição de água, químicos, caldeiras, entre outros. Portanto, torna-se relevante possibilitar e incentivar atividades práticas na área de processos industriais, permitindo a aplicação prática dos conceitos de identificação e controle de processos. O artigo apresenta os materiais e pontos levados em consideração no desenvolvimento da planta real, assim como também apresenta algumas das técnicas de identificação e controle que podem ser aplicadas à planta, a saber: técnicas de identificação clássicas, controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo) e GMV (Generalized Minimum Variance)-PID.

Keywords: process control; mono-tank level plant; PID; systems identification; engineering education.

Palavras-chaves: controle de processos; planta de nível monotanque; PID; identificação de sistemas; ensino em engenharia.

1. INTRODUÇÃO

O controle de processos é uma área multidisciplinar, envolvendo a aplicação de diversos conhecimentos/disciplinas da engenharia de controle e automação; entre elas, pode-se citar as disciplinas de controle contínuo, controle digital, identificação e instrumentação. Sendo a área a qual várias disciplinas tendem a convergir, essa multidisciplinaridade da área de controle de processos é bem utilizada no âmbito industrial. Ela permite que o controle seja aplicado em diversos processos como vazão, pressão, nível, temperatura, pH, densidade, entre outros (Garcia, 2017).

Entre os processos presentes na indústria, tem-se os processos de nível. Eles podem ser aplicados em diversas configurações, quantidade e formato dos tanques. Esses processos se fazem presentes em indústrias do ramo químico, petroquímico, papel e celulose, tratamento e abastecimento de água, caldeiras (Neto et al., 2019).

Assim como outras processos industriais, os processos de nível podem ser controlados por controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo), que “mesmo com uma estrutura relativamente simples, (...) mostram-se suficien-

tes para o controle adequado de muitos processos” (Alpi, 2016).

Porém, outras estruturas de controladores podem ser aplicadas com o intuito de lidar com as possíveis não linearidades de um processo de nível, devido ao atrito dos sistemas mecânicos, a natureza do líquido, como a viscosidade e os formatos dos tanques. Dessa forma, pode-se utilizar controladores adaptativos ou preditivos, ou ainda, controladores Fuzzy, assim como Chabni et al. (2016) propõe.

Nesse contexto, Belém et al. (2019) realiza a comparação de diferentes controladores aplicados à uma planta de nível, demonstrando as possibilidades de controle e reforçando a importância de bancadas didáticas e plantas de nível para o ensino-aprendizagem nos cursos de Engenharia de Controle e Automação.

A utilização de processos físicos, plantas reais, se destacam como ferramentas de ensino-aprendizagem na área de controle. Com esse mesmo propósito, Carmo et al. (2020) realiza a construção de três plantas em formato modular, conectados com a placa arduino para utilização no ensino de identificação e controle; e Silva et al. (2012) propõe a construção de uma planta didática para controle de nível, vazão e temperatura, e que apesar de satisfazer sua função, demanda alto custo.

A grande presença desses processos no meio industrial, suas diversas aplicações, além das possibilidades de controle, tornam pertinente a utilização desses processos no ensino-aprendizagem da engenharia de controle e automação.

Visando o objetivo de desenvolver uma ferramenta alternativa para ser aplicada no ensino da engenharia de controle e automação, esse trabalho apresenta o projeto e desenvolvimento de uma planta de nível, de baixo custo, para ensino e treinamento de técnicas de identificação, e a implementação de algoritmos de controle.

O trabalho é organizado da seguinte forma: nas seções 2 e 3 são apresentados os conceitos das técnicas de identificação e controle, respectivamente, que podem ser experimentadas utilizando a planta desenvolvida. Na seção 4 é abordada a definição do processo de nível, a construção da planta, os detalhes de montagem, funcionamento e possibilidades. Na seção 5, são apresentados os resultados da construção, assim como um experimento de identificação e controle para validação do funcionamento e utilidade da planta. Por fim, são realizadas as considerações à respeito do desenvolvimento e aplicação da planta, além da indicação das pretensões de continuidade do trabalho.

2. IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Tanto a identificação quanto a modelagem de um sistema, consistem na “determinação de um modelo matemático de um sistema real em estudo, representando suas características” (Coelho e Coelho, 2016). Enquanto a modelagem utiliza as leis da física envolvidas, a identificação parte de uma análise de medições realizadas no processo.

Esses modelos matemáticos podem ser utilizados, entre outras aplicações, no projeto de controladores. Uma vez que a planta construída nesse trabalho é caracterizada por um sistema monotanque, o qual já possui sua modelagem

pela física disponível na literatura, como em Coelho e Coelho (2016), parte-se para aplicações de métodos de identificação. Nesse caso, para fins demonstrativos, é utilizado um método clássico, que utiliza a curva de reação para determinar a função de transferência da planta.

Por sua vez, para se conseguir a curva de reação corresponde a resposta ao degrau, torna-se necessário, portanto, aplicar uma variação no sinal de entrada, em malha aberta, e fazer repetidas medições à variável de saída, a fim de se verificar a variação da resposta no tempo (Coelho e Coelho, 2016).

Entre os vários métodos clássicos para processos de 1ª ordem com atraso de transporte (FOPDT - *First Order Plus Dead Time*), busca-se da literatura, os métodos de Ziegler-Nichols (ZN) e Hägglund (HAG) que utilizam as informações da curva de reação, conforme Figura 1.

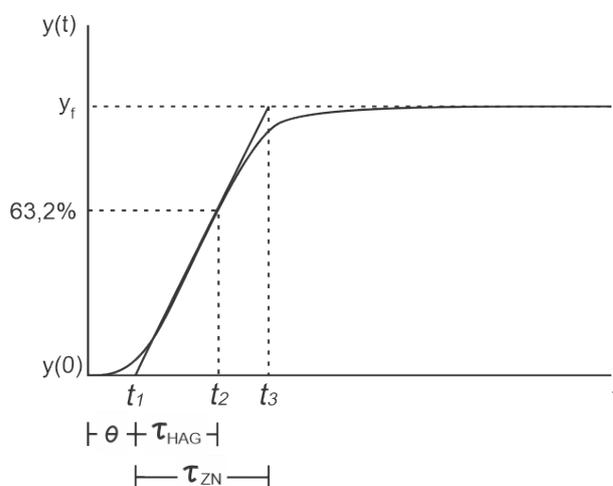


Figura 1. Curva de reação e marcações de informações para métodos de Ziegler-Nichols e Hägglund

Dessa maneira, mediante a resposta ao degrau, é possível determinar os parâmetros K_p (ganho estático), θ (atraso de transporte) e τ (constante de tempo). Na Figura 1, t_1 corresponde ao valor no eixo das abscissas (tempo) para o qual a reta tangente à curva de reação toca a reta $y(t) = y(0)$, t_3 quando toca a reta de $y(t) = y_f$, e t_2 é o tempo quando o sinal ultrapassa 63,2%. Utiliza-se as equações 1 e 2 para o cálculo de K_p e θ , respectivamente. Para o τ de Ziegler-Nichols e Hägglund, as equações 3 e 4, respectivamente.

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} \quad (1)$$

$$\theta = t_1 \quad (2)$$

$$\tau_{ZN} = t_3 - t_1 \quad (3)$$

$$\tau_{HAG} = t_2 - t_1 \quad (4)$$

3. CONTROLE DE PROCESSOS

3.1 Controle Clássico

Uma das formas de realizar a sintonia desses controladores PID é utilizando tabelas (método empírico), com equações que determinam os parâmetros K_c , T_i e T_d .

O primeiro passo, portanto, é definir a técnica de sintonia. Para os testes expostos neste trabalho, é utilizada a sintonia de Ziegler-Nichols (Tabela 1), neste método, os parâmetros identificados da processo para o modelo de 1^a ordem (K_p , θ e τ) são utilizados para calcular a sintonia dos parâmetros do controlador PID, esses valores podem ser seguidos de um ajuste manual para serem aplicados à planta.

Tabela 1. Sintonia de Ziegler-Nichols para controlador PID.

Método	K_c	T_i	T_d
ZN	$\frac{1,2\tau}{K_p\theta}$	2θ	$\frac{\theta}{2}$

Cabe ressaltar que devido às não linearidades da planta, são estimados quatro modelos diferentes da planta referente aos quatro pontos de operação, estes pontos de operação referem-se às diferentes amplitudes dos sinais de entrada (sinal de tensão PWM aplicado na bomba), isto posto, os sinais de entrada são 40, 50, 60 e 70% do sinal de controle, ou seja, 4,8, 6,0, 7,2 e 8,4 V.

Enquanto que, para os testes realizados, os controladores são sintonizados por um modelo identificado em um ponto de operação, no entanto, aplicados em diferentes pontos de operação, com o intuito de analisar a robustez do controlador clássico frente às não linearidades de ganho da planta.

3.2 Controlador de variância mínima generalizada

Além dos controladores PID, há também diversas outras estruturas e equacionamentos de controladores dispostos na literatura. Entre eles, o controlador GMV (*Generalized Minimum Variance*).

O controlador GMV tem sua base no regulador MV, mas buscando resolver algumas das suas dificuldades quanto à dinâmica transitória e erro de regime permanente nulo (Araújo et al., 2019).

Dentre as abordagens do GMV, destaca-se a hibridização do PID com o GMV. Essa metodologia permite manter a estrutura do controlador PID, bastante difundida no cenário e controladores industriais, no entanto, a sintonia de seus parâmetros é realizada por meio do equacionamento da técnica do controlador GMV. Dessa forma, é possível atribuir ao controlador PID características alcançadas pelo projeto do controlador GMV.

O cálculo de K_c , T_i e T_d para a hibridização PID-GMV é dado pelas equações 5, 6 e 7 (Araújo et al., 2019).

$$K_c = -q_0(s_1 + 2s_2) \quad (5)$$

$$T_i = \frac{-(s_1 + 2s_2)T_s}{s_0 + s_1 + s_2} \quad (6)$$

$$T_d = \frac{-s_2T_s}{s_1 + 2s_2} \quad (7)$$

Nas equações 5, 6 e 7, s_0 , s_1 e s_2 são os coeficientes do polinômio $S(z^{-1})$, o qual caracteriza o projeto do controlador, pode ser encontrados por meio dos coeficientes dos polinômios $B(z^{-1})$ e $A(z^{-1})$ referentes aos zeros e polos de malha aberta do modelo matemático da planta, respectivamente; T_s é o tempo de amostragem e q_0 é um parâmetro do controlador GMV, o fator energético do sinal de controle. Uma descrição mais detalhada é desenvolvida em Araújo et al. (2019).

Esses cálculos podem ser realizados de acordo com um modelo da planta previamente identificado ou atualizado a cada iteração utilizando a aplicação dos métodos de identificação recursivas. Na aplicação das técnicas de MQR (Mínimos Quadrados Recursivos), os parâmetros da planta são estimados e utilizados para resintonizar o controlador, ou seja, o controlador possui parâmetros ajustáveis automaticamente (Aguirre, 2015; Coelho e Coelho, 2016).

4. A CONSTRUÇÃO DA PLANTA

Nesse trabalho, é projetado um sistema monotanque devido sua relativa “simplicidade e facilidade” de construção, sem perder as possibilidades e potencialidades de estudo na área de identificação e controle de processos.

Um sistema monotanque é caracterizado por um tanque com um nível de líquido variável, uma vazão de entrada e uma de saída, como na Figura 2, onde u é a vazão de entrada, q é a vazão de saída, h_L a altura da coluna d'água (nível do líquido), A é a área do tanque e w é a área do tubo de saída (Coelho e Coelho, 2016).

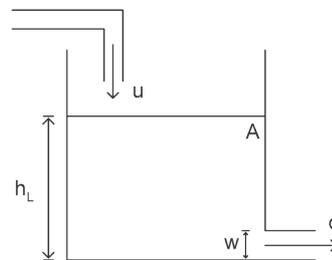


Figura 2. Processo de nível monotanque

Dessa forma, a planta é composta por um tanque cilíndrico, uma válvula manual para ajuste da vazão de saída, reservatório, sensor de nível e bomba d'água submersível para controle da vazão de entrada.

Sintetizando a dinâmica do processo, tem-se que, a potência da bomba determina a vazão de entrada alterando o nível do líquido, o qual, conseqüentemente, altera também a vazão de saída, que depende da abertura da válvula manual e do nível do líquido. A variação do volume (balanço de massa) é dado pela diferença da vazão de entrada e saída.

4.1 Componentes e circuitos

A idealização do protótipo físico pode ser observada na modelagem 3D da Figura 3, sendo toda a estrutura em material acrílico. Porém, em consequência da dificuldade e

preço para confeccionar os tanques em acrílico, na planta final, os materiais utilizados são substituídos por materiais semelhantes sem prejudicar sua função.



Figura 3. Modelo 3D da idealização do protótipo

Da mesma forma, as escolhas dos demais componentes estruturais, atuadores e sensores da planta são realizadas atentando-se à facilidade de acesso, preço e compatibilidade com o funcionamento da planta. Os itens utilizados são:

- Pote cilíndrico para o tanque;
- Vasilha grande para reservatório;
- Compensado, porcas e parafusos para estrutura;
- Mangueira/tubulação 6 mm e conectores;
- Registro de chuveiro;
- Placa de prototipagem Arduino Nano;
- Módulo de expansão para Arduino Nano;
- Módulo driver L298n;
- Sensor ultrassônico HC-SR04;
- Bomba d'água submersível DC;
- Cabo USB A-B;
- Fonte de alimentação;
- Sensor de nível bóia.

É válido destacar que o tanque reservatório deve ser maior (em volume) que o tanque controlado, tendo em vista que o fluido que deve encher o tanque controlado sairá do reservatório e que esse, possui um valor mínimo para que a bomba não funcione “à vazio”.

Isto posto, os tanques construídos possuem os volumes calculados de acordo com o seu formato, o tanque reservatório possui é aproximadamente um paralelepípedo, enquanto o tanque controlado possui uma forma cilíndrica, portanto, seus volumes são:

- Tanque reservatório: $28 \times 15 \times 9 \text{ cm} = 3,78 \text{ l}$.
- Tanque controlado: $20 \times \pi \times 5^2 \text{ cm} = 1,57 \text{ l}$

Para o sensoramento do nível é utilizado o sensor ultrassônico HC-SR04, bastante utilizado em conjunto com a placa arduino. Devido a utilização do som ao invés da luz, sensores ultrassônicos são uma solução para a detecção de distância de superfícies de líquidos transparentes ou muito reflexivas (Petruzella, 2014), e assim como os sensores fotoelétricos, não precisam de contato com o fluido.

A escolha do sensor ultrassônico HC-SR04 também influencia na largura do tanque, haja vista que, dado o ângulo de abertura do sensor de aproximadamente 15° (ElecFreaks, 2017), para a altura do tanque de 20 cm, o raio mínimo (r) do tanque controlado pode ser calculado a conforme a equação 8.

$$\tan \frac{15}{2} = \frac{r}{20} \Rightarrow r = \tan 7,5 \times 20 \approx 2,63 \text{ cm} \quad (8)$$

Sendo assim, o valor mínimo é satisfeito pelo raio do tanque controlado, o qual corresponde a 5 cm.

A vazão de entrada é ajustada por meio de uma bomba submersível posicionada no fundo do reservatório, sua alimentação e controle é por meio do driver L298n e da placa Arduino Nano, a qual também é responsável pela interface entre a planta e os *softwares* Arduino® e MATLAB®.

Um sensor de nível tipo bóia verifica se o reservatório possui um nível de água mínimo para a atuação da bomba, dado que não é recomendável que a mesma funcione a vazio. Um segundo sensor tipo bóia verifica se o reservatório (em seu estado inicial) possui água suficiente para suprir a necessidade do tanque controlado e verifica o nível máximo no momento de reposição de água. Enquanto um último sensor verifica o nível máximo do tanque controlado, para que em situações de emergência, protejam o sensor ultrassônico na parte superior do tanque.

Os dados principais da bomba submersível constam no Quadro 1, enquanto os dados do sensor e arduino podem ser encontrados em Engineering (2017) e Arduino (2022), respectivamente.

Quadro 1: Dados técnicos da bomba d'água submersiva

Característica	Medida
Tensão de entrada	3 a 6 V
Corrente de carga nominal	180 mA
Altura máxima d'água	50 cm
Vazão nominal	100 l/h
Temperatura de operação máxima	50°C
Diâmetro interno de saída	4 mm
Diâmetro externo de saída	6 mm

4.2 Organização e Sinais do sistema

É necessário entender como todos os módulos e circuitos envolvidos estão conectados entre si e com a planta. O sistema pode ser dividido em duas partes principais, que são apresentadas na Figura 4: sistema de atuação e sistema de medição.

O sistema de atuação é responsável por realizar um ação sobre o sistema alterando a variável manipulada, nesse caso, controlar o fluxo de entrada de água no tanque; seu elemento final (atuador) é uma bomba d'água que recebe um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*), e consequentemente, aumenta ou diminui esse fluxo; o *driver* L298n modifica a potência de alimentação da bomba em função do sinal de controle enviado pelo arduino.

O sistema de medição corresponde aos sinais e elementos do sistema que realizam o sensoramento da variável controlada, nesse caso, o nível do líquido no tanque controlado. O módulo responsável por esse sensoramento é o sensor ultrassônico HC-SR04, utilizando dois pinos, *echo* e *trigger*, ele envia um som (inaudível ao ouvido humano) e verifica o tempo de retorno desse mesmo som, dessa forma é possível calcular a distância do sensor para o objeto que está direcionado, esse cálculo também é intermediado pelo arduino.

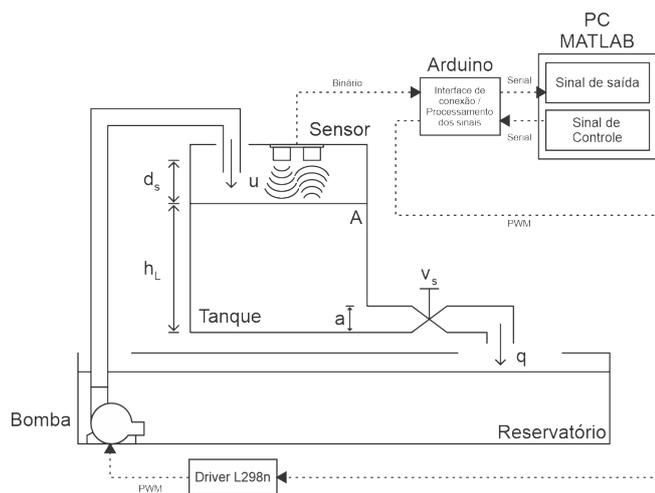


Figura 4. Organização do sistema, conexões e sinais

Percebe-se que na atual proposta, onde o processamento é realizado no computador, a placa de prototipagem arduino é a plataforma que faz a conexão entre os dispositivos da planta (atuadores e sensores) e o computador/MATLAB®.

5. RESULTADOS

A construção da planta tem seu resultado apresentado na Figura 5, sendo possível notar a disposição e tamanho do tanque, tamanho. Para este arranjo, alguns elementos são impressos em impressora 3D, como os conectores das tubulação, conector da válvula manual, além do painel exposto.

O painel guarda o arduino e o *driver* L298n, além da tela LCD e do *joystick* que pertencem aos trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos para integração da planta à controladores lógicos programáveis (CLPs) (ver seção 6).



Figura 5. Planta de nível real

Quanto aos custos dos materiais, esses são apresentados na Tabela 2.

Alguns componentes, na Tabela 2, são desconsiderados, como o arduino e fonte de alimentação, que podem ser reutilizados de outros projetos. Outros são materiais que

Tabela 2. Preço dos componentes

Componente	Quantidade	Preço (R\$)
Driver L298n	1	30,90
Bomba submersível	1	20,00
Registro	1	20,00
Pote cilíndrico	1	10,00
Vasilha para o reservatório	1	8,50
Mangueira	1	2,00
Sensor de nível tipo boia	2	46,00
Outros (parafusos, porcas)	—	7,00
Total	—	144,00

podem ser de descarte como os pedaços de compen-sado/madeira e/ou até o parafusos.

Contudo, se considerarmos todos os materiais utilizados, incluindo arduino, madeira, parafusos, entre outros, uma planta didática como a apresentada neste trabalho, sairia, com um custo total de no máximo R\$ 400,00. Pensando-se no custo benefício, para uma instituição de ensino, esse valor é absolutamente pequeno, ratificando a proposta do projeto que é construir uma planta de baixo custo, fácil manutenção e expansão.

5.1 Aplicações de Identificação

Para as aplicações de identificação é necessário analisar as respostas do processo mediante à aplicação de um sinal. Como visto na seção 2, esse sinal de entrada é uma variação na amplitude do sinal do atuador, que gera uma resposta que representa a dinâmica da planta de nível. Aplicando-se sinais de diferentes amplitudes, é possível analisar se o processo possui expressivas não linearidades.

Assim, a Figura 6, apresenta as curvas de reação do processo para variações do sinal de entrada de 40, 50, 60 e 70% do nível do tanque.

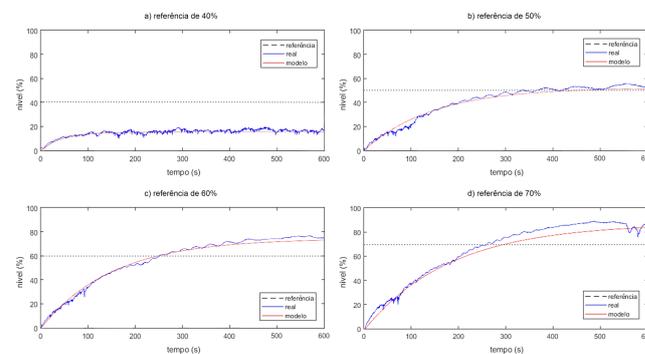


Figura 6. Resposta do sistema em malha aberta real e modelo estimado para os sinais de entrada: a) 40%, b) 50%, c) 60% e d) 70%

Os gráficos da Figura 6 mostram a não linearidade no ganho da planta, a qual está relacionada à vazão de saída do tanque. Para cada sinal de entrada (PWM aplicado à bomba) a planta estabiliza em um ponto que torna o balanço de massa igual a zero (ver seção 2), gerando um ganho proporcional K_p diferente.

A Figura 6 contém também as curvas dos modelos de 1ª ordem obtidos pelo método de identificação de Ziegler-Nichols, onde os parâmetros K_p , τ e θ identificados para cada ponto de operação são apresentados na Tabela 3 e

reafirmam também a não linearidade da planta. Outras técnicas podem ser utilizadas também, inclusive os métodos recursivos.

Tabela 3. Parâmetros K_p , τ e θ para cada ponto de operação.

PWM (%)	K_p	τ (s)	θ (s)
40	0,4555	44,0	0,5
50	1,084	146,5	0,5
60	1,283	151,5	0,5
70	1,245	182,5	0,5

Assim como o ganho proporcional da planta, os diferentes pontos de operação, conforme o aumento da entrada, também influenciam no τ , i.e. quanto maior a entrada maior o tempo para que o sistema entre em equilíbrio.

Antes ainda da identificação do processo, é necessário realizar a aquisição de dados e o tratamento dos mesmos, caso seja necessário, pois os dados podem conter ruídos, o que pode influenciar tanto na identificação quanto no controle. Tendo em vista a primeira visualização dos dados, composta por ruídos, provenientes dos respingos e perturbações na água, optou-se por aplicar um filtro digital de média móvel com janela de 10 amostras.

Essa escolha está associada à três motivos: a facilidade e flexibilidade de aplicar um filtro digital uma vez que os dados já foram adquiridos; a simplicidade matemática de um filtro de média móvel, o qual consiste na média aritmética das n amostras anteriores (nesse caso, 10 amostras), tal como na equação 9; e a análise de diferentes valores de n amostras, ponderando a suavização dos ruídos e o atraso de resposta do filtro.

$$y_{filtrado}[n] = \frac{1}{10} \sum_{k=0}^{10-1} y_{real}[n-k] \text{ para todo } n \in N \quad (9)$$

Dito isso, destaca-se que todos os dados apresentados nesse trabalho utilizam esse filtro no tratamento do sinal de medição de nível realizado pelo sensor ultrassônico.

5.2 Aplicações de Controle

As aplicações de controle são inúmeras, possibilitando os testes de diversos controladores. Aqui são mostrados dois controladores que são projetados para a planta de nível, ambos utilizam uma taxa de amostragem $T_s = 0,5$ s.

Com base na função de transferência identificada para a entrada de 50%, conforme Tabela 3, ou seja, $K_p = 1,084$, $\tau = 146,5$ e $\theta = 0,5$ é projetado um controlador PID pela sintonia de Ziegler-Nichols (Tabela 1) mais ajuste manual do parâmetro K_c . A resposta do processo em malha fechada com controlador é apresentada na Figura 7 para três referências diferentes para $K_c = 5$ (reajustado), $T_i = 1$ e $T_d = 0,25$.

O gráfico superior da Figura 7 mostra a saída real do sistema controlado. Mesmo utilizando uma função de transferência para um ponto de operação, a sintonia do PID é suficiente para os três pontos de operação. Porém, algumas pequenas diferenças na dinâmica podem ser observadas como:

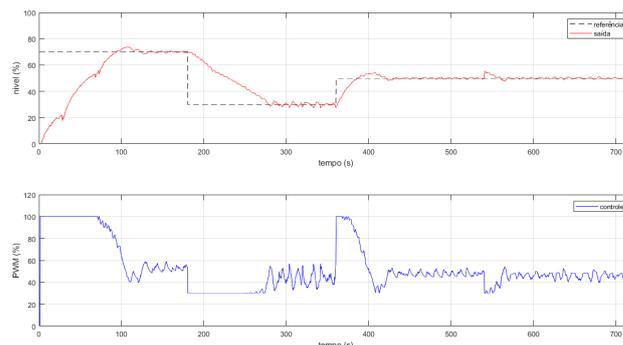


Figura 7. Resposta do sistema com controlador PID para os pontos de operação 70% (15,4 cm), 30% (6,6 cm) e 50% (11 cm).

- o overshoot maior para as referências de 70 e 50%;
- maior oscilação em torno do ponto de estabilidade na referência de 30%;
- oscilação de maior amplitude no sinal de controle para a referência de 30 a 50%.

Os dois últimos pontos condizem com a maior diferença dos parâmetros apresentados na Tabela 3 entre os pontos de 40 e 50%.

A resposta e dinâmica da planta com o controlador PID pode ser observada em: https://youtu.be/LmaoPhdeY_k.

Como o processo tem suas características não lineares no ganho estático, também é possível utilizar outros controladores, sejam adaptativos ou preditivos. Para demonstrar, é aplicado o controlador GMV com síntese PID (GMV-PID).

O projeto do controlador GMV, envolve um algoritmo MQR para estimação dos coeficientes a e b do modelo da planta e conseqüentemente, cálculo dos coeficientes do polinômio $S(z^{-1})$ e sintonia de K_c , T_i e T_d , conforme apresentado na seção 3.2. O projeto do controlador utiliza um $q_0 = 1$, estimador MQR com atualização da matriz P e tem sua resposta apresentada na Figura 8.

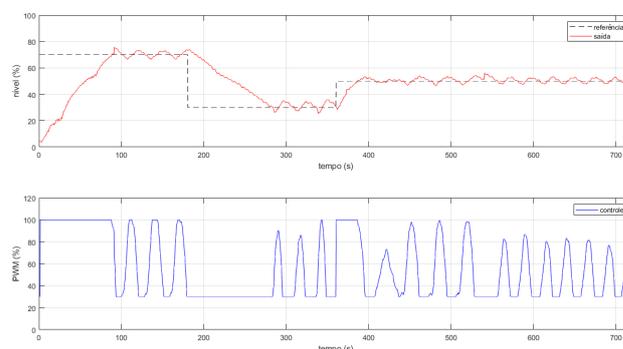


Figura 8. Resposta do sistema com controlador GMV-PID para os pontos de operação 70% (15,4 cm), 30% (6,6 cm) e 50% (11 cm).

Os gráficos da Figura 8 controla a planta nos 3 pontos de operação, no entanto, tanto o nível quanto o sinal de controle apresentam oscilações de grande amplitude, entrando

em saturação. A resposta não representa a melhor sintonia para o controlador, mas demonstra mais uma aplicação de controle para a planta.

Nos dois processos controlados das Figuras 7 e 8 é aplicada uma perturbação diretamente na saída do processo com amplitude 5% do sinal atual no instante 540 s. Ambos os controladores, apresentaram rejeição à perturbação, mantendo o rastreamento da trajetória.

6. CONSIDERAÇÕES

A construção da planta como um todo, permite o desenvolvimento de muitas habilidades práticas pertinentes para um engenheiro, como a eletrônica, programação, levantamento de material, custo, entre outros. No contexto da Engenharia de Controle, é possível utilizá-la para o estudo de diversas técnicas de identificação de sistemas e projeto de controladores, dos clássicos aos modernos.

Nesse contexto, essa planta foi desenvolvida como atividade curricular na disciplina de Controle de Processos do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal do Pará, contribuindo positivamente para o ensino-aprendizagem a partir da aplicação prática dos conhecimentos teóricos.

Os resultados dos experimentos mostraram algumas das possíveis aplicações da planta. A aquisição dos dados, visualização e aplicação das técnicas de identificação permitem visualizar com mais objetividade as não linearidades. Enquanto a aplicação dos controladores mostram as respostas do processo para dois diferentes controladores, destacando a dinâmica da resposta de saída e do sinal de controle, oscilando com maior amplitude no GMV-PID.

Apesar de apresentar duas técnicas com diferentes respostas, vale destacar que o trabalho não busca realizar uma comparação de eficiência e qualidade entre os controladores, somente destacar as possibilidades de aplicação dos alunos na planta de nível, até mesmo pois outras sintonias melhores podem ser alcançadas mediante outros testes e configurações dos projetos de controle.

Quanto à construção da planta, destaca-se a possibilidade de substituição dos componentes, no entanto, o trabalho apresenta uma proposta de baixo custo, envolvendo materiais normalmente disponíveis para os estudantes.

A continuação deste trabalho inclui o aprimoramento da planta de nível objetivando o desenvolvimento de uma bancada didática, porém possibilitando alguns procedimentos, tais como: visualização das variáveis do processo diretamente em uma tela LCD, ajuste dos setpoints pela IHM (Interface Homem-Máquina), alterar o modo de configuração entre interface, computador e CLP. Assim, outros conhecimentos de automação e programação via CLP serão possíveis.

Destaca-se ainda, a possibilidade de desenvolvimento de interfaces e sistemas supervisórios programados em outras linguagens de programação, como Python, permitindo a democratização do acesso e diminuindo os custos com ferramentas de programação e interação do processo.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A. (2015). *Introdução à Identificação de Sistemas*. Editora UFMG, 4^a edition.
- Alpi, L.B. (2016). *Desenvolvimento de uma planta didática para controle de nível de tanques acoplados*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Araújo, R.B., Coelho, A.A., e Jeronymo, D.C. (2019). *Sistemas dinâmicos: controle clássico e preditivo discreto*. Ed. da UFSC.
- Arduino (2022). Nano. URL <https://www.arduino.cc>.
- Belém, G.S., Alexandre, G.B., e Silvestre, A.D. (2019). Estratégias de controle avaliadas a uma planta de nível e temperatura. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 1.
- Carmo, C.V.S., Araújo, R.B., e Oliveira, R.N. (2020). Modicon: Módulos para ensino de identificação e controle de processos. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2.
- Chabni, F., Taleb, R., Benbouali, A., e Bouthida, M.A. (2016). The application of fuzzy control in water tank level using arduino. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7, 261–265.
- Coelho, A.A.R. e Coelho, L.S. (2016). *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. Ed. da UFSC, Florianópolis, 2. rev. edition.
- ElecFreaks (2017). Ultrasonic ranging module hcsr04. URL <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>.
- Engineering, B. (2017). Sensores ultrassônicos 101: Respostas a perguntas frequentes. URL [https://www.bannerengineering.com/br/pt/company/expert-insights/ultrasonic-sensors-101.html#/.](https://www.bannerengineering.com/br/pt/company/expert-insights/ultrasonic-sensors-101.html#/)
- Garcia, C. (2017). *Controle de Processos Industriais: Estratégias Convencionais*, volume 1^o. Blucher, São Paulo, 1^o edition.
- Neto, F.R.A., Belém, G.S., Neto, D.P.A., Alexandre, G.B., e Baltar, R.M.S.M. (2019). Bancada didática para controle de nível e temperatura. In *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC*. Palmas, Brasil.
- Petruzella, F.D. (2014). *Controladores lógicos programáveis*. AMGH Editora.
- Silva, R.B., Lopes, M.P., e Amaral, L.S. (2012). Projeto e construção de uma planta didática para ensino de estratégias de controle de nível, vazão e temperatura em cursos de engenharia. In *Congresso Brasileiro de educação em Engenharia*, volume 40.