

# Desenvolvimento de uma ferramenta didática para o ensino de automação e controle de sistemas de tanques industriais

Isaiás Valente de Bessa\* Alessandra Menezes\*  
Daniel Modesto de Souza\* Jean Alesi da Silva e Silva\*  
Lucas Luis de Souza Barreto\* Otavio Nogueira Pessoa\*  
Vicente Ferreira Lucena Junior\* Renan Landau Paiva de Medeiros\*

\* Faculdade de Tecnologia, Departamento de Eletricidade,  
Universidade Federal do Amazonas - UFAM, AM, (e-mail:  
isaibessa@super.ufam.edu.br alessandramenezes@super.ufam.edu.br,  
danielsoouza@super.ufam.edu.br, jeansilva@super.ufam.edu.br,  
lucasbarreto@super.ufam.edu.br, otaviopessoa@super.ufam.edu.br,  
vicente@super.ufam.edu.br, renan@super.ufam.edu.br).

**Abstract:** The use of digital technologies, for product and services generation, is one of 4.0 industry characteristics. Moreover, in social distancing context, the necessity arises to adapt the laboratory teaching, which propels the development of reality simulation tools. For this question, this paper presents the building of the web tool for the simulation, control, identification and monitoring of a virtual tank system for the teaching of digital control techniques.

**Resumo:** O uso de tecnologias digitais para a geração de produtos e serviços é uma das características da indústria 4.0. Além disto, no contexto de distanciamento social, surge-se a necessidade de adaptar o ensino laboratorial, o que impulsiona o desenvolvimento de ferramentas de simulação da realidade. Com esta finalidade, este trabalho apresenta a construção de uma ferramenta *web* para a simulação, controle, identificação e monitoramento de um sistema de tanque virtual para o ensino de técnicas de controle digital.

**Keywords:** 4.0 industry; simulation; identification; monitoring; digital control.

**Palavras-chaves:** Indústria 4.0; simulação; identificação; monitoramento; controle digital.

## 1. INTRODUÇÃO

O ensino de controle está baseado em uma forte base matemática e física para a compreensão dos processos dinâmicos envolvidos (Marin et al., 2020; Magnus et al., 2020). Além disto, a integração destes conceitos às novas tecnologias, relacionadas com o advento da indústria 4.0, é fundamental para o entendimento de processos de automação industrial.

A partir disso, Crisóstomo et al. (2018); Calderón and Izquierdo (2020); Stankovski et al. (2019) destacam-se pelo desenvolvimento de ambientes de realidade aumentada para o projeto de dispositivos eletromecânicos. Assim como, Krupnova et al. (2020) investigam a possibilidade de utilizar ferramentas de realidade virtual para o ambiente educacional, avaliando as vantagens e desvantagens destas. Da mesma maneira, Calderón and Izquierdo (2020) usam ferramentas de realidade aumentada para o ensino de laboratório de máquinas elétricas. Bem como, Crisóstomo et al. (2018) desenvolveram um simulador de fazendas eólicas para o projeto de aerogeradores construído no *software* UNITY. E em (Marin et al., 2020), os autores apresentam a ferramenta *linear control system design* (LCSD) desenvolvida pela Pontifícia Universidad Católica de Valparaíso para o ensino da teoria básica de controle.

Complementar a isso, Chaczko and Braun (2017) introduzem a utilização da ferramenta *open source* NODE-RED para a compreensão de conceitos básicos relacionados a *Internet-of-Things* (IoT). Neste mesmo conceito, Cicioğlu and Çalhan (2021) utilizam o NODE-RED para a criação

de um monitoramento de incêndios para a ação de corpos de bombeiros. Entretanto, Ferrari et al. (2018) utilizam o NODE-RED como uma ferramenta de envio de mensagens entre diferentes clientes para a medição do atraso de transmissão entre servidores distintos.

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de controle, automação e monitoramento de um sistema de tanque, através da construção de uma interface de fácil utilização, baseada em NODE-RED. Com a finalidade de ensinar estratégias de controle digital para alunos do ensino superior, aplicando em um sistema de tanque, emulado em ambiente virtual.

A partir disso, a estrutura do trabalho está dividida como segue: Seção 2 realiza a descrição matemática da planta utilizada. Já a Seção 3 descreve as tecnologias utilizadas no sistema construído. A Seção 4 apresenta um estudo de caso para mostrar o funcionamento básico do sistema. Por fim, a Seção 5 apresenta as considerações finais sobre o projeto desenvolvido neste trabalho.

## 2. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA

Esta seção tem por objetivo realizar a modelagem matemática da planta proposta e em sequência descrever o processo de identificação utilizado para este sistema.

### 2.1 Modelagem matemática

O tanque de processo apresentado na Figura 1 é uma planta clássica apresentada na disciplina de sistemas de

controle. A modelagem deste sistema é baseada na equação de Bernoulli utilizada para descrever sistemas hidrodinâmicos.

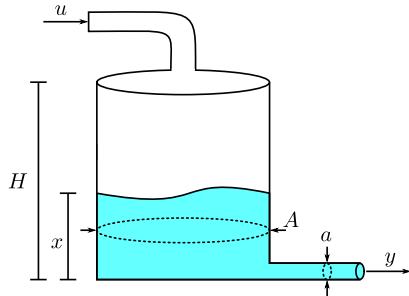


Figura 1. Diagrama esquemático de um tanque de processo.

O tanque apresentado tem base com área  $A$ , enquanto que a seção transversal da válvula de saída tem medida  $a$ . O tanque tem altura  $H$  contendo um líquido incompressível na altura  $x$ . O fluxo de entrada é representado por  $u$ . Enquanto que  $y = \sqrt{2gx}$  representa o fluxo de saída com  $g$  sendo a aceleração da gravidade. Neste sentido, a variação de fluxo dentro do tanque é dado pela equação (1).

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{a}{A}\sqrt{2gx} + \frac{1}{A}u \quad (1)$$

O tanque opera no ponto de operação  $x_o$  para uma entrada  $u_o$ . Linearizando (1) em torno deste ponto obtém-se (2):

$$\frac{d\delta x}{dt} = -\frac{a}{A}\sqrt{\frac{g}{2x_o}}\delta x + \frac{1}{A}\delta u \quad (2)$$

Em que  $\delta x = x - x_o$  representa pequenas variações em torno do ponto de operação. Então pode-se determinar a função de transferência do sistema (3), em torno do ponto de operação escolhido.

$$G_u(s) = \frac{\delta X(s)}{\delta U(s)} = \frac{\frac{1}{A}}{s + \frac{a}{A}\sqrt{\frac{g}{2x_o}}} \quad (3)$$

Na prática, a variável controlada diretamente pelo usuário não é o fluxo de entrada, mas sim a tensão aplicada à válvula de entrada. Considerando uma relação linear  $u = Kv$ , entre o fluxo  $u$  e a tensão aplicada  $v$ , a equação (3) pode ser modificada para (4):

$$G_v(s) = \frac{\delta X(s)}{\delta V(s)} = \frac{\frac{K}{A}}{s + \frac{a}{A}\sqrt{\frac{g}{2x_o}}} = \frac{\alpha_0}{s + \beta_1} \quad (4)$$

Por fim, como o sistema é emulado digitalmente, determina-se o modelo discretizado (5), utilizando o segurador de ordem zero (*zero-order holder-ZOH*) para um tempo de amostragem  $T_s$ .

$$G_v(z) = \frac{\delta X(z)}{\delta V(z)} = \frac{\alpha_0}{\beta_1} \frac{1 - e^{-T_s\beta_1}}{z - e^{-T_s\beta_1}} \quad (5)$$

## 2.2 Método dos mínimos quadrados para identificação de processos

O processo de modelagem apresentado anteriormente permite o conhecimento prévio da planta. Contudo, na prática pode-se não ter acesso aos aspectos construtivos do sistema. Neste caso, faz-se o uso de processos de identificação, que permitem descrever o comportamento dinâmico da planta tendo acesso à entrada e saída.

Como observado na seção anterior, a planta do tanque pode ser descrita por uma função de transferência de primeira ordem em (6).

$$G_v(z) = \frac{\delta X(z)}{\delta V(z)} = \frac{b_0}{z - a_1} \quad (6)$$

Logo, pode-se reescrever (6) através da equação recursiva (7).

$$\delta x(k) = [a_1 \ b_0] \begin{bmatrix} \delta x(k-1) \\ \delta v(k-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Nesse sentido, o objetivo do processo de identificação é a determinação do vetor de parâmetro  $\theta = [a_1 \ b_0]^T$ . Considerando que foram realizadas  $n$  medições, então tem-se:

$$Y = [\delta x(1) \ \delta x(2) \ \dots \ \delta x(n)] \\ X = \begin{bmatrix} \delta x(0) & \delta x(1) & \dots & \delta x(n-1) \\ \delta v(0) & \delta v(1) & \dots & \delta v(n-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde o vetor  $Y \in \mathbb{R}^{1 \times n}$  representa a saída atual do nível do tanque e a matriz  $X \in \mathbb{R}^{2 \times n}$  representa o nível de saída passado e a tensão aplicada na válvula. Logo, dado o vetor  $\theta \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$  e baseado na equação (7), o valor estimado para  $\hat{Y} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$  é dado por:

$$\hat{Y} = \theta X \quad (9)$$

Dessa forma, o parâmetro  $\theta$  é definido a partir da minimização da função de custo (10).

$$J = \sum_{k=1}^{k=n} (Y - \hat{Y})^2 \quad (10)$$

Resultando no vetor de parâmetro calculado pela equação (11) em que  $(XX^T)^{-1}$  representa a pseudo-inversa da matriz  $X$ .

$$\theta = YX^T(XX^T)^{-1} \quad (11)$$

## 3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Nessa seção, abordam-se os procedimentos básicos da operação do sistema para o ensino das características de automação e controle. Desta forma, o fluxograma da Figura 2 mostra os passos lógicos na utilização da ferramenta construída.

A primeira etapa consiste na escolha do modelo baseado na ordem da dinâmica do sistema analisado. A complexidade do modelo aumenta à medida que mais características não lineares são adicionadas no modelo.

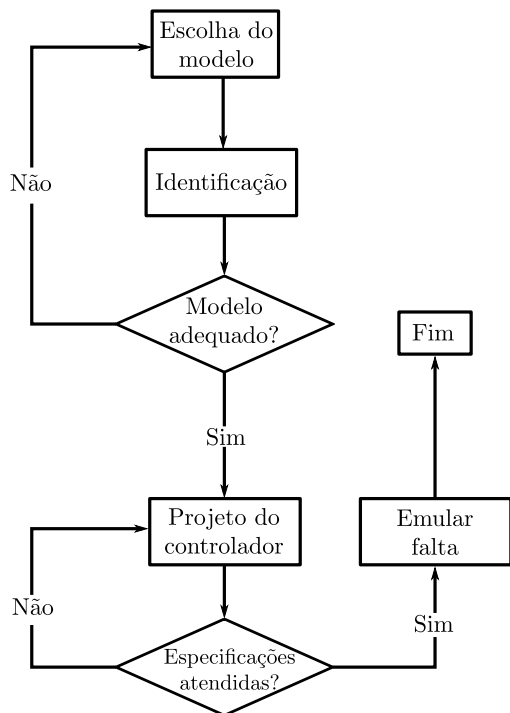


Figura 2. Fluxograma do passo a passo da operação do sistema.

Em seguida, aplica-se o algoritmo de identificação comparando o comportamento dinâmico do modelo identificado com as medidas coletadas. Então, com a validação do modelo, realiza-se o projeto de controle baseado em especificações de desempenho. Por fim, para avaliar a capacidade do sistema para operar fora do ponto de operação projetado pode-se emular faltas aplicadas à válvula de saída do tanque.

### 3.1 Estrutura do sistema

Baseado no fluxograma de operação para a ferramenta construída para o ensino de automação, a arquitetura proposta é mostrada na Figura 3.

Nesse caso, o projeto da ferramenta inicia pela simulação da planta que tem seus atuadores e sensores sendo conectados a um controlador lógico programável (CLP). A tomada de decisão sob a planta é realizada através do NODE-RED, que é uma ferramenta *web open source* de programação em blocos, que neste trabalho é utilizada para coletar informações enviadas pelos sensores e enviar o sinal de controle para a modificação dos estados dos atuadores da planta (Ferrari et al., 2018; Chaczko and Braun, 2017).

No NODE-RED também é desenvolvido uma interface homem-máquina (IHM), permitindo o usuário monitorar e modificar o estado da planta. Outra tarefa realizada pelo NODE-RED é a coleta de dados utilizados para a implementação do algoritmo de identificação e, em seguida, no projeto do controlador. Os ganhos do controlador são devolvidos para o NODE-RED que garante a operação em malha fechada para a regulação do nível do tanque.

Por fim, a ferramenta construída também permite a emulação de faltas de entupimento e vazamento na válvula de saída do tanque para observar o comportamento dinâmico do sistema mediante a ocorrência de perturbações.

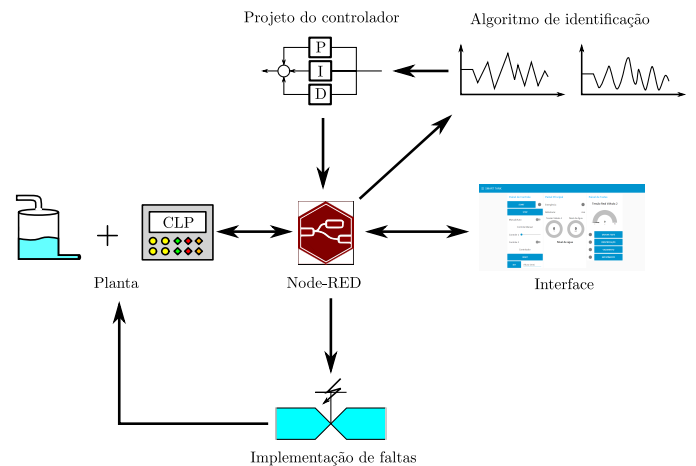


Figura 3. Fluxograma estrutural do sistema proposto.

### 3.2 Descrição da planta

A planta utilizada é mostrada na Figura 4 sendo simulada no *software* FACTORYIO.

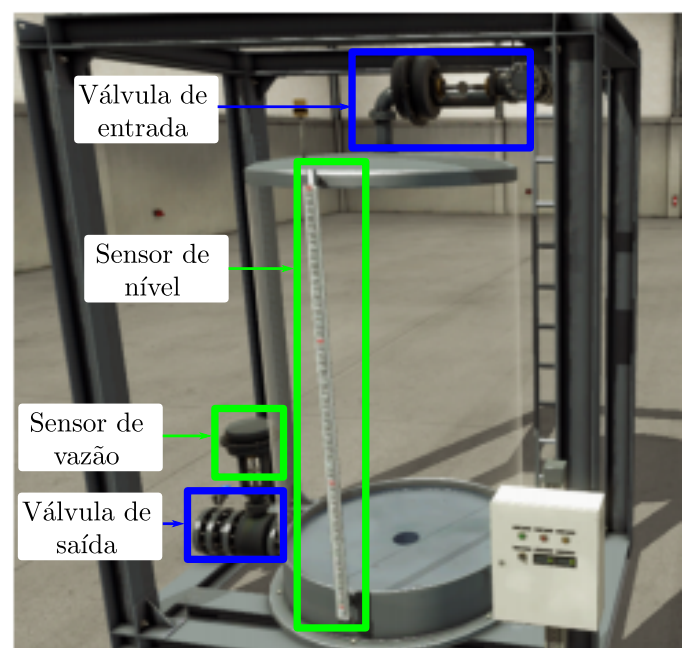


Figura 4. Tanque simulado para a construção do sistema.

Essa planta é composta por uma válvula de entrada e uma válvula de saída, ambas controladas por tensão. Sendo que a válvula de saída assume dois estados: fechada, quando aplicada 0 V, ou aberta, quando aplicada 10 V. Já a válvula de entrada é a variável controlada do sistema para a regulação do nível, com tensão regulada entre 0-10 V. Além disto, o tanque é composto por um sensor de nível e um sensor de vazão localizados na válvula de saída.

O tanque utilizado foi configurado para ter uma altura de 250 mm para um líquido no ponto de operação de 112 mm.

O envio dos dados dos sensores e o sinal de controle dos atuadores são enviados através da utilização de um CLP virtual que permite a programação do sistema utilizando diagrama *ladder*.

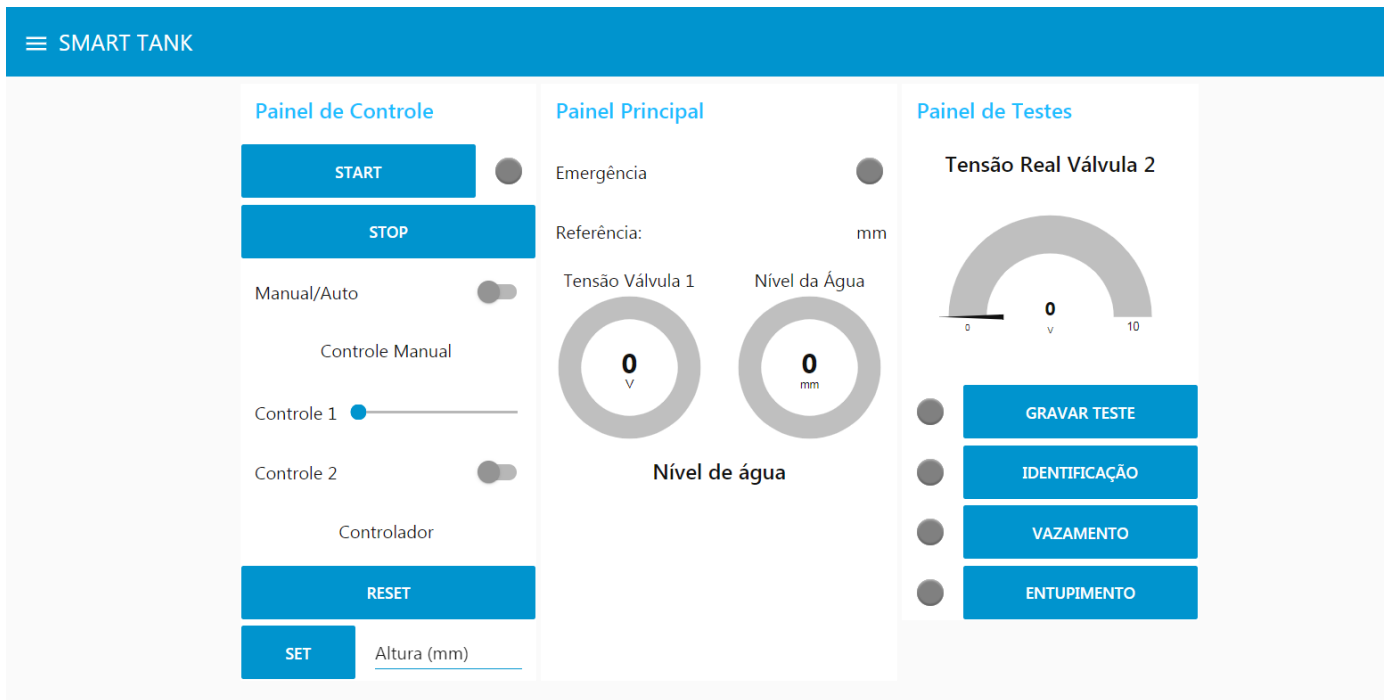


Figura 5. IHM construída para a operação do sistema.

### 3.3 Interface homem-máquina (IHM)

A IHM desenvolvida para a operação do sistema é mostrada na Figura 5, sendo dividida em três conjuntos: painel de controle, painel principal e painel de testes.

O painel de controle é responsável pelos blocos relacionados à modificação dos estados dos atuadores do sistema, podendo modificar a operação em malha aberta e malha fechada, alterar a referência do nível do tanque, além de modificar o *status* da válvula de saída.

O painel principal é responsável pelo monitoramento do tanque, mostrando informações de nível do líquido e tensão aplicada nas válvulas, para corroborar a tomada de decisão do usuário.

Por fim, o painel de testes é responsável por executar os procedimentos como identificação, gravação de dados e emulação de faltas para validar o sistema de controle projetado.

### 3.4 Algoritmo de identificação

O algoritmo de identificação utilizado para esse trabalho é o algoritmo dos mínimos quadrados, descrito na Seção 2. Nesse sentido, o vetor de parâmetros calculado é mostrado na equação (12).

$$\theta = [0,9882 \ 0,5905] \quad (12)$$

O custo minimizado para o vetor de parâmetros calculado resultou em  $J = 0,6888$ . Com isto, a dinâmica da planta identificada em relação aos dados medidos é mostrada na Figura 6, indicando que o modelo identificado corresponde à dinâmica da planta medida.

Baseado no vetor de parâmetros em (12) e na comparação dos modelos discretizados em (5) e (6) determina-se os parâmetros  $\alpha_0$  e  $\beta_1$  através de (13).

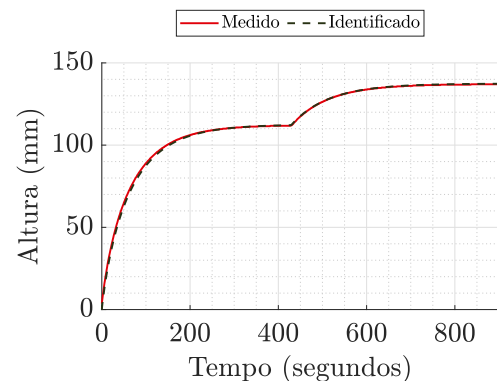


Figura 6. Comparação entre modelo identificado e dados medidos.

$$\beta_1 = -\frac{\ln a_1}{T_s}, \quad \alpha_0 = \frac{\beta_1 b_0}{1 - e^{-T_s \beta_1}} \quad (13)$$

Dessa forma, o modelo de função de transferência contínua utilizado para o projeto do controlador é indicado em (14).

$$G_v(s) = \frac{0,594}{s + 0,0118} \quad (14)$$

### 3.5 Projeto do controlador

De posse do modelo identificado, realiza-se o projeto do controlador  $C(s)$ . A função de transferência em malha fechada é mostrada em (15).

$$M(s) = \frac{C(s)G_v(s)}{1 + C(s)G_v(s)} \quad (15)$$

A estrutura do controlador projetado é baseada em um controlador PI mostrado em (16).

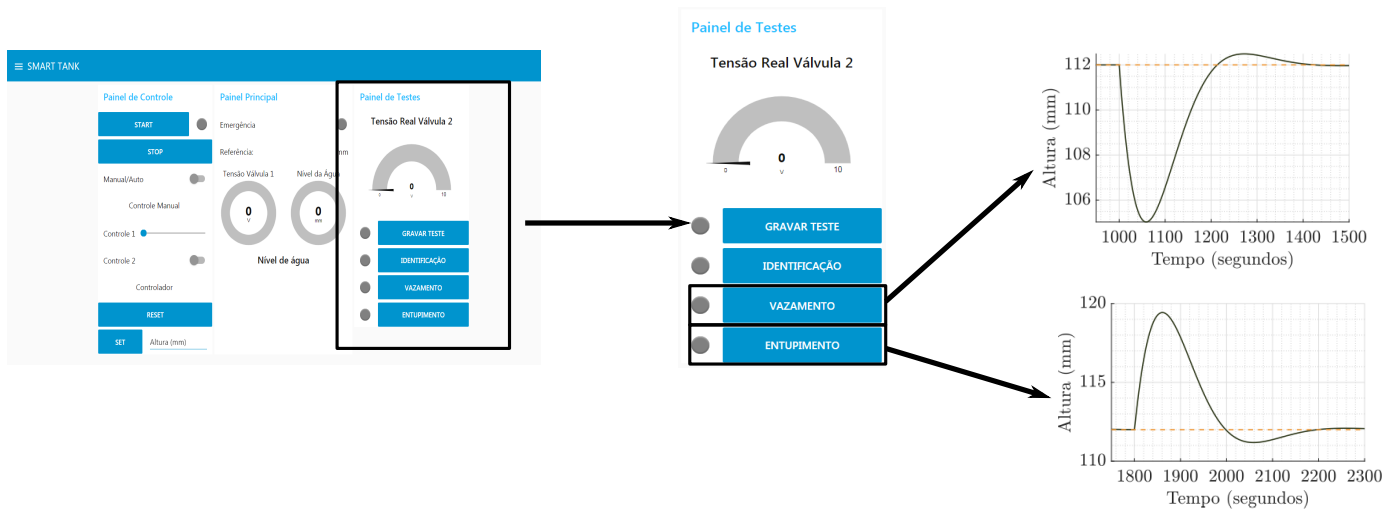


Figura 7. Passo a passo da implementação das faltas.

$$C(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (16)$$

Os cálculos dos ganhos são baseados em uma especificação de desempenho de tempo de acomodação inferior a 400 segundos e máximo sobressinal inferior a 10%. A metodologia utilizada para o projeto foi a alocação polinomial de polos, baseada na solução da equação Diofantina (SED). Neste caso, o polinômio característico em malha fechada é dado por (17).

$$\Delta_M(s) = s^2 + (a_1 + b_0 k_p) s + b_0 k_i \quad (17)$$

Além disso, baseado nas especificações de desempenho, tem-se o polinômio desejado em malha fechada, mostrado na equação (18).

$$\Delta_D(s) = s^2 + 0,0229s + 0,0004 \quad (18)$$

Nesse caso, a SED é baseada na solução da igualdade  $\Delta_M(s) = \Delta_D(s)$ , resultando no controlador mostrado em (19).

$$C(s) = \frac{0,01856s + 0,0006292}{s} \quad (19)$$

O controlador é discretizado para operar no sistema com um tempo de amostragem de 1 segundo, resultando em (20),

$$C(z) = \frac{0,01888z - 0,01825}{z - 1} \quad (20)$$

e testado no sistema para verificar se as especificações de desempenho são obedecidas, mediante o teste de variação de referência indicado na Figura 8.

Uma vez que a atuação do controlador no sistema garantiu as especificações de desempenho, o sistema está operando de forma correta.

Na próxima seção, é apresentado um estudo de caso em que se observa o comportamento dinâmico, mediante a ocorrência de uma falta.

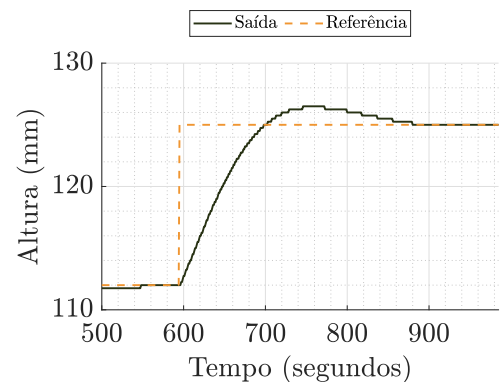


Figura 8. Validação do controlador projetado.

#### 4. ESTUDO DE CASO: EMULANDO FALTA

A implementação de faltas é uma função disponível no painel de teste da interface construída. Sendo que são possíveis realizar dois tipos de falta: vazamento e entupimento. Estas faltas ocorrem na válvula de saída onde através do aumento ou redução da tensão aplicada em 1 V garante-se uma maior abertura (falta de vazamento) ou fechamento (falta de entupimento). A Figura 7 mostra os passos necessários para realizar este teste na interface construída.

No momento em que uma falta é emulada, inicia-se o processo de gravação dos dados, que além de serem mostrados em tempo real no painel principal também são salvos para a análise em um arquivo .txt com diretório escolhido pelo usuário.

O primeiro teste realizado foi o de vazamento na válvula de saída. Neste teste, aumenta-se artificialmente a vazão da válvula, para observar a operação do sistema nesta situação. A Figura 9 mostra a realização do teste.

O segundo teste realizado foi o de entupimento na válvula de saída. Neste teste, a vazão da válvula é reduzida artificialmente, para observar a operação do sistema nesta situação. A Figura 10 mostra a realização do teste.

Observa-se, assim, a capacidade do controlador proposto de conseguir regular o sistema mediante a ocorrência de

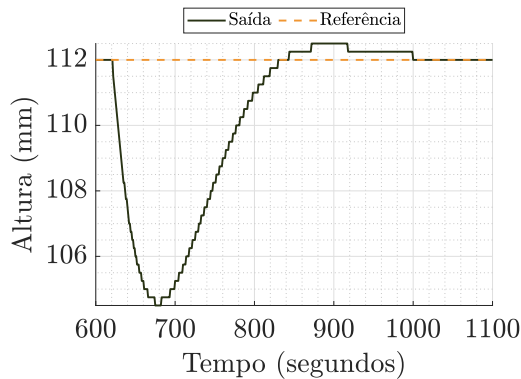


Figura 9. Emulando uma falta de vazamento.

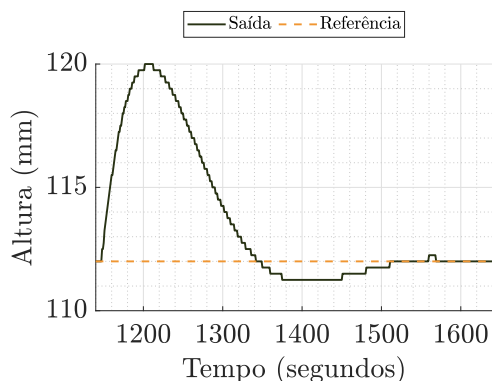


Figura 10. Emulando uma falta de entupimento.

faltas, além disto, mostra-se um exemplo de operação do sistema construído.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo a construção de uma ferramenta didática para o controle e automação de tanques de processo. Neste contexto, este trabalho apresentou a modelagem clássica de um tanque simples e o algoritmo de mínimos quadrados, utilizado para a identificação do processo.

Em seguida, destacou-se os tópicos relacionados à construção da arquitetura da ferramenta, sendo apresentada a construção da IHM, para tomada de decisão do usuário. Com a coleta dos dados da planta, aplicou-se o algoritmo de identificação, para a determinação de uma função de transferência para o projeto de um controlador PI, o qual obedeceu às especificações de desempenho propostas.

Por fim, apresentou-se um exemplo de operação realizado com a ferramenta construída, onde se observa o comportamento da planta, mediante a ocorrência de faltas de vazamento e entupimento.

Por tanto, este trabalho apresentou todas as partes necessárias, para a compreensão básica de conceitos iniciais relacionados à automação, controle e identificação de sistemas, os quais são explorados através da utilização de uma ferramenta didática. Além disto, a possibilidade de mudança, da estrutura do controlador, técnica de identificação e metodologia de controle, permite que a ferramenta desenvolvida contribua com o ensino de automação industrial e sistemas de controle.

Tendo em vista a gama de possibilidades da ferramenta, deseja-se em trabalhos futuros a construção de um banco de dados em nuvem para a possibilidade de reconstrução da planta proposta em um novo ambiente. Além disso, pode-se expandir o uso da ferramenta para o ensino de metodologia de detecção de faltas, baseado em técnicas de aprendizado de máquinas.

## AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa, realizada no âmbito do Projeto Samsung-UFAM para Educação e Pesquisa (SUPER), nos termos do artigo 48 do Decreto nº 6.008/2006 (SUFRAMA), foi financiada pela Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda., nos termos da Lei Federal nº 8.387/1991, por meio do convênio 001/2020, firmado com a Universidade Federal do Amazonas e a FAEPI, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- Calderón, R.R. and Izquierdo, R.B. (2020). Machines for industry 4.0 in higher education. In *2020 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE)*, 1–4. doi:10.1109/EDUNINE48860.2020.9149501.
- Chaczko, Z. and Braun, R. (2017). Learning data engineering: Creating iot apps using the node-red and the rpi technologies. In *2017 16th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*, 1–8. doi:10.1109/ITHET.2017.8067827.
- Cicioğlu, M. and Çalhan, A. (2021). Internet of things-based firefighters for disaster case management. *IEEE Sensors Journal*, 21(1), 612–619. doi:10.1109/JSEN.2020.3013333.
- Crisóstomo, D., Moura, A., Rocha, E., Cruz, F., and Moura, A. (2018). Educational software for simulation of power and voltage control in power systems connected with wind farms. *IEEE Latin America Transactions*, 16(6), 1603–1609. doi:10.1109/TLA.2018.8444155.
- Ferrari, P., Flammini, A., Sisinni, E., Rinaldi, S., Brandão, D., and Rocha, M.S. (2018). Delay estimation of industrial iot applications based on messaging protocols. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(9), 2188–2199. doi:10.1109/TIM.2018.2813798.
- Krupnova, T., Rakova, O., Lut, A., Yudina, E., Shefer, E., and Bulanova, A. (2020). Virtual reality in environmental education for manufacturing sustainability in industry 4.0. In *2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, 87–91. doi:10.1109/GloSIC50886.2020.9267848.
- Magnus, D.d.M., Carbonera, L.F.B., Pfitscher, L.L., Farret, F.A., Bernardon, D.P., and Tavares, A.A. (2020). An educational laboratory approach for hybrid project-based learning of synchronous machine stability and control: A case study. *IEEE Transactions on Education*, 63(1), 48–55. doi:10.1109/TE.2019.2956909.
- Marin, L., Vargas, H., Heradio, R., de La Torre, L., Diaz, J.M., and Dormido, S. (2020). Evidence-based control engineering education: Evaluating the lcsd simulation tool. *IEEE Access*, 8, 170183–170194. doi:10.1109/ACCESS.2020.3023910.
- Stankovski, S., Ostojić, G., Zhang, X., Baranovski, I., Tegeltija, S., and Horvat, S. (2019). Mechatronics, identification technology, industry 4.0 and education. In *2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, 1–4. doi:10.1109/INFOTEH.2019.8717775.