

## Automação de um sistema de envase, paletização e estoque por meio de controlador lógico programável em ambiente de realidade virtual

Guilherme L. V. Pereira\* Willian R. B. M. Nunes\*  
Rodrigo P. Caun\*

\* Laboratório de Controle e Automação - Coord. de Engenharia  
Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PR, (e-mail:  
guilhermelechenco1996@alunos.utfpr.edu.br, willianr@utfpr.edu.br,  
rodrigocaun@utfpr.edu.br).

**Abstract:** Among the pillars of Industry 4.0 stand out the simulation and virtual reality strategies, bringing the real world closer to the virtual one and generating optimization of resources and economy with the improvement in machine configurations before the actual implementation system connected via an OPC server. This work presents a proposal of automation of a virtual factory, whose process consists of filling stages with level control of a tank, palletizing station and stock of products. The Programmable Logic Controller (PLC) program is organized into program organization units in the LADDER, *Structured Text* (ST) and *Sequential Flow Chart* (SFC), as per IEC 61131-3. An identification test and controller tuning for the filling system was carried out with the PLC and the virtual factory. Results from the simulation demonstrate the operation of the virtual plant processes through a single PLC via OPC communication.

**Resumo:** Entre os pilares da indústria 4.0 destacam-se as estratégias de simulação e realidade virtual, que aproximam o mundo real do virtual, otimizam recursos com o aperfeiçoamento nas configurações das máquinas antes da implementação real. Este trabalho apresenta uma proposta de automação de uma fábrica virtual, cujo processo é composto por etapas de envase com controle do nível de um tanque, estação paletizadora e estoque de produtos por meio de robô empilhadeira. O programa do controlador lógico programável (CLP) é organizado em unidades de organização de programa nas linguagens LADDER, *Structured Text* (ST) e *Sequential Flow Chart* (SFC), conforme IEC 61131-3. Um ensaio de identificação e sintonia de controlador para o sistema de envase foi realizado com o CLP e a fábrica virtual. Resultados provindos da simulação demonstram o funcionamento dos processos da fábrica virtual através de um único CLP via comunicação OPC.

**Keywords:** Virtual factory; industrial network; digital control; manufacturing automation; virtual laboratory.

**Palavras-chaves:** Fábrica virtual; redes industriais; controlador digital; automação da manufatura; laboratório virtual.

### 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos a automação da manufatura vem desempenhando um papel relevante na indústria, em virtude da confiabilidade e flexibilidade na execução dos processos, diminuição dos custos operacionais e auxílio na identificação e recuperação de falhas. Com o advento da pandemia da COVID-19 dois aspectos se tornaram mais relevantes para reflexão e tomada de decisões nas esferas pública e privada.

O primeiro aspecto relevante é o econômico, no qual o grau de adoção da automação nas aplicações industriais demonstrou uma relação direta de retorno financeiro de tais investimentos. Medidas de segurança sanitária, tais como o isolamento social para evitar o contágio de pessoas, acarretou um efeito negativo do ponto de vista econômico.

Todavia, empresas com um nível de automatização em seus processos conseguiram manter suas atividades produtivas, possibilitando o trabalho remoto de seus colaboradores (Vasconcelos (2020)). Segundo pesquisa realizada pela *Mckinsey & Company*, a adoção de indústria 4.0 pelas empresas trouxe resultados positivos mesmo na pandemia, enquanto as que estavam começando ou ainda não utilizando estas tecnologias tiveram algumas dificuldades que poderiam ser evitadas (Agrawal et al. (2021)).

O segundo aspecto relevante é o educacional, no qual consiste em disponibilizar mão de obra qualificada na área de automação, realocando pessoas na estrutura organizacional das empresas em meio desta transformação do mercado de trabalho proveniente da sofisticação dos processos por meio da automação e adoção da indústria 4.0. Aliado a isto, a pandemia evidenciou a necessidade de reformula-

ção de estratégias de aprendizagem de maneira virtual e remota. Experiências em realidade virtual tornaram-se amplamente utilizadas no ensino de engenharia (Ma (2020)). Na área de controle e automação de processos é possível expor os discentes a equipamentos e infraestrutura física que no ambiente de laboratório da universidade são indisponíveis por questão de recurso, espaço físico, ou devido às condições de periculosidade como altas temperaturas, altas pressões e outras condições de riscos experimentais (Pereira et al. (2012)). Com isto, cenários de processos industriais de fábricas operando em tempo real podem ser apresentadas por meio de cenas tridimensionais. A experiência provinda por meio da realidade virtual já provou fornecer vantagens importantes (Lei et al. (2021); Guan et al. (2021); Faulconer and Gruss (2018); de la Torre et al. (2016)).

Neste contexto, as contribuições deste trabalho podem ser elencadas em:

- (1) propor uma estratégia de aprendizagem por meio da realidade virtual de fundamentos de controle e automação aplicados em uma indústria, cujo processo é composto por etapas de envase, paletização e estoque por robô empilhadeira;
- (2) efetuar ensaio de identificação de sistema e sintonia de controlador do nível do tanque de envase por meio do CLP via comunicação OPC;
- (3) qualificar profissionais na área de automação no desenvolvimento de programação de controladores lógicos para aplicações industriais utilizando solução provinda de maneira conjunta das linguagens *LADDER* (LD), *Structured Text* (ST) e *Sequential Flow Chart* (SFC).

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve o funcionamento de cada processo da fábrica virtual, apresenta as estratégias adotadas para identificação da dinâmica do tanque industrial e os métodos heurísticos de sintonia do controlador; a Seção 3 mostra os resultados obtidos de identificação do sistema, sintonia do controlador e o funcionamento de todos os processos da fábrica virtual a partir da programação de um único CLP; e por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões deste trabalho.

## 2. METODOLOGIA

Este trabalho realiza a simulação de uma fábrica virtual por meio de um cenário tridimensional no *software Factory I/O™*, versão *demo*. O CLP utilizado para gerenciar todos os processos da fábrica virtual é o Altus Nexto Xpress XP 340, programado por meio do *software* MasterTool IEC XE™ 3.32. A identificação e sintonia do controlador do processo de nível foi realizado por meio do *software* MATLAB™ utilizando protocolo de comunicação OPC. Todos os sensores e atuadores da fábrica virtual são acessados e controlados virtualmente pelo *software* de programação do CLP via comunicação OPC. A Figura 1 elucida os três passos empregados para a realização deste trabalho.

### 2.1 Fábrica virtual

O processo industrial é composto de três etapas: envase, paletização e estoque, vide Figura 2. Recipientes vazios são conduzidos até um sistema de envase de água. Após

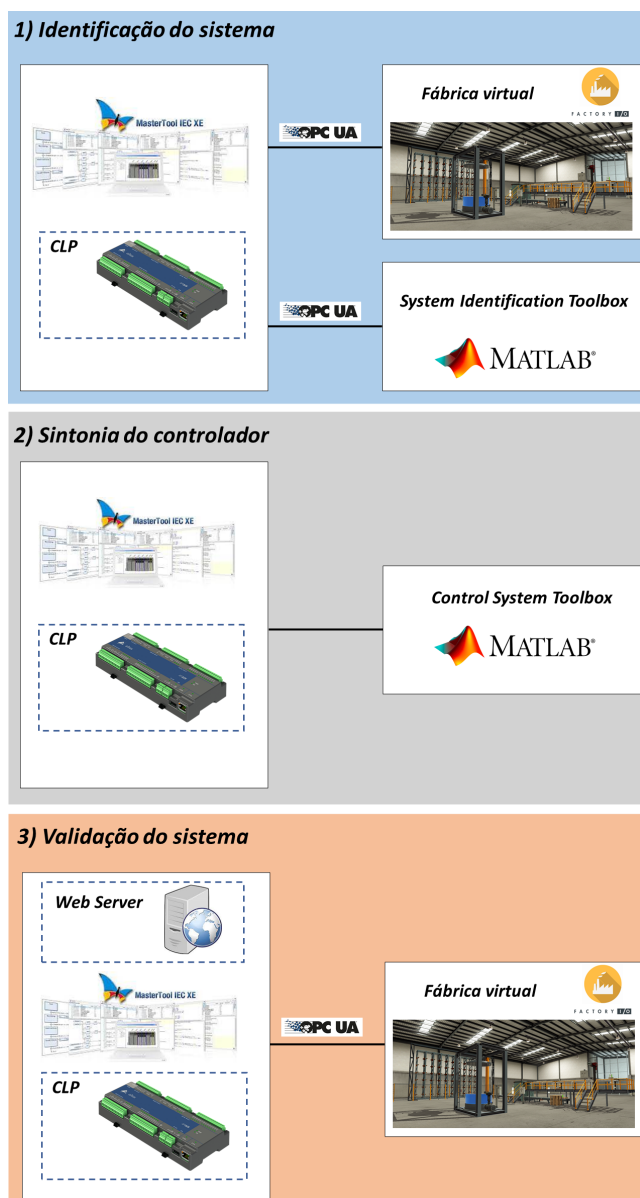


Figura 1. Metodologia empregada para ensaio de identificação de sistema, sintonia de controlador e validação da programação do CLP.

o enchimento deste recipiente com água, realiza-se o armazenamento em caixas que devem ser transportadas por meio de esteira até um sistema de paletização. A etapa de paletização é dotada de mecanismo que organiza os recipientes sobre um palet. Os paletes são transportados por meio de esteiras até o estoque matricial. O estoque é operado e gerenciado por um robô empilhadeira que possui um servomecanismo para organizar os paletes em estantes adequadas. Além disto, considera-se que o sistema de envase opera em malha fechada, ou seja, por meio de um controlador proporcional integral e derivativo (PID) mantém-se o nível do tanque industrial no valor desejado.

### 2.2 Processo de envase

Este processo corresponde ao envase dos recipientes, que são alocadas em caixas dispensadas automaticamente na esteira a cada 12 segundos, conforme indicado pela seta



Figura 2. Ilustração de cada uma das etapas do processo da fábrica virtual.

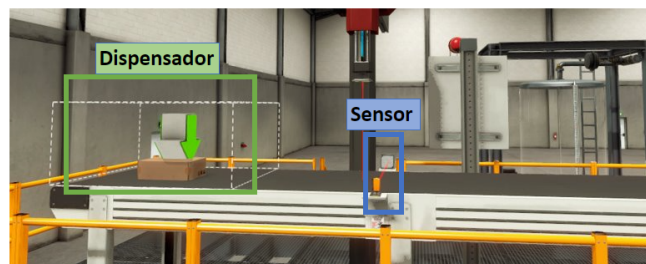


Figura 3. Fábrica virtual: esteira do processo de envase.

verde na Figura 3. O motor da esteira estará ativado até o instante em que o sensor de presença detectar a caixa (vide retângulo azul na Figura 3). Após a detecção do sensor, o motor da esteira será desativado e inicia-se o envase por 10 segundos através de uma válvula de descarga do tanque industrial.

O tanque possui uma válvula de descarga, uma válvula de enchimento e um transmissor de nível, conforme indicado na Figura 4. Todas as variáveis do tanque são analógicas de 0-10V. O tanque possui dimensões de 3 m de altura e 2 m de diâmetro, que resulta em um volume de 9,4247 m<sup>3</sup>. A vazão máxima da válvula de enchimento é de 0,25 m<sup>3</sup>/s e a vazão máxima da válvula de descarga é de 0,3543 m<sup>3</sup>/s (Realgames (2022)). Durante a operação do processo deseja-se manter o nível do tanque em um valor de *setpoint* estipulado, para isto o sistema é realimentado e um controle automático do tipo PID atua sobre a válvula de enchimento.

### 2.3 Identificação da dinâmica do tanque industrial

A identificação da dinâmica do tanque industrial, Figura 4, foi realizado por meio da aquisição dos dados provindo do sensor de nível e da válvula de enchimento da fábrica virtual, transmitidas via comunicação OPC ao *software* MasterTool IEC XE<sup>TM</sup> 3.32 e armazenadas no *software* MATLAB<sup>TM</sup> utilizando *OPC Data Access Explorer*. Na programação do CLP foi configurado a válvula de descarga em 20% da vazão nominal e a válvula de enchimento em 100% da vazão nominal. O sinal de ativação do sistema é do tipo degrau, ou seja, o tanque começa a encher a partir do instante que o botão ON do quadro de comando for pressionado pelo usuário. O processo de enchimento do tanque é interrompido ao pressionar o botão OFF. O tempo de amostragem adotada para aquisição dos dados foi de  $T_s = 200$  ms.

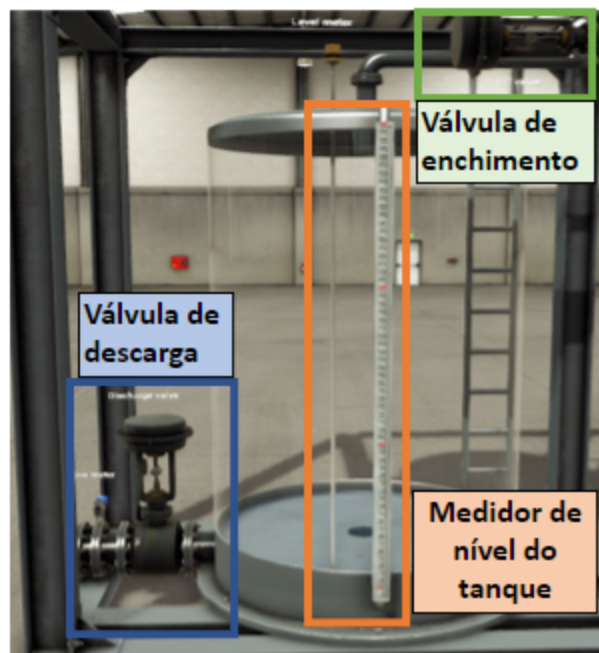


Figura 4. Tanque industrial utilizado no processo de envase.

No procedimento de identificação, por meio da *toolbox System Identification* do MATLAB<sup>TM</sup> avaliou-se as seguintes configurações de função de transferência: *i*) um polo real e atraso temporal; *ii*) dois polos reais e atraso temporal; *iii*) dois polos complexos e atraso temporal, definidos pelas equações (1), (2) e (3):

$$G_{p1d}(s) = \frac{Ke^{-\tau_d s}}{\tau_{p1}s + 1}, \quad (1)$$

$$G_{p2d}(s) = \frac{Ke^{-\tau_d s}}{(\tau_{p1}s + 1)(\tau_{p2}s + 1)}, \quad (2)$$

$$G_{p2du}(s) = \frac{Ke^{-\tau_d s}}{(T_w s)^2 + 2\zeta T_w s + 1}. \quad (3)$$

### 2.4 Sintonia do controlador

Neste trabalho foram comparados os controladores PI e PID para o tanque industrial. O controlador PID disponível no *software* MasterTool IEC XE<sup>TM</sup> possui o seguinte equacionamento do tipo paralelo clássico:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right), \quad (4)$$

onde  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  são as constante de ganho proporcional, integral e derivativo, respectivamente. Para a sintonia do controlador comparou-se cinco métodos heurísticos de sintonia difundidos na literatura e ainda amplamente utilizados na indústria (Campos and Teixeira (2010)):

- (1) Ziegler-Nichols (ZN): determinação dos parâmetros do controlador conforme Tabela 1 (Ziegler and Nichols (1943)).
- (2) Chien, Hrones e Reswick (CHR): ajuste dos parâmetros conforme estabelecido na Tabela 2;

- (3) Cohen & Coon (CC): sintonia de acordo com a Tabela 3;
- (4) Método da integral do erro absoluto (IAE): otimização dos parâmetros do controlador baseado pelo critério de desempenho da integral do erro absoluto (IAE), para uma variação de *setpoint* e
- (5) Método da integral do produto do tempo pelo erro absoluto (ITAE): otimização dos parâmetros baseado no critério de desempenho (Rovira et al. (1969)).

Os parâmetros do controlador PI e PID pelos métodos IAE e ITAE são obtidos através de:

$$K_p = \frac{A}{K} \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)^B, \quad (5)$$

$$T_i = \frac{\tau}{C + D \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)}, \quad (6)$$

$$T_d = \tau E \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)^F, \quad (7)$$

onde as constantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  e  $F$  estão definidas na Tabela 4.

Tabela 1. Parâmetros para sintonia de PI e PID pelo método ZN.

| Controlador | PI                         | PID                        |
|-------------|----------------------------|----------------------------|
| $K_p$       | $0.9 \frac{\tau}{K\tau_d}$ | $1.2 \frac{\tau}{K\tau_d}$ |
| $T_i$       | $3.33\tau_d$               | $2\tau_d$                  |
| $T_d$       | -                          | $0.5\tau_d$                |

Tabela 2. Parâmetros para sintonia de PI e PID pelo método CHR.

| Controlador | PI                          | PID                        |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|
| $K_p$       | $0.35 \frac{\tau}{K\tau_d}$ | $0.6 \frac{\tau}{K\tau_d}$ |
| $T_i$       | $1.16\tau_d$                | $\tau$                     |
| $T_d$       | -                           | $0.5\tau_d$                |

Tabela 3. Parâmetros para sintonia de PI e PID pelo método CC.

| Controlador | PI  | PID  |
|-------------|---|--|
| $K_p$       | $(0.9 + 0.083 \frac{\tau_d}{\tau}) \frac{\tau}{K\tau_d}$  | $(1.35 + 0.25 \frac{\tau_d}{\tau}) \frac{\tau}{K\tau_d}$   |
| $T_i$       | $\frac{0.9 + 0.083 \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)}{1.27 + 0.6 \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)} \tau_d$ | $\frac{1.35 + 0.25 \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)}{0.54 + 0.33 \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)} \tau_d$ |
| $T_d$       | -   | $\frac{0.5\tau}{1.35 + 0.25 \left( \frac{\tau_d}{\tau} \right)}$   |

Tabela 4. Constantes para sintonia de PI e PID pelo método da integral do erro: IAE e ITAE.

| Controlador | PI     |        | PID    |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
|             | IAE    | ITAE   | IAE    | ITAE   |
| A           | 0.758  | 0.586  | 1.086  | 0.965  |
| B           | -0.861 | -0.916 | -0.869 | -0.850 |
| C           | 1.02   | 1.03   | 0.740  | 0.796  |
| D           | -0.323 | -0.165 | -0.130 | -0.147 |
| E           | -      | -      | 0.348  | 0.308  |
| F           | -      | -      | 0.914  | 0.929  |

### 2.5 Processo de paletização

O processo de paletização é uma maneira otimizada de organizar e empilhar uma quantidade maior de produtos a serem armazenados ou transportados. Por meio de um palete é possível transportar uma quantidade definida e padronizada de caixas por uma empilhadeira. Uma das



Figura 5. Visão geral do processo de paletização.

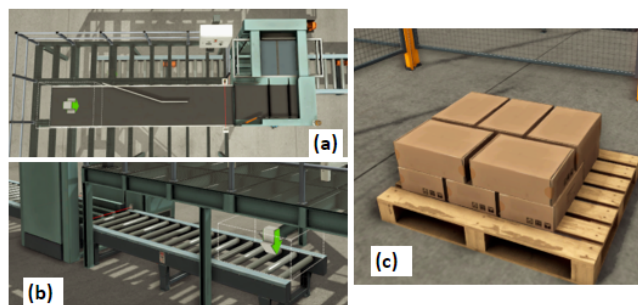


Figura 6. Sistema *palletizer*: (a) visão superior da esteira de entrada de caixas e saída de paletes prontos; (b) esteira de entrada de paletes; (c) paleta montado.

maneiras de realizar a paletização no *Factory I/O*<sup>TM</sup> é utilizando o *palletizer*, conforme apresentado na Figura 5. As especificações técnicas desta máquina são as seguintes: o curso do elevador é de 1.75 m; com velocidade de 2 m/s; e o empurrador tem um curso de 0.88 m (Realgames (2022)).

Esse processo possui duas entradas físicas, sendo uma referente ao produto a ser paletizado (as caixas) que entra pela esteira localizada no nível superior do sistema, Figura 6(a), e a outra corresponde ao suprimento de paletes, que se deslocam no nível inferior da máquina por meio de roletes, conforme indicado na Figura 6(b).

Da vista superior do elevador, vide Figura 7, nota-se o percurso dos produtos a serem organizados de forma padronizada no palete. O sensor destacado por meio do retângulo de cor azul é responsável pela contagem de caixas. O *turn* indicado pelo quadro de cor verde é uma ferramenta para girar as caixas em 90°. Um pistão destacado no retângulo de cor amarela realiza a ação de empurrar as caixas até a porta do elevador (destacado em laranja) a cada final de ciclo da paletização. Um ciclo de montagem corresponde pela junção de cinco caixas. A porta do elevador abre após dois ciclos de montagens, efetuando o empilhamento sobre o palete das caixas de cada ciclo, Figura 6(c). Note que a montagem do palete finalizado, Figura 6(c), é compreendida de dois níveis de caixas organizados de maneira complementar.

### 2.6 Processo de estoque

A utilização de estoque com robô empilhadeira permite automatizar o armazenamento de produtos no final da linha de produção de maneira mais rápida e segura. Uma ilustração do esquema de estoque automatizado

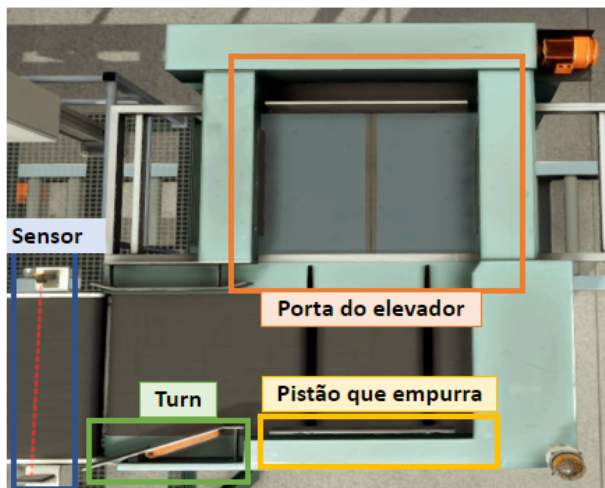


Figura 7. Visão superior do elevador do processo de paletização.



Figura 8. Visão do sistema de estoque com o robô empilhadeira.

com capacidade de armazenagem de 54 paletes consta na Figura 8.

O transelevador (do inglês, *Stacker Crane*) é uma estrutura constituída de uma paleteira em um elevador montado sobre um trilho. Com isso é possível se locomover em um plano tridimensional ( $X, Y, Z$ ). O carro pode se locomover em até 10.5 metros no eixo  $X$ , em uma velocidade de 1.4m/s. E o elevador pode subir em até 6.625 m no eixo  $Z$ , em uma velocidade 1.7 m/s. A cesta que carrega os paletes é formada por uma paleteira dotada de garfos conforme indicado na Figura 9. Por meio dos garfos, o robô empilhadeira pode mover-se no eixo  $Y$ , tanto na direção de captura de palete, quanto para deixar um palete. O garfo pode se mover em 1.3 m em ambas as direções, com uma velocidade de 0.5 m/s. O *Stacker Craner* tem dois telômetros a laser, colocados no carrinho e na plataforma, medindo a posição horizontal e vertical da plataforma (Realgames (2022)).

Os racks das prateleiras têm que se alinhar perfeitamente com o carro para realizar corretamente o armazenamento ou a retirada dos produtos. O robô possui três métodos de alinhamento, sendo eles: o método analógico; o método digital; e o método numérico.

Neste trabalho utiliza-se o método de alinhamento digital, no qual cada prateleira é codificada por um número de 1 a 54. Se for informado o número zero realiza-se a parada na posição atual, podendo também ser um método

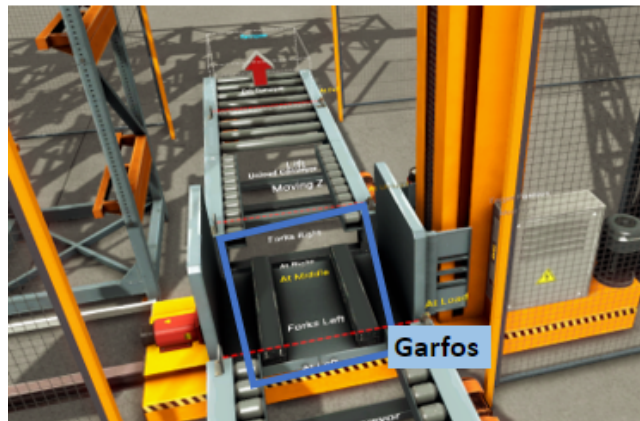


Figura 9. Fábrica virtual: robô empilhadeira.

Tabela 5. Codificação da posição do robô empilhadeira pelo método digital do *Stacker Crane*.

| Posição                | Bits de codificação |
|------------------------|---------------------|
| 0 (parada)             | 0 0 0 0 0           |
| 1                      | 1 0 0 0 0           |
| 2                      | 0 1 0 0 0           |
| 3                      | 1 1 0 0 0           |
| 4                      | 0 0 1 0 0           |
| ...                    | ...                 |
| 54                     | 0 1 1 0 1 1         |
| 55 (posto de descanso) | 1 1 1 0 1 1         |

de cancelamento. Se for informado um valor maior que 54 ele irá para o posto de descanso, ou seja ponto de carga/descarga, vide Tabela 5.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Identificação e sintonia do controlador

A Figura 10 mostra a curva experimental para identificação do sistema provinda do sensor de nível a partir de um degrau de tensão na válvula de enchimento.

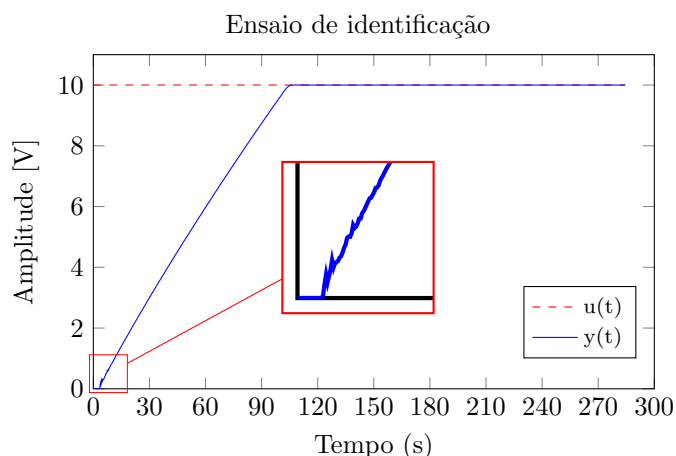


Figura 10. Resposta temporal do sensor de nível  $y(t)$  a partir de um degrau de tensão na válvula de enchimento  $u(t)$ .

Com os dados adquiridos, determinou-se os parâmetros das funções de transferência (1)-(3) que alcançaram o

melhor *fitting* em relação aos dados experimentais. A Figura 11 apresenta os resultados de validação das funções de transferências estimadas e a Figura 12 elucida o erro de estimativa. As funções de transferência estimadas são expressas por:

$$G_{p1d}(s) = \frac{1}{51.804s + 1} e^{-2.6129s},$$

$$G_{p2d}(s) = \frac{1}{(25.182s + 1)(28.976s + 1)} e^{-2.6129s},$$

$$G_{p2du}(s) = \frac{0.0011}{s^2 + 0.0548s + 0.0011} e^{-2.6129s}.$$

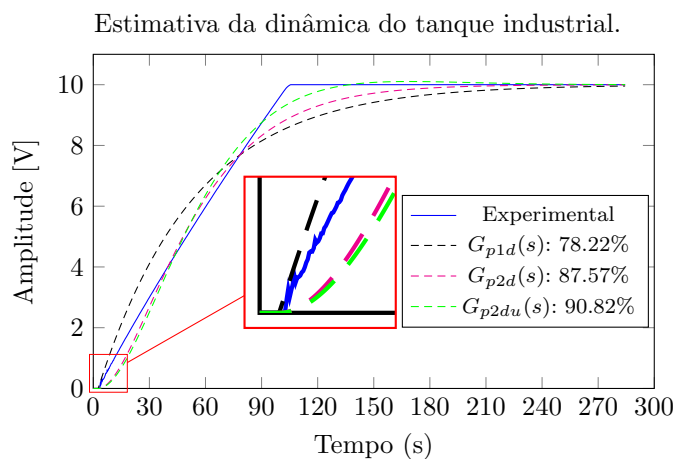


Figura 11. Validação da resposta temporal da saída do sistema a partir das funções de transferência estimadas.

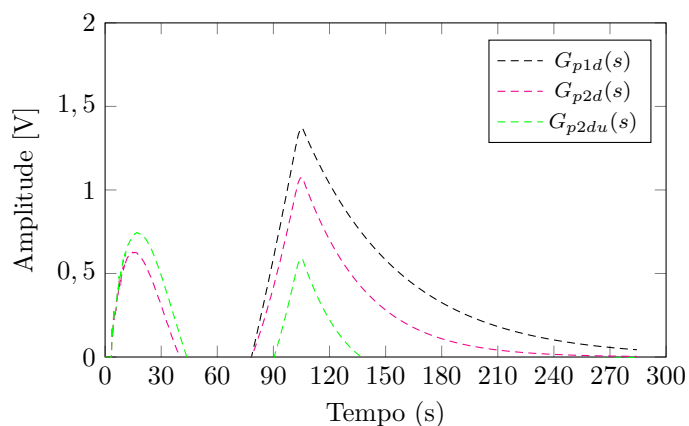


Figura 12. Erro de estimativa das funções de transferências.

Embora as funções  $G_{p2du}(s)$  e  $G_{p2d}(s)$  tenham apresentado o menor erro de estimativa, a resposta temporal do sistema realimentado apresenta um sobressinal que é inviável fisicamente para *setpoint* definido para o valor máximo. Por esta razão, optou-se em utilizar a função  $G_{p1d}(s)$ , no qual a dinâmica do processo é descrita por um pólo real e um atraso temporal.

Por meio dos métodos heurísticos, determinou-se os parâmetros do controlador PI e PID, indicados na Tabela 6. As Figuras 13 e 14 denotam os resultados para uma mudança de *setpoint* no nível do tanque. Nota-se que o

método ZN apresenta o maior valor de sobressinal entre as técnicas de sintonia para PI e PID. O controlador PI sintonizado pelo método CHR conduziu o sistema para a instabilidade, por tal razão foi omitido da Figura 13. O menor tempo de estabelecimento é alcançado com o controlador PID, cujos ganhos foram sintonizados pelo método IAE. Destaca-se que um resultado interessante foi dos controladores sintonizados pelo método CHR, que apresentou uma resposta suave e sem sobressinal para o nível do tanque.

Tabela 6. Parâmetros dos controladores PI e PID pelos métodos heurísticos de sintonia.

| Método | PI    |       | PID   |       |       |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | $K_p$ | $T_i$ | $K_p$ | $T_i$ | $T_d$ |
| ZN     | 17.8  | 8.7   | 23.8  | 5.23  | 1.31  |
| CHR    | 6.94  | 60.1  | 11.9  | 51.8  | 1.31  |
| CC     | -     | -     | 27    | 6.4   | 0.959 |
| IAE    | 9.92  | 51.6  | 14.6  | 70.6  | 1.18  |
| ITAE   | 9.04  | 50.7  | 12.2  | 65.7  | 0.995 |

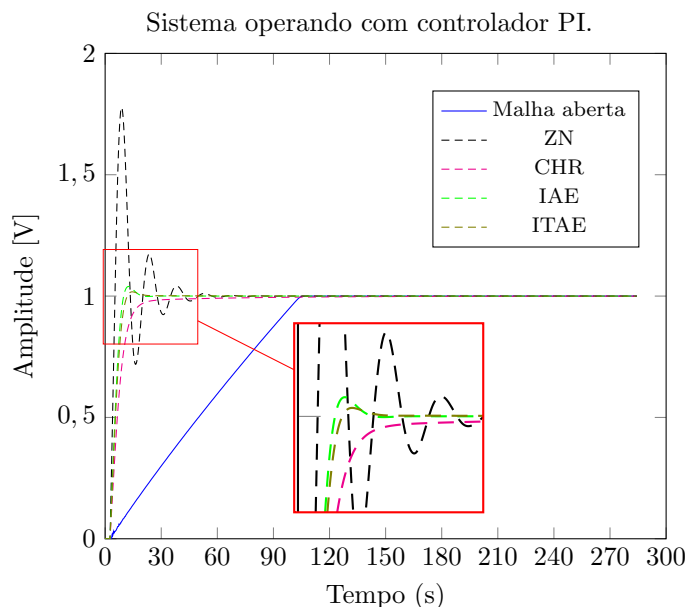


Figura 13. Resposta de saída do sistema operando em malha fechada com controlador PI sintonizado pelos métodos heurísticos.

### 3.2 Programação do CLP e funcionamento da fábrica

Para o funcionamento automatizado dos processos da fábrica foi utilizado na programação do CLP uma estrutura de três linguagens diferentes de programação de CLP's as linguagens LD, ST e SFC organizadas em POU's (do inglês, *Program Organizational Units*).

O sistema funciona de maneira automática após o usuário apertar o botão de ativação no quadro de comando. Um vídeo demonstrativo apresenta o funcionamento completo da fábrica, cujo *link* está disponível na Figura 15.

## 4. CONCLUSÃO

O contexto recente de pandemia evidenciou a necessidade de maiores investimentos por parte das empresas em

## REFERÊNCIAS

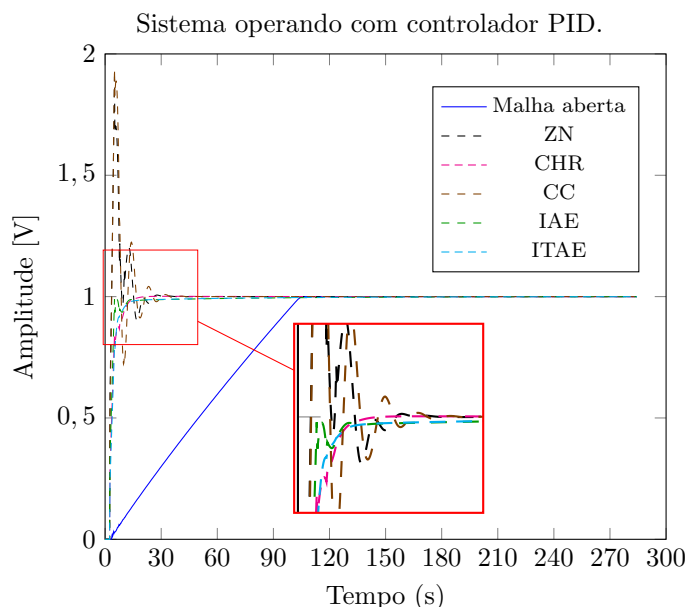


Figura 14. Resposta de saída do sistema operando em malha fechada com controlador PID sintonizado pelos métodos heurísticos.



Figura 15. Funcionamento da fábrica virtual. Clique aqui para visualizar o vídeo demonstrativo.

automação da manufatura. Com isto, obtêm-se a redução do erro humano na fabricação, uniformidade no produto, minimização dos casos de lesões por esforço repetitivo, monitoramento por gráficos das variáveis de interesse, entre outros.

No contexto educacional, a utilização de *software* de realidade virtual demonstra ser uma estratégia de aprendizagem adequada, pois permite aos discentes experiências de projeto para aplicações industriais, cuja validação seriam inviáveis no ambiente de laboratório acadêmico. Neste sentido, este trabalho apresentou a factibilidade do desenvolvimento de conhecimentos e habilidades no âmbito da área de controle e automação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, a coordenação do curso de Engenharia Elétrica e a Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG) e Diretoria de Graduação e Educação Profissional (DIR-GRAD) da UTFPR, pelo apoio a este trabalho.

- Agrawal, M., Dutta, S., Kelly, R., and Millan, I. (2021). COVID-19: Um ponto de inflexão para a Indústria 4.0. Technical report. URL <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/covid-19-an-inflection-point-for-industry-40-pt-br>.
- Campos, M.C.M.M.d. and Teixeira, H.C.G. (2010). *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. Editora Blucher, São Paulo, SP, 1 st edition.
- de la Torre, L., Sánchez, J.P., and Dormido, S. (2016). What remote labs can do for you. *Physics Today*, 69(4), 48–53.
- Faulconer, E.K. and Gruss, A.B. (2018). A review to weigh the pros and cons of online, remote, and distance science laboratory experiences. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, 19(2).
- Guan, S., Hu, W., Zhou, H., Lei, Z., Feng, X., and Liu, G.P. (2021). Design and implementation of virtual experiment for complex control system: A case study of thermal control process. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 15(23), 3270–3283.
- Lei, Z., Zhou, H., Hu, W., Deng, Q., Zhou, D., Liu, Z.W., and Gao, X. (2021). 3-D Interactive Control Laboratory for Classroom Demonstration and Online Experimentation in Engineering Education. *IEEE Transactions on Education*, 64(3), 276–282. doi:10.1109/TE.2020.3041070.
- Ma, T. (2020). Online Teaching Exploration and Practice of intelligent Control Courses in the context of COVID-19 Epidemic. In *2020 International Conference on Modern Education and Information Management (IC-MEIM)*, 300–303. IEEE.
- Pereira, C.E., Paladini, S., and Schaf, F.M. (2012). Control and automation engineering education: Combining physical, remote and virtual labs. In *International Multi-Conference on Systems, Signals Devices*, 1–10. doi:10.1109/SSD.2012.6197908.
- Realgames (2022). Manual - Factory I/O - Documentation. URL <https://docs.factoryio.com/manual>.
- Rovira, A., Murrill, P.W., and Smith, C.L. (1969). Tuning controllers for setpoint changes. *Instrumentation & Control Systems*.
- Vasconcelos, G. (2020). A relevância da Indústria 4.0 durante a pandemia | Nube 08/09/2020. URL <https://www.nube.com.br/blog/2020/09/08/a-relevancia-da-industria-4-0-durante-a-pandemia>.
- Ziegler, J. and Nichols, N. (1943). Process lags in automatic control circuits. *Trans. ASME*, 65(5), 433–443.