

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA HARDWARE IN THE LOOP APLICADO AO ENSINO DE PROGRAMAÇÃO DE CLP

Renan P. I. L. Sandes \* Carlos A. V. Cardoso \*\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe, SE, (e-mail: renanpils@gmail.com).

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe, SE, (e-mail: carlosvcardoso@gmail.com).

---

**Abstract:** This paper presents the use of Hardware-in-the-loop topology for the development of an auxiliary platform for automation teaching, in this case Programmable Logic Controllers (PLC) programming. To do so, an architecture is proposed where an industrial plant is simulated and controlled by a physical PLC. The system developed includes an hardware interface that connects the simulation signals with the PLC inputs and outputs, a simulation that executes in real-time a virtual model of an industrial plant and a GUI for viewing the simulation status and animations. In the education point of view, the system developed has promising applications inside automation laboratories based in PLCs, microcontrollers and digital systems, etc, without losing connection with the idea of bringing more real situations inside classroom.

**Resumo:** Neste trabalho é apresentado o uso do Hardware-in-the loop (HIL) aplicado ao ensino de Automação industrial, neste caso à programação de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis). Para tanto é proposta uma arquitetura onde a planta simulada é controlada por um controlador real, neste caso o CLP. O sistema inclui uma interface em hardware que permite sua conexão com as entradas e saídas do CLP, e um software, que executará uma simulação do comportamento de uma planta física em tempo real, e ao mesmo tempo permitirá a interação e acompanhamento do processo através de uma interface gráfica. Do ponto de vista didático o sistema desenvolvido possui promissoras aplicações dentro de sala de aula de modo a facilitar, flexibilizar e reduzir o custo de experimentos realizados durante o aprendizado de controladores lógicos, sejam estes baseados em CLPs, microcontroladores, circuitos digitais, etc, não se afastando da proposta de trazer situações e problemas mais próximos da realidade.

*Keywords:* Programmable Logic Controllers; Hardware-in-the-loop; Engineering Education; Automation Education

*Palavras-chaves:* Controladores Lógicos Programáveis; Hardware-in-the-loop; Ensino de engenharia; Ensino de automação

---

## 1. INTRODUÇÃO

Ainda hoje há certa dificuldade para trazer experiências mais próximas da realidade industrial para dentro da sala de aula, por diversos motivos. Alguns podem ser listados rapidamente: Custos do maquinário, complexidade das instalações e plantas, grande número e diversidade das aplicações, características estocásticas dos sistemas reais entre outros. Sendo os Controladores Lógicos Programáveis (CLP) dispositivos amplamente utilizados na indústria devido à sua robustez e versatilidade, além da sua inserção no contexto Indústria 4.0 como exposto por Langmann and Rojas-Peña (2016), o ensino do uso destes dispositivos, se faz necessário para a formação de profissionais capazes de lidar com tais dispositivos sob uma vasta gama de aplicações.

Para tanto, dado o teor prático do ensino de programação de CLP, trazer para a sala de aula recursos como plantas

didáticas permitem excelentes experiências de contato com o âmbito prático. Apesar disso, as experiências se fazem limitadas pelo número de alunos simultâneos, alto custo e inflexibilidade nos experimentos, remetendo à reflexão de que os sistemas utilizados para ensino devem ser capazes de garantir uma flexibilização em relação aos experimentos realizados e ao nível de dificuldade do experimento, bem como garantir um baixo custo de implantação e operação.

Simulações são uma alternativa viável para assegurar os quesitos acima, reafirmados pela avanço, popularização e facilidade de uso dos computadores atuais. Alguns trabalhos como Shyr (2010) e Potkonjak et al. (2016) propõem o uso de ferramentas virtuais, que simulam não só o sistema em teste, como também as interfaces e ambientes a fim de tornar a experiência mais imersiva. Embora viável simulações puramente virtuais ainda são artificiais e tiram o realismo das aplicações muito valorizadas nas matérias práticas de automação.

Considerando o anteriormente mencionado o presente trabalho propõe uma topologia capaz de aproveitar a flexibilidade das simulações, bem como garantir a necessidade do contato com o hardware pelos alunos durante o processo de aprendizado. Para tanto, foi implementado um sistema Hardware-in-the-loop (HIL) de modo a inserir o controlador físico (CLP) em uma planta virtual simulada por meio do desenvolvimento de uma interface capaz de, adequadamente, realizar o acoplamento entre as partes físicas e virtuais. Esse sistema tem como objetivo auxiliar no teste e validação dos programas desenvolvidos pelos estudantes sem que haja perda do sentimento prático, pois a planta virtual precisará ser controlada por um CLP programado pelos alunos.

A simulação apresentada neste trabalho foi desenvolvida empiricamente baseada em uma planta física, no entanto, a plataforma foi desenvolvida voltado para a flexibilização de tal simulador, permitindo que outros modelos sejam elaborados para uso em conjunto com a plataforma. O uso de plataformas abertas como Python e Arduino foi priorizado, esperando assim facilitar a reprodução do sistema HIL desenvolvido neste trabalho por estudantes de outras universidades.

As seções a seguir apresentam uma breve descrição da topologia HIL, uma revisão bibliográfica expondo brevemente outros trabalhos já realizados com natureza semelhante, a descrição do sistema desenvolvido, a aplicação deste sistema descrevendo experimentos realizados e por fim uma conclusão.

## 2. HARDWARE-IN-THE-LOOP

Introduzidos nos anos 60 inicialmente nas áreas de simulação de vôo, os sistemas baseados na topologia HIL tem sido aplicado pela indústria amplamente desde os anos 80 principalmente na indústria automotiva. Conforme afirmado por Bacic (2005), os sistemas baseados nesta topologia são utilizados de uma maneira *ad hoc*, especificamente para cada aplicação e são definidos pelo princípio básico da inclusão de um elemento físico em uma simulação de um sistema operando em tempo real .

Na Figura 1 pode ser observado uma comparação entre um sistema real, cujos elementos são todos físicos e um sistema HIL, onde o sistema é simulado para um controlador. Em tal exemplo, o sistema sob teste é o CLP.

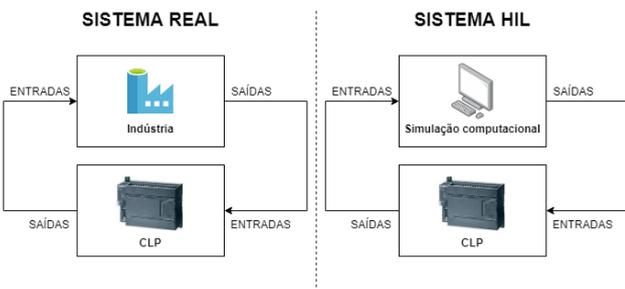


Figura 1. Comparação entre sistema real e sistema com a topologia HIL.

Ao introduzir uma parte do sistema à uma simulação, se torna possível apresentar ao dispositivo físico sob teste, nesse caso um controlador lógico programável, um dado

estado do sistema repetidamente ou também simular condições de operação de risco. Trazendo para o âmbito educacional, um sistema como tal possibilita uma repetibilidade de modo que os custos sejam reduzidos. Dessa forma, um aprendiz pode cometer erros repetidamente, analisar suas falhas e corrigi-las em condições seguras de operação sem riscos. Além disso, o modelo pode ser variado constantemente para ser aperfeiçoado ou até mesmo para um processo diferente.

## 3. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

A proposta de uso de simulações com HIL para auxiliar o ensino de controle de sistemas industriais é apresentada desde Grega (1999), onde além de apresentar a introdução de tal topologia ele ressalta a importância do uso de plantas em escala de laboratório, mas apresentando a facilidade que a topologia traz para o ambiente educacional.

Referências como Lima and Goncalves (2007), Tebani et al. (2015) e Tejado et al. (2016) apresentam propostas para plataformas educacionais que apresentem uma interface para facilitar a visualização de simulações em eventos discretos, melhorando a aplicabilidade em sala de aula, lidando de diferentes formas com a conectividade entre o hardware e o sistema de simulação, seja via porta paralela, por um *socket* TCP/IP ou um CLP conectado a um servidor OPC via porta serial. Tais referências demonstram a diversidade de formas como a topologia pode ser implementada, mostrando a dependência da implementação com o dispositivo em testes.

Um recente trabalho que aborda uma temática semelhante é Osen (2019). Neste trabalho, o autor aborda o desenvolvimento para uso educacional no ensino de automação de um simulador HIL de válvula borboleta. A autor objetiva incrementar a sensação de realismo de suas práticas e também o desenvolvimento próprio dos sistemas voltado para as atividades de laboratório das disciplinas quando somado à colaboração dos alunos envolvidos se torna um processo verdadeiramente enriquecedor.

## 4. DESENVOLVIMENTO

O sistema desenvolvido, cuja topologia mais detalhada é apresentada na Figura 2 pode ser dividido em três partes: A simulação, a IPA (Interface de Programação de Aplicação), a interface HIL. Como pode ser observado, a interface HIL, responsável pelo correto acoplamento entre o controlador e a planta virtual é construída em torno de um Arduino Uno, que se comunica via porta serial USB com a IPA executada em Python.

Os circuitos de entradas/saídas da interface foram projetados de modo que fossem eletricamente compatíveis com as saídas/entradas do CLP. Desse modo, as entradas e saídas da interface, que são conectadas diretamente às do CLP Siemens SIMATIC S7-200 operam com  $24V_{DC}$  e foram implementadas utilizando um módulo relés de 6 canais e um módulo de entradas digitais, respectivamente. Ambos os módulos são eletricamente desacoplados por meio de optoacopladores para proteção do microcontrolador.

A Figura 3 expõe a parte interna do hardware, demonstrando os elementos apresentados na Figura 2 como implementados.

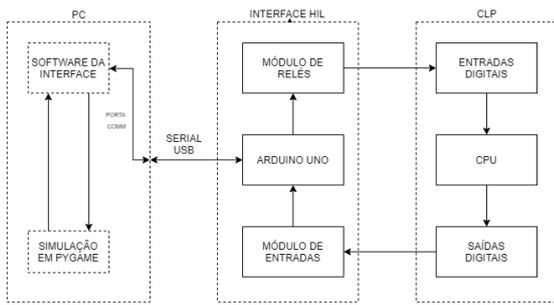


Figura 2. Topologia com detalhes internos do sistema implementado.

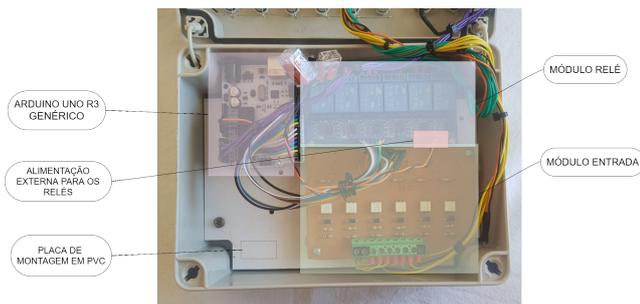


Figura 3. Parte interna do hardware da interface HIL.

Para experimentação foi desenvolvida uma simulação que opera em tempo real e contém um modelo empírico a eventos discretos de uma planta cujo propósito é separar peças de quatro diferentes tipos. O modelo é baseado em uma planta didática do laboratório de automação da UFS. A planta virtual é composta por duas cancelas (Cancela 1 e Cancela 2) a serem acionadas pelo CLP e três sensores, um óptico, um indutivo e um capacitivo, que fornecem informações ao controlador sobre a natureza e tamanho da peça. A Figura 3 contém um *screenshot* do programa da simulação, e nela podem ser indicados os elementos supracitados.

A planta modelada possui a funcionalidade de classificação, e deve classificar as peças de acordo com as especificações na Tabela 1 para que sejam encaminhadas para suas devidas contagens. As peças são identificadas por meio dos sensores, de modo que o óptico determina se a peça é Grande, o indutivo caso a peça seja metálica e o capacitivo determina se a peça é não metálica.

O sistema real que inspirou este primeiro exemplo é uma esteira artesanal com espaço para alocação de três sensores de diferentes: Espaço para instalar 2 sensores rente à esteira e um terceiro sensor acima dos anteriores para realizar a identificação do tamanho da peça. Os sensores propositalmente estão localizados no início da esteira a uma distância de 30cm das cancelas que realizam a classificação e são acionadas por atuadores pneumáticos de ação simples com retorno por mola.

Para atender ao requisito de trazer uma experiência mais próxima do real, uma não idealidade foi adicionada ao modelo, de modo que os alunos em experimentação tivessem que utilizar os conhecimentos adquiridos a respeito de programação de CLP para corrigi-la. A não idealidade

adicionada foi o tempo de atuação dos sensores. Estes atuam conforme a passagem do bloco pela esteira. a Tabela 2 contém a indicação dos sensores de acordo com as características dos blocos.

Embora essa planta seja um exemplo empírico inicial, o sistema possui flexibilidade para o desenvolvimento diferentes modelos, inserindo diferentes aspectos não ideais, como situações inválidas de operação, como defeitos, falhas, erros de operador, ruídos, etc. A planta foi implementada utilizando a biblioteca Pygame, que fornece um bom suporte para execução de gráficos em tempo real e o tratamento de eventos discretos, como por exemplo, o acionamento de uma entrada da planta.

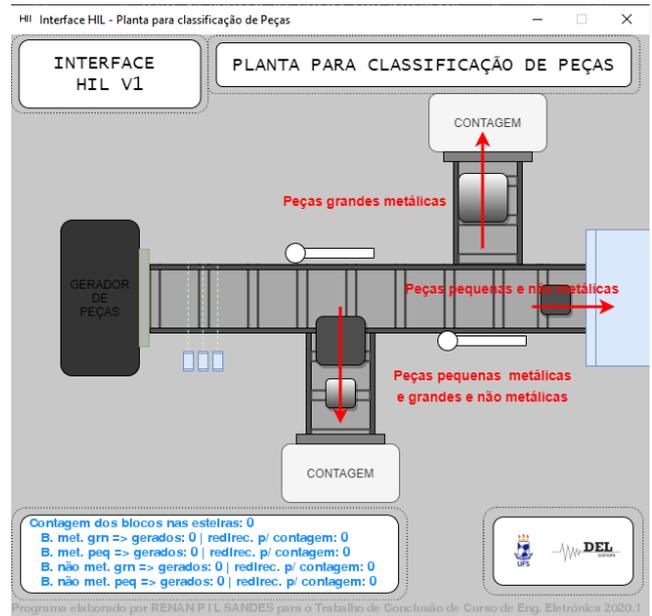


Figura 4. *Screenshot* do simulador desenvolvido, mostrando indicações para instrução de separação das peças.

## 5. APLICAÇÃO

Após o desenvolvimento foram realizados testes onde a interface foi conectada ao CLP a fim de observar a funcionalidade e usabilidade junto ao CLP e ao kit educacional do laboratório de automação da Universidade Federal de Sergipe. Na Figura 6 pode ser visto uma fotografia da

Tabela 1. Especificação do funcionamento dos atuadores.

Classificação das peças	Cancela 1	Cancela 2
Pequenas Metálicas	Acionada	Não importa
Grandes e não metálicas	Acionada	Não importa
Grandes e metálicas	Recuada	Acionada
Pequenas e não metálicas	Recuada	Recuada

Tabela 2. Acionamento dos sensores de acordo com a natureza das peças.

Identificação das peças	S. Óptico	S. Capacitivo	S. Indutivo
Pequenas Metálicas e	0	0	1
Grandes Metálicas	1	0	1
Pequenas não metálicas	0	1	0
Grandes não metálicas	1	1	0

Tabela 3. Relação de conexão entre CLP e interface HIL.

Identificação	CLP	Interface HIL
S. Óptico	I0.0	Q0
S. Capacitivo	I0.1	Q1
S. Indutivo	I0.2	Q2
Cancela 1	Q0.0	I0
Cancela 2	Q0.1	I1

montagem realizada conforme o diagrama proposto na Figura 2, ou seja, as saídas do CLP foram conectadas às entradas da interface e vice versa. A tabela 3 contém informações sobre as conexões entre o CLP e a interface HIL. A Figura 5 expõe a parte frontal dos dispositivos demonstrando também as indicações de entradas e saídas.

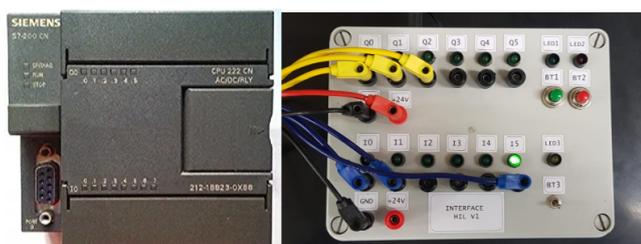


Figura 5. Parte frontal do CLP S7-200 (à esquerda) e da Interface HIL (à direita).

O experimento inicialmente realizado pelos autores consiste na programação do CLP e aplicação à planta virtual a fim de validar o funcionamento do sistema e a programação elaborada no controlador. Para tanto, foi desenvolvido um programa na linguagem FBD para o CLP disponível do kit, que controlasse a planta automaticamente.

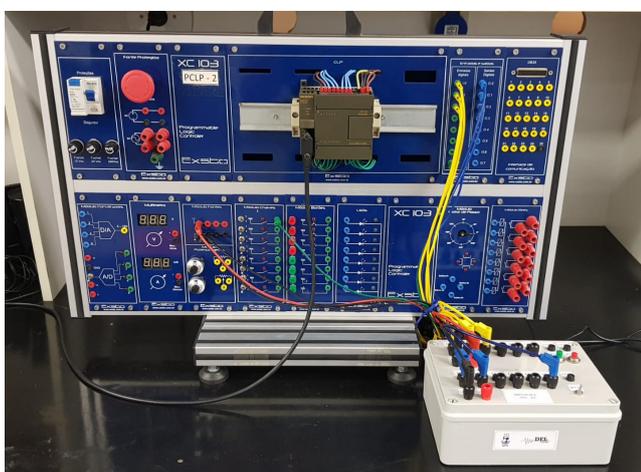


Figura 6. Montagem do experimento. Kit didático de CLP e a interface HIL desenvolvida (canto inferior direito).

A simulação opera a uma taxa de 5 quadros por segundo, enquanto a velocidade de aquisição e geração das saídas, medida através do tempo de execução do programa, é de 20 amostras/s, contando uma amostra como a leitura de todas as entradas e uma saída a escrita de todas as saídas. Apesar de apresentar uma taxa de amostragem relativamente baixa, o funcionamento demonstrou-se satisfatório para fins didáticos quando conectados ao controlador físico. A limitação do sistema provém da comunicação desenvolvida via serial.

Além do uso pelos autores, a interface foi apresentada a alunos da disciplina de Automação Industrial para a avaliação de experiência do usuário. O experimento lhes foi apresentado oralmente e também por meio de uma guia de experimento sendo aplicado aos estudantes de engenharia elétrica, eletrônica e de produção que houvessem cursado ou cursavam a disciplina de automação industrial, público alvo que utilizará o sistema. Um total de 18 alunos participaram do experimento, sendo 17% alunos de engenharia eletrônica, 5% alunos de elétrica e 78% alunos de engenharia de produção.

O objetivo do experimento é elaborar um programa para o CLP que controle automaticamente a planta apresentada, de acordo com determinados requerimentos. Para completar o experimento, os alunos levaram um tempo médio de 2 horas e 30 minutos para a resolução do problema proposto. Após completar a automação da planta, alunos que participaram da experiência de uso da plataforma responderam o questionário sobre a avaliação da experiência. O questionário utilizado visa obter a impressão dos alunos acerca da usabilidade, da intuitividade e também a respeito da inclinação à recomendação da plataforma. O gráfico na Figura 7 ilustra as médias obtidas nas respostas dos alunos ao questionário.

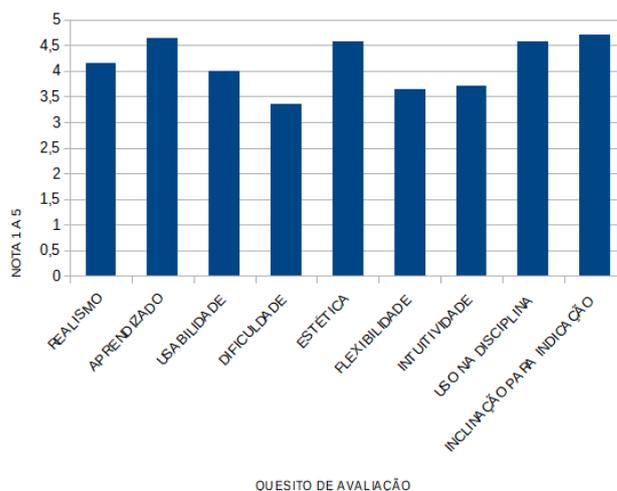


Figura 7. Médias das respostas do questionário de avaliação da experiência respondido pelos alunos.

De acordo com as médias expostas no gráfico da Figura 7, os quesitos melhores avaliados foram o aprendizado, a estética e a inclinação para indicação do uso da plataforma. Tais resultados podem ser correlacionados devido ao apelo estético que torna o uso da ferramenta mais atrativo, pois os alunos iniciantes sentem-se desconvidados ao utilizar uma ferramenta que aparente ser complexa e mal construída. Além desses, o quesito avaliação obteve uma média elevada, representando o conforto dos usuários ao serem avaliados por uma ferramenta de simulação virtual.

Apesar de os participantes solucionarem o problemas numa média de 2 horas e 30 minutos, na escala de 1 a 5 a média foi 3,35, indicando que apesar da inexperiência da maioria não impactou na impressão do nível de dificuldade do problema.

Os quesitos que receberam maior desvio padrão nas respostas foram dificuldade e intuitividade. Isso pode ser um

indicativo que apesar de ter sido considerado intuitivo e não tão difícil, as opiniões tenham divergido entre os participantes. Além disso, as dúvidas a respeito das conexões a serem feitas indicam que há uma necessidade do melhor esclarecimento a respeito da relação controlador/planta e entradas/saídas. Os relatos informais dos alunos participantes foram positivos a respeito da apresentação gráfica da simulação, ou seja, a validação dos seus programas se tornou mais compreensível utilizando um recurso visual para avaliar o funcionamento dos seus programas. Na Figura 8, algumas fotografias obtidas durante a realização dos experimentos.



Figura 8. Fotografias da execução dos experimentos.

Os experimentos conduzidos em sala de aula foram realizados antes da situação global de pandemia, respeitando a legislação corrente.

## 6. CONCLUSÃO

Experimentação em laboratório é necessária para o bom aprendizado dos conceitos teóricos, especialmente nos vistos em cursos de automação e controle. Na Universidade Federal de Sergipe, pôde ser empregada a topologia HIL proposta neste trabalho para melhorar as experiências de laboratório de programação de CLP durante a simulação de eventos discretos. O desenvolvimento de um hardware que implementa a interface entre um simulador e os controladores utilizados no aprendizado se fez viável, de forma a garantir além de uma melhor flexibilização nos experimentos uma melhor visualização das respostas dos controladores programados pelos aprendizes.

Além disso, pode ser destacado que o desenvolvimento do sistema foi realizado apenas com plataformas abertas, facilitando a portabilidade entre sistemas operacionais e o acesso a alunos, professores e universidades para incrementação das atividades educacionais das disciplinas de controle e automação industrial. Ainda, a necessidade por recursos didáticos que permitam o isolamento entre os estudantes em meio à situação global de pandemia de Covid-19, um sistema de baixo custo e complexidade de hardware como o proposto neste artigo pode ser replicado de forma que as experiências normalmente realizadas em grupos possam ser individualizadas sem custo significativo reduzindo o risco de contaminação.

Embora o sistema seja de código aberto e possua uma fácil manutenibilidade continua sendo um sistema desenvolvido artesanalmente e que contém limitações da capacidade de processamento pelo fato de não utilizar uma plataforma

dedicada a isso, resultando na diminuição da gama de aplicações possíveis. No entanto, há abertura não só para uso didático em conjunto com CLP, mas também com outros sistemas digitais como por exemplo FPGA e microcontroladores e possui a flexibilidade para ser utilizada em conjunto com um computador pessoal comum, com uma grande diversidade de modelos, afinal muitos dos experimentos que são apresentados em sala de aula têm uma baixa complexidade e podem possivelmente ser simulados em um computador pessoal. Atualmente o sistema continua sob desenvolvimento para criação de novas plantas didáticas virtuais e em busca de recursos que aumentem a frequência de operação da comunicação.

## REFERÊNCIAS

- Bacic, M. (2005). On hardware-in-the-loop simulation. In *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, 3194–3198. doi:10.1109/CDC.2005.1582653.
- Grega, W. (1999). Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education. volume 2, 12B6/7 – 12B612 vol.2. doi:10.1109/FIE.1999.841594.
- Langmann, R. and Rojas-Peña, L.F. (2016). A plc as an industry 4.0 component. In *2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 10–15. doi:10.1109/REV.2016.7444433.
- Lima, J. and Goncalves, J. (2007). Plc training based on a 3d virtual maquette control: an educational experience in automation.
- Osen, O. (2019). On the use of hardware-in-the-loop for teaching automation engineering. 1308–1315. doi:10.1109/EDUCON.2019.8725050.
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V.M., and Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*, 95, 309 – 327. doi:https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131516300227>.
- Shyr, W.J. (2010). Enhancement of plc programming learning based on a virtual laboratory. 8, 196–202.
- Tebani, K., Mihoubi, B., Kadri, M., Mehdi, G., and Bouzouia, B. (2015). Hardware-in-the-loop simulation for validating plc programs.
- Tejado, I., Serrano, J., Pérez, E., Torres, D., and Vinaigre, B.M. (2016). Low-cost hardware-in-the-loop test-bed of a mobile robot to support learning in automatic control and robotic. *IFAC-PapersOnLine*, 49(6), 242 – 247. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.184. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316303901>.