



REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA
FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

**SIMULADOR DIDÁTICO HARDWARE-IN-THE-LOOP DE BAIXO CUSTO PARA SISTEMAS DE
CONTROLE SISO**

LOW COST HARDWARE-IN-THE-LOOP DIDACTIC SIMULATOR FOR SISO CONTROL SYSTEMS

Ricardo Fonte Marinheiro^{1, i}
Daniel Barbuto Rossato^{2, ii}
Pedro André Braga De Oliveira^{3, iii}

Data de submissão: (05/02/2024) Data de aprovação: (07/10/2024)

RESUMO

O objetivo desse trabalho é desenvolver um simulador didático de baixo custo que permita a utilização de controladores de processos industriais sem a necessidade de sensores, atuadores e infraestrutura para emular as variáveis do processo, facilitando a aprendizagem de estratégias de controle. O desenvolvimento do simulador tipo hardware-in-the-loop foi baseado na plataforma Arduino em conjunto com o software de fonte aberta *Scilab*, permitindo a utilização de diferentes funções de transferências para simular sistemas de controle Single Input Single Output (SISO). Os resultados foram coletados a partir do controlador lógico programável SIEMENS S7-300, demonstrando a efetividade do controle após ajustes dos parâmetros PID do controlador.

Palavras-chave: hardware-in-the-loop; simulador de processos; simulador de sistema de controle; Arduino; CLP; *Scilab*.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a low-cost didactic simulator that allows the use of industrial process controllers without the need for sensors, actuators and infrastructure to emulate the process variables, facilitating the learning of control strategies. The development of the hardware-in-the-loop simulator was based on the Arduino platform together with the Scilab open source software, allowing the use of different transfer functions to simulate Single Input Single Output (SISO) control systems. The results were collected from the SIEMENS S7-

¹Pós-graduado Automação e Controle na Faculdade SENAI São Paulo. E-mail: ricardo.marinheiro@sp.senai.br

²Docente na Faculdade SENAI São Paulo – Campus Mariano Ferraz. E-mail: daniel.rossato@sp.senai.br

³Docente na Faculdade SENAI São Paulo – Campus Mariano Ferraz. E-mail: pedro.braga@sp.senai.br

300 programmable logic controller, demonstrating the effectiveness of the control after adjusting the PID parameters of the controller.

Keywords: hardware-in-the-loop; process simulator; control system simulator; Arduino; PLC; Scilab.

1 INTRODUÇÃO

O controle automático de processos industriais tem por objetivo manter as condições adequadas e seguras dos processos produtivos, aumentando a qualidade e diminuindo custos (Garcia, 2017). Uma malha de controle típica de processos industriais é composta por sensor-transmissor, controlador e elemento final de controle.

Os controladores do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) são os mais tradicionais aplicados na indústria, principalmente pelo fato de estar presente em quase todos os equipamentos de controle disponíveis no mercado (Campos; Teixeira, 2010).

Segundo Abramovitch (2019), alunos do ensino médio que conhecem equações diferenciais é exceção e não a regra, conseqüentemente, conceitos de engenharia de controle tornam-se um dos tópicos de maior dificuldade abordados ao longo da graduação. Uma alternativa para facilitar a aprendizagem desses conteúdos são as aulas práticas em laboratórios, que desempenham um papel fundamental pois fornecem uma experiência tangível de engenharia na vida real e a capacidade de aprender por tentativa e erro (Rossiter *et al.*, 2014). Porém, requer das instituições de ensino investimentos em equipamentos e tecnologias. Outra alternativa são os laboratórios virtuais, atendendo simultaneamente uma quantidade maior de alunos, contudo, as atividades de acesso remoto tendem a ser baseadas em ambientes virtuais/matemáticos sem contato com equipamentos reais do mercado de trabalho e, portanto, oferecem uma experiência pseudoautênticas (Rossiter *et al.*, 2019).

Um laboratório de engenharia de controle aplicado a processos industriais deve ser composto por equipamentos que permitam a montagem de uma malha de controle (sensor-transmissor, controlador e elemento final de controle), e infraestrutura que viabilize o funcionamento e a prática de experimentos. Por exemplo, na simulação de controle de nível de líquidos em um processo, além dos equipamentos da malha de controle (bomba ou válvula, sensor de nível e controlador), é preciso uma infraestrutura composta por tanques e tubulações, exigindo da instituição de ensino um local apropriado para instalação, manutenção periódica e investimentos em tecnologias. Desse modo, para viabilizar a prática e o uso do controlador na aprendizagem de técnicas de sintonia e estratégias de controle, se faz necessário uma infraestrutura complexa e custosa.

O objetivo desse trabalho é desenvolver um simulador de processo didático tipo hardware-in-the-loop (HIL) de baixo custo para sistemas de controle SISO (Single Input Single Output), permitindo o uso de um controlador industrial real conectado a um processo virtual, diminuindo os custos com infraestrutura e viabilizando a prática de técnicas de sintonia e estratégias de controle em controladores reais utilizados no mercado de trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Simulador hardware-in-the-loop (HIL)

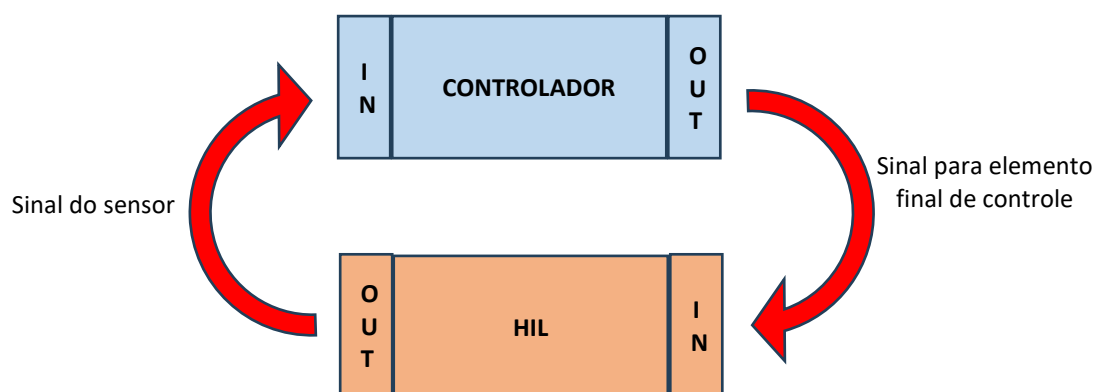
A simulação hardware-in-the-loop (HIL) é uma técnica para realizar testes de maneira abrangente, econômica e repetível. Além disso, o HIL tem sido historicamente usado no desenvolvimento e testes de sistemas complexos e caros, como mísseis táticos militares, sistemas de controle de voo de aeronaves, sistemas de controle de satélites e controladores de reatores nucleares (Ledin, 1999).

Grega (1999) descreveu o conceito HIL implementado como parte experimental do curso de engenharia de controle. O conceito do método HIL consistia na utilização de um modelo de simulação da planta e um controlador industrial. Como resultado demonstrou os benefícios de incorporar este recurso na educação de engenharia de controle e cita algumas vantagens, entre elas: aulas práticas com controladores industriais e ferramentas de programação, capacidade de verificar vários métodos de controle em um curto espaço de tempo e diminuição dos custos em equipamentos de laboratórios.

Uma proposta de HIL aplicado ao ensino na área de controle e automação também foi realizada por Moreira *et al.* (2011), consiste no desenvolvimento de um sistema composto por dispositivos físicos *Foundation Fieldbus* configurados para operar uma estratégia de controle e interagir com o ambiente simulado de uma planta genérica de um processo industrial. A planta é simulada em computador e foi implementada em *LabVIEW*. Apesar de enfrentarem problemas na aquisição de sinal do controlador, os resultados demonstraram que é uma técnica viável, permitindo que estudantes de engenharia aprendam a controlar um processo semelhante ao sistema real.

A conexão entre o HIL e o controlador é apresentada na Figura 1, de modo que a saída do controlador resulta em um sinal de entrada para a simulação, e, a simulação gera um sinal de saída que resulta em um sinal de entrada para o controlador.

Figura 1 – Exemplo de conexão de um hardware-in-the-loop (HIL)



Fonte: Adaptado de Ledin (1999, p.43)

2.2 Controladores industriais

Segundo Ogata (2010), mais da metade dos controladores industriais em uso são controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) ou controladores PID modificados. Como a maioria dos controladores PID são ajustados no local, muitos tipos diferentes de regras de

ajuste foram propostos na literatura. A utilidade dos controles PID reside em sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle.

Quanto ao funcionamento, o controlador tenta corrigir o erro entre uma variável de processo medida e o ponto de ajuste desejado calculando a diferença e, em seguida, executa uma ação corretiva para ajustar o processo de acordo. Um controlador PID controla um processo através de três parâmetros: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D). Esses parâmetros podem ser ponderados ou ajustados para definir seu efeito no processo (Woolf, 2020).

O controlador PID correlaciona a saída do controlador com o erro, a integral do erro e a derivada do erro. Este comportamento do controlador PID é matematicamente ilustrado na equação 1 (Åström; Hägglund, 1995).

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Sendo $u(t)$ o sinal de saída, K o ganho do controlador, $e(t)$ o erro, T_i a constante de tempo da função integral e T_d a constante de tempo da função derivativa.

2.3 Sintonia por curva de reação

Quando um modelo matemático de um sistema está disponível, os parâmetros do controlador podem ser explicitamente determinados. No entanto, quando um modelo matemático não está disponível, os parâmetros devem ser determinados experimentalmente. O ajuste do controlador é o processo de determinação dos parâmetros do controlador que produzem a saída desejada. O ajuste do controlador permite a otimização de um processo e minimiza o erro entre a variável do processo e seu ponto de ajuste. Os tipos de métodos de ajuste do controlador incluem o método de tentativa e erro e os métodos de curva de reação do processo.

Na metodologia baseada na curva de reação, as variáveis que estão sendo medidas são as de um sistema já existente. Uma perturbação é introduzida no sistema e os dados podem então ser obtidos a partir desta curva. Primeiro, permite-se que o sistema atinja o estado estacionário e, em seguida, uma perturbação, é introduzida nele. A porcentagem de perturbação no sistema pode ser introduzida por uma alteração no ponto de ajuste ou na variável do processo. Esses tipos de curvas são obtidos em sistemas em malha aberta, quando não há controle do sistema, permitindo o registro da perturbação. O método da curva de reação do processo geralmente produz uma resposta a uma mudança na função degrau permitindo a medição de vários parâmetros, incluindo: atraso de transporte ou tempo morto, tempo de resposta à mudança e o valor final que a resposta atinge no estado estacionário, ou seja, parâmetros de um modelo de baixa ordem (primeira e segunda ordem).

Na década de 1940, Ziegler e Nichols (1942) desenvolveram dois métodos empíricos para obter os parâmetros do controlador, tornando-se clássicos para ajuste de controladores industriais. Porém, fornecem grande ganho ao controlador e tempo integral curto, o que não é propício para aplicações de engenharia química. O método *Internal Model Control* (IMC) foi desenvolvido por Rivera, Morari e Skogestad (1986), tendo em mente a robustez e a facilidade de ajuste em aplicações industriais. O método IMC refere-se ao uso do modelo da planta na estrutura do controlador e ajuste dos parâmetros para manter o sinal de saída do sistema em malha fechada sem sobressinal (*overshooting*) ou comportamento oscilatório (Woolf, 2020).

Segundo Åström e Hägglund (1995), existem muitos métodos diferentes para encontrar parâmetros adequados dos controladores. Os métodos diferem em complexidade, flexibilidade e na quantidade de conhecimento do processo usado. Existe claramente a necessidade de ter vários tipos de métodos de ajuste, pois há a necessidade de métodos simples, fáceis de usar, intuitivos, que exijam pouca informação e que proporcionem desempenho moderado. Há também a necessidade de métodos sofisticados que forneçam o melhor desempenho possível, mesmo que exijam mais informações e mais cálculos. O método Ziegler-Nichols é insuficiente por não fornecer garantias de desempenho ou robustez, apesar de ser simples e amplamente utilizado. Para os modelos mais complexos, é necessário ter mais informações sobre o processo. Isso pode ser obtido ajustando funções racionais às respostas de frequência ou aplicando técnicas de identificação do sistema. Métodos baseados no cancelamento de polos de processo como o IMC fornecem cálculos simples, mas não são aplicáveis uniformemente. Métodos como o projeto do polo dominante ou os métodos de resposta em frequência são melhores nesse aspecto, mas também são mais exigentes computacionalmente. O ajuste bem-sucedido do controlador não pode ser feito sem conhecimento sobre modelagem de processos e teoria de controle.

De acordo com Ender (1993), mais de 30% dos controladores de processo instalados operam em manual, e mais de 30% das malhas de controle possuem problemas de sintonia ou funcionam mal devido a problemas de equipamentos, que incluem dimensionamento de válvulas e leituras de sensores.

Miller (2000 apud Desborough *et al.*, 2002), classificou o desempenho de vinte e seis mil controladores PID coletados em dois anos em uma grande amostra de indústrias de processo contínuo, como resultado demonstrou que apenas um terço dos controladores foram classificados com desempenhos aceitáveis e dois terços possuem oportunidades de melhorias significativas.

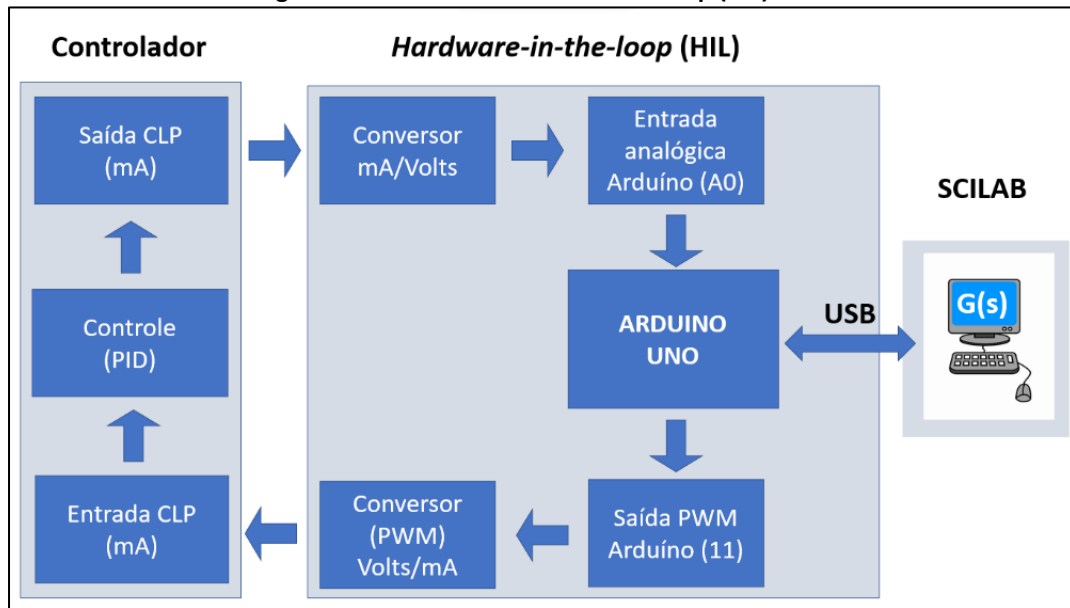
Desse modo, a necessidade de profissionais qualificados na área de engenharia de controle é evidente, sendo fundamental na composição da sua formação a prática de técnicas de sintonia e estratégias de controle em controladores reais utilizados no mercado de trabalho. A proposta desse trabalho, no desenvolvimento de um HIL didático de baixo custo, pode auxiliar as instituições de ensino no desafio de viabilizar aos estudantes uma experiência real durante sua formação profissional.

3 METODOLOGIA

A montagem do HIL (hardware-in-the-loop) foi baseada na plataforma Arduino, encarregado de realizar a comunicação entre o controlador e o software *OSS (Open Source Software)* de computação numérica *Scilab*. Cinco fatores contribuíram para a escolha do Arduino, sendo: ambiente de desenvolvimento gratuito (IDE), tutoriais e materiais de apoio disponíveis para consulta e disponibilizados gratuitamente, grande variedade de circuitos eletrônicos de interface (*shields*), baixo custo do hardware e integração com *Scilab*, que também é um software gratuito. Além desses fatores, esses recursos são de fácil acesso, presentes nas instituições de ensino e amplamente utilizados como materiais didáticos em diversas disciplinas ao longo da graduação.

A comunicação entre o controlador e o HIL é realizada via sinal analógico de 4 a 20 mA, entretanto, a comunicação do software *Scilab* e o HIL se faz por meio de comunicação serial via porta USB, conforme diagrama de blocos representado na Figura 2.

Figura 2 – Conexão hardware-in-the-loop (HIL)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da interface gráfica de programação em blocos para a construção de simulações dinâmicas *Xcos* (aplicativo disponível no software *Scilab*) e o código fonte de licença livre “*toolbox_arduino_v5.ino*”, desenvolvida por Bruno Jofret (Jofret *et al.*, 2019), foi possível estabelecer a comunicação serial entre o software *Scilab* e a placa Arduino.

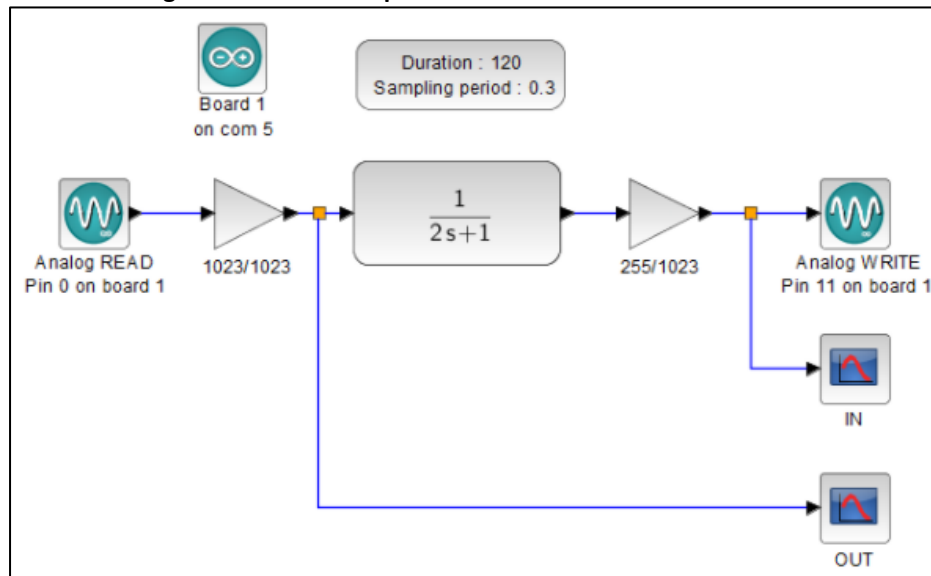
As funções de transferência foram aplicadas ao bloco *CLR*, disponível na opção de sistema de tempo contínuo do aplicativo *Xcos*, este bloco realiza um sistema linear SISO (Single Input Single Output) representado por uma função de transferência racional numerador/denominador.

Também foram utilizados blocos específicos para tratamento dos sinais com a adição de constantes mantendo uma relação diretamente proporcional e variação linear entre os sinais de entrada e saída da função de transferência, para tanto, considerou-se a resolução de 10 bits da entrada analógica do Arduino, permitindo converter valores de tensões entre 0 e 5 V para valores inteiros entre 0 e 1023, e, a resolução de 8 bits da saída PWM do Arduino, permitindo uma combinação de valores entre 0 e 255.

Blocos de comunicação com a placa Arduino e parametrização da aquisição de dados complementam a programação. A Figura 3 apresenta os blocos utilizados do aplicativo *Xcos* do software *Scilab*.

Desse modo, é possível gerar curvas de reações que simulam processos a partir das funções de transferência aplicadas no software *Scilab*, permitindo a utilização de diferentes metodologias de ajuste do controlador e a análise dos resultados de manutenção de uma variável em um determinado valor desejado (*set point*).

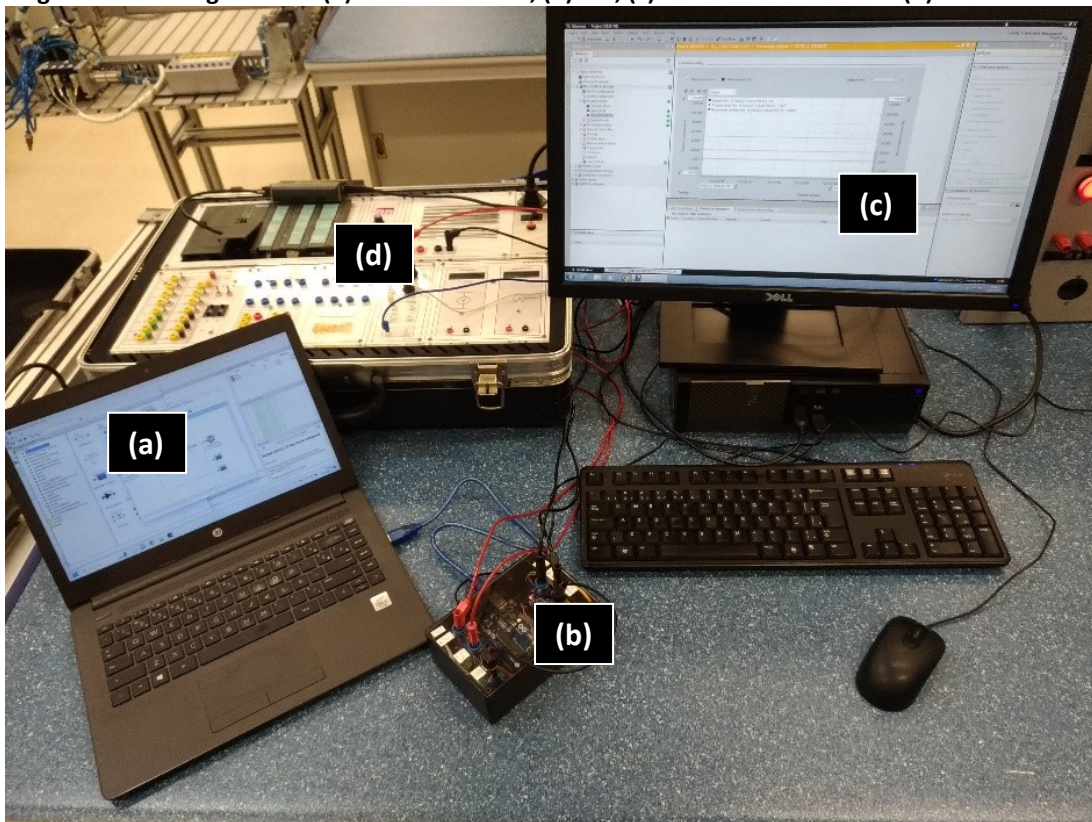
Figura 3 – Blocos do aplicativo Xcos do software Scilab



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um CLP (controlador lógico programável) da SIEMENS, modelo S7-300, foi utilizado como controlador e os dados foram coletados via software *TIA Portal* SIEMENS. A montagem final com a integração dos equipamentos e dos softwares pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Montagem final: (a) Software Scilab, (b) HIL, (c) TIA Portal SIEMENS e (d) CLP SIEMENS

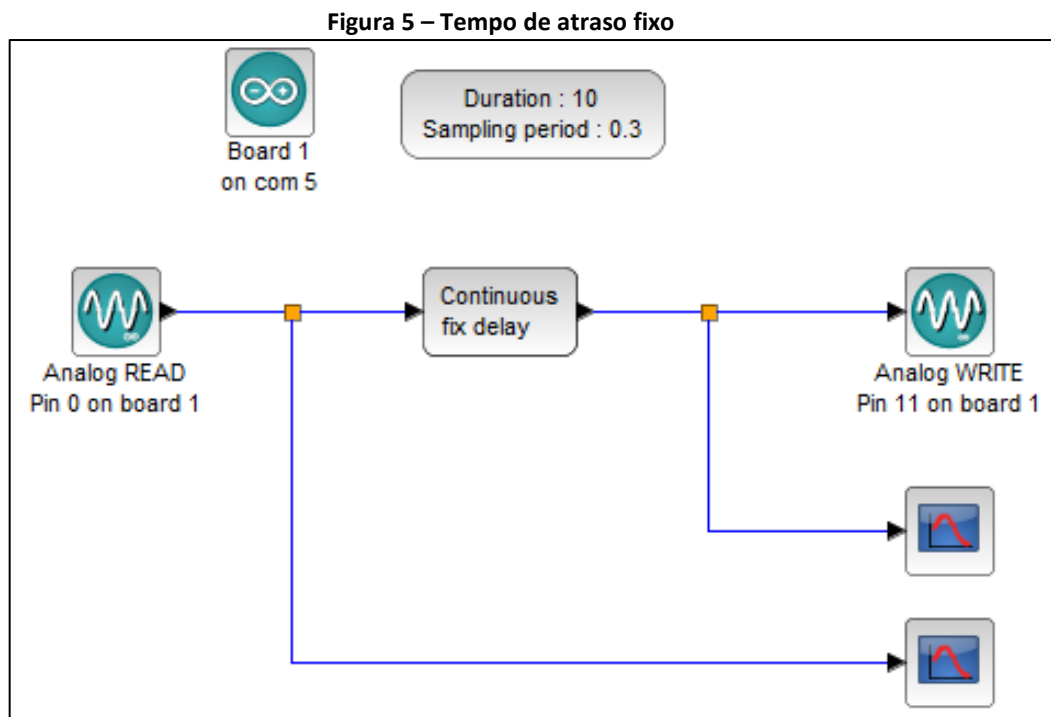


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Jitter e tempo de atraso do sistema

A ação PID do controlador (bloco FB-41 do CLP SIEMENS) foi programada com interrupção cíclica de 300 ms (bloco de organização OB-35 do CLP SIEMENS que permite execução periódica pré-definida). Esse tempo de interrupção foi definido de modo empírico após a elaboração de um programa elaborado no *Tia Portal* SIEMENS capaz de mensurar o tempo de atraso do sinal ao percorrer todo o sistema (CLP + HIL + Scilab) oferecendo o menor valor de *jitter* possível. A seguir, segue descrição do procedimento.

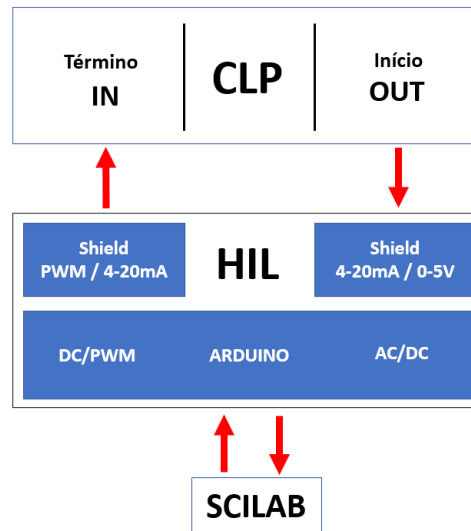
A primeira etapa da programação consiste em enviar um sinal na saída do CLP que seguirá por um conversor (*Shield*) de 4 a 20 mA para 0 a 5 V com destino a entrada analógica do Arduino. É possível adicionar um tempo de atraso fixo (bloco *continuous fix delay* do aplicativo *Xcos*) por meio da comunicação serial entre o Arduino e o software Scilab, conforme demonstrado na Figura 5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o cumprimento do tempo de atraso estipulado no bloco *continuous fix delay* do aplicativo *Xcos*, o sinal será enviado a saída PWM do Arduino, passando por um conversor (*Shield*) PWM para 4 a 20 mA, e, por fim, retornar a entrada do CLP. Desse modo, é possível monitorar o tempo total do percurso do sinal desde a saída do CLP, passando pelo HIL e retornando a entrada do CLP. Um diagrama de blocos detalhado do percurso do sinal através do sistema é apresentado na Figura 6. Observou-se ao longo dessa etapa que o ajuste do tempo de interrupção do bloco OB-35 provoca uma oscilação nos tempos de atraso do sistema medidos via *TIA Portal* SIEMENS, aumentando o *jitter*. Constatou-se que interrupções no bloco OB-35 com valores menores que 100 ms apresentam valor elevado de *jitter*, inviabilizando a aplicação de controle nas simulações.

Figura 6 – Diagrama de blocos do circuito de monitoramento do tempo de atraso do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de evitar interferências e atrasos provenientes do processamento de dados via software, o computador ficou dedicado ao uso exclusivo do software *Scilab* (nenhum outro software operou simultaneamente com o *Scilab*) e desconectado de qualquer conexão com rede (*wifi*, conexão via cabo, etc.).

O tempo de interrupção do bloco OB-35 ajustado em 300 ms permitiu as medições do tempo de atraso do sistema sem apresentar variações ao longo dos testes, ou seja, *jitter* com valor igual a 0%. Foram coletadas 10 amostras para 4 diferentes tempos de atraso fixados no *Scilab* e não houve diferença nos resultados (*jitter* = 0%), conforme dados apresentados na Tabela 1. A média do tempo de atraso do sistema foi de 825 ms.

Tabela 1 – Tempo de atraso do sistema

| Tempo de atraso fixado no <i>Scilab</i> (milissegundos) | Tempo de atraso medido via <i>Tia Portal</i> SIEMENS Média de 10 amostras (milissegundos) | <i>jitter</i> (%) | Diferença entre o tempo de atraso fixado e medido (milissegundos) |
|---|--|-------------------|---|
| 0 | 900 | 0 | 900 |
| 1000 | 1800 | 0 | 800 |
| 2000 | 2700 | 0 | 700 |
| 3000 | 3900 | 0 | 900 |
| Tempo de atraso médio (milissegundos) | | | 825 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Levantamento da curva de reação do processo e ajuste do controlador

Após a conexão dos equipamentos e montagem do sistema, e, considerando o tempo de atraso médio do sistema em 825 milissegundos, adotou-se um procedimento para uso do HIL e ajuste do controlador. O primeiro passo é inserir a função de transferência do sistema que se pretende controlar no *Scilab*, em seguida, obter a curva da reação do processo com aplicação de um degrau em malha aberta, coletar os sinais de entrada e saída da função de transferência utilizando as ferramentas de coleta de dados do *Scilab*, calcular os valores dos parâmetros PID do controlador (K_c , T_i e T_d) utilizando a técnica IMC (*Internal Model Control*), aplicar os valores de ajuste do PID no controlador e coletar os resultados via software *TIA Portal* SIEMENS.

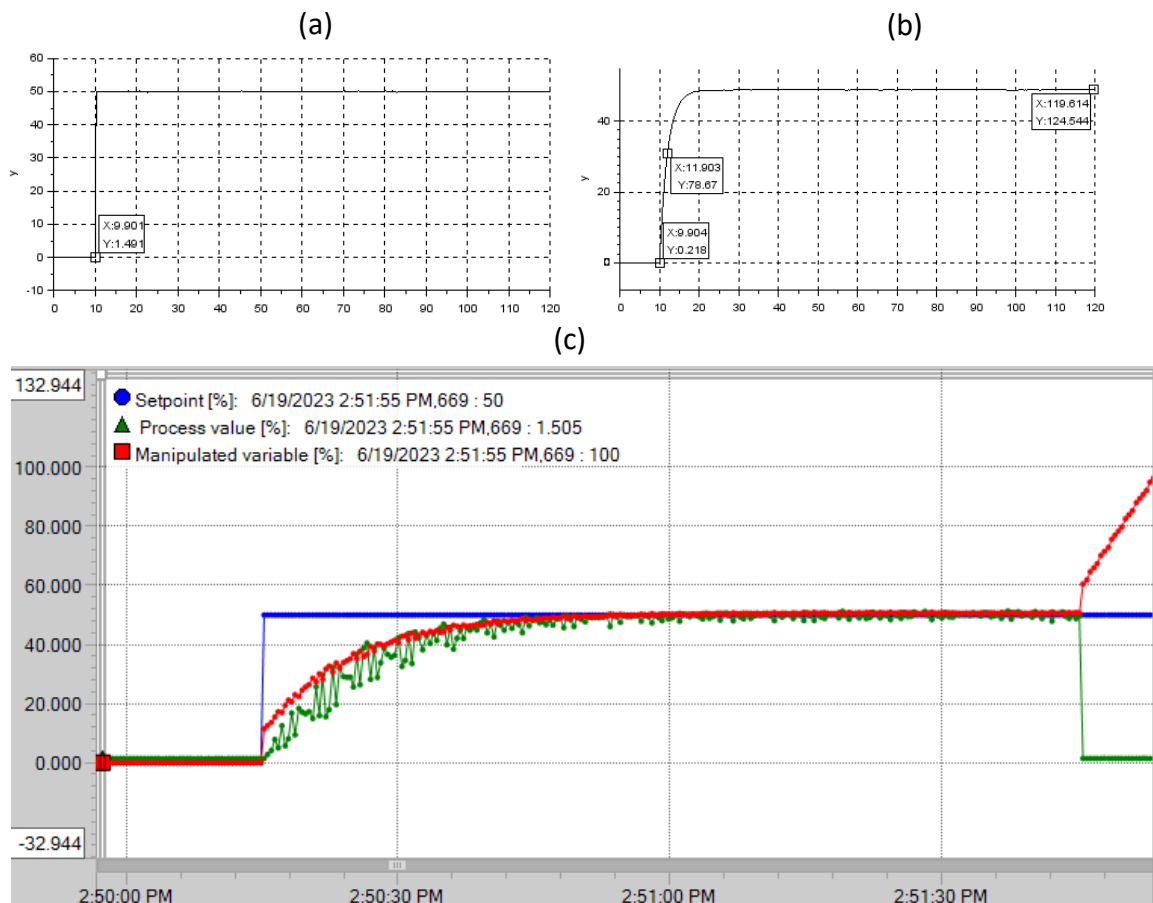
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram aplicadas no HIL funções de transferência de primeira ordem tipo 0 e tipo 1, e, funções de transferência de segunda ordem tipo subamortecido, superamortecido e tipo 1.

Os resultados da função de transferência de primeira ordem tipo 0, especificada na equação 2, podem ser observados na Figura 7: (a) degrau aplicado ao sistema, (b) curva de reação do processo ao degrau e (c) resultado do controle após ajuste do controlador coletado via software *TIA Portal* SIEMENS. Aplicando-se a técnica IMC baseado em Chien-Fruehauf (FRUEHAUF *et al.*, 1994), e, considerando o tempo de atraso do sistema (θ) = 825ms, $K = \Delta PV/\Delta MV = 0,97\%$, τ (63,2% do PV) = 2,00 segundos e $\tau_c = 10$ segundos, obteve-se os valores de ajuste do controlador tipo PI (Proporcional-Integral) com $K_c = 0,19$ e $T_i = 2,00$ segundos.

$$G(s) = \frac{1}{2s+1} \quad (2)$$

Figura 7 – Equação de primeira ordem tipo 0: (a) degrau, (b) curva de reação do processo e (c) resultado do controle coletado via *TIA Portal*

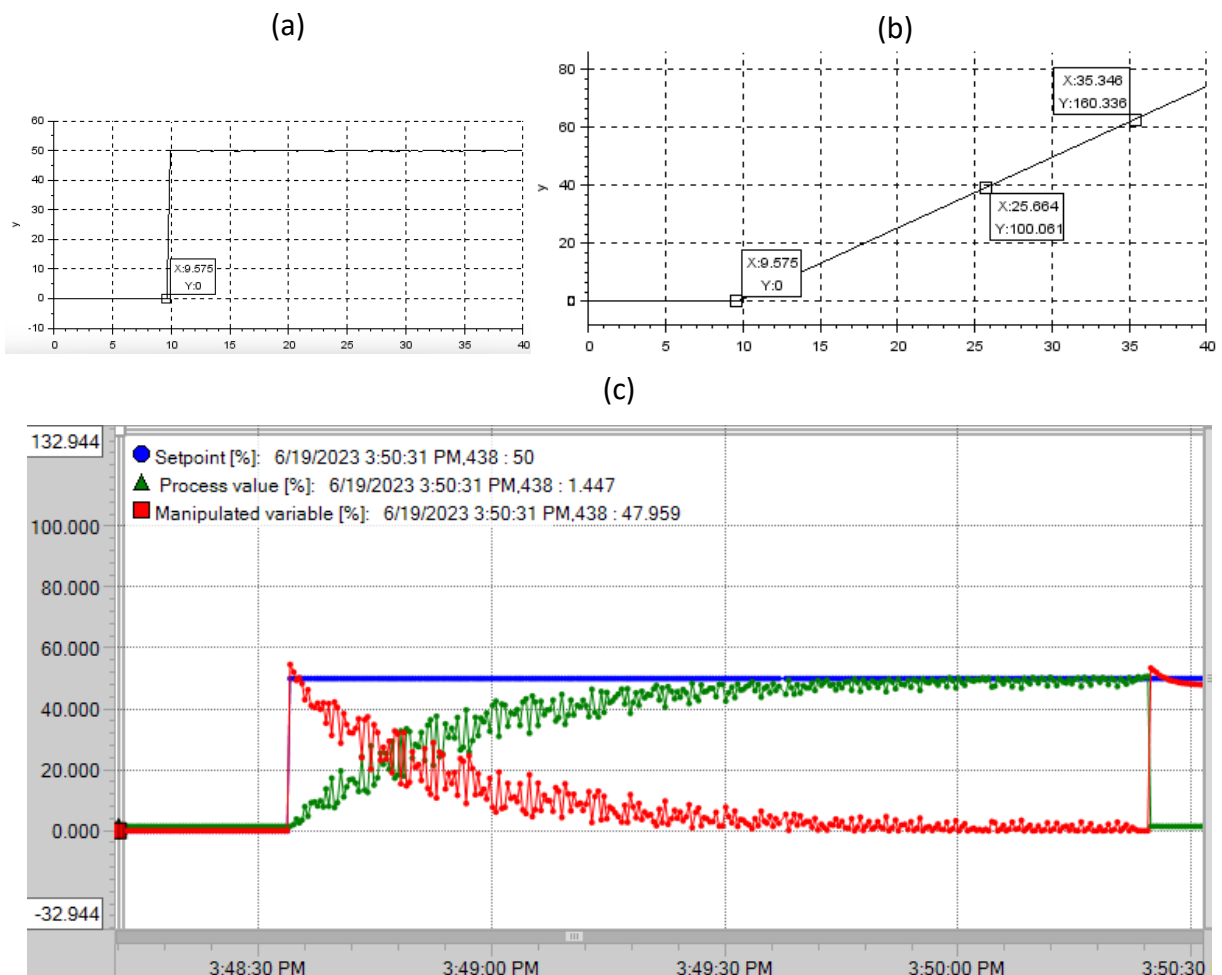


Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando uma função de transferência de primeira ordem tipo 1, especificada na equação 3, obteve-se os resultados demonstrados na Figura 8: (a) degrau aplicado ao sistema, (b) curva de reação do processo ao degrau e (c) resultado do controle após ajuste do controlador coletado via software *TIA Portal* SIEMENS. Aplicando-se a técnica IMC baseado em Lee-Lee-Park (LEE *et al.*, 1998), e, considerando o tempo de atraso do sistema (θ) = 825ms, $k = (\Delta PV / \Delta t) / \Delta MV = 0,05 \%$ e $\tau_c = 20$ segundos, obteve-se os valores de ajuste do controlador tipo PD (Proporcional-Derivativo) com $K_c = 0,98$ e $T_d = 0,01$ segundos.

$$G(s) = \frac{1}{20s} \quad (3)$$

Figura 8 – Equação de primeira ordem tipo 1: (a) degrau, (b) curva de reação do processo e (c) resultado do controlador coletado via TIA Portal

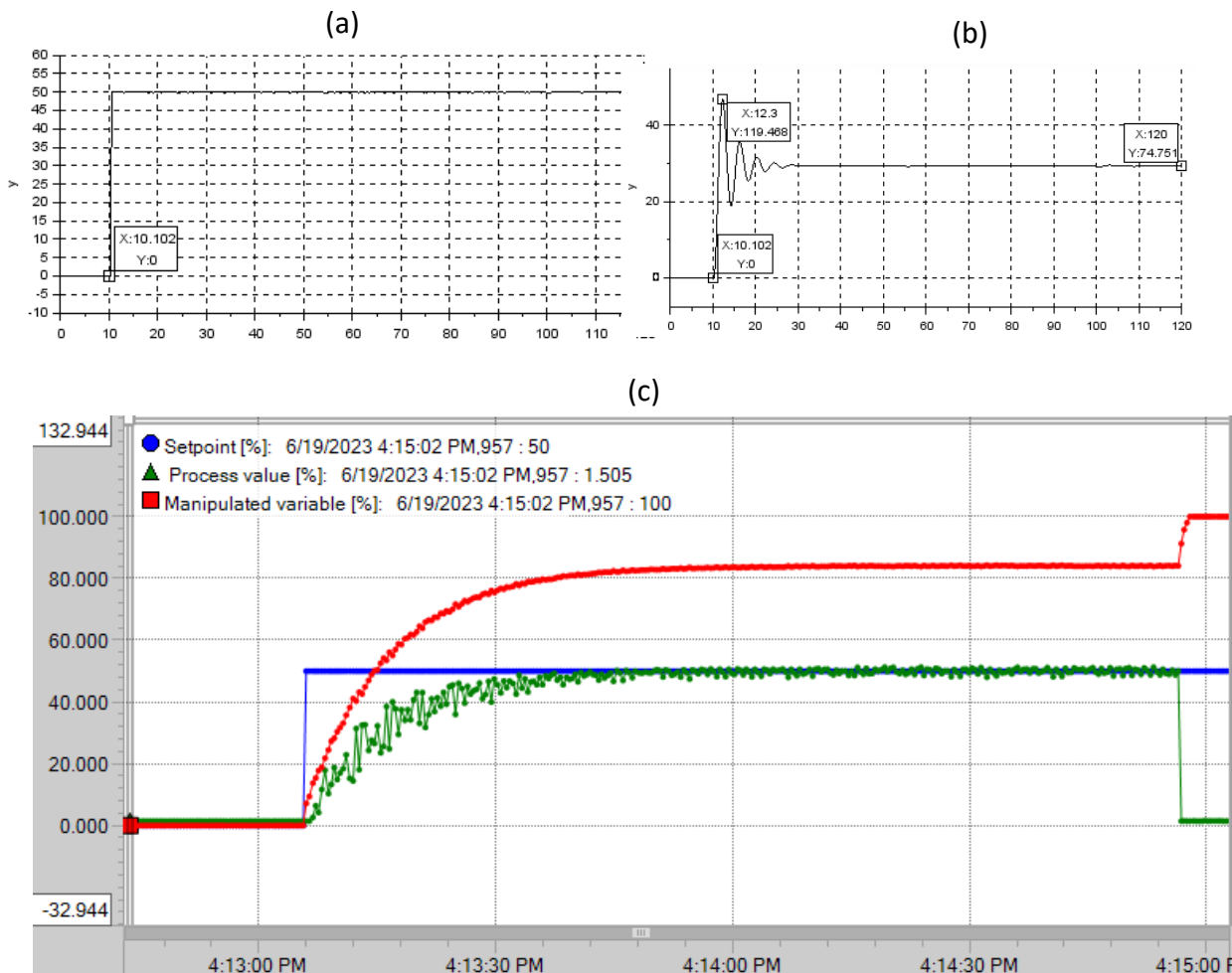


Fonte: Elaborado pelo autor.

A resposta obtida com uma função de transferência de segunda ordem subamortecida, especificada na equação 4, podem ser observados na Figura 9: (a) degrau aplicado ao sistema, (b) curva de reação do processo ao degrau e (c) resultado do controle após ajuste do controlador coletado via software *TIA Portal* SIEMENS. Aplicando-se a técnica IMC baseado em Chien-Fruehauf, e, considerando o tempo de atraso do sistema (θ) = 825ms, ζ = 0,79, τ = 0,42, τ_c = 5 segundos e β = 1,21, obteve-se os ajustes de um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) com $K_c \cdot K$ = 0,11, T_i = 0,67 segundos e T_d = 0,27 segundos.

$$G(s) = \frac{3}{2s^2 + 1s + 5} \quad (4)$$

Figura 9 – Equação de segunda ordem tipo subamortecida: (a) degrau, (b) curva de reação do processo e (c) resultado do controlador coletado via TIA Portal



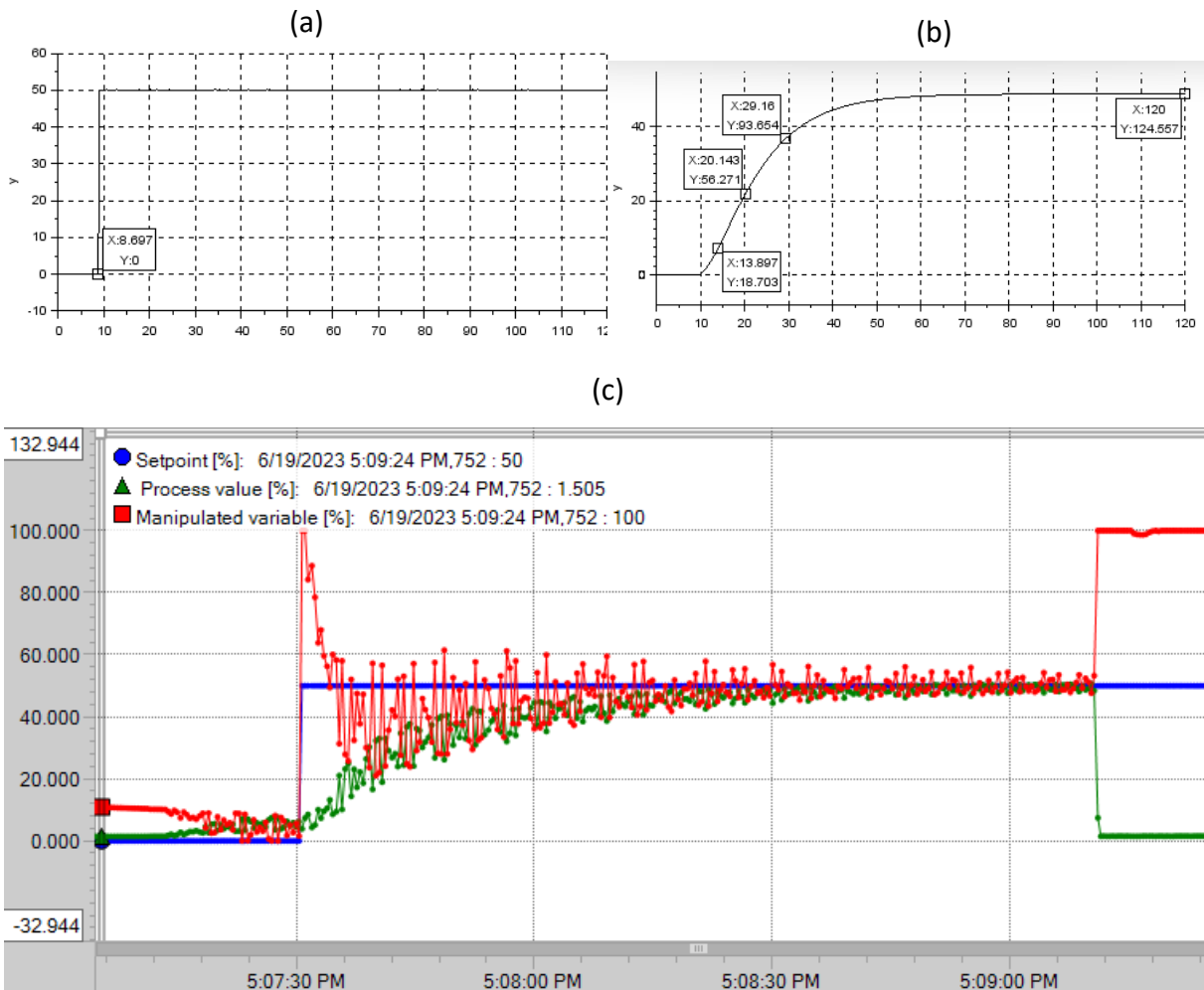
Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando uma função de transferência de segunda ordem superamortecida, conforme especificada na equação 5, os resultados podem ser observados na Figura 10: (a) degrau aplicado ao sistema, (b) curva de reação do processo ao degrau e (c) resultado do controle

após ajuste do controlador coletado via software *TIA Portal* SIEMENS. Aplicando-se a técnica IMC baseada Chien-Fruehauf, e, considerando o tempo de atraso do sistema (θ) = 825ms, τ_1 = 5,20 segundos, τ_2 = 11,44 segundos e τ_c = 20 segundos, obteve-se os ajustes de um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) com K_c = 0,85, T_i = 16,65 segundos e T_d = 3,57 segundos.

$$G(s) = \frac{1}{(10s+1)(5s+1)} \quad (5)$$

Figura 10 – Equação de segunda ordem superamortecida: (a) degrau, (b) curva de reação do processo e (c) resultado do controlador coletado via *TIA Portal*



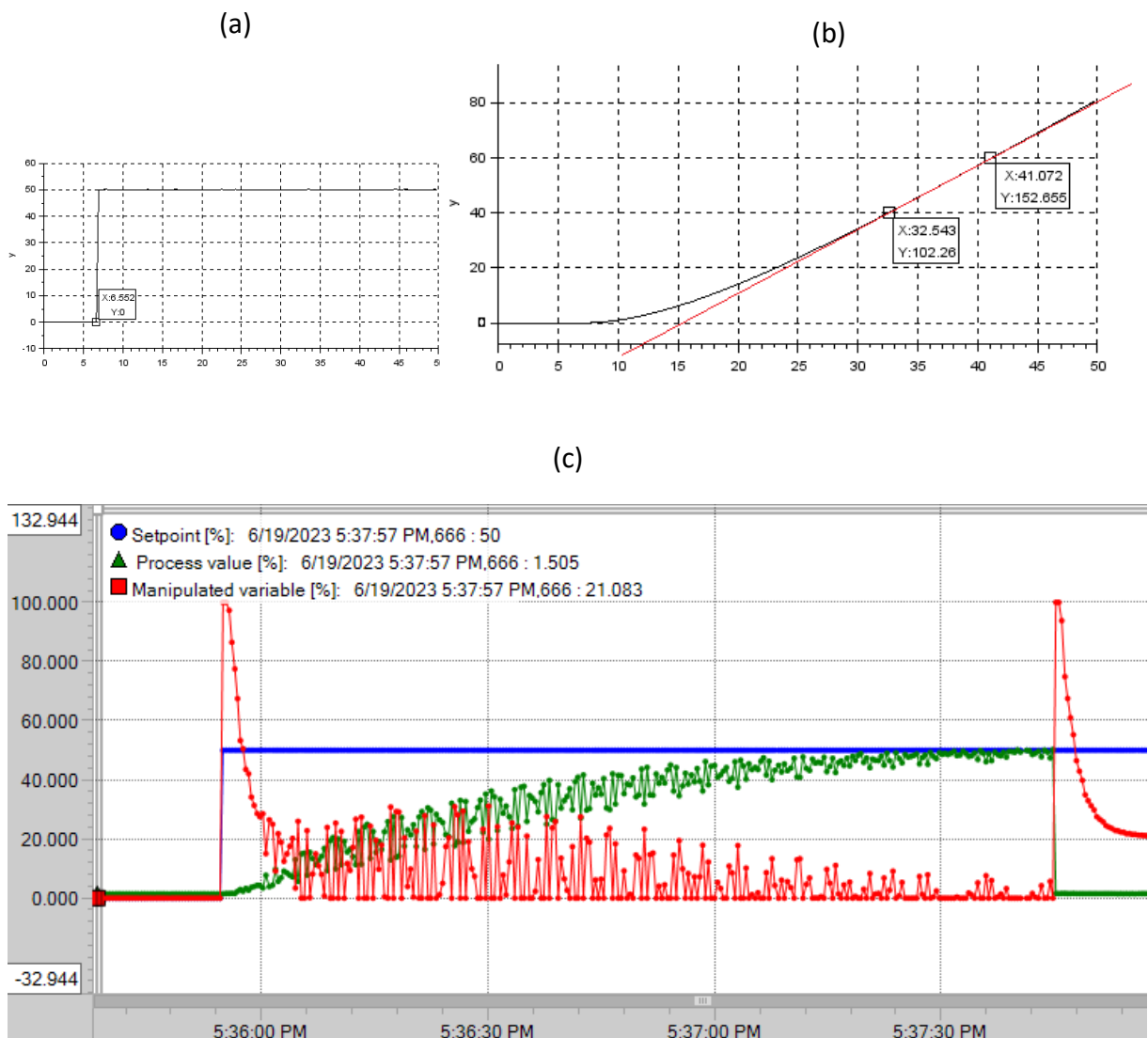
Fonte: Elaborado pelo autor.

A resposta obtida para uma função de transferência de segunda ordem tipo 1, especificada na equação 6, podem ser observados na Figura 11: (a) degrau aplicado ao sistema, (b) curva de reação do processo ao degrau e (c) resultado do controle após ajuste do controlador coletado via software *TIA Portal* SIEMENS. Aplicando-se a técnica IMC baseada

Lee-Lee-Park, e, considerando o tempo de atraso do sistema (θ) = 825ms, $k = (\Delta PV / \Delta t) / \Delta MV = 0,05$, $\tau = 12$ segundos e $\tau_c = 600$. Os ajustes de um controlador PD (Proporcional-Derivativo) ficou $K_c = 0,43$ e $T_d = 12$ segundos.

$$G(s) = \frac{1}{20s(10s+1)} \quad (6)$$

Figura 11 – Equação de segunda ordem tipo 1: (a) degrau, (b) curva de reação do processo e (c) resultado do controlador coletado via TIA Portal



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar dos ruídos (principalmente na variável manipulada), é evidente a efetividade do controlador na manutenção da variável do processo sobre o valor desejado (*set-point*).

O HIL, construído a partir de equipamentos de baixo custo e com softwares gratuitos, permitiu o uso de um controlador industrial real sem a necessidade de sensores, atuadores ou qualquer outro tipo de infraestrutura.

Em um curto espaço de tempo o HIL viabilizou com sucesso a simulação de diferentes funções de transferência, permitindo uma análise gráfica da curva de reação do processo e do comportamento das variáveis a partir dos ajustes aplicados ao controlador.

Após a montagem do HIL e seguindo a metodologia citada nesse trabalho, é possível colocar em prática assuntos relacionados a técnicas de sintonia de malhas e estratégias de controle, cumprindo assim sua função de simulador didático.

Diante desses resultados, outros experimentos podem ser realizados com o objetivo de melhorar a qualidade da resposta, como por exemplo: testar o HIL com outros controladores industriais, utilizar sistemas operacionais de tempo real (RTOS - *Real Time Operating System*), aplicar outros métodos de sintonias de malha de controle, entre outros. Um estudo comparativo do desempenho de estudantes com e sem a utilização do HIL também seria interessante para mensurar o impacto do simulador didático na aprendizagem de estratégias de controle.

5 CONCLUSÃO

O objetivo de desenvolver um simulador didático baseado em HIL capaz de permitir o uso de um controlador industrial e aplicar diferentes estratégias de controle foi atingido.

O simulador proposto descarta a necessidade de sensores, atuadores ou infraestrutura para reproduzir as variáveis de um processo, viabilizando o uso de controladores industriais em uma infraestrutura de baixo custo. Outro fator considerável é o ganho de velocidade na simulação de diferentes funções de transferência com o uso de um controlador industrial real, facilitando a compreensão dos conceitos de engenharia de controle através de ensaios práticos.

Uma etapa desafiadora e fundamental para o sucesso no controle foi o levantamento do tempo de atraso e do *jitter* do sistema, servindo de base para os cálculos dos parâmetros de ajuste do controlador implicando diretamente na estabilidade do *set point*. Considerando o tempo de ciclo do controlador em 300 ms (interrupção cíclica), o simulador HIL é limitado a aplicações de modelos de sistemas com constantes de tempos de no mínimo 600 ms, pois de acordo com o Teorema de Amostragem de Shannon-Nyquist, a frequência de amostragem ω_s deve obedecer ao limitante inferior $\omega_s > 2W$, sendo W a largura de faixa do sistema em malha fechada a tempo contínuo. O tempo de atraso do sistema de 825 ms é uma consideração importante no projeto do controlador, mas não afeta diretamente a frequência de amostragem necessária para evitar o *aliasing*.

A simulação no software *Scilab* ajustada para um período de 2 minutos foi suficiente para demonstrar a capacidade do controlador em manter o *set point* e coletar os resultados após a aplicação de um degrau no sistema.

A utilização do HIL junto ao controlador industrial e ao software de simulação é de rápida adaptação, resultando em uma curva de aprendizagem pequena, tornando as aulas práticas eficientes e produtivas.

O principal diferencial que se fez notório é a viabilização do uso de um controlador industrial conectado a um sistema virtual, oferecendo ao estudante a oportunidade de familiarizar-se com a tecnologia disponível no mercado de trabalho.

REFERÊNCIAS

ABRAMOVITCH, D. Y. Introducing feedback control to middle and high school STEM students, Part 1: Basic Concepts. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 9, p. 171–176, 1 jan. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319305269>. Acesso em: 10 ago. 2023.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers**. 2. ed. Research Triangle Park, Carolina do Norte: Instrument Society of Automation, 1995.

CAMPOS, E. M. C. M. M. DE; TEIXEIRA, E. H. C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. São Paulo: Blucher, 2010.

DESBOROUGH, L.; MILLER, R. Increasing customer value of industrial control performance monitoring -Honeywell's experience. **AIChE Symposium Series**, v. 98, 1 jan. 2002.

ENDER, D. Process control performance: not as good as you think. **Control Engineering**, 1993. Disponível em: https://www.academia.edu/1340822/Process_control_performance_Not_as_good_as_you_think. Acesso em: 14 ago. 2023.

FRUEHAUF, P. S.; CHIEN, I.-L.; LAURITSEN, M. D. Simplified IMC-PID tuning rules. **ISA Transactions**, v. 33, n. 1, p. 43–59, 1 maio 1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0019057894900353>. Acesso em: 16 ago. 2023.

GARCIA, C. **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. São Paulo: Blucher, 2017. v. 1

GREGA, W. **Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education**. 1 fev. 1999.

JOFRET, B.; DEBRAY, Y.; GOUGEON, S. **Arduino toolbox**: Arduino communication through serial. Disponível em: <https://github.com/tanchinluh/arduino/tree/master>. Acesso em: 4 ago. 2022.

LEDIN, J. A. Hardware-in-the-loop simulation. **Embedded Systems Programming**, v. 12, p. 42–62, 1999.

LEE, Y. et al. PID controller tuning for desired closed-loop responses for SI/SO systems. **AIChE Journal**, v. 44, n. 1, p. 106–115, 1998. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.690440112>. Acesso em: 27 jul. 2023.

MOREIRA, E.; PANTONI, R.; BRANDÃO, D. Equipment Based on the Hardware in the Loop (HIL) concept to test automation equipment using plant simulation. **Practical Application and Solutions Using LabVIEW™ Software**, Folea Silviu (Ed.), p. 133–152, 2011.

OGATA, K. **Modern control engineering**. 5. ed. Boston: Prentice-Hall, 2010.

RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. Internal model control: PID controller design. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, v. 25, n. 1, p. 252–265, jan. 1986. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/i200032a041> . Acesso em: 14 ago. 2023.

ROSSITER, J. A. et al. Opportunities and good practice in control education: a survey. *In*: IFAC WORLD CONGRESS, 19., v. 47, n. 3, p. 10568–10573, 1 jan. 2014. **[Proceedings...]**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016432921>. Acesso em: 21 jun. 2023.

ROSSITER, J. A. et al. Evaluation and demonstration of take home laboratory kit. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 9, p. 56–61, 1 jan. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319304598>. Acesso em: 10 ago. 2023.

WOOLF, P. **Chemical process dynamics and controls**. Michigan: University of Michigan, 2020. Disponível em: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_\(PID\)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.03%3A_PID_Tuning_via_Classical_Methods) . Acesso em: 26 jul. 2023.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. **Journal of the Society of Automotive Engineers**, v. 41, p. 759-768, 1942. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-abstract/64/8/759/1155342/Optimum-Settings-for-Automatic-Controllers> . Acesso em: 21 jun. 2023.

Sobre os Autores

ⁱ Ricardo Fonte Marinheiro



Possui mestrado em Engenharia Elétrica pela UFABC (2017), pós-graduação em Automação e Controle pela Faculdade SENAI São Paulo (2022), pós-graduação em Engenharia Clínica pelo IEP do Hosp. Albert Einstein (2008) e graduado em Tecnologia em Saúde pela FATEC (2004). Atualmente é instrutor no SENAI e professor na FATEC, atuando nas áreas de sistemas biomédicos e automação industrial.

<https://orcid.org/0009-0000-8335-0513>

ii Daniel Barbuto Rossato

Possui doutorado em Engenharia Eletrônica e Computação pelo ITA (2022), mestrado (2009) e bacharelado (2002) em Engenharia Elétrica pela EPUSP. Atualmente é docente na Faculdade SENAI São Paulo – Campus Mariano Ferraz, atuando nas áreas de Sistemas e Controle, Internet das Coisas, Redes Neurais Artificiais, Robótica e Segurança. Tem experiência em manutenção em sistemas de automação industrial.

<https://orcid.org/0000-0003-1654-3424>

iii Pedro André Braga de Oliveira

Possui graduação em Matemática Aplicada e Computacional com habilitação em sistemas e controle pela Universidade de São Paulo - USP (2009), especialização em Ciência de Dados (Big Data Analytics) pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (2019). Atualmente é professor da Faculdade SENAI São Paulo “Mariano Ferraz”.

<https://orcid.org/0009-0006-3195-1759>