Plataforma de Ensino Experimental: Uma Solução por Abordagem via IoT

Erick N. M. Alves [*] **João V. T. Santos** [*] **Robson R. T. Júnior** [*]
Lucas S. Oliveira [*,**]

[*] *Curso de Engenharia Mecatrônica, CEFET-MG, Campus Divinópolis, MG, (e-mail: erick.alves@aluno.cefetmg.br, joaojv497@hotmail.com, robson@aluno.cefetmg.br)*
[**] *Departamento de Engenharia Mecatrônica, CEFET-MG, Campus Divinópolis, MG, (e-mail: lqsoliveira@cefetmg.br)*

Abstract: The current educational landscape presents a considerable challenge when it comes to teaching and learning concepts, theories, and techniques related to experimental teaching activities, especially in engineering and science. To overcome the difficulties encountered during experimental activities and to facilitate the practical application of theoretical concepts, we propose the development of a teaching platform for use in control disciplines present in engineering. The solution comprises both hardware and software, with features and functions designed to support didactic experiments in modeling activities (open-loop) and closed-loop control via PID controllers. The proposed device includes analog and digital signal acquisition, data storage, and a direct current load drive system. The device's embedded programming, written in the C language, provides the user with a set of functions to explore the resource according to their needs. We evaluated the proposed solution in a coupled set of motors (actuator/generator) and verified sensor readings, open and closed loop operation. The results obtained indicate that the device can be a promising tool in practical/experimental disciplines, mainly related to systems modeling and the study of PID controllers.

Resumo: O complexo cenário educacional vem se tornando cada vez mais um desafio maior no processo de ensino e aprendizagem de conceitos, teorias e técnicas diretamente relacionadas as atividades experimentais de ensino, principalmente para áreas de ensino que contemplam as engenharias e ciências. A fim de mitigar os obstáculos presentes em atividades experimentais, e possibilitar a aproximação dos conceitos teóricos com a realidade prática, é proposto neste trabalho o desenvolvimento de uma plataforma didática para uso em disciplinas de controle presente nas engenharias. A solução, consiste de *hardware* e *software*, com características e funções para aplicação em experimentos didáticos de atividades de modelagem (acionamento malha aberta) e controle em malha fechada via controlador PID. O dispositivo proposto contempla a aquisição de sinais analógicos, digitais, armazenamento de dados e sistema de acionamento de carga de corrente contínua. A programação embarcada, implementada em linguagem C, oferece ao usuário um conjunto de funções prontas para exploração do recurso diante sua necessidade. A solução proposta é avaliada em um conjunto acoplado de motores (atuador/gerador), onde verifica-se as leituras dos sensores, operação em malha aberta e fechada. Os resultados obtidos indicam que o dispositivo pode ser aplicado como uma promissora ferramenta no auxílio de disciplinas prática/experimental relacionadas principalmente à modelagem de sistemas e ao estudo de controladores PID.

Keywords: Education; Instrumentation; Internet of Things; Didactic tool; MQTT.
Palavras-chaves: Ensino; Instrumentação; Internet das coisas; Plataforma didática; MQTT.

1. INTRODUÇÃO

No cenário educacional contemporâneo, a integração de tecnologias emergentes tem sido fundamental para aprimorar a eficiência no processo de ensino e aprendizagem (Mouha, 2021). Diante de um mundo cada vez mais imerso em automação e enorme volume de dados digitalizados, a educação em engenharia e ciências, precisa novamente se atualizar. Fato este, que resulta em uma vasta demanda por métodos práticos e interativos que se apliquem ao ensino de conceitos complexos (Führ, 2022; Filgueira et al., 2023). Nesse contexto, o ensino experimental de conteúdos abordados em disciplinas que se dedicam ao ensino de técnicas de modelagem e controle automático em malha fechada, torna-se fundamental para a formação de profissionais capazes de projetar, analisar e otimizar sistemas automáticos em diversas aplicações industriais e comerciais (Villas Boas and Mattasoglio Neto, 2011). Diante de tal demanda, surge como solução educacional a utilização de plataformas de ensino ou kits didáticos que emergem como um importante recurso, capaz de pro-

porcionar experiências práticas essenciais na compreensão desses conceitos e técnicas (Menekse et al., 2013).

Entretanto, a condução do ensino experimental exige que o corpo docente e discente enfrentem significativos desafios. Questões como disponibilidade de recursos acessíveis, complexidade de configuração e limitação de experimentação práticos, representam barreiras para a efetiva transmissão de conhecimento nessas áreas (Bacich and Moran, 2017). Além disso, as restrições orçamentárias e a falta de flexibilidade em relação às diferentes configurações de plantas didáticas constituem desafios adicionais que precisam ser superados (Marcia Regina Carletto, 2009). Em ordem de mitigar esses obstáculos comuns presentes nas atividades de ensino experimental, diversos trabalhos têm buscado apresentar alternativas e soluções que possibilitem a oferta de um ensino de qualidade. Em Santana (2018) é proposto o desenvolvimento de uma bancada didática que explora a dinâmica e mecânica para a implementação do controle de posição angular de uma haste, essa abordagem visa aprimorar a qualidade do ensino, facilitando o entendimento dos conceitos e procedimentos em controle digital. Já em Fernandes et al. (2019), destaca-se a criação de um sistema didático focado no controle de nível em um tanque, esse sistema integra tanto *hardware* quanto *software* especificamente projetados para facilitar o ensino de controle analógico. Por sua vez, dos Santos Silveira et al. (2019) descreve a construção de uma bancada didática de baixo custo para o controle interno de temperatura de uma caixa de isopor, esse projeto incentiva os estudantes a aplicarem seus conhecimentos teóricos em um contexto prático, utilizando um sistema físico real para reforçar o aprendizado na área de controle. Por fim, em Neto et al. (2023) é desenvolvido uma plataforma didática de ensino baseada na dinâmica e mecânica de um aeropêndulo, em que é desenvolvido um *hardware* para ensino de controle analógico em cursos de engenharia.

Nesse contexto, e motivados pelas soluções apresentadas pelos trabalhos mencionados, é proposto neste trabalho o desenvolvimento de uma plataforma didática, composta por *hardware, firmware* e interface de interação com o usuário, que apresente como principais características: versatilidade de uso (possibilitando sua aplicação em diversos processos ou sistemas de controle), baseada em princípios e conceitos de internet das coisas (*internet of things – IoT*), aquisição de sinais analógicos e digitais, sistema para controle e atuação em cargas de corrente contínua, capacidade de armazenamento de dados, e visualização em tempo real do comportamento das principais variáveis (sinal de saída, estados e/ou sinal de controle) relacionados ao processo ou sistema em estudo. Em contraste com as soluções apresentadas por Fernandes et al. (2019); Neto et al. (2023), a plataforma proposta busca criar um instrumento de ensino para as disciplinas de controle, com foco na obtenção de dados para identificação do modelo dinâmico local do sistema e teste/validação de controladores proporcional-integral-derivativo (PID) projetados pelas mais diversas técnicas do controle clássico ou moderno, que possa ser aplicadas a sistemas monovariáveis (*single-input single-output – SISO*). O dispositivo foi avaliado experimentalmente em um sistema de motores acoplados (conjunto motor/gerador) (Norwey-Rico and Morato, 2021). Nesses experimentos, são avaliados o processo de aquisição de sinais analógico, sinal de controle entregue à carga para condições de malha aberta , bem como experimentos para obtenção e validação do modelo local. Além disso, é disponibilizado ao leitor, um vídeo tutorial com todas as etapas de uso da plataforma didática. Os resultados obtidos sugerem que a solução proposta pode se tornar uma ferramenta importante no processo de ensino de controle nos cursos de engenharia.

Este trabalho está organizado como segue: na Seção 2 é apresentada a contribuição principal deste trabalho, onde apresenta-se os projetos de *hardware, firmware* e interface homem-máquina (IHM). Na Seção 3 são realizados os experimentos em que valida-se o uso do sistema proposto em um conjunto de motores acoplados. Por fim, na Seção 4 são feitas as conclusões e indicadas as perspectivas de continuidade da pesquisa.

2. A PLATAFORMA DE ENSINO IOT

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento do projeto da plataforma didática baseada nos conceitos de IoT. Nesse sentido, inicia-se a Seção com a apresentação do desenvolvimento do projeto de *hardware*. Na sequência são introduzidas as abordagens de programação para o *firmware* e interface de comunicação com o usuário.

2.1 Projeto de Hardware

O hardware proposto é composto por dois circuitos principais: o circuito de condicionamento e processamento de sinais, e o circuito de acionamento de carga. Conforme pode-se verificar pelo diagrama esquemático introduzido na Figura 1. O circuito de condicionamento apresentado, possibilita ao usuário aplicar a plataforma IoT proposta em sistemas de controle que possuam sensores analógicos e/ou digitais. Além do que, realizar o acionamento de cargas de corrente contínua (CC). É importante observar, que as características do *hardware* visam atender as necessidades para experimentação em laboratório, de técnicas de controle dedicadas ao projeto de controladores PID e modelagem/identificação de sistemas monovariáveis.

Conforme apresentado no diagrama da Figura 1, a plataforma baseia-se em um circuito integrado (CI) do tipo sistema em um chip (*system on chip – SoC*), em que optou-se pelo microcontrolador ESP32 em sua versão modular DEVKIT V1. Essa escolha baseia-se nas características necessárias e desejáveis desse microcontrolador para a solução proposta, dentre as quais vale destacar: arquitetura com dois núcleos de processamento, conversores analógico digital com resolução configurável de até 12 *bits*, *timers* de 64 *bits* dedicados, *general purpose input output (GPIO)* configurável para sinal de modulação por largura de pulso *(pulse width modulation – PWM)* de até 13 *bits*, módulo de conectividade sem fio *Wi-Fi*, entre outros. Nesse sentido, o circuito do microcontrolador é alimentado por uma fonte CC externa, V_1, de tensão mínima de 9 V e máxima de 35 V que é submetido ao circuito do regulador de tensão construído a partir do uso do LM7805. Conforme verifica-se no circuito esquemático, o circuito de regulação de tensão dispõe de chave de acionamento independente e proteção contra sobrecorrente via fusível. Desse modo, fica estabelecido que a potência máxima desse circuito limita-se à 5 W. Sobre esse circuito é importante ressaltar que o

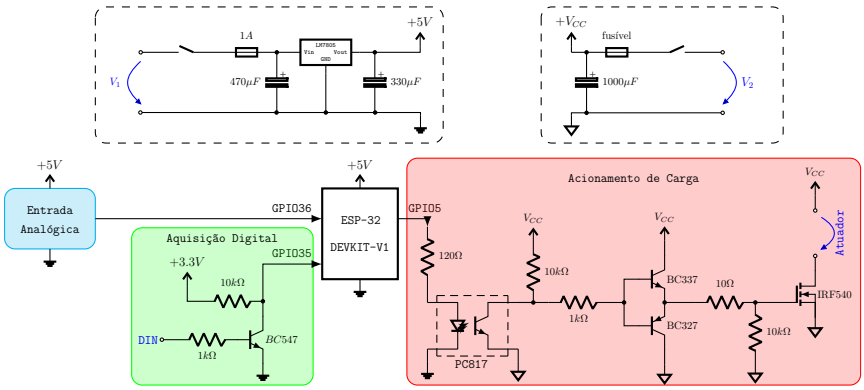

Figura 1. Diagrama esquemático geral do *hardware*.

mesmo é dedicado a alimentação dos sensores e geração do sinal de acionamento da carga, além do microcontrolador. Há ainda um isolamento óptico entre o circuito de lógica e acionamento de carga, assegurando alta impedância galvânica e prevenindo possíveis interferências mútuas entre as etapas citadas.

O acionamento do atuador é realizado via sinal PWM emitido pelo ESP32 e utilizado no acionamento do *mosfet* de potência. A especificação do *mosfet* (canal N) se dará de acordo com a carga a ser acionada, que demandará características específicas, como a corrente máxima exigida e a atenuação da chave em função da frequência de chaveamento, por exemplo. Para a aplicação desenvolvida, optou-se pelo modelo IRF540, que atende às especificações desejáveis e é facilmente encontrado. O componente, por sua vez, realiza o acionamento direto da carga em uma configuração de fonte comum. Nesse circuito, o sinal lógico de PWM ($+3,3\ V$ de amplitude, quando em bit alto) é isolado do circuito de potência via uso do optoacoplador PC817. Esse sinal isolado é então encaminhado ao circuito de acionamento do IRF540, por meio do *driver totem* de meia ponte bipolar e não inversor (Balogh, 2018), montado com os transistores BC337 e BC327. Como todos os *drivers* externos, esse arranjo eletrônico consegue lidar com picos de corrente e perdas de energia tornando as condições operacionais do controlador PWM mais favoráveis. A implementação do arranjo atua como um *gate driver* e soluciona eventuais problemas de acionamento devido a capacitância de acoplamento do *gate* do *mosfet*, assegurando assim, melhores condições para o correto chaveamento via IRF540. Note que o circuito de potência deve ser alimentado por uma fonte externa independente, V_2, com tensão mínima de $12\ V$ e potência ajustada de acordo com a exigência da carga. Esse circuito, conta com chave de acionamento independente e proteção contra sobrecorrente a ser dimensionada de a cordo com a necessidade da carga, via ajuste do fusível de proteção destinado a esse circuito.

Por sua vez a aquisição do sinal digital, DIN, é realizado com o auxílio de um transistor BC547 em configuração de emissor comum, com um resistor de polarização na base, e um resistor *pull-up* para o nível lógico alto do ESP32. O uso do transistor nesse circuito possibilita que o usuário possa adotar um sensor digital que opere em nível lógico de até $+5\ V$, assegurando sempre uma tensão máxima de $+3,3\ V$ ao microcontrolador.

Por fim, é introduzido na Figura 2 os circuitos de condicionamento do sinal analógico. Esse circuito foi desenvolvido para adequar sinais analógicos positivos diversos. Nesse sentido, conforme pode-se observar na Figura 2(a), o sinal analógico, AIN, deve ser ajustado de modo a permanecer numa faixa de tensão não saturada pelo amplificador operacional, por meio do *trimpot* (ATT_IN), que é responsável pela atenuação do sinal de entrada. Diante disso, o sinal atenuado é submetido a um *buffer* e direcionado a um arranjo diferencial (Sedra and Smith, 2007), que possibilita com auxílio do *trimpot* ($OFFSET$), adequar o sinal à faixa de operação do ESP32, $150\ mV$ a $1750\ mV$ (para um nível de atenuação de $6dB$ no conversor A/D do ESP32) (Expressif Systems, 2019). Sendo na sequência enviado ao circuito de amplificação apresentado na Figura 2(b). Esse circuito é projetado para amplificar sinais em que o máximo valor é inferior aos $1750\ mV$, por meio do *trimpot* ($GAIN$). Por fim, o sinal é submetido ao filtro ativo passa baixa em topologia *Sallen-Key* introduzido na Figura 2(c). Para esse circuito, a frequência de corte, f_c, é dada pela relação (Aguirre, 2013): $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$. Fixa-se o valor das capacitâncias $C_1 = C_2 = 100\ nF$, assim como a resistência $R_2 = 100\ k\Omega$. O *trimpot* ($CUTOFF$) de valor típico de $100\ k\Omega$ permite o ajuste de R_1, possibilitando uma faixa para a frequência de corte tal que, $15,9\ Hz < f_c < 5\ kHz$. Assim, pode-se deixar a banda de passagem mais estreita possível, de a cordo com o sistema a ser controlado: $f_c = \frac{10}{\tau}$, em que f_c é a frequência de corte ideal para o filtro e τ é a constante de tempo do sistema (Aguirre, 2014).

2.2 Topologia de Controle, Comunicação e Armazenamento de Dados

A arquitetura de controle e gestão dos serviços presentes nas ações entre usuário e dispositivo (*hardware*), baseia-se em uma aplicação ASP.NET Core que atuará como servidor. Essa estrutura, organizada em micro serviços possibilita que o servidor opere como um *message broker* intermediando as ações de publicação/assinatura (*"pub/sub"*) entre IHM, *hardware* e armazenamento de dados em arquivo, conforme representado pelo diagrama introduzido na Figura 3. Conforme verifica-se no diagrama esquemático da Figura 3, o servidor comunica-se com o *hardware* via protocolo de comunicação MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), pelo qual receberá os dados mensurados pelos sensores e enviará as configurações de operação do *hardware*. Além disso, o servidor é configurado para trabalhar

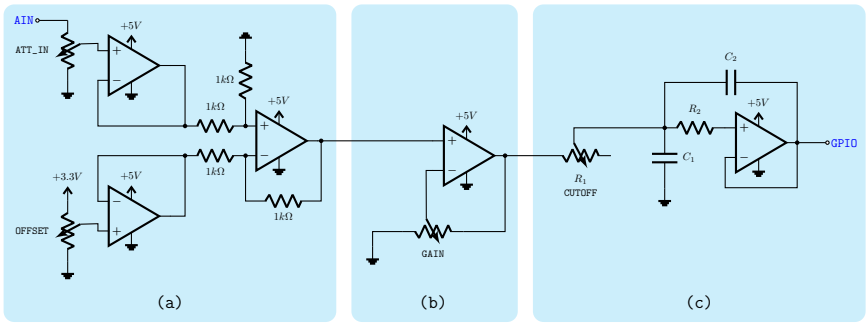

Figura 2. Circuito de condicionamento para leituras analógicas. Este circuito é composto por três estágios: **a)** Atenuação de entrada, *Buffer* e *offset*; **b)** Ganho; **c)** Filtragem.

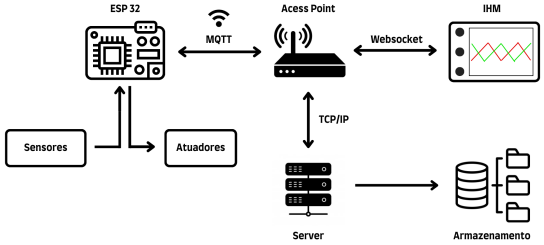

Figura 3. Diagrama esquemático da topologia de controle, comunicação e armazenamento de dados.

com uma porta dedicada ao MQTT e outra ao WebSocket, possibilitando conexões de ambos os tipos de comunicação. Isso é essencial para viabilizar o envio bidirecional de dados entre o *hardware* e a IHM, uma vez que nativamente os navegadores web não suportam o protocolo MQTT. Tal integração se dá por meio de uma camada de abstração, que converte mensagens MQTT em eventos *WebSocket* e vice-versa. Essa abordagem assegura que as informações essenciais de configuração do *hardware*, bem como os alertas ativados durante a execução do experimento sejam transmitidos prontamente para a IHM, enquanto comandos do usuário são enviados aos dispositivos via MQTT. A adoção dessa camada de abstração, torna viável a interação entre dispositivos do experimento (sensores e atuadores) e a interface com o usuário. Além disso, tal estratégia de habilitar o canal de comunicação bidirecional em tempo real entre o servidor e a interface web, torna-se uma solução acessível para qualquer navegador moderno, sem maior custo operacional ao usuário.

A escolha para uso do protocolo MQTT entre *hardware* e servidor, se faz diante as características do protocolo, o qual se apresenta como uma solução eficaz para aplicações do tipo IoT, em que se encontram etapas de monitoramento e/ou controle de sistemas eletromecânicos em ambientes industrial ou acadêmico. Além do que, sua arquitetura de publicação/assinatura promove uma comunicação eficiente entre os dispositivos, assegurando baixo *overhead* de rede (processamento excessivo que prejudica o desempenho do sistema) e entrega de mensagens com ínfima latência (Cortez et al., 2022). Por fim, outra característica de destaque do protocolo MQTT, consite do fato de operar sobre TCP/IP, juntamente com o suporte a diferentes níveis de qualidade de serviço (QoS). Essa funcionalidade, assegura a integridade e confiabilidade na entrega de mensagens essenciais para a otimização e resposta rápida e precisa de sistemas automatizados. Portanto, no contexto da plataforma de ensino proposto neste trabalho, a utilização de um endereço do tipo *internet protocol –IP* apresenta uma vantagem adicional, uma vez que o servidor e *hardware* estejam na mesma rede. Isso não apenas proporciona uma comunicação mais rápida e eficiente, mas também elimina a necessidade de custos associados ao uso de serviços de nuvem para armazenamento e processamento de dados.

O protocolo WebSocket desempenha papel fundamental na comunicação entre a IHM e o servidor, especialmente quando ocorre por meio de um navegador. Esse protocolo é essencial para permitir interações contínuas e em tempo real, o que é crucial para aplicações que demandam atualizações imediatas, como é o caso de painéis de controle e sistemas de monitoramento. Uma limitação enfrentada é que o servidor não pode iniciar comunicações diretamente com as páginas web. Para contornar isso, o navegador estabelece a conexão, criando uma ponte que facilita a troca de mensagens sem necessitar de múltiplas requisições HTTP. Isso não só minimiza a latência e o *overhead* na comunicação, mas também evita custos elevados e degradação no desempenho do navegador, visto que o WebSocket é um protocolo leve e rápido.

Para o armazenamento de dados, foram utilizados comandos enviados pela IHM, que instruem o servidor sobre quando iniciar e cessar o armazenamento de dados. O servidor, ao receber o comando para iniciar, salva os dados de forma incremental, em pacotes, armazenando-os temporariamente em memória até atingir volume predefinido. Este método assemelha-se ao funcionamento de um *cache*, que, ao atingir sua capacidade máxima, transfere os dados para um arquivo de texto, em batelada. Essa abordagem de persistência de dados minimiza a sobrecarga na memória RAM do servidor e garante que a alta frequência e taxa de transmissão dos dados não impactem negativamente o desempenho da aplicação.

2.3 Programação do Firmware

Nessa seção é apresentada uma breve descrição do algoritmo embarcado no microcontrolador ESP32, realizado em linguagem de programação *C*, com auxílio do ambiente de desenvolvimento *ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework)*, conforme apresentado pelo pseudo-código descrito no Algoritmo 1.

Diante da rotina estabelecida pelo pseudo-código apresentado no Algoritmo 1, vale destacar as configurações

Algoritmo 1 : Pseudo-código do *firmware* embarcado no ESP32 DEVKIT-V1.

```
Incluir bibliotecas necessárias
Definir constantes para canais ADC, GPIOs, parâmetros do sistema e outras configurações
Definir estruturas para buffers de dados

função MAIN
    Configurar Wi-Fi
    Configurar MQTT
    Configurar ADC
    Configurar PWM
    Criar timer periódico
    Criar e iniciar tarefas de envio de dados e controle
    Publicar estado inicial via MQTT
    Loop infinito esperando comandos via MQTT
fim função

função CALLBACK PARA EVENTOS DO TIMER
    se modo de operação ativo então
        Ler sensor via ADC
        Ação de controle
        Aplicação de PWM
        Atualizar buffer com novos dados
        se buffers cheios então
            Marcar para envio
        fim se
    se não
        Limpar buffers e resetar contadores
    fim se
fim função

função CALLBACK PARA EVENTOS MQTT
    Processar comandos recebidos para mudar modos de operação, parâmetros de controle, ou referências
fim função

função TAREFA DE ENVIO DE DADOS
    enquanto True faça
        se buffers prontos para envio então
            Enviar dados via MQTT
            Marcar buffer como enviado
            Aguardar intervalo de tempo ou evento
        fim se
    fim enquanto
fim função
```

adotadas por padrão do dispositivo. Sendo que, optou-se por habilitar o conversor ADC1, em resolução de 12 bits, atenuação do sinal em 6 dB o que configura o conversor para atuação em sinais de amplitude mínima de 150 mV e máxima de 1750 mV. Por sua vez, para acionamento da carga via sinal PWM, configurou-se o módulo de controle de motor, para operar com 13 bits de resolução e frequência de chaveamento de 1 kHz. Em ordem de assegurar constância da taxa de amostragem, T_s, estabeleu-se a configuração de um *timer* periódico de execução dedicado (*periodic timer register*), em que executa-se uma *task* a cada instante de amostragem, conforme definido pelo usuário. Assim, uma função de *callback* é chamada em frequência fixa executando por sua vez os processos de amostragem, armazenamento em *buffer*, cálculo do sinal de controle, entre outras funções. Por fim, configura-se o ESP32 para se portar como uma *Station (STA)*, possibilitando que o mesmo possa se conectar a rede Wi-Fi disponibilizada pelo servidor, que por sua vez, encontra-se configurado como *Access Point (AP)*, estabelecendo por consequente a conexão via protocolo MQTT. Note que detalhes das rotinas, funções e estruturas introduzidas pelo Algoritmo 1 podem ser verificadas em maior detalhes através do acesso direto aos códigos do projeto, disponibilizados em um repositório do *github* [1] .

2.4 Programação da Interface com o Usuário

Para implementação de experimentos relacionados às práticas de controle e identificação/modelagem, sendo esses experimentos em malha aberta ou malha fechada, faz-se necessário que o usuário, normalmente representado pela figura do discente, defina os parâmetros do experimento, tais como, tempo de amostragem, parâmetros do controlador PID, duração do teste, etc. Nesse sentido, em ordem de tornar essa tarefa mais fácil e simples para o usuário é proposto neste trabalho o desenvolvimento de uma interface para o usuário baseada em Linguagem de Marcação de HiperTexto (*HyperText Markup Language – HTML*). O HTML consiste de uma estrutura ou marcação empregada como base para estruturar o conteúdo visual de páginas Web, permitindo desse modo a inclusão de elementos textuais e gráficos (imagens) estáticas ou dinâmicas. Essa abordagem se dá em função da compatibilidade da IHM em HTML, com uma enorme diversidade de navegadores web modernos, que já se encontram instalados/disponíveis nos computadores ou até mesmo outros dispositivos como o *smartphone*, por exemplo.

Associado ao HTML emprega-se no desenvolvimento da IHM, tecnologias como *Cascading Style Sheets – CSS*, ferramenta de suporte/recursos utilizada para estilizar visualmente os elementos da página web, possibilitando o gerenciamento de cores e layouts no *frot-end* (Duckett, 2011). E JavaScript, que por outro lado, atua na interatividade/funcionalidade das páginas, permitindo manipular dinamicamente gráficos interativos em tempo real, além de viabilizar a comunicação com o servidor sem necessidade de recarregar a página, através do uso das bibliotecas *Chart.js* e *WebSocket.js*, respectivamente (Flanagan, 2020). A IHM relaciona-se com o *hardware*, conforme ações estabelecidas no digrama de sequência introduzido na Figura 4.

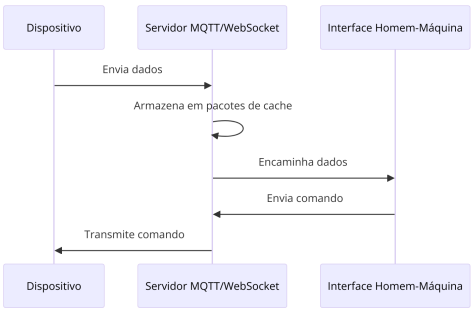

Figura 4. Diagrama de sequência de ações da solução proposta.

O diagrama da Figura 4 ilustra o processo pelo qual informações e comandos trafegam dentro do sistema, certificando que todos os dados trafeguem através do servidor, independentemente de serem comandos ou informações.

[1] `https://github.com/Joaovictortav/SmartEduLab`

Para tal, conforme definido na Seção 2.2 adota-se o protocolo WebSocket para comunicação entre IHM e servidor, enquanto o servidor comunica-se com o dispositivo via protocolo MQTT. Além disso, pode-se verificar que o próprio servidor é responsável pelo armazenamento temporário dos dados na memória, agrupando-os em pacotes. Portanto, quando o *buffer* é preenchido, esses dados são adicionados ao arquivo de texto e o *cache* é liberado, habilitando o armazenamento de novos dados. Por fim, na Figura 5 é apresentado a interface da IHM em sua janela de experimentação em malha fechada do controlador PID, com seus respectivos campos de interação com o usuário.

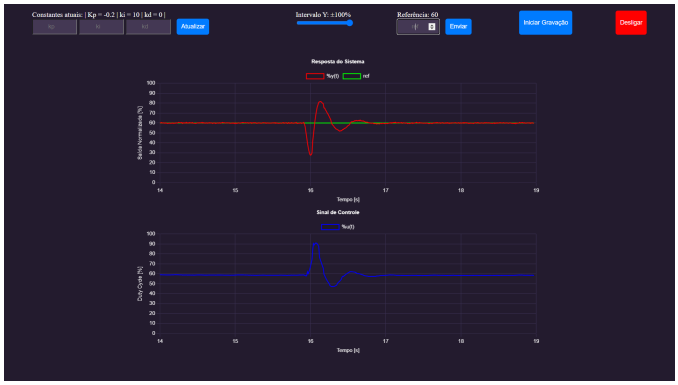

Figura 5. Interface Homem Máquina: *front-end* desenvolvido em *HTML*, *Java Script* e *CSS*.

3. RESULTADOS

Nesta Seção são apresentados os resultados experimentais obtidos com a solução proposta. Nesse sentido, o sistema foi submetido a dois testes distintos. O primeiro visa verificar/validar a aquisição de sinais analógicos e do sinal de acionamento da carga. Enquanto, no segundo experimento é realizado o acionamento em malha aberta de um sistema de motores acoplados (motor/gerador) (Norwey-Rico and Morato, 2021, p.679), em ordem de obter o modelo do sistema via método da resposta ao degrau de 3 parâmetros.

Para realização dos experimentos, montou-se o sistema eletromecânico com o uso de dois motores CC modelo *UGFMDE-03SRI11*, acoplados via correia sincronizadora. Com os motores acoplados, conectou-se os mesmos ao *hardware* descrito na Seção 2.1, aquele com a função de atuador foi conectado ao circuito de acionamento, enquanto o segundo com função de gerador, foi conectado ao circuito de aquisição de sinal analógico. Para alimentação do circuito, fez-se o uso de duas fontes externas reguláveis de bancada e independentes, ajustadas em $V_1 = 10\ V$ para alimentação do circuito de microcontrolado e $V_2 = 14\ V$ para alimentação do atuador. Usando a IHM aplicou-se ao sistema um sinal de acionamento, PWM, com 50% de ciclo de trabalho. O resultado obtido é apresentado na Figura 6, que foi obtida a partir do uso de um osciloscópio Tektronix DPO 2014B com uma frequência de amostragem de 100 MHz. Conforme pode-se verificar o atuador recebeu o sinal PWM em amplitude de 14 V e ciclo de trabalho de 50%, o que resulta na tensão média entregue a carga de $7,17\ V$. Por outro lado, avaliou-se a excursão máxima do sinal oriundo do gerador, verificando que a mesma é da ordem de $11,11\ V$. Nesse caso, realizou-se a configuração dos potenciômetros *ATT_IN* e *OFFSET* de modo a escalonar o sinal do gerador a faixa de 150 a 1750 mV.

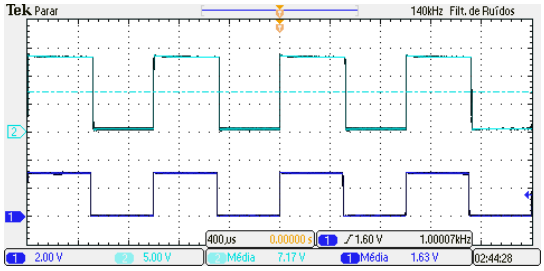

Figura 6. Sinal PWM com 50% de ciclo de trabalho aplicado para acionamento do atuador. A linha contínua ciana descreve o sinal aplicado à carga, a linha tracejada ciana a tensão média entregue à carga e a linha contínua azul indica o sinal digital gerado pelo ESP32.

Para 50% de ciclo de trabalho, verificou-se que o gerador produziu uma tensão de $7,17\ V$, e que após o condicionamento, esse sinal foi escalonado a uma amplitude de $1,17\ V$, sendo esse o valor disponibilizado ao conversor analógico digital do ESP32. Por sua vez, a IHM recebe essa tensão e apresenta ao usuário a leitura normalizada em uma escala de 0 a 100% [2].

Por sua vez, para obtenção do modelo dinâmico do sistema via método da resposta ao degrau de 3 parâmetros, aplicou-se ao sistema uma entrada degrau de amplitude de 10% do sinal PWM, fazendo com o sinal aplicado à planta fosse alterado de $52,5\%$ para $62,5\%$ de ciclo de trabalho. Os dados obtidos no experimento são apresentados na Figura 7.

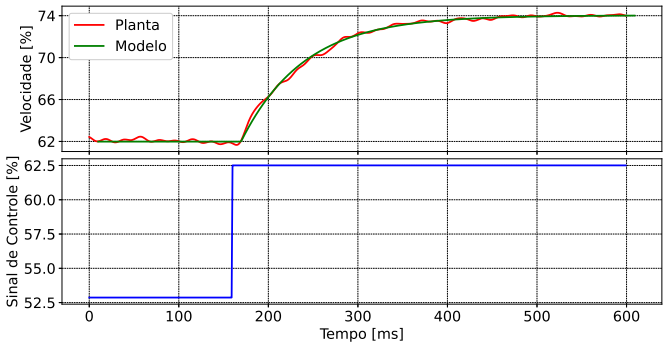

Figura 7. Dados usados na obtenção do modelo local do sistema.

É importante observar que os dados apresentados no gráfico da Figura 7, foram plotados a partir dos valores oriundos do arquivo de texto, que foi salvo pelo servidor. Note que o experimento adotou tempo de amostragem de, $T_s = 1\ ms$, uma vez que estima-se que a constante de tempo desse sistema seja da ordem de 20 a 80 ms. Para os dados amostrados aplicou-se o método de identificação da resposta ao degrau de 3 parâmetros, em que é obtido o modelo de primeira ordem dado por Garcia (2017): $G(s) = \frac{17,86}{s+14,29}$.

[2] https://github.com/Joaovictortav/SmartEduLab/tree/main/curvas

A validação do modelo é dada pela resposta em linha contínua verde, descrita na Figura 7. Conforme é verificado, o modelo descreve suficientemente bem a dinâmica local do conjunto mecânico motor/gerador. Note, que a discussão sobre a qualidade do modelo e etapas de desenvolvimento projeto de controlador PID, não são objetivos desse trabalho. Esses procedimentos, são introduzidos em ordem de apresentar/validar a funcionalidade da plataforma didática proposta. Por fim, foi gravado um vídeo tutorial em que todas etapas (calibração, acionamento malha aberta e aplicação do controlador PID) são apresentados e discutidos, possibilitando ao leitor compreender as funcionalidades do dispositivo [3] .

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma didática baseada em conceitos de IoT, que pode ser aplicada à diversos sistemas mecatrônicos (mecânico, elétrico/eletrônico e/ou hidráulico/pneumático) usados para desenvolvimento experimental de técnicas de modelagem e controle em malha fechada por PID. Para tal, as plantas de ensino habilitadas para uso da plataforma, devem ser caracterizadas como um sistema SISO, com instrumentação analógica ou digital e atuador de corrente contínua. A solução proposta, é acompanhada de uma IHM baseada em HTML, dinâmica, de simples compreensão e uso que possibilita ao usuário (discente) operar facilmente os sistemas didáticos. Esse dispositivo foi avaliado com o uso de um conjunto de motores acoplados em um arranjo atuador/gerador, em que buscou-se verificar os sinais medidos, o sinal de controle, e o armazenamento de dados em atividades de malha aberta e fechada. Nesse sentido, os resultados indicam que a plataforma didática proposta pode ser adotada como um instrumento útil no desenvolvimento de atividades práticas de ensino do controle nas engenharias. Em busca da continuidade de aprimoramento do dispositivo, busca-se nas próximas etapas incluir junto ao *hardware* circuito para armazenamento físico local (módulo de cartão de memória) dos dados do experimento. Além disso, busca-se embarcar o servidor bem como a IHM em um serviço de nuvem, possibilitando o acesso remoto do dispositivo.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CEFET-MG pela concessão de bolsas ao grupo do Programa de Educação Tutorial – PET do curso de Engenharia Mecatrônica campus Divinópolis, e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (PCE-00384-24).

REFERÊNCIAS

Aguirre, L.A. (2013). *Fundamentos de Instrumentação*. Pearson Education, 1 edition.

Aguirre, L.A. (2014). *Fundamentos de Instrumentação*. Pearson, São Paulo, 1^{st} edition.

Bacich, L. and Moran, J. (2017). *Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática*. Penso Editora.

Balogh, L. (2018). Application report: SLUA618A – Fundamentals of MOSFET and IGBT gate driver circuits.

Cortez, H.B.C., Fonseca, L.B., Florencio, H.M., andV. V. Pereira, J.D.F., and Francisco, G.C. (2022). Arquitetura IoT para monitoramento de planta industrial: uma comparação dos protocolos MQTT e ESP-Now. In *CBA 2022*, 1–8.

dos Santos Silveira, A., Machado, E., and de Souza, J.A. (2019). Construção de uma bancada didática de baixo custo para ensino de sistemas de controle. *Brazilian Applied Science Review*, 3(1), 133–144.

Duckett, J. (2011). *HTML and CSS: Design and Build Websites*. Wiley, 1^{th} edition.

Expressif Systems (2019). ESP32 Series Datasheet. URL `www.espressif.com`.

Fernandes, M.F. et al. (2019). *Desenvolvimento de sistema didático de nível voltado para o ensino de controle*. Trabalho de conclusão de curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte.

Filgueira, G.O.A. et al. (2023). *Avaliação dos impactos das tecnologias emergentes na educação: um estudo de caso na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas*. Dissertação, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil.

Flanagan, D. (2020). *Javascript: The Definitive Guide: Master the World's Most-Used Programming Language*. O'Reilly Media, 7^{th} edition.

Führ, R.C. (2022). *Educação 4.0 nos impactos da quarta revolução industrial*. Editora Appris.

Garcia, C. (2017). *Controle de Processos Industriais - Estratégias Convencionais*. Blucher, 1 edition. 599 p.

Marcia Regina Carletto (2009). *Avaliação de impacto tecnológico: alternativas e desafios para a educação crítica em engenharia*. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Menekse, M., Stump, G.S., Krause, S., and Chi, M.T. (2013). Differentiated overt learning activities for effective instruction in engineering classrooms. *Journal of Engineering Education*, 102(3), 346–374.

Mouha, R.A. (2021). Internet of things (iot). *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 9(2), 77–101.

Neto, R.C., Trindade, F.L.A., Marques, B.R.A., Azevedo, G.M.S., Barbosa, E.J., and Barbosa, E.A.O. (2023). An aeropendulum-based didactic platform for the learning of control engineering. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 34(3), 566–577. doi:10.1007/s40313-022-00981-4.

Norwey-Rico, J.E. and Morato, M.M. (2021). *Introdução ao Controle de Processos*. Blucher, São Paulo, 1^{st} edition.

Santana, A.P.N. (2018). Abordagem experimental para ensino de sistemas de controle. In *III Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica-EnICT (ISSN: 2526-6772)*.

Sedra, A.S. and Smith, K.C. (2007). *Microeletrônica*. Pearson, São Paulo, 5^{th} edition.

Villas Boas, V. and Mattasoglio Neto, O. (2011). Aprendizagem ativa na educação em engenharia. In *XX-XIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia,– COBENGE Blumenau*. Santa Catarina, Brasil.

[3] `https://youtu.be/stt6I6gpyX0`