

Um Módulo Motor-Tacogerador de Baixo Custo para Ensino de Controle Automático^{*}

Rafael Oliveira Pedrisch^{*}

Amanda Maria Monteiro Cerezini de Souza^{**}

André Luiz Barbosa Marinho^{***} Artur Vítório Andrade Santos^{****}

José Diogo Forte de Oliveira Luna[†]

^{*} Coordenação de Engenharia de Controle & Automação, Instituto Federal de Rondônia, RO, (e-mail: r.pedrisch@estudante.ifro.edu.br).

^{**} Coordenação de Eletrotécnica, Instituto Federal de Rondônia, RO, (e-mail: amandacerezini2019@gmail.com).

^{***} Coordenação de Engenharia de Controle & Automação, Instituto Federal de Rondônia, RO, (e-mail: andre.marinho@estudante.ifro.edu.br).

^{****} Coordenação de Engenharia de Controle & Automação, Instituto Federal de Rondônia, RO, (e-mail: artur.santos@ifro.edu.br).

[†] Coordenação de Engenharia de Controle & Automação, Instituto Federal de Rondônia, RO, (e-mail: jose.luna@ifro.edu.br).

Abstract: The new Brazilian National Curriculum Guidelines (DCNs) establish theory and practice as inseparable. The practical experiments are an essential tool for the development of automatic control skills. Thus, the present work presents a low cost motor-tachogenerator didactic module. The manufacturing process of the module is presented and the files of the electronic board, the 3D printed parts and the optional laser cut cover are made available in an online platform to allow reproduction. The module is validated experimentally to demonstrate its applicability. After analyzing the results it is found that the module meets requirements for an adequate practical experiment as well as its manufacturing cost is compatible with other low-cost works in the literature.

Resumo: As novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) colocam teoria e prática como indissociáveis. Neste sentido, os experimentos práticos se propõem como uma ferramenta imprescindível ao processo de desenvolvimento das competências relacionadas a controle automático de sistemas dinâmicos. Assim, o presente trabalho apresenta um módulo didático motor-tacogerador de baixo custo. É apresentado o processo de fabricação do módulo e os arquivos da placa eletrônica, das peças impressas em 3D e da tampa opcional em corte a laser são disponibilizadas em plataforma on-line para permitir a reprodução. O módulo é validado experimentalmente, para demonstrar sua aplicabilidade. Após a análise dos resultados é constatado que o módulo atende requisitos para um experimento prático adequado bem como seu custo de fabricação é compatível com outros trabalhos de baixo custo na literatura.

Keywords: Automatic Control; Engineering Teaching; Motor-Tachogenerator.

Palavras-chaves: Controle Automático; Ensino em Engenharia; Motor-Tacogerador.

1. INTRODUÇÃO

É sabido que a experimentação prática se constitui em uma valiosa oportunidade para a construção das competências que dialogam com o perfil do egresso desejado. No Brasil, as Diretrizes Curriculares Nacionais preconizam a articulação entre teoria e prática como indispensável para a formação (Cassemiro e Henrique, 2020), (de Almeida Moura et al., 2019). Em adição, conforme Balchen et al. (1981), um bom experimento de laboratório deve expor ideias teóricas, refletir importantes problemas do mundo real,

dar sensações acústica e visual, ter um adequado tempo de escala e experimentação, ser barato, fácil de entender e utilizar, além de não expor o discente a perigos. Um experimento popular no ensino de controle que atende tais características é o motor-tacogerador. Este experimento consiste no controle de velocidade de rotação de um motor cuja velocidade angular é medida através de um tacogerador (Coelho et al., 2001).

Na literatura existem vários trabalhos apresentando algumas versões do dispositivo. O estudo de Coelho et al. (2001) apresenta um módulo construído sobre um perfil metálico com dois motores de toca-fitas acoplados entre si por uma correia e placa eletrônica embutida para comando e comunicação com computador, tendo um custo de R\$

^{*} Os autores agradecem ao IFRO - Campus Calama, ao CNPq e a CAPES, pelo financiamento através do edital Nº 5/2021/REIT - PROPESP/IFRO.

90,00. O módulo foi usado no trabalho de Rico et al. (2003) para validar em laboratório a proposta de uma técnica de controle de velocidade de perfuração com rejeição de carga via estimação e pré-alimentação da perturbação.

Um dispositivo similar foi fabricado por Cesar et al. (2006), com dois motores acoplados mecanicamente por um tubo plástico rígido. Foi desenvolvida também uma placa eletrônica com acionamento analógico ao invés do uso de PWM para o motor. O módulo foi utilizado para práticas de identificação e controle de sistemas.

Uma outra versão é apresentada por Serralheiro e de Souza (2012), onde dois motores CC foram montados em uma cantoneira de aço fresada, e neles foram acoplados polias iguais. Uma terceira polia com rolamento foi acoplada a um eixo rosqueado para ser usado como esticador da correia que acopla os dois motores. Além disso, é fornecido o esquemático da placa para a interface com um Arduino, e há a discussão da aplicabilidade do módulo para controle adaptativo. O módulo proposto é mostrado na figura 1.



Figura 1. Módulo motor-tacogerador feito em perfil metálico. Adaptado de Serralheiro e de Souza (2012).

Já nos trabalhos de Schons et al. (2017a) e Schons et al. (2017b) aplicaram controle preditivo em um módulo DIGIAC 710, um dispositivo comercial que contempla tanto experimentos de controle velocidade quanto de posição. Em particular, quanto a velocidade, a medição é realizada por tacogerador.

O estudo de do Carmo et al. (2020) apresenta o projeto de módulos de hardware para ensino e aprendizagem, de técnica de controle de processos, batizado de MODICON. Dentre os módulos há um motor-tacogerador. Este módulo foi construído com um case impresso em 3D para comportar a placa eletrônica e acomodar os dois motores acoplados por um tubo plástico rígido. O custo de fabricação de cada módulo, excetuando o custo com impressão 3D, foi de R\$ 25,00.

Investigações similares também foram conduzidas por Gupta et al. (2006), Moreira et al. (2017), Matsuzaki et al. (2019), Cook et al. (2020) e Takács et al. (2021) entretanto estas propostas utilizaram encoders no lugar de tacogeradores, os quais proveem maior exatidão na medida de velocidade, porém com maior custo de aquisição.

Cabe citar que, dentre todos menos um dos trabalhos revisados, tanto com uso de tacogerador quanto de enco-

der, apesar de haver a demonstração dos esquemáticos da eletrônica e foto das montagens mecânicas, não houve divulgação dos arquivos das placas de circuito nem das peças impressas em 3D (quando do caso), não permitindo uma reprodução imediata. A exceção é o trabalho de Takács et al. (2021), que disponibiliza online os arquivos Gerber para a reprodução.

Assim, o presente estudo objetiva apresentar a construção de um módulo motor-tacogerador, de baixo custo, que se presta ao do ensino de identificação e controle automático. Adicionalmente, o procedimento de construção e os arquivos de fabricação da placa eletrônica, além dos arquivos de impressão 3D e corte a laser, serão divulgados em plataforma aberta para permitir a fácil reprodução do módulo.

De modo a cumprir tais objetivos, este texto está estruturado como segue: a segunda seção examina o procedimento de fabricação do módulo; depois, a terceira seção descreve a validação do uso do módulo para prática de identificação e controle; em seguida, a quarta seção trás os resultados e as discussões e, finalmente, a quinta seção contém as considerações finais.

2. FABRICAÇÃO DO MÓDULO

O módulo proposto, que pode ser visto na Figura 2, é composto por uma placa de circuito impresso que também serve para a fixação mecânica do par motor-tacogerador e da tampa de acrílico.



Figura 2. Módulo proposto. Dimensões: 90x80x60 mm.

Iniciando-se pela eletrônica, o circuito é composto por três estágios, conforme apresentado na Figura 3: um circuito a transistor para chaveamento do motor, um circuito com filtro para leitura da tensão de saída do tacogerador e um circuito com LED para indicação de energização.

Quando o módulo está alimentado por uma fonte 5 V o LED de indicação acende. Assim, quando a base do transistor é excitada por um sinal PWM, através do

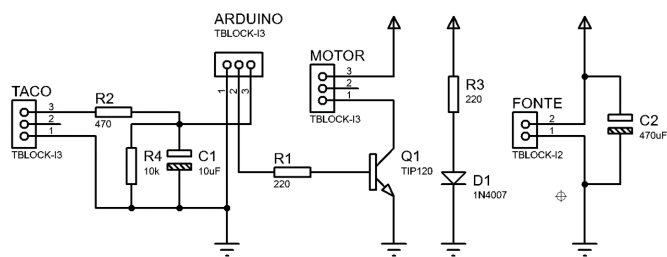


Figura 3. Esquemático do circuito eletrônico do módulo.

resistor de base, o motor é acionado. Pelo acoplamento mecânico o tacogerador rotaciona na mesma velocidade angular produzindo uma tensão de saída que é filtrada pelo circuito RC na saída.

Os materiais utilizados para a fabricação são listados na Tabela 1.

Tabela 1. Lista de Materiais.

Item	Quantidade
Motor CC 5V	2 und
Resistor 470R 1/4W	1 und
Resistor 10k 1/4W	1 und
Resistor 220R 1/4W	2 und
Capacitor 1uF 25V	1 und
Capacitor 470uF 25V	1 und
Transistor TIP 120	1 und
LED verde 5mm	1 und
Placa cobreada de fenolite face simples	80x90 mm
Conector Borne KRE 2 terminais	1 und
Conector Borne KRE 3 terminais	1 und
Arduino UNO com cabo USB	1 und
Fonte Chaveada 5V 1A	1 und
Parafuso M3 com porca	8 und
Filamento ABS para impressão 3D	27 g
Chapa acrílico cristal 3mm	55x174 mm

São empregados dois motores CC 5V de alta rotação, modelo MM5G25T22-1, podendo ser substituídos por qualquer outro motor de DVD player. Um dos motores cumpre a função de motor, sendo chaveado via PWM para controle de velocidade, enquanto o outro é utilizado como tacogerador, para prover a realimentação da velocidade angular.

Os resistores de 10k, 470R formam o divisor de tensão na saída da tacogerador. Um resistor de 220R limita a corrente de base do transistor enquanto o outro limita a corrente do LED. O capacitor eletrolítico de $10\mu\text{F}$ compõe o filtro RC na saída do tacogerador e o de $470\mu\text{F}$ é colocado em paralelo com a alimentação vinda de uma fonte de 5V, para amortecer variações na tensão.

Para chavear o motor, foi utilizado um transistor TIP120, um transistor darlington de alto ganho e um LED de 5mm foi incluído para indicar que o módulo está alimentado. Utilizou-se ainda bornes KRE de dois e três terminais para a ligação com o Arduino.

Para iniciar a fabricação da placa de circuito eletrônico fez-se o uso de um software de projeto assistido por computador para circuitos eletrônicos. No software foi possível montar o circuito e realizar a simulação, permitindo a validação do dimensionamento dos componentes. Em seguida, utilizou-se o pacote do software para gerar o desenho da placa a ser impressa.

Posteriormente, o layout da placa foi impresso a laser em papel fotográfico para ser realizado a termo transferência. Utilizou-se um pedaço da placa de fenolite cobreada de 80x90mm, fazendo-se a limpeza com o auxílio de uma palha de aço. Posicionando-se a parte impressa do papel em contato com a placa cobreada, foi umedecido e transferido termicamente para a placa.

Em seguida, a placa é corroída em percloroeto de ferro, para deixar somente as trilhas de cobre. Para acelerar esse processo agita-se a placa dentro da solução. Após a conclusão da corrosão da placa, a mesma deve ser retirada da solução e lavada com água.

Depois, as ilhas da placa são furadas, ensaiadas com teste de continuidade para cada trilha e, em seguinte, os componentes são soldados de acordo com o esquemático.

Para a fixação dos motores foi projetado em 3D um suporte para motor no formato de abraçadeira, sendo impresso em ABS. O motor é posicionado na abraçadeira e ela é apertada com uso de um parafuso ou de uma presilha de nylon, fixando o motor. Os suportes são parafusados na placa com dois parafusos M3.

Similarmente, a conexão mecânica entre o motor e o tacogerador é feito através de um acoplamento cilíndrico, também projetado em 3D, impresso em ABS. Há duas cavas em cada lado para a inserção de porcas sextavadas M3, ortogonal a furos para parafusos que, por sua vez, travam o eixo do motor. O acoplamento também foi impresso em ABS. As duas peças são exibidas na Figura 4, e os arquivos podem ser obtidos no link apresentado posteriormente.

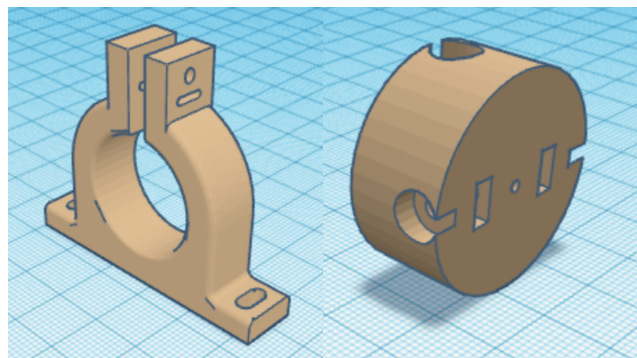


Figura 4. Suporte do motor e acoplamento dos eixos, modelados em software 3D.

Para um acabamento do módulo, bem como facilitar o armazenamento dos mesmos, foi incluída uma tampa de acrílico recobrindo o par motor-tacogerador. A tampa foi feita com acrílico cristal de 3mm, cortada a laser segundo o desenho presente na Figura 5 e, posteriormente dobrada numa dobradeira de acrílico seguindo as marcas vermelhas na Figura. Cabe citar que a tampa não exerce função outra senão facilitar o empilhamento dos módulos para armazenamento, podendo ser dispensada na reprodução do dispositivo.

Todos os arquivos de impressão 3D dos acoplamentos, corte a laser e circuito PCB, estão disponíveis na plataforma Github, podendo ser acessado pelo link a seguir e QR Code apresentado na Figura 6.

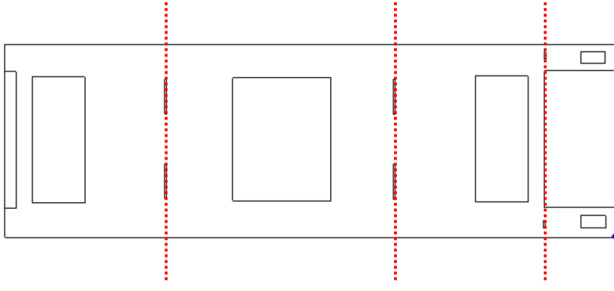


Figura 5. Desenho da tampa opcional a ser cortada em acrílico com corte a laser. As linhas tracejadas indicam os pontos de dobra.



Figura 6. QR Code para acessar os arquivos disponíveis neste link.

3. VALIDAÇÃO DO MÓDULO

Para validar o módulo no ensino de controle automático são examinadas quatro práticas representativas dos temas passíveis de abordagem em sala de aula com os módulos.

3.1 Identificação de Sistemas

Considerando que a maioria das técnicas de controle linear abordadas no currículo de graduação dependem do conhecimento de um modelo do sistema, a discussão de métodos para levantar experimentalmente tais modelos se faz necessária.

A identificação de sistema, para um sistema estável, pode ser feita através de métodos determinísticos baseados em resposta ao degrau, como o Método de Smith (Coelho, 2016), onde são tomados dois pontos, um no instante t_1 , quando a curva de reação 28,3% da variação total, e um segundo, no instante t_2 , quando a curva de reação atinge 63,2% da variação total. O método obtém parâmetros para um modelo de primeira ordem com atraso:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls}, \quad (1)$$

onde o ganho K é dado pela razão entre a amplitude da variação da resposta e a amplitude do degrau aplicado, e a constante de tempo τ e o tempo morto L são dados por:

$$\tau = 1.5(t_2 - t_1), L = t_2 - \tau. \quad (2)$$

O ensaio de resposta ao degrau é realizado alimentando o módulo com uma fonte externa de 5 V, e conectando um Arduino UNO para comando do PWM e coleta de dados através da leitura analógica da tensão de saída do tacogerador.

Aplicando-se um degrau de 3,0 V para 3,5 V na entrada, os dados são coletados e, empregando-se o método de Smith, obteve-se $K = 0,802$, $\tau = 0,624$ e $L = 0,019$, conforme observa na Figura 7, que compara a resposta do ensaio com o modelo $G(s)$ obtido.

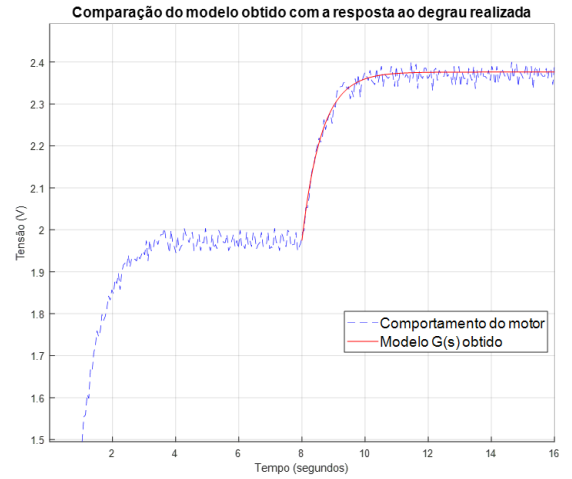


Figura 7. Comparação entre o resultado experimental e a resposta ao degrau gerada pelo modelo obtido.

3.2 Resposta em Frequência

A análise da resposta em frequência fornece conhecimento sobre o comportamento de um sistema dinâmico. Como introdução ao tema, o módulo proposto pode ser usado em uma prática de obtenção do diagrama de Bode do sistema motor-tacogerador.

Para tanto, faz-se necessário, novamente, alimentar o módulo com uma fonte externa de 5 V, e conectá-lo a um Arduino UNO para comando do PWM e coleta de dados através da leitura analógica da tensão de saída do tacogerador. O Arduino é programado para realizar uma varredura, aplicando sinais senoidais de frequência crescente. Para o resultado abaixo foram aplicados sinais entre 0,1 rad/s e 10 rad/s.

Na Figura 8 são apresentados os valores de magnitude e fase do experimento comparados com os curvas ideais para o modelo obtido pela resposta ao degrau.

3.3 Erro em Regime Permanente

Em sistemas controlados deseja-se que a resposta na saída siga referência. O erro é o sinal que representa a diferença entre a saída e o setpoint, idealmente, é desejável que o valor do erro seja nulo em regime permanente ($e(\infty) = 0$). O erro em regime permanente se caracteriza como a diferença entre a entrada e saída quando $t \rightarrow \infty$ para uma entrada constante.

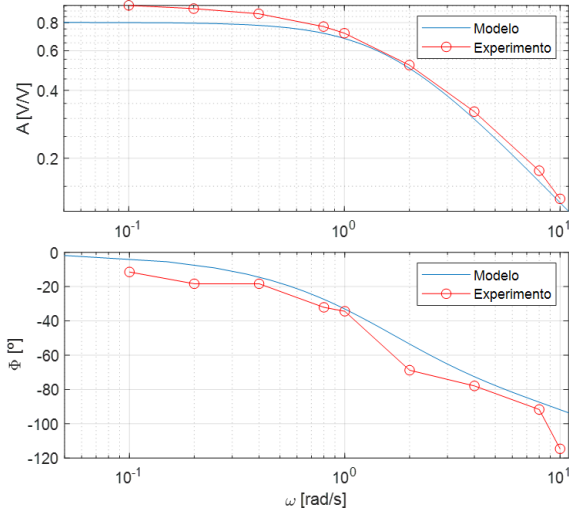


Figura 8. Comparação entre o resultado experimental e o diagrama gerado a partir do modelo obtido pela resposta ao degrau.

Para sistemas estáveis do tipo zero, isto é, sem nenhum polo na origem, pode-se mostrar que um controle proporcional puro (P), garante erro em regime finito e não-nulo.

Para demonstrar a influência do ganho proporcional no erro em regime permanente, adotou-se um controle:

$$u(t) = K_c e(t), \quad (3)$$

e variou-se K_c em 5 casos, conforme demonstrado na Figura 9. No primeiro caso, o ganho proporcional escolhido foi $K_{C1} = 2$, e nos casos seguintes, aumentou-se o ganho para $K_{C2} = 5$, $K_{C3} = 10$, $K_{C5} = 25$, e por fim, um ganho de $K_{C5} = 50$.

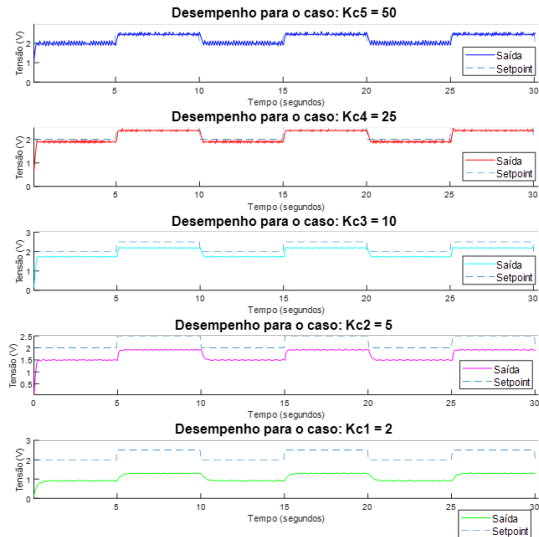


Figura 9. Respostas do sistema a diferentes ganhos do controle proporcional.

Onde: o ganho proporcional mínimo utilizado foi $K_{C1} = 2$ e o ganho máximo $K_{C5} = 50$.

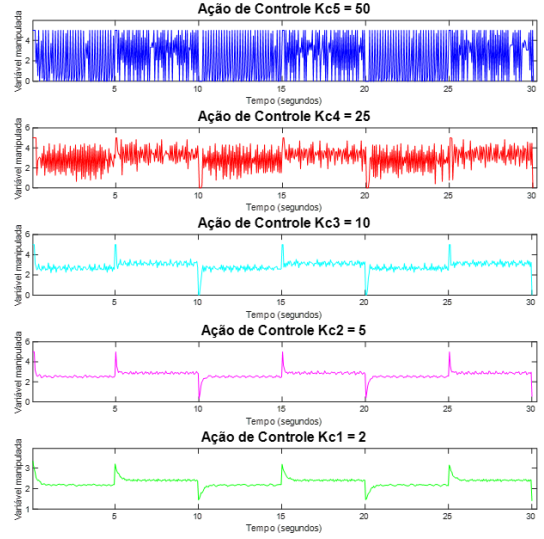


Figura 10. Sinais de controle da ação proporcional para os diferentes ganhos.

Observa-se na Figura 9 que a resposta à ganhos baixos possui um erro em regime permanente maior, porém, ao decorrer que K_c aumenta, o sistema vai apresentando um erro em regime menor, conforme visto na Figura 11.

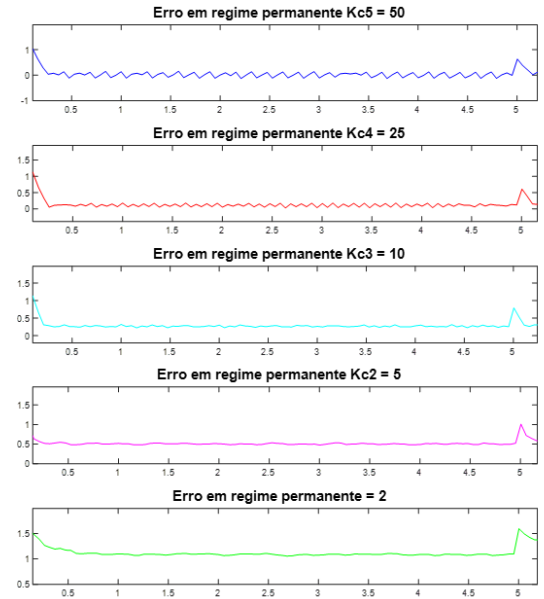


Figura 11. Erro em regime permanente para os casos com controle proporcional.

Na Figura 10 nota-se que aumentando o ganho proporcional a velocidade da resposta do sistema aumentará. Entretanto, se o ganho proporcional for muito grande, o comportamento se torna muito agressivo, ensejando a rica discussão sobre a parcimônia na sintonia dos controladores e a existência de limites de desempenho em sistemas físicos.

3.4 Controle em Malha Fechada

Uma técnica de sintonia de controle PI bastante usada na literatura para sistemas de primeira ordem é o uso do zero

do controlador para cancelar o polo do modelo do processo, sendo esta a base, por exemplo, do SIMC proposto por Skogestad (2003). No caso particular do motor-tacogerador onde o atraso de transporte é aproximadamente nulo pode-se escrever:

$$C(s)G(s) = K_c \frac{T_i s + 1}{T_i s} \frac{K}{\tau s + 1}, \quad (4)$$

onde $C(s)$ é o controlador PI, $G(s)$ é o modelo do sistema, K_c é o ganho do controlador, T_i é o tempo integral, K é o ganho estático do processo e τ a constante de tempo do sistema. Escolhendo-se $T_i = \tau$ para realizar o cancelamento, obtém-se a seguinte função de transferência de malha fechada:

$$FTMF(s) = \frac{\frac{K_c K}{T_i s}}{1 + \frac{K_c K}{T_i s}} = \frac{1}{\frac{T_i}{K_c K} s + 1}. \quad (5)$$

Observa-se na equação 5 que a constante de tempo do sistema de primeira ordem resultante da malha fechada é dada por:

$$\tau_c = \frac{T_i}{K_c K}. \quad (6)$$

E, portanto, pode-se encontrar o ganho do controlador ao se arbitrar a constante de tempo através, inclusive, de um critério de desempenho como tempo de subida ou tempo de acomodação.

Para ilustrar, fez a sintonia para três casos: $\tau_c = 1$, deixando a malha fechada mais lenta que a malha aberta, $\tau_c = 0,6$, deixando a malha fechada na mesma velocidade da malha aberta, e $\tau_c = 0,3$, acelerando a resposta de malha fechada em duas vezes com relação a malha aberta. Aplicando-se os controladores obtidos, tem-se a resposta apresentada na Figura 12, onde a resposta do experimento físico é comparada ainda com o resultado obtido por simulação.

Conforme esperado, a presença de ação integral garante erro nulo em regime permanente e assim o sistema em malha fechada é capaz de rastrear os degraus de referência. Ademais, existe concordância entre os resultados simulados e o experimento físico, sendo o tempo de acomodação menor conforme a constante de tempo de malha fechada diminui e, consequentemente, o ganho do controlador aumenta, levando o polo para longe da origem do plano-s.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme ilustrado na seção anterior, o módulo tem boa aplicabilidade para a execução de práticas em diversos temas inerentes ao ensino de controle automático. Adicionalmente, é possível argumentar, de maneira ao que é feito no trabalho de Coelho et al. (2001), que o módulo proposto atende os requisitos elencados por Balchen et al. (1981) para um bom experimento de laboratório. O dispositivo é capaz de expor ideias teóricas, conforme demonstrado na seção anterior, sendo capaz de refletir importantes problemas do mundo real, uma vez que as técnicas para identificação, análise e projeto de controle que podem ser

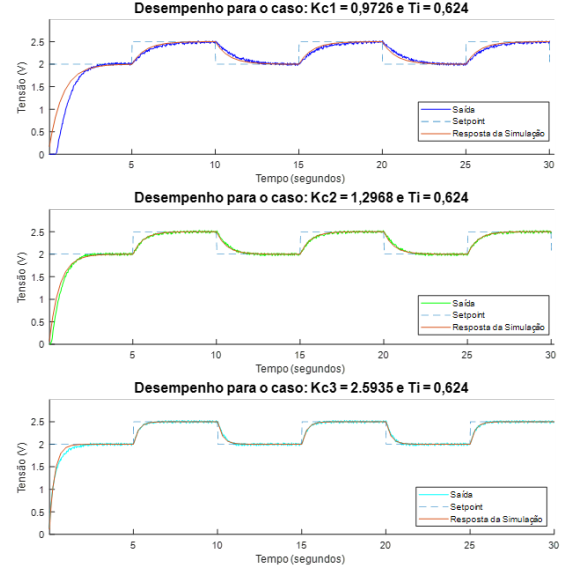


Figura 12. Comparação entre a resposta experimental, e a resposta simulada para cada caso do PI.

tratados com o módulo são análogas as que podem ser usadas para outros sistemas SISO estáveis. Para além disso, o módulo oferece estímulo acústico e visual, durante a operação do motor-tacogerador, sendo possível acompanhar auditivamente o comportamento ao mesmo tempo em que se observa a evolução dos gráficos no computador. Para além disso, a duração dos experimentos é suficientemente curta para caber em um ou dois tempos de aula. O módulo proposto atende o critério de ser barato, uma vez que seu custo de produção, excetuando o valor do Arduino e da fonte externa, ficou em R\$ 24,16. O atendimento ao critério da facilidade de entender e utilizar é constatado por o controle de velocidade de motores CC ser algo próxima da realidade dos alunos, permeando, inclusive dispositivos do cotidiano e, finalmente, dado pequeno torque bem como baixa tensão do dispositivo, o mesmo não expõe o discente a perigos.

Estabelecendo-se uma breve comparação com os trabalhos revisados da literatura, conforme levantado na Tabela 2, cabe destacar que o módulo proposto possui valor de produção compatível com o que se observa na literatura recente bem como divulga todos os arquivos necessários à sua reprodução.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo apresentou o desenvolvimento de um módulo didático motor-tacogerador para o ensino de controle de sistemas. O dispositivo pode ser fabricado utilizando componentes de baixo custo, contabilizando um valor de menos de 25 reais para sua aquisição, estando em acordo com os valores de outros trabalhos da literatura. Para além disso, o módulo requer três peças impressas em 3D, que, com a disseminação das impressoras 3D e seu barateamento, não é de difícil replicação. Há também uma peça cortada a laser no acrílico, porém ela é dispensável, tornando acessível a reprodução do dispositivo por outras instituições de ensino e até estudantes. Ademais, a repro-

Tabela 2. Comparação com os trabalhos revisados na literatura. Os valores marcados com * desconsideram o custo das partes feitas por impressão 3D. 1 - Tacogerador; 2 - Encoder; NI - Não Informado.

Proposto por	Sensor	Custo	Divulgação
Coelho et al. (2001)	1	BRL 90,00	não
Cesar et al. (2006)	1	NI	não
Serralheiro et al. (2012)	1	NI	não
Schons et al. (2017a)	1	NI	não
do Carmo et al. (2020)	1	BRL 25,00*	não
Gupta et al. (2006)	2	NI	não
Moreira et al. (2017)	2	NI	não
Matsuzaki et al. (2019)	2	NI	não
Cook et al. (2020)	2	NI	não
Takács et al. (2021)	2	USD 22,00	sim
Presente Estudo	1	BRL 24,16*	sim

dução é facilitada pela divulgação de todos os arquivos em plataforma digital, sob a óptica de ciência aberta.

Adicionalmente, foi examinada sua aplicabilidade para o ensino de temas usuais no currículo de teoria de controle a nível de graduação, mostrando, também, que a proposta atende os requisitos para um bom experimento prático, conforme Balchen et al. (1981).

Para trabalhos futuros pretende-se explorar a possibilidade levantada por Serralheiro e de Souza (2012) e trabalhar com controle adaptativo para abordar a não-linearidade do sistema, vislumbrada para uma faixa maior de operação, gerando uma biblioteca de controle adaptativo para Arduino.

REFERÊNCIAS

- Balchen, J., Handlykken, M., e Tysso, A. (1981). The need for better laboratory experiments in control engineering education. *IFAC Proceedings Volumes*, 14(2), 3363–3368.
- Casemiro, K. e Henrique, A.L.S. (2020). Para onde apontam as atuais diretrizes curriculares? um olhar sobre as dcns de engenharia. *Currículo sem Fronteiras*, 20(3), 656–683.
- Cesar, T.C., Ghetti, F.T., Vianello, R., Santos, T.S., Esperidon, J.A., e Gomes, F.J. (2006). An integrated experimental module for process control and modeling.
- Coelho, A.A.R. (2016). *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*. UFSC, Florianópolis, 2 edition.
- Coelho, A.A., Almeida, O.M., Santos, J.E., Sumar, R.R., e Bittencourt, F. (2001). Da teoria à prática: projeto motor taco-gerador. In *XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, 19–22.
- Cook, M.D., Bonniwell, J.L., Rodriguez, L.A., Williams, D.W., e Pribbernow, J. (2020). Low-cost dc motor system for teaching automatic controls. In *2020 American Control Conference (ACC)*, 4283–4288. IEEE.
- de Almeida Moura, D.B.A., Fontes, A.R.M., de Souza, R.L.R., e Paravizo, E. (2019). Contribuições da cultura maker para o ensino de engenharia de produção no contexto das novas diretrizes curriculares.
- do Carmo, C.V.S., de Barros Araújo, R., e de Oliveira, R.N. (2020). Modicon: Módulos para ensino de identificação e controle de processos. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2.
- Gupta, G.S., Mukhopadhyay, S., e Tin, C.M. (2006). A project based approach to teach mixed-signal embedded microcontroller for dc motor control. In *Third IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications (DELTA'06)*, 6–pp. IEEE.
- Matsuzaki, T., Elfadil, O., Horiuchi, K., Shiratsuchi, H., e Mashiko, K. (2019). Embedded controller based learning system for dc motor control. *Int J Innov Comput Inform Control*, 15(3), 997–1007.
- Moreira, A.P., Costa, P., Gonçalves, J., e Faria, B.M. (2017). Dc motor educational kit: a teaching aid in control theory. In *CONTROLO 2016*, 879–889. Springer.
- Rico, J.E.N., Scheuer, A., e Filho, I.J. (2003). Controle de velocidade de perfuração de poços de petróleo com rejeição de carga via estimação e pré-alimentação da perturbação.
- Schons, S.C.d.M. et al. (2017a). Implementação de estratégia de controle preditivo em cascata em sistema embarcado de tempo real e fpga.
- Schons, S.C.d.M. et al. (2017b). Implementação e avaliação experimental de um gpc em sistema embarcado de tempo real.
- Serralheiro, W.A.d.O. e de Souza, E.Z. (2012). Plataforma para implementação de técnicas de controle digital adaptativo—o sistema motor-tacogerador.
- Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 13(4), 291–309. doi: [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152402000628>.
- Takács, G., Boldocky, J., Mikuláš, E., Konkoly, T., e Gulán, M. (2021). Motoshield: Open miniaturized dc motor hardware prototype for control education. In *2021 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1–9. IEEE.