

# Produção de um Kit Didático Motor-Tacogerador para Controle de Velocidade

Amanda Maria Monteiro Cerezini de Souza<sup>a</sup>, Carlos Henrique Azevedo Guimarães<sup>a</sup>,  
Guilherme Mantaia Moreira<sup>a</sup>, José Diogo Forte de Oliveira Luna<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho/RO

## RESUMO

O controle de velocidade de motores de corrente contínua (CC) é um dos problemas mais típicos do controle automático. O objetivo é simples, porém elegante: deseja-se que o motor mantenha uma velocidade desejada, rastreando esse valor e rejeitando perturbações de carga. Isto é feito através de um sistema de controle em malha fechada. Para transportar esta realidade para a sala de aula, o projeto desenvolveu um protótipo de um kit motor-tacogerador de baixo custo para ensino de controle automático. O protótipo foi construído com circuitos eletrônicos, peças impressas em 3D e cortadas a laser. As placas eletrônicas foram projetadas em software dedicado, termotransferidas para placas cobreadas de fenolite e corroídas em percloroato de ferro, com os componentes eletrônico sendo soldados posteriormente. Os desenhos e modelos 3D foram produzidos em software e processados, no caso das peças de plástico, na impressora 3D e, na peça de acrílico, na corte a laser. Com as partes construídas, os módulos foram montados, tendo um custo de produção aproximado de 56 reais por unidades, inferior ao valor de módulos comerciais. O protótipo produzido é funcional e os kits atendem a sua finalidade pedagógica, sendo compatível com a plataforma microcontrolada Arduino e utilizável em sala de aula para o ensino de controle automático com os alunos da graduação de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Rondônia. Os esquemáticos, desenhos e modelos 3D serão divulgados em plataforma online de forma open-source para permitir a reprodução por outras instituições, na ideia de ciência aberta.

**Palavras-chave:** Controle Automático. Educação em Engenharia. Motor-tacogerador. Novas DCNs. Baixo Custo.

## ABSTRACT

The new Brazilian National Curriculum Guidelines (DCNs) establish theory and practice as inseparable. The practical experiments are an essential tool for the development 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.

**Keywords:** Automatic Control. Engineering Teaching. Motor-tachogenerator. Low Cost.



## 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 (Casseiro e Henrique, 2020), (de Almeida Moura et al., 2019). Em adição, conforme 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\$ 90,00. O módulo foi usado no trabalho de e 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 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 por Serralheiro e de Souza (2012).

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

Já nos trabalhos 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 encoder, 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 inclui os métodos e os materiais utilizados para o projeto; depois, a terceira seção descreve os resultados e a utilização do projeto; por fim, a quarta e última seção traz a conclusão do projeto.

## 2. METODOLOGIA

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.

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.

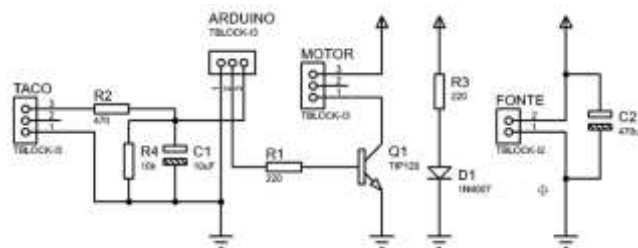


Figura 3: Esquemático.

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 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.

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.

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

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 seguida, 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.

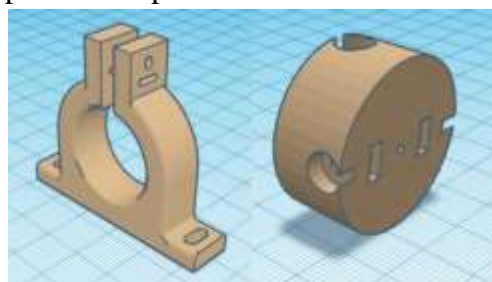


Figura 4: Peças modeladas em 3D.

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 em corte 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.

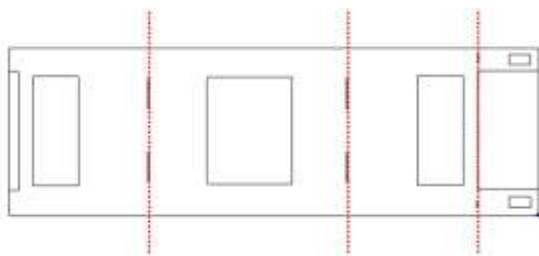


Figura 5: Peça projetada para corte a laser..

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 6: QR-Code para download dos arquivos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar o módulo no ensino de controle automático foi desenvolvida uma prática de projeto de controle PI por cancelamento, análoga àquelas que seriam desenvolvidas pelos alunos em sala de aula.

Identificou-se os parâmetros do sistema através de uma resposta ao degrau, conforme ilustrado na Figura 7. O ganho do sistema é de 0,802 V/V e a constante de tempo é de 0,62 segundos.

Utilizando a tabela de sintonia do método SIMC (Skogestad, 2003), para obter-se uma constante de tempo de malha fechada de 1 segundo, sendo mais lento que a malha aberta, em seguida, de 0,6 segundo, tão rápido quanto a malha

aberta e, finalmente, uma de 0,3 segundos, mais rápido que a malha aberta.



Figura 7: Resposta ao degrau do módulo ensaiado.

A resposta do sistema é malha fechada é apresentada na Figura 8, ilustrando a aplicação do controle em malha fechada e refletindo a discussão teórica do tema.

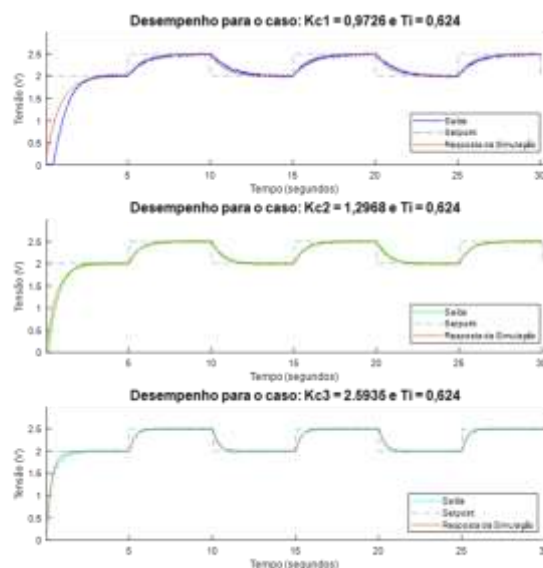


Figura 8: Ensaio de mudança de setpoint em malha fechada, para diferentes sintonias do controle PI.

Assim, 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 acima, sendo capaz de refletir

importantes problemas do mundo real, uma vez que as técnicas para identificação, análise e projeto de controle que podem ser tratados com o módulo são análogas às que podem ser usadas para outros sistemas monovariáveis e 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, além de ter o LED para indicação de funcionamento e a percepção de velocidade angular do acoplamento. 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. Considerando a fonte, o custo da impressão 3D e do corte a laser, o módulo tem o valor de aproximadamente 56 reais. O atendimento ao critério da facilidade de entender e utilizar é constatado por o controle de velocidade de motores CC ser algo próximo 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 levantados na introdução, cabe destacar que o módulo proposto possui valor de produção compatível com o que se observa na literatura, sendo alguns centavos mais barato que o trabalho de do Carmo et al. (2020), que já era o mais barato dentre os elencados. Fora isso, o presente projeto

divulga todos os arquivos necessários à sua reprodução, algo que é feito apenas no trabalho de Takács et al. (2021), porém este último trabalha com encoder, que encarece o custo do módulo.

#### 4. CONCLUSÕES

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 são 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 por estudantes. Ademais, a reprodução 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 avaliar o impacto pedagógico da aplicação dos módulos propostos no desenvolvimento dos estudantes na disciplina de teoria de controle no IFRO Campus Calama.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. **An integrated experimental module for process control and modeling**. (2006).

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. **Contribuições da cultura maker para o ensino de engenharia de produção no contexto das novas diretrizes curriculares**, (2019).

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. **Embedded controller based learning system for dc motor control**. *Int J Innov Comput Inform Control* (2019)., 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. **Controle de velocidade de perfuração de poços de petróleo com rejeição de carga via estimação e pré-alimentação da perturbação**, (2003).

Schons, S.C.d.M. et al. **Implementação de estratégia de controle preditivo em cascata em sistema embarcado de tempo real e fpga**. (2017a).

Schons, S.C.d.M. et al. **Implementação e avaliação experimental de um gpc em sistema embarcado de tempo real**. (2017b).

Serralheiro, W.A.d.O. e de Souza, E.Z. **Plataforma para implementação de técnicas de controle digital adaptativo no sistema motor-tacogerador**. (2012).

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>.

Taka'cs, G., Boldocky`, J., Mikul'as, E., Konkoly, T., e Gulan, M. Motoshield: Open miniaturized dc motor hardware prototype for control education. In 2021 **IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)**, 1–9. IEE, (2021).