

MODELO DE BANCADA DE CONTROLE DE VELOCIDADE PARA ENSINO MULTIDISCIPLINAR EM LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA ELÉTRICA

André Felipe Souza da Cruz – andcruz@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica.
Rodovia BR 422 Km 13 - Canteiro de Obras - UHE Tucuruí - Vila Permanente.
68464-000 – Tucuruí – Pará.

Felipe Silveira Piano – felipe.s.piano.99@gmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica.
Rodovia BR 422 Km 13 - Canteiro de Obras - UHE Tucuruí - Vila Permanente.
68464-000 – Tucuruí – Pará.

Amanda Beatriz Ferreira Bezerra – amanda.f.bezerra1@gmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica.
Rodovia BR 422 Km 13 - Canteiro de Obras - UHE Tucuruí - Vila Permanente.
68464-000 – Tucuruí – Pará.

Dywles de Souza Soares – dywles.souza@gmail.com

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica.
Rodovia BR 422 Km 13 - Canteiro de Obras - UHE Tucuruí - Vila Permanente.
68464-000 – Tucuruí – Pará.

Rafael Suzuki Bayma – rafaelbayma@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica.
Rodovia BR 422 Km 13 - Canteiro de Obras - UHE Tucuruí - Vila Permanente.
68464-000 – Tucuruí – Pará.

Resumo: *Uma das principais preocupações no ensino de Engenharia é a conexão entre os conceitos das diversas áreas que formam o alicerce dos conhecimentos do profissional. Em particular, na Engenharia Elétrica podemos destacar a conexão entre os conceitos de Circuitos Elétricos, Eletrônica e Sinais e Sistemas. Das componentes curriculares de um curso de graduação em Engenharia, as disciplinas laboratoriais são as maiores responsáveis pela integração dos conhecimentos teóricos na aplicação e resolução de problemas práticos. Infelizmente, por questões econômicas, nem todos os laboratórios estão preparados para atender tais necessidades de desenvolvimento técnico. Tendo em vista tal dificuldade, alunos da Universidade Federal do Pará, do curso de Engenharia Elétrica, desenvolveram bancadas de controle de velocidade para o estudo de Sinais e Sistemas, que podem ser aplicadas nas disciplinas laboratoriais de Eletrônica e Sistemas de Controle. Neste trabalho são apresentadas a construção e análise inicial de sinais destas bancadas de controle, com o objetivo de então possibilitar a aplicação da metodologia de modelagem de sistemas nestas disciplinas de laboratório.*

Palavras-chave: *Experimento de laboratório. Modelagem de sistemas. Baixo custo. Arduino.*

1 INTRODUÇÃO

As práticas metodológicas de ensino em engenharia têm contribuído para a formação de profissionais capazes de aliar conceitos teóricos a aplicações técnicas. Estes métodos têm sido desenvolvidos baseados principalmente nas dificuldades encontradas pelos estudantes durante a formação acadêmica (POWELL et al., 2015). Na graduação, a maioria dos estudantes de engenharia enxerga boa parte da grade curricular do curso como algo abstrato. Além disso, há dificuldade de conectar os conceitos entre as áreas dentro da Engenharia Elétrica, dificultando o desenvolvimento de trabalhos multidisciplinares. Outra questão persistente é a dificuldade que os estudantes encontram em enxergar e relacionar os conceitos da Engenharia Elétrica no seu dia a dia (POWELL et al., 2015).

A metodologia de aprendizagem baseada em problemas (PBL – *Problem-Based Learning*), que na engenharia é muitas vezes referida como aprendizagem baseada em projetos (PBL – *Project-Based Learning*), pode tratar de questões como interdisciplinaridade e integração entre teoria e prática, além de promover estratégias que podem acrescentar no desenvolvimento do conhecimento técnico-científico, sem sobrecarregar ou estender as componentes curriculares (CAMARGO RIBEIROA, 2008). O PBL é fundamentado em pesquisas que demonstram que a aprendizagem não se baseia apenas na simples acumulação de informações individuais durante a academia, mas também na construção de conhecimentos a partir de conceitos e ações cognitivas, o que torna a metodologia PBL uma ação ativa entre as partes (discentes e docentes) na construção do conhecimento (CAMARGO RIBEIROA, 2008). Adicionalmente, para reduzir a insegurança dos estudantes nos primeiros anos de curso, práticas pedagógicas de aproximação docente têm sido realizadas em cursos introdutórios. Como por exemplo, a execução da disciplina de “Seminário de Engenharia Elétrica”, que conta com professores das quatro áreas da Engenharia Elétrica: Eletrônica, Sistemas de Controle, Sistemas de Potência e Telecomunicações, para apresentar uma visão geral do curso, as possíveis linhas de pesquisa e atuação, além das possibilidades de carreira na Engenharia Elétrica.

A metodologia baseada no uso de aparatos experimentais também tem contribuído de forma incontestável na formação técnico-profissional de um engenheiro, bem como na especialização e atualização de profissionais na área (BIANCHINI & GOMES, 2006). Talvez o defeito mais persistente na estrutura curricular tradicional dos cursos de engenharia é o fato do aluno estudar separadamente os conceitos referentes às áreas de conhecimento, e mantê-los separados durante as etapas do curso (POWELL et al., 2015). No caso da Engenharia Elétrica, uma parte dos alunos tem dificuldade para reconhecer a conexão entre as disciplinas de circuitos elétricos e eletrônica, e então futuramente conectá-las aos conceitos da análise de sistemas lineares. Em vista desta dificuldade, a metodologia baseada em aparatos experimentais pode ser tratada em cursos de sistemas embarcados, em geral, a partir do terceiro ano de graduação (POWELL et al., 2015; BIANCHINI & GOMES, 2006). Neste curso podem ser combinados ensinamentos com experimentos laboratoriais, onde cada experimento reúne conhecimento das mais diversas áreas da Engenharia Elétrica.

Uma das maiores dificuldades de se intensificar o uso de experimentos baseados em aparatos de controle em disciplinas, teóricas e de laboratório, são os custos dos kits comerciais, sendo elevados para muitas instituições de ensino (LOPES et al., 2013). Infelizmente, boa parte dos cursos de engenharia nas universidades públicas, em particular Engenharia Elétrica, não pode usufruir de bons laboratórios para atender a estes desejados objetivos, o que prejudica a trajetória acadêmica e profissional do engenheiro, que deveria estar apto para aplicar seus conhecimentos teóricos na solução de inúmeros problemas de campo (LOPES et al., 2013; NEVES & FORMOSOS, 2007). Atualmente, laboratórios de simulação têm sido propostos para contornar tal problema. Por exemplo, em disciplinas

laboratoriais da área de Sistemas de Controle, tem sido proposta a utilização de softwares de simulação dinâmica para elaboração de plantas de controle. No entanto, ainda assim é notável a ausência do contato com o circuito embarcado que implementa o controle na prática. Uma forma menos onerosa de resolver esta questão pedagógica é a utilização de bancadas construídas com materiais reutilizados, como componentes eletrônicos de dispositivos descartados, e equipamentos de baixo custo como o Arduino, uma plataforma de prototipagem muito utilizada para experimentos de baixo custo nos cursos de ciências exatas (BRIDI et al., 2013).

Em uma aula experimental, que envolve sistemas com motores de corrente contínua (CC) de pequeno porte, podem ser realizados experimentos de controle de velocidade em malha aberta, ou fechada, sendo tratados conteúdos a respeito das leis de Kirchhoff, resposta em frequência, transformadas de Fourier e Laplace, modelagem linear, eletrônica de semicondutores, entre outros (POWELL et al., 2015; BIANCHINI & GOMES, 2006). A introdução do experimento prático multidisciplinar pode acelerar o aprendizado do estudante, além de tornar o ensino mais interessante e agradável aos seus olhos.

Tendo em vista à necessidade e a importância de se aplicar os conhecimentos teóricos em situações práticas e das dificuldades de se adquirir *kits* didáticos comerciais, faz se importante a proposta do desenvolvimento de bancadas de controle de baixo custo para o ensino na Engenharia Elétrica. Os benefícios da metodologia baseada na utilização destes aparatos se iniciam desde a confecção das bancadas, realizada por um grupo de estudantes orientados adequadamente, e vão até a utilização efetiva em disciplinas de sala de aula, ou de laboratório. Um diferencial é a utilização da abordagem de modelagem de sistemas, desde que estes protótipos possibilitam maior liberdade de acesso e identificação do seu funcionamento. Com esta premissa, alunos do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí, desenvolveram bancadas de controle de velocidade, utilizando componentes de baixo custo, para aplicações em disciplinas da área de Sistemas de Controle.

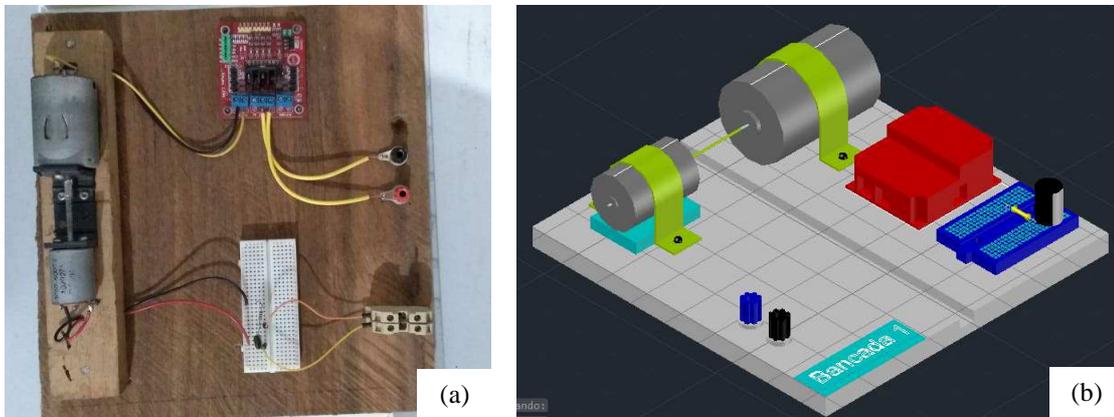
Neste trabalho são apresentadas a construção e análise de um modelo de bancada de controle de velocidade para a utilização em disciplinas de laboratório da área de Sistemas de Controle. Para isso, foram utilizados motores CC reutilizados, o microcontrolador Arduino e componentes de baixo custo. Como resultado, é apresentado o processo de identificação e modelagem do sistema que descreve o funcionamento da bancada, metodologia que poderá ser apresentada aos estudantes das disciplinas de laboratório, com a devida orientação. Neste contexto, a metodologia PBL pode ser aplicada em sala de aula desde que sejam definidos adequadamente os objetivos específicos dos experimentos utilizando as bancadas.

2 METODOLOGIA

O modelo da bancada de controle de velocidade proposto neste trabalho foi desenvolvido por um grupo de estudantes integrantes do Laboratório de Eletrônica – LETRON, da Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí. O protótipo inicial e o projeto de melhoria da bancada (este último desenvolvido no software AutoCAD 2012) são demonstrados na Figura 1. Em resumo, um sinal de tensão é enviado para o motor 1, que está acoplado mecanicamente ao motor 2, que pelo princípio de indução magnética da lei de Faraday, induz uma tensão nos terminais do motor 2, que após uma filtragem adequada é enviada para o microcontrolador, onde é processado adequadamente para a geração do sinal de controle, que será reenviado para o motor 1.

O processo de construção, os materiais utilizados, e o funcionamento detalhado da bancada são demonstrados nas seções subsequentes. No total foram construídas cinco bancadas.

Figura 1 – (a) Protótipo inicial; (b) Projeto de melhoria da bancada.

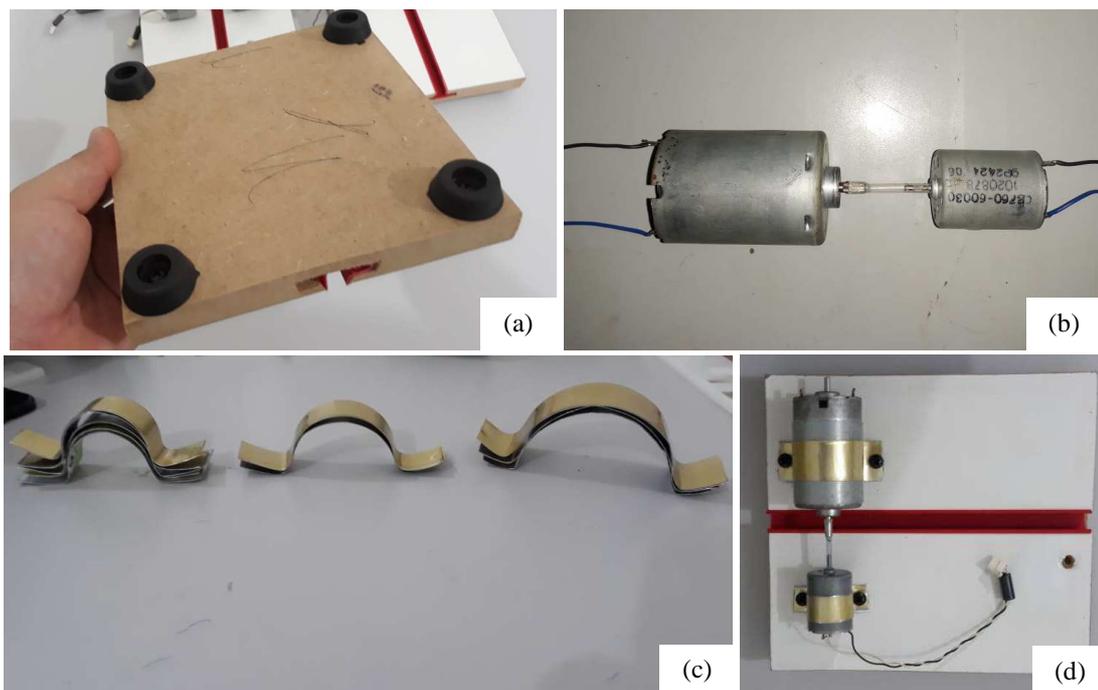


Fonte: O Autor, 2019.

2.1 Processo de construção da bancada

Para a construção das bancadas foram utilizadas peças de madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*) de 15mm de espessura, com dimensões de 16,5cm por 17,5cm. Na parte inferior de cada peça de MDF foram parafusados quatro pés de borracha simetricamente posicionados com é mostrado na Figura 2a. Na parte superior da bancada, foram posicionados dois motores CC de tamanhos diferentes, estes foram retirados em sua maioria de impressoras danificadas. Os motores tiveram seus eixos acoplados através de tubos de canetas (Figura 2b). Utilizando latas de desodorante reaproveitadas, foram preparadas abraçadeiras de metal (Figura 2c) para a fixação dos motores sobre as bancadas (Figura 2d).

Figura 2 – Processo de montagem das bancadas: (a) Fixação dos pés de borracha na parte inferior da peça de MDF; (b) Acoplamento entre os eixos dos motores CC; (c) Abraçadeiras de ferro; (d) Fixação dos motores CC.



Fonte: O Autor, 2019.

Por questões de confiança e otimização do processo de montagem, parte dos componentes da bancada foram comprados. Dentre estes estão as pontes H, as *protoboards* e os terminais conectores do tipo banana (Figura 3). Ressaltamos ainda que os custos para obtenção destes componentes isolados são incomparavelmente menores do que os custos para compra de *kits* comerciais que atendem os mesmos propósitos.

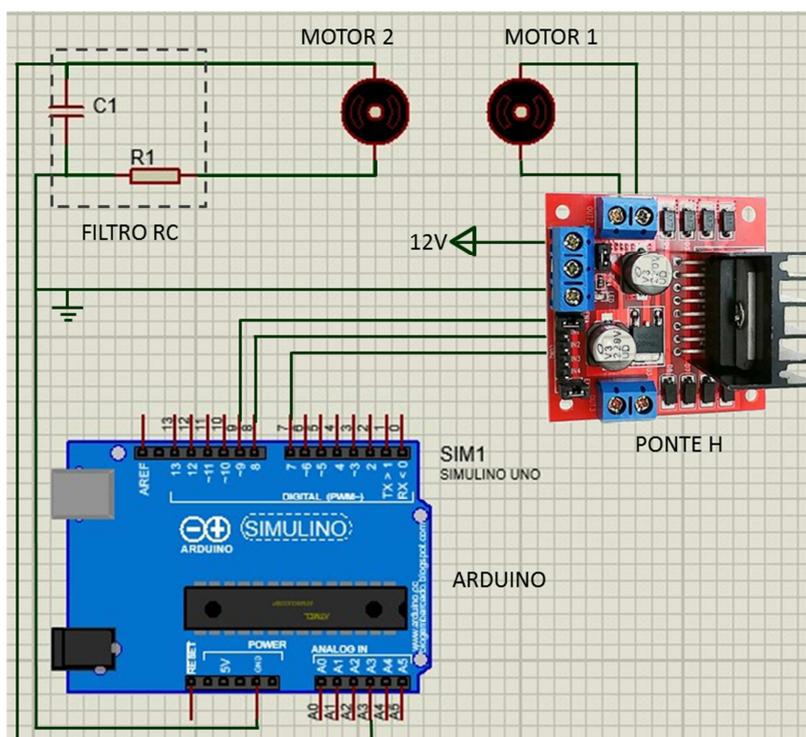
Figura 3 – Componentes adquiridos mediante compra: (a) *Protoboards* e Pontes H; (b) Terminais conectores.



Fonte: O Autor, 2019.

Fixados as pontes H, as *protoboards* e os terminais nas peças de MDF, o próximo passo da montagem da bancada se resume à preparação do circuito elétrico e o projeto do filtro RC (Resistor Capacitor). Na Figura 4 é demonstrado o esquema de ligação do circuito elétrico da bancada, neste, o motor 1 está conectado à ponte H, que é controlada através do sinal de tensão enviado pelas portas digitais do Arduino. O motor 2 está conectado a um circuito RC (filtro passivo passa baixa), que por sua vez envia a informação de tensão filtrada para a porta analógica do Arduino.

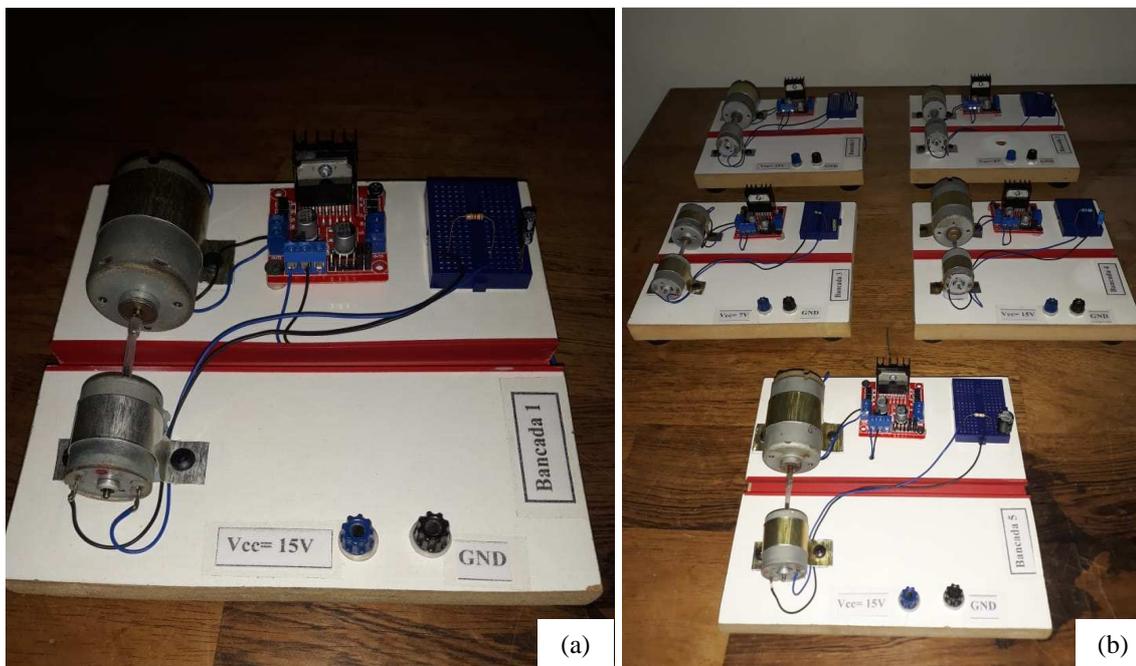
Figura 4 – Circuito Elétrico da bancada.



Fonte: O Autor, 2019.

Por fim, a Figura 5 mostra as bancadas de controle de velocidade finalizadas. Note que o Arduino não faz parte da estrutura das bancadas, isso foi feito intencionalmente, pois permite um maior desenvolvimento técnico de habilidades dos alunos que iram realizar experimentos nestas bancadas, além de evitar que a utilização dos microcontroladores se torne ociosa.

Figura 5 – Modelo de bancada de controle de velocidade: (a) Uma única bancada; (b) Cinco bancadas.



Fonte: O Autor, 2019.

2.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados na construção de uma única bancada são descritos na Tabela 1, juntamente com os valores e modo de aquisição.

Tabela 1 – Componentes e materiais utilizados.

Quant.	Descrição	Modo de aquisição	Custo
01	Peça de madeira MDF	Reaproveitado	–
02	Motores CC	Reaproveitado	–
06	Parafusos de rosca soberba	Reaproveitado	–
½	Lata de desodorante	Reaproveitado	–
½	Tubo de caneta	Reaproveitado	–
01	Resistor	Reaproveitado	–
01	Capacitor	Reaproveitado	–
02	Terminais banana	Comprado	RS 2,90
01	Protoboard	Comprado	RS 3,99
01	Ponte H – L298	Comprado	RS 15,30

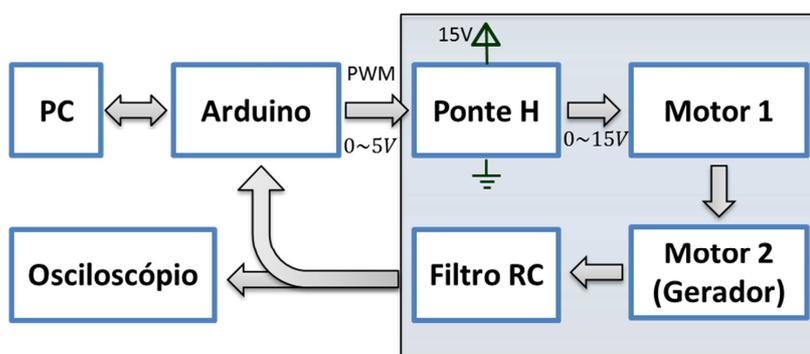
Fonte: O Autor, 2019.

Dessa forma, para construção de uma única bancada é necessária a quantia de R\$22,30, e para a confecção das cinco bancadas, o mínimo necessário para uma aula de laboratório com 20 participantes, são necessários os investimentos de R\$111,40.

2.3 Funcionamento da bancada

O funcionamento da bancada de controle de velocidade é descrito no fluxograma da Figura 6. Externo à bancada, são conectados um microcontrolador Arduino ligado pela conexão serial ao computador, e um osciloscópio de mesa. Primeiramente, uma rotina de programação é carregada no Arduino, que em seguida envia pela porta digital PWM (*Pulse Width Modulation*) um sinal de tensão entre 0 e 5V para a Ponte H, esta por vez amplifica essa informação e envia um sinal de tensão com amplitude entre 0 e 15V para o motor 1. Conectado mecanicamente ao motor 1, o motor 2 opera como um gerador CC, induzindo uma tensão ruidosa em seus terminais, que deve ser filtrada pelo Filtro passivo RC, e em seguida, enviada tanto para o Arduino, quanto para o osciloscópio, onde o sinal é observado em tempo real. Em posse desse sinal, o Arduino envia estas informações de volta para o computador onde estes dados serão tratados.

Figura 6 – Fluxograma de funcionamento da bancada de controle de velocidade.



Fonte: O Autor, 2019.

3 RESULTADOS

Para que a bancada de controle de velocidade seja operada adequadamente em atividades experimentais, primeiramente deve-se realizar um processo de identificação do modelo que descreve o funcionamento da bancada. Uma maneira de realizar tal processo é utilizar a técnica de modelagem empírica do sistema, ou seja, identificar os parâmetros de projeto a partir de testes de entrada e saída na bancada. Este é um ótimo exercício que pode vir a ser realizado por estudantes em uma aula de laboratório envolvendo o controle de velocidade.

Os primeiros testes de identificação do modelo foram realizados em malha aberta (sem realimentação de informação). Coletando os sinais com o auxílio do osciloscópio verificou-se que o sinal de saída do motor 2 apresentou ser altamente ruidoso. Por este motivo, foi implementado o filtro RC na saída do motor 2. Após uma série de testes, os valores dos parâmetros do filtro que apresentaram melhor resposta de filtragem foram: $R=2.2k\Omega$ e $C=10\mu F$. A partir dos componentes escolhidos foi calculada a frequência de corte $f_c=1/\omega RC=7.23Hz$.

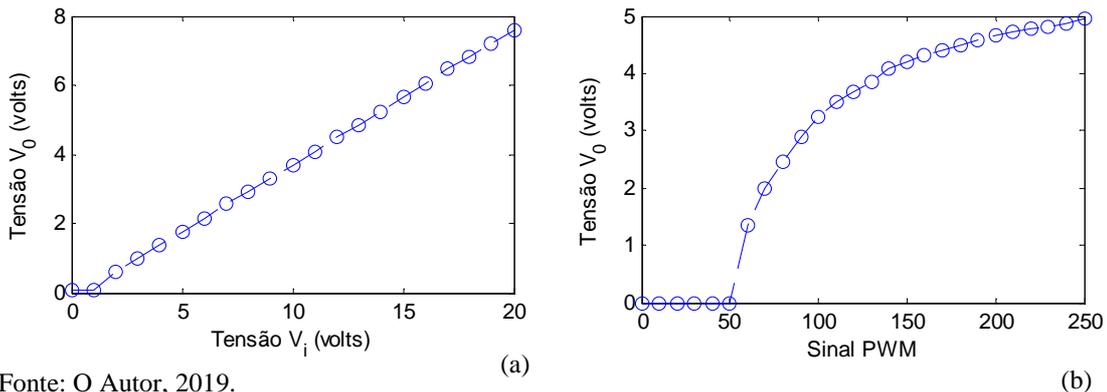
Primeiramente, foram injetadas entradas do tipo degrau de amplitude variando de 0V a 19V no motor 1, e em seguida foram medidos os valores de tensão induzida no motor 2, este resultado é demonstrado na Tabela 2. A relação entre os sinais de entrada e saída para os dados da Tabela 2 são demonstrados na Figura 7ª, onde V_i são as tensões de entrada e V_o a saída.

Tabela 2 – Sinais de entrada e saída para o primeiro teste em volts.

V_i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V_o	0,07	0,07	0,59	1	1,37	1,75	2,14	2,58	2,92	3,30
V_i	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
V_o	3,70	4,07	4,53	4,84	5,24	5,66	6,03	6,47	6,80	7,19

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 7 – (a) Relação entre os sinais de entrada e saída; (b) Relação entre sinal PWM e sinal de saída

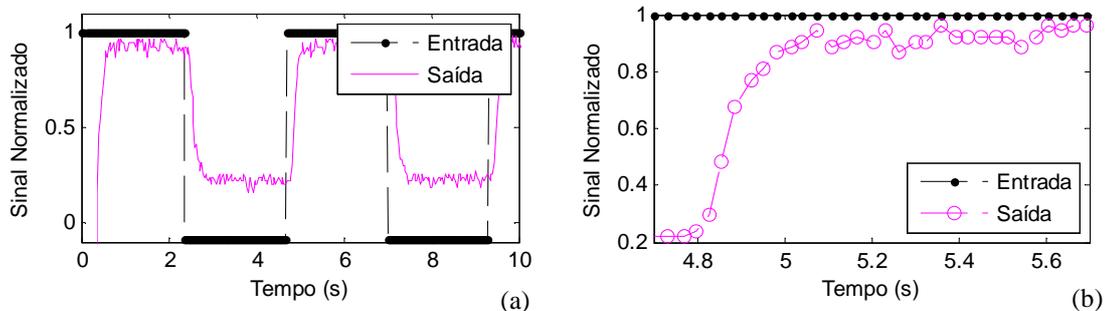


Fonte: O Autor, 2019.

A partir da Figura 7^a, podemos verificar a relação linear entre os sinais de entrada e saída. Esta característica nos dá a informação de ganho de malha aberta de aproximadamente 0.4 do sistema, além da região de zona morta do motor 2. Na segunda etapa de identificação, o Arduino foi conectado à bancada de controle de velocidade. A partir desse momento a entrada do sistema passou a ser considerada como a tensão de saída do Arduino, que varia de 0V a 5V a partir da modulação PWM. Neste processo, o microcontrolador emula uma saída analógica com resolução de 8 bits, gerando $2^8 = 256$ subdivisões de tensão de 0 a 5V, onde cada bit equivale a $5/256 \sim 0.0196V$. A modulação PWM produz não linearidade no sistema, o que pode ser visto na Figura 7b.

A partir da comunicação serial entre o computador e o Arduino, a rotina de controle de velocidade foi implementada no software MATLAB, que foi escolhido ao invés da própria IDE (*Integrated Development Environment*) do Arduino devido a grande quantidade de ferramentas fornecidas. Para verificar a resposta do sistema no tempo, primeiramente foi aplicado um sinal pulso retangular na entrada do sistema (Figura 8a). A partir de um intervalo da resposta do sistema, podemos identificar a constante de tempo do sistema (Figura 8b).

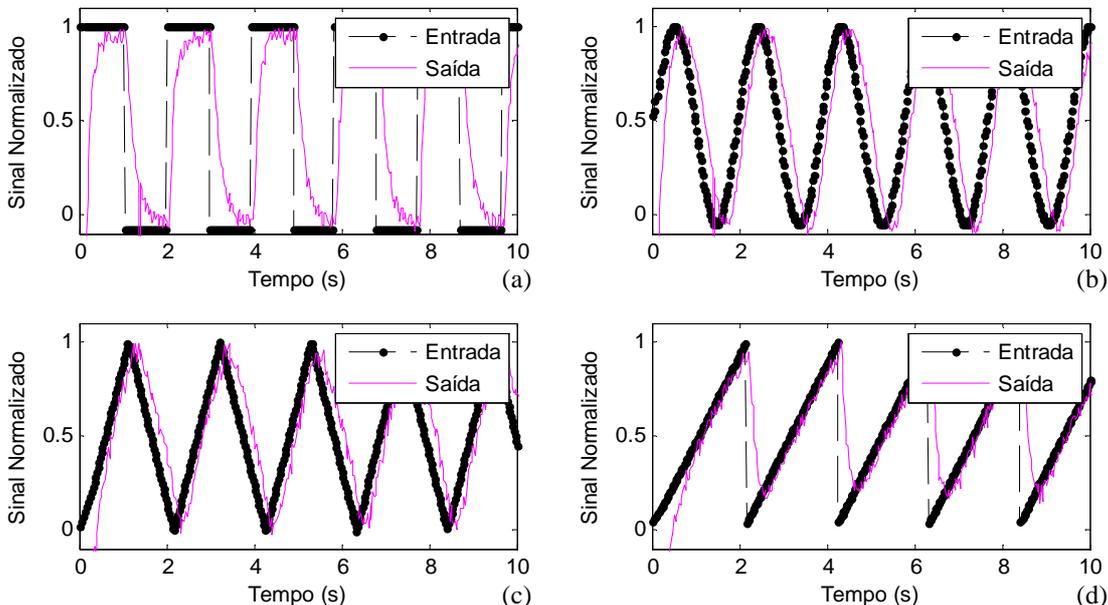
Figura 8 – (a) Relação entre os sinais de entrada e saída; (b) Relação entre sinal PWM e sinal de saída



Fonte: O Autor, 2019.

Em seguida, foram injetados sinais no sistema com a intenção de analisar a resposta da bancada, foram eles: onda quadrada, senoidal, onda triangular e dente de serra (Figura 9).

Figura 8 – Resposta do sistema a entradas: (a) Pulso retangular; (b) Senoidal; (c) Triangular; (d) Dente de serra.



Fonte: O Autor, 2019.

A partir da resposta no domínio do tempo da Figura 8b, estimou-se um valor de constante de tempo de $\tau = 0,089s$, sendo o tempo em que o sinal atinge 63% do valor de regime. NISE (2012) propõe que, para um sistema linear de primeira ordem, a planta do sistema em resposta a um degrau unitário de amplitude $A=K/a$ possui a forma da equação (1), onde K é o ganho em malha aberta e a seus polos, sendo $a=1/\tau$.

$$C(s) = \frac{K}{s(s+a)} = \frac{K/a}{s} - \frac{K/a}{s+a} \quad (1)$$

Por fim, a função de transferência da bancada de controle de velocidade é dada por:

$$G(s) = \frac{16,396}{s + 11,236} \quad (2)$$

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada a construção de uma bancada de controle de velocidade como proposta de experimento de baixo custo para utilização em aulas de laboratório do curso de Engenharia Elétrica. Como metodologia a ser aplicada no ensino de disciplinas de laboratório de controle, foi proposto o uso do método de modelagem empírica do sistema para identificação do modelo que descreve as características da bancada de controle de velocidade. Podemos verificar que os sinais de saída da bancada, com o projeto do filtro RC adequado, respondem coerentemente ao sinal de entrada, pelo menos na região linear. Ainda assim, em posse do modelo (2) da bancada, pode-se realizar experimentos em malha fechada propondo-se uma planta de controle adequada. Dessa forma, para futuros artigos, tem-se o objetivo de expor os resultados coletados após o primeiro teste em sala, além de implementar um controlador PID para a resposta da planta.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos integrantes do Laboratório de Eletrônica – LETRON – UFPA, e ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

BIANCHINI, David; GOMES, Francisco de Salles Cintra. **O ensino de engenharia por meio de laboratórios virtuais de eletrônica: uma reflexão entre a montagem no protoboard e a simulação.** Congresso de Educação em Engenharia (COBENGE). 2006.

BRIDI, Eder et al. **Oficina de arduino como ferramenta Interdisciplinar no curso de engenharia elétrica Da UFMT: a experiência do PET-elétrica.** Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE). Gramado, RS. 2013.

CAMARGO RIBEIROA, Luis Roberto. **Aprendizagem baseada em problemas (PBL) na educação em engenharia.** Revista de Ensino de Engenharia, v. 27, n. 2, p. 23-32, 2008.

LOPES, Leonardo Bruno; ENOQUE, Luccas; DE SOUZA OLIVEIRA, Everthon. **Proposta de Aerostabilizador como bancada didática para o ensino de controle de processos.** Seminário Nacional de Sistemas Industriais e Automação, 2013.

NEVES, Renato M. FORMOSOS, Carlos T. **Aprendizagem baseada em problemas: Estudo exploratório com alunos de graduação em cursos de engenharia civil.** Congresso Brasileiro de Educação (COBENGE). 2007.

NISE, Norman S.; SILVA, Fernando Rib. **Engenharia de sistemas de controle.** LTC, 2002.

POWELL, Harry C. et al. **Restructuring an electrical and computer engineering curriculum: a vertically integrated laboratory/lecture approach.** In: Proceedings of American Society for Engineering Education. p. 12-14. 2015.

MODEL OF SPEED CONTROL BENCH FOR MULTIDISCIPLINARY EDUCATION IN ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORIES

Abstract: *One of the main concerns in Engineering teaching is the connection between the concepts of the various areas that form the foundation of the professional's knowledge. In particular, in Electrical Engineering we can highlight the connection between the concepts of Electrical Circuits, Electronics and Signals and Systems. From the curricular components of an engineering degree, the laboratory disciplines are the main responsible for the integration of theoretical knowledge in the application and resolution of practical problems. Unfortunately, for economic reasons, not all laboratories are prepared to meet such technical development needs. In view of this difficulty, students from the Federal University of Pará, from the Electrical Engineering course, developed speed control benches for the study of Signals and Systems, which can be applied in the laboratory disciplines of Electronics and Control Systems. In this work, the construction and initial analysis of signals from these control benches are presented, with the purpose of enabling the application of the System modeling methodology in these laboratory disciplines.*

Key-words: *Construction of benches. System modeling. Low cost. Arduino.*