

## **PROPOSTA DE FERRAMENTA DIDÁTICA PARA ENSINO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA: INTEGRAÇÃO A CONVERSORES DE ENERGIA**

KHALED JAMAL BAKRI<sup>1</sup>, RODRIGO DA PONTE CAUN<sup>2\*</sup>; FELIPE WALTER DAFICO PFRIMER<sup>3</sup>; RENATO FRANCISCO MERLI<sup>4</sup>; ALBERTO YOSHIHIRO NAKANO<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Eletrônica, UTFPR, campus Toledo-PR, khaledbakri@outlook.com

<sup>2</sup>Me. em Eng. Elétrica, Prof. Adjunto, UTFPR, campus Toledo-PR, rodrigocaun@utfpr.edu.br

<sup>3</sup>Dr. em Eng. Elétrica, Prof. Adjunto, UTFPR, campus Toledo-PR, pfrimer@utfpr.edu.br

<sup>4</sup>Me. em Ens. de Ciências e Educação Matemática, Prof. Assistente, UTFPR, campus Toledo-PR, renatomerli@utfpr.edu.br

<sup>5</sup>Dr. em Eng. Elétrica, Prof. Adjunto, UTFPR, campus Toledo-PR, nakano@utfpr.edu.br

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016  
29 de agosto a 2 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

**RESUMO:** Neste trabalho é desenvolvido um objeto de aprendizagem aplicado ao controle de sistemas eletrônicos envolvendo conversores de energia. O protótipo disponibilizará dois graus de liberdade, o primeiro, na escolha da topologia do conversor de energia e, segundo, na escolha da natureza do controlador a ser projetado, no caso, analógico ou digital. Na etapa de testes, realiza-se a validação do projeto através da implementação do conversor CC-CC (corrente contínua para corrente contínua) abaixador atendendo a premissa de erro de regime estacionário nulo. Finalmente, um *kit* de desenvolvimento em controle, contendo um tutorial para aplicações em controle digital envolvendo o microcontrolador TM4C123GH6PMI, será constituído e disponibilizado como o objeto de aprendizagem. O conversor *Buck* e um controlador analógico são os focos deste trabalho na iniciação científica do primeiro autor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle de sistemas eletrônicos; conversores CC-CC; objeto de aprendizagem.

### **PROPOSAL FOR DIDACTIC TOOL FOR TEACHING IN ELECTRONIC ENGINEERING: INTEGRATION IN POWER CONVERTERS**

**ABSTRACT:** In this paper a learning object applied to electronic control systems in power converters, is developed. The prototype provide two degrees of freedom that allows the selection of the power converter topology and the selection of an analog or digital controller that will be designed. In the test phase, takes place the validation through the implementation of a stepdown DC-DC (direct current to direct current) converter assuming the hypothesis of null steady state error. Finally, a control development kit, containing a tutorial for applications in digital control for the TM4C123GH6PMI microcontroller, will be made and available as learning object. The Buck converter and an analog controller are the focus of this work in an undergraduate research project of the first author.

**KEYWORDS:** Electronic control systems; DC-DC converters; learning object.

### **INTRODUÇÃO**

Os meios de produção (composto por equipamentos, infraestrutura, etc.) e de serviço estão passando por profundas mudanças, caracterizadas por uma supervalorização do conhecimento (Valente, 1995). Em muitas áreas de pesquisa, “a maioria das competências adquiridas por uma pessoa no início de seu percurso profissional estarão obsoletas no fim de sua carreira” (Lévy, 1999) de modo que o aprendizado contínuo é uma meta para o profissional do futuro.

Certamente, estamos adentrando na sociedade do conhecimento em que os processos de sua aquisição assumirão papel de destaque, ou seja, de primeiro plano (Drucker, 1993; Naisbitt & Aburdene, 1990). Essa mudança implica em uma alteração de postura dos profissionais em geral e, portanto, requer o repensar dos processos educacionais. A educação não pode mais ser apenas baseada

na instrução que o professor passa ao aluno, mas na construção do conhecimento pelo aluno e no desenvolvimento de competências como aprender a buscar a informação, compreendê-la e saber utilizá-la na resolução de problemas.

A tentativa de modernizar ou repensar a educação tem sido feita através da introdução de tecnologias no ensino, e como aponta Kenski (2012) a “educação e tecnologia são indissociáveis”. A partir do início do século XX,

[...] a convergência da ciência e tecnologia inaugurou uma “tecnologia científica” que determinou um avanço exponencial nas invenções e descoberta de soluções para investigações e questionamentos sobre os fenômenos do mundo, o que leva à impressão de uma ilimitada possibilidade de aquisição e produção do conhecimento (Silva, 2013).

Partindo do princípio que introduzir novas tecnologias no ensino podem proporcionar uma melhoria na aprendizagem do conhecimento e, considerando relatos de professores, discentes e egressos em atividades de iniciação científica/tecnológica (IC/IT) e trabalhos de conclusão de curso em Engenharia Eletrônica do campus Toledo, verificou-se a necessidade de objetos de aprendizagem que possibilitem explorar aplicações práticas em disciplinas, principalmente, na disciplina de Controle de Sistemas Lineares.

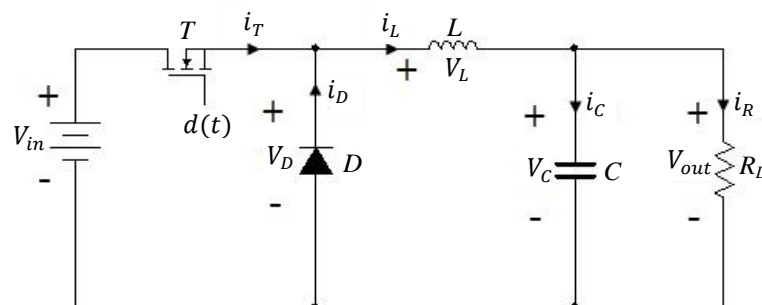
Nesse contexto, este trabalho apresenta resultados preliminares de um projeto de IC voltado à produção de um objeto de aprendizagem, definido como uma ferramenta e/ou dispositivo reutilizável que serve ao ensino e a aprendizagem (Willey, 2000), com foco em aplicações de controle em conversores de energia, tendo como alvo alunos de graduação e pós-graduação de Engenharia Elétrica e áreas afins. O objetivo da ferramenta didática em questão é proporcionar conhecimento através da investigação e projeto de controladores analógicos e digitais para as configurações básicas de conversores CC-CC. Em seguida, apresentar-se-á a metodologia utilizada, e, por fim, algumas discussões sobre as possibilidades de utilização desse material na sala de aula.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O objeto em estudo abordará o controle de três topologias básicas de conversores CC-CC: *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*. Para este fim, planeja-se o desenvolvimento de um circuito que permita a comutação entre estes três tipos de conversores e a possibilidade de substituição do controlador, construído de forma modular, proporcionando flexibilidade ao estudante durante uma atividade prática. Pelo fato do IC estar ainda em andamento, neste artigo serão discutidas apenas as considerações teóricas e práticas referentes ao conversor *Buck*, deixando os outros conversores *Boost* e *Buck-Boost* e o controlador digital para trabalhos futuros.

O conversor *Buck* é caracterizado por ser um abaixador de tensão, ou seja, o nível de tensão da saída do conversor é menor que à entrada aplicada. A Figura 1 apresenta os elementos necessários para o desenvolvimento do circuito de potência contendo a chave eletrônica ( $T$ ), o diodo ( $D$ ), o capacitor ( $C$ ), o indutor ( $L$ ) e a carga ( $R_L$ ), arranjados para atender a configuração do conversor de energia em estudo. A seguinte discussão abordará o projeto, a simulação e a implementação do conversor em matriz de contatos.

Figura 1. Circuito eletrônico do conversor *Buck*.



O projeto do conversor *Buck* se baseou em parâmetros pré-determinados, dentre os quais, destacam-se: tensão de entrada ( $V_{in}$ ), razão cíclica ( $d(t)$ ), corrente no indutor ( $i_L$ ), variação da corrente no indutor ( $\Delta i_L$ ), tensão de saída ( $V_{out}$ ), variação da tensão de saída ( $\Delta V_{out}$ ) e frequência de

chaveamento ( $f_c$ ). Após as etapas de projeto, o conversor foi simulado em malha aberta para avaliar se o circuito de potência atendeu as respectivas especificações de projeto, avaliando adicionalmente o comportamento dos seguintes sinais: corrente no transistor ( $i_T$ ), no diodo ( $i_D$ ), no capacitor ( $i_C$ ) e na carga ( $i_R$ ), bem como a tensão no diodo ( $V_D$ ), capacitor ( $V_C$ ) e indutor ( $V_L$ ).

Com relação ao controle do nível de tensão na saída do conversor, destaca-se que é realizado via chaveamento da tensão de entrada, por meio da chave semicondutora  $T$ , no qual o valor médio da tensão de interesse ( $V_{out}$ ) é controlado pelo tempo em que a chave eletrônica permanece aberta ou fechada empregando-se a modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse-Width Modulation* - PWM), cuja frequência de chaveamento permanece constante diante da variação do sinal modulante de controle (Mohan, 2002).

Em seguida, modelou-se o conversor *Buck* usando o modelo médio de espaço de estados, obtendo a função de transferência através da relação entre a tensão de saída do conversor pela razão cíclica da chave semicondutora. Com base neste estudo preliminar, foi constatado que o sistema é do Tipo 0, ou seja, não possui nenhum integrador, implicando no tradicional erro de regime estacionário. Portanto, uma forma simples de corrigir o erro de regime estacionário corresponde a utilização de um controlador proporcional-integral (PI), sendo projetado pelo método de Lugar das Raízes no domínio da frequência (Ogata, 2010).

Para completar o sistema, incluiu-se uma eletrônica analógica responsável pelo processamento dos sinais contínuos em consonância com a malha de controle e seguiu-se para a simulação em *software SPICE* (do inglês, *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). Constatou-se que as especificações de erro em regime estacionário foram atendidas, premissa almejada neste projeto. Ao final, foi aplicado o controlador analógico, compondo a fase de testes práticos em laboratório, com a implementação em matriz de contatos para validar os resultados teóricos do conversor de energia e do sistema de controle, conforme apresentado na próxima seção.

Por fim, com o intuito de ampliar a aplicabilidade do protótipo na disciplina de controle, propôs-se a extensão dos resultados à disciplina de controle digital através da aplicação do método de mapeamento de polos e zeros do controlador analógico projetado no domínio “s”. Este processo refletiu positivamente no desenvolvendo de um tutorial resumido com foco na aplicação de equações a diferença de controladores, integrando digitalmente parte do processamento analógico dos sinais como, por exemplo, a geração interna do PWM e da operação de subtração, utilizando a placa de desenvolvimento EK-TM4C123GXL, que possui um processador ARM® Cortex™-M4 TM4C123GH6PMI, indicado para aplicações de processamento digital de sinais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando o processo de validação entre teoria/prática das etapas de concepção do protótipo, houve o desenvolvimento da malha de controle analógica por meio de uma placa em matriz de contatos. A Figura 2 apresenta a setorização do protótipo, conforme as especificidades que envolvem o processo de controle de conversores CC-CC. Para o projeto do conversor *Buck* utilizou-se os parâmetros definidos na Tabela 1, considerando um protótipo de baixa potência.

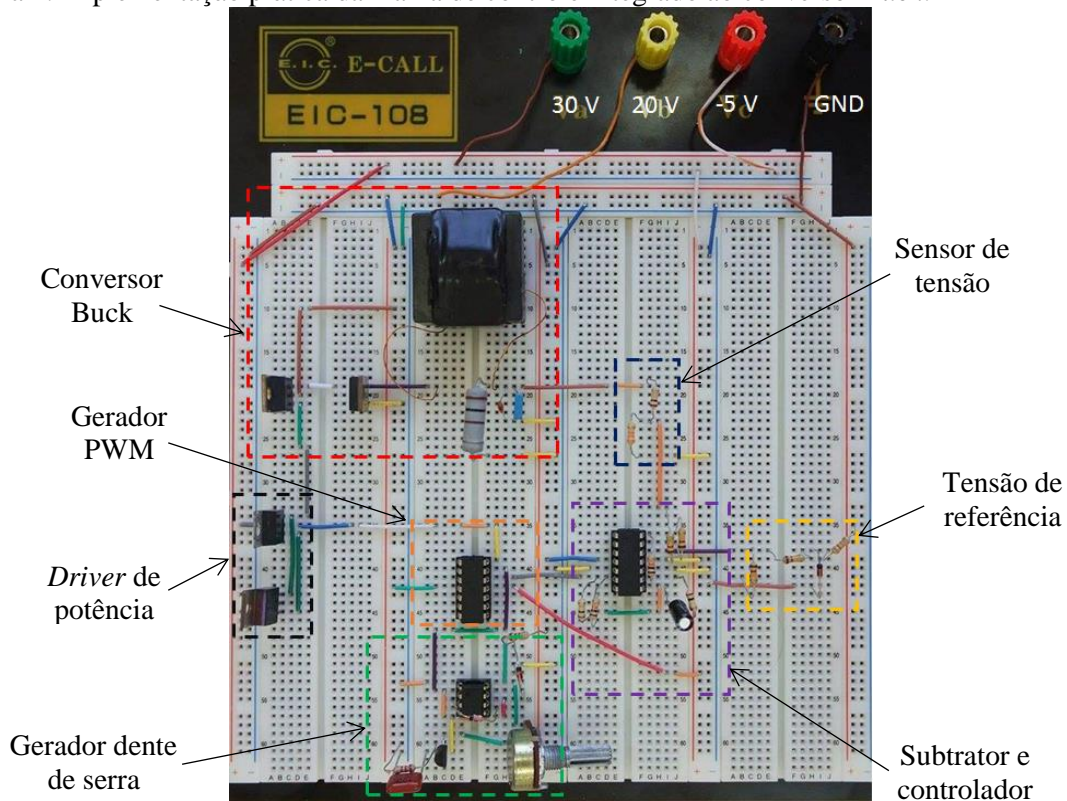
Tabela 1. Parâmetros para projeto do filtro LC passa baixa

Tensão de entrada, $V_{in}$	20 V
Tensão de saída, $V_{out}$	10 V
Corrente no indutor, $i_L$	100 mA
Frequência de chaveamento, $f_c$	20 kHz
Ciclo de trabalho ( <i>Duty cycle</i> ), $d(t)$	0,5
Carga, $R_L$	100 $\Omega$

Considerando os resultados obtidos na Figura 3, observa-se que os principais sinais envolvidos no projeto do circuito de potência controlado por um circuito analógico PI atenderam as condições impostas na Tabela 1, além de garantir um erro de regime estacionário nulo. Além disso, nota-se que a corrente de *inrush* do conversor não atingiu valores prejudiciais ao circuito de potência, motivando o

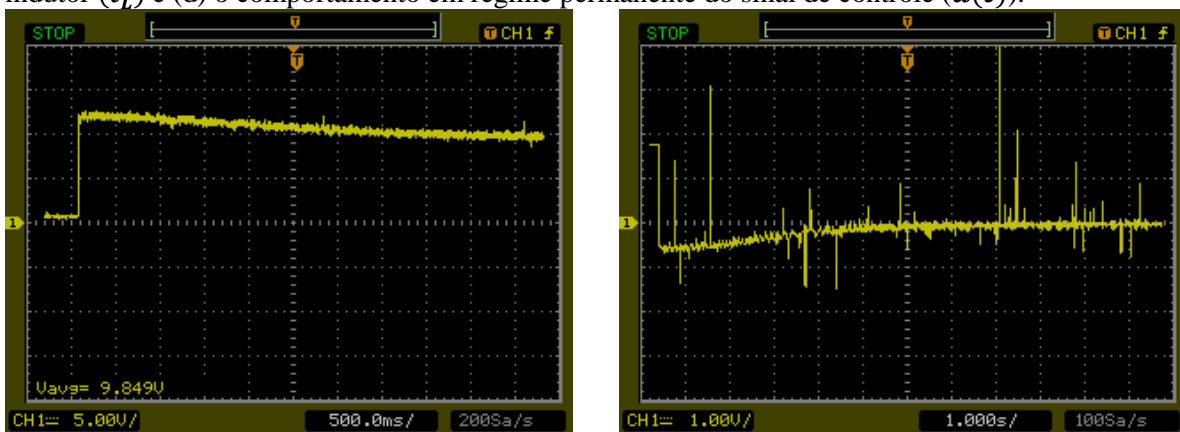
desenvolvimento de um estágio de entrada retificador, alimentado diretamente da rede de corrente alternada (CA). Assim, o protótipo aproximar-se-á das convencionais fontes chaveadas do tipo *of-the-line*, que são utilizadas comercialmente.

Figura 2. Implementação prática da malha de controle integrado ao conversor *Buck*.



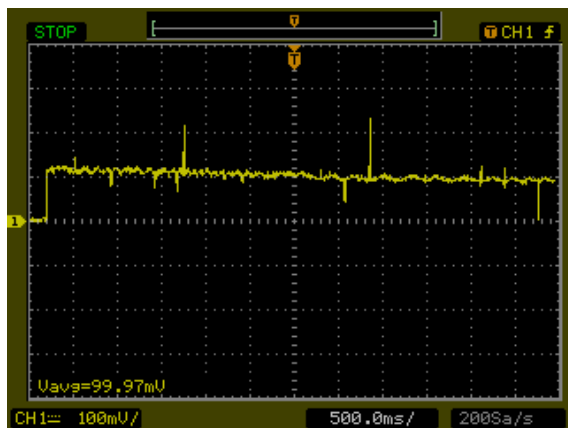
Neste projeto de IC, após a finalização construtiva dos *kits* de desenvolvimento em sistemas de controle linear, uma etapa de coleta de dados será realizada para demonstrar sua eficácia no processo ensino/aprendizagem junto às turmas de alunos do curso de graduação em Engenharia Eletrônica do campus Toledo. Neste caso, o uso do objeto de aprendizagem ocorrerá em duas etapas: identificação do problema e a busca de uma solução que atenda as especificações delineadas pelo professor. Outra abordagem para este projeto consiste no apoio a interdisciplinaridade entre as disciplinas de Eletrônica de Potência e, em especial, Controle de Sistemas Lineares analógicos e digitais, consolidando o conhecimento através de atividades práticas em sistemas eletrônicos.

Figura 3. Comportamento transitório, sendo (a) tensão de saída ( $V_{out}$ ), (b) sinal de erro (subtração entre o sinal de amostra da tensão de saída e a referência do degrau), (c) tensão espelho da corrente no indutor ( $i_L$ ) e (d) o comportamento em regime permanente do sinal de controle ( $d(t)$ ).

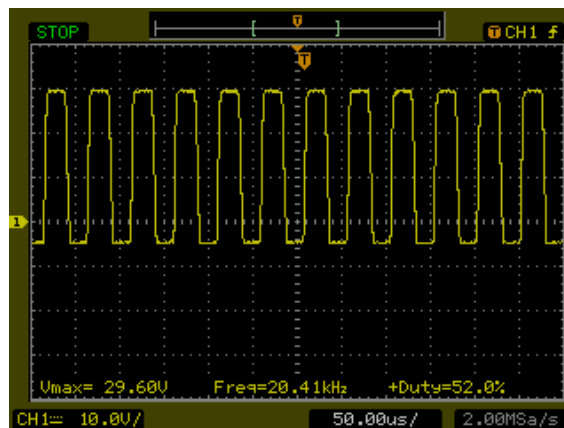


(a)

(b)



(c)



(d)

## CONCLUSÃO

O projeto de IC alcançou em sua fase inicial o objetivo de produzir um protótipo de circuito eletrônico no domínio da Eletrônica de Potência com vistas ao desenvolvimento de controladores analógicos e sua aplicação prática, ou seja, o objeto de aprendizagem. Atualmente, o desenvolvimento do sistema de controle digital está em fase de testes práticos, produzindo uma forte contribuição na substituição dos controladores analógicos pelos digitais através do uso de um algoritmo *perform* para o microcontrolador TM4C123GH6PMI, viabilizando o uso de equações à diferença resultantes das mais diversas técnicas de projetos de controladores no domínio “z”. Por conseguinte, após a finalização dos testes em matriz de contatos, uma placa de circuito impresso (do inglês, *Printed Circuit Board* – PCB) e três máscaras de trilhas comutadoras serão produzidas com a finalidade de viabilizar um *kit* de desenvolvimento em sistemas de controle. Assim, o protótipo final de aprendizagem disponibilizará alguns níveis de autonomia ao acadêmico de Engenharia Eletrônica da UTFPR campus Toledo, ou seja, a escolha da topologia de conversor CC-CC (*Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*) e a natureza do controlador (discreto ou contínuo) a ser aplicado.

## REFERÊNCIAS

- Drucker, P. F. Post-capitalist society. 5 ed. New York: HarperCollins, 1993, 186p.
- Kenski, V.M. Educação e tecnologias: O novo ritmo da informação. 3 ed. Campinas: Papyrus, 2012, 141p.
- Lévy, P. Cibercultura. Tradução: Carlos Irineu Costa. São Paulo: Ed. 34, 1999, p. 157.
- Mohan, N.; Underland T. M.; Robbins, W.P. Power electronics: Converters, applications and design. 3 ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2003, 802p.
- Naisbitt, J.; Aburdene, P. Megatrends 2000: ten new directions for the 1990's. New York: Avon Books, 1990, 461p.
- Ogata, K. Engenharia de controle moderno. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010, 809p.
- Silva, P. K. L. e. A escola na era digital. In: Abreu, C. N.; Eisenstein, E.; Estefenon, S. G. B. (Org.). Vivendo esse mundo digital: impactos na saúde, e nos comportamentos sociais. Porto Alegre: Artmed, 2013, p. 138.
- Valente, J. A. Informática na educação: confrontar ou transformar a escola. *Perspectiva*, Florianópolis, v. 13, n. 24, p. 41-49, jan. 1995. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/perspectiva/article/view/10703/10207>. Acesso em: 26 de junho de 2016.
- Wiley, D. Connecting learning objects to instructional design theory: A definition, a metaphor, and a taxonomy, 2000. Disponível em: <http://reusability.org/read>. Acesso em: 26 de junho de 2016.