



Jun 7 2024 11:47AM Jun 7 2024 11:46AM PLATAFORMA DIDÁTICA ABERTA PARA EXPERIMENTAÇÃO E CONTROLE DE CONVERSOR CC-CC BUCK

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5125

Autores: MARIA ALINE GONCALVES, ELIANE SILVA CUSTODIO

Resumo: Este estudo apresenta uma plataforma didática aberta para experimentação e controle digital de um conversor CC-CC Buck. A plataforma integra hardware de eletrônica de potência com um microcontrolador, proporcionando uma experiência prática e imersiva no projeto e análise de conversores de potência. A metodologia adotada enfatiza o ensino de eletrônica de potência a partir da perspectiva do controle, promovendo uma abordagem interdisciplinar e prática. O estudo destaca a importância de combinar teoria, simulação e observação experimental para um aprendizado abrangente e significativo.

Palavras-chave: Plataforma didática; Conversor CC-CC Buck; Eletrônica de potência; Controle digital; Ensino prático.

PLATAFORMA DIDÁTICA ABERTA PARA EXPERIMENTAÇÃO E CONTROLE DE CONVERSOR CC-CC BUCK

INTRODUÇÃO

Conversores estáticos de potência são sistemas fundamentais em aplicações como energia eólica e eletrônica de potência, abrangendo desde a modulação por largura de pulso (PWM) até o projeto de circuitos de controle e modelagem dinâmica. A pesquisa nessa área tem proporcionado diversas ferramentas e métodos que aprimoram o ensino e a compreensão desses sistemas, como as ferramentas educacionais baseadas em computador, que permitem um ensino mais eficiente em termos de custo e tempo, oferecendo interfaces gráficas para manipulação e visualização de formas de onda (AKCAYOL; YIGIT, 2004). Modelos dinâmicos lineares e invariantes no tempo (LTI) também são cruciais para entender a interação dinâmica dos circuitos de comutação estática com a rede elétrica, representando com precisão a resposta dinâmica de dispositivos como TCSC e conversores HVDC (PERKINS; IRAVANI, 1999).

No entanto, a complexidade desses sistemas e a necessidade de integrar conhecimentos de diferentes áreas, como eletrônica de potência, controle e modelagem, apresentam desafios para o ensino e aprendizagem. Abordagens tradicionais, muitas vezes focadas em aspectos teóricos e com pouca prática experimental, podem não ser suficientes para desenvolver as habilidades necessárias para o projeto e análise de conversores estáticos de potência.

Visando superar essas limitações, diversos autores têm buscado abordagens interdisciplinares e práticas para o ensino de eletrônica de potência. De Oliveira e Venkataramanan (2008), por exemplo, propõem uma metodologia que ensina Eletrônica de Potência sob a perspectiva do Controle, utilizando uma representação ideal do interruptor de potência e abrangendo quatro configurações de conversores não isolados. O programa inclui desde observação e medição experimental estática até simulações dinâmicas não lineares e lineares, incentivando a participação ativa dos alunos no processo de aprendizagem.

O trabalho de Boutte Aissa *et al.* (2023) apresenta uma abordagem com descobertas relevantes não apenas para fins educacionais, mas também para aplicações comerciais de nano satélites, destacando as implicações práticas e o impacto mais amplo da pesquisa. Os autores propõem um conversor CC-CC Buck de +12V para nano satélites, contribuindo para o avanço dos subsistemas de energia nesses pequenos satélites.

Inspirado por essas iniciativas, este estudo propõe uma solução integrada composta por hardware de eletrônica de potência e uma plataforma de controle digital, projetada especificamente para atender às necessidades didáticas no ensino de engenharia. Esse protótipo tem como objetivo proporcionar aos alunos uma experiência prática e imersiva no projeto, implementação e análise de conversores estáticos de potência e controle aplicado, integrando teoria, simulação e prática de forma eficaz. A metodologia proposta concentra-se no ensino de Eletrônica de Potência a partir do ponto de vista do controle digital, enfatizando os aspectos dinâmicos em detrimento das abordagens tradicionais centradas em circuitos. As características distintivas e os

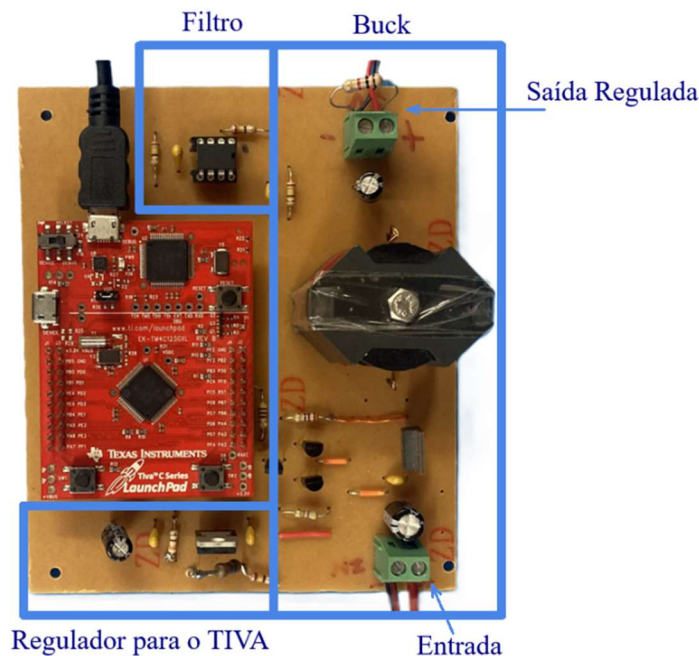
detalhes da implementação dessa solução serão apresentados e discutidos nas seções subsequentes.

1 DESENVOLVIMENTO

O protótipo proposto neste estudo consiste em um Conversor Buck em Modo de Condução Contínua (CCM) com chaveamento PWM, conforme descrito em De Freitas (1992), integrado a um microcontrolador Tiva TM4C123GXL, com o objetivo de aprimorar a estabilidade e eficiência dos sistemas de geração de energia fotovoltaica. O microcontrolador desempenha um papel fundamental, atuando como controlador de Modulação por Largura de Pulso (PWM) e compensador de avanço (Ogata, 2011) seguindo a abordagem do "fator K" (Venable, 1983). O desafio proposto aos alunos compreende projetar um compensador adequado, guiado pelos princípios do fator K, para alinhar o desempenho do conversor com o de um sistema de primeira ordem.

O protótipo apresentado na Figura 1 visa atender às demandas dos laboratórios de eletrônica de potência e controle digital, oferecendo um hardware aberto de fácil utilização em conjunto com um microcontrolador de alta performance. Este sistema possibilita a validação de métodos de controle investigados pela comunidade científica, além de fornecer um ambiente de aprendizado seguro e realista para os estudantes. A placa desenvolvida proporcionará a integração de teoria, simulação e observação experimental promovendo o treinamento prático em um contexto educacional controlado.

Figura 1 – Protótipo montado em escala laboratorial



Fonte: Os Autores, 2024

A seguir, apresenta-se a descrição detalhada de cada bloco do protótipo, conforme os blocos identificados na Figura 1 e listados a seguir: Filtro, Conversor CC-CC Buck, Regulador de Tensão e Microcontrolador.

1.1 Filtro

Uma amostra da tensão de saída passa por um seguidor de tensão e depois por um filtro. O filtro na entrada da leitura AD do conversor Buck ajuda a suavizar o sinal analógico, removendo ou atenuando as componentes de alta frequência indesejadas, enquanto preserva as informações de interesse. Isso resulta em uma leitura mais estável e precisa, melhorando a qualidade do sinal analógico convertido em digital pelo conversor, e conseqüentemente, a confiabilidade e precisão do sistema como um todo.

1.2 Conversor CC-CC buck

O conversor CC-CC Buck, também conhecido como conversor abaixador de tensão ou conversor *step-down*, é um tipo comum de conversor de energia utilizado para reduzir a tensão de alimentação de um circuito para um nível menor.

O funcionamento básico do conversor Buck envolve a chaveamento de um circuito indutor-capacitor, onde a energia é armazenada no indutor durante um período e, em seguida, transferida para o capacitor, resultando em uma tensão de saída menor que a de entrada. Esse processo é controlado por um circuito de controle, que monitora a tensão de saída e ajusta o ciclo de trabalho do sinal de chaveamento da chave do conversor (geralmente um transistor) para manter a tensão de saída estável.

1.3 Regulador de tensão

O regulador de tensão presente na placa desempenha um papel importante ao garantir que a tensão de entrada seja estabilizada e ajustada para uma tensão específica de saída, neste caso, 3,3 V. Essa tensão regulada é então fornecida para alimentar o microcontrolador e outras partes do circuito digital da placa.

1.4 Microcontrolador

O microcontrolador Tiva TM4C123GXL foi selecionado devido ao seu desempenho avançado e ampla variedade de recursos integrados. Como parte da família Tiva C Series da *Texas Instruments*, possui um poderoso núcleo ARM Cortex-M4 de 32 bits, com capacidade de processamento robusta e uma variedade de periféricos úteis. Sua arquitetura e núcleo oferecem potência suficiente para controlar de maneira precisa e eficiente o conversor Buck, bem como algoritmos de controle avançados e modulação de largura de pulso (PWM).

Além disso, o Tiva TM4C123GXL possui uma ampla gama de periféricos integrados, incluindo *timers* avançados, módulos PWM e ADCs integrados. Esses recursos são essenciais para gerar os sinais de controle necessários para o funcionamento do conversor Buck, além de permitir a monitorização e ajuste da operação em tempo real. Sua disponibilidade de documentação extensa e suporte abrangente da *Texas Instruments* tornam o desenvolvimento e a depuração do código para implementar e otimizar o conversor Buck uma tarefa simplificada, garantindo uma solução eficiente e confiável para essa aplicação.

1.5 Aplicação Prática

Para demonstrar a eficácia da solução integrada de hardware e controlador para fins educacionais, foram realizados testes em duas frentes: simulação e implementação prática.

A Tabela 1 apresenta a compilação dos parâmetros dos componentes utilizados na simulação e testes do sistema proposto.

Tabela 1 – Parâmetros do Conversor CC-CC Buck

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de Entrada (Vin)	9-28	V (Volts)
Tensão de Saída (Vo)	5	V (Volts)
Indutor (L)	28	V (Volts)
Capacitor (C)	2.5	µF (Microfarads)
Resistência em Série do Capacitor (RSE)	0.67	Ω (Ohms)
Frequência de Chaveamento (fc)	30	kHz (QuiloHertz)

Fonte: Os Autores, 2024

1.6 Simulação

Os ambientes Matlab® e Simulink® foram utilizados para modelar o conversor CC-CC Buck e executar simulações sob diversos cenários. Além dos parâmetros expostos na Tabela 1, foram fixadas as taxas máximas de variação para corrente no indutor e tensão de saída em 10%, em relação aos valores de entrada. A simulação permitiu observar o comportamento do conversor sob diferentes condições de operação, reforçando conceitos teóricos de controle e modelagem de conversores estáticos de potência. Posteriormente segue-se com o projeto e simulação do controlador fator "K".

A aplicação do controlador do tipo fator "K" em um conversor Buck CC-CC envolve uma abordagem procedural enraizada na metodologia descrita por Maciel (2016). Essa metodologia incorpora o fator "K" em conjunto com um compensador de avanço de fase para desenvolver um mecanismo de controle eficaz. O processo pode ser sucintamente delineado através de uma série de passos específicos, que incluem determinar o valor apropriado do fator "K" com base nos requisitos e características do sistema, integrá-lo ao projeto do compensador e ajustar iterativamente os parâmetros para otimizar o desempenho. Ao utilizar essa abordagem, o controlador pode regular eficientemente a tensão de saída do conversor Buck, garantindo estabilidade e precisão em várias condições de operação.

Os passos desse processo incluem a construção de um diagrama de Bode para o conversor, a escolha da frequência de chaveamento, o cálculo da margem de fase desejada, a determinação do ganho em decibéis na frequência de crossover, o cálculo do impulso de fase necessário, a escolha do tipo de compensador com base no impulso de fase, o cálculo do fator "K" utilizando uma equação trigonométrica, a alocação de polos e zeros com base no fator "K", a determinação do ganho do compensador, a definição da função de transferência do compensador, a geração do diagrama de Bode do compensador e a análise da função de transferência em malha aberta compensada do sistema para garantir estabilidade e eficácia.

Essa abordagem abrangente capacita um controle preciso da tensão de saída do Conversor Buck, facilitando um desempenho ótimo em diversas condições de operação.

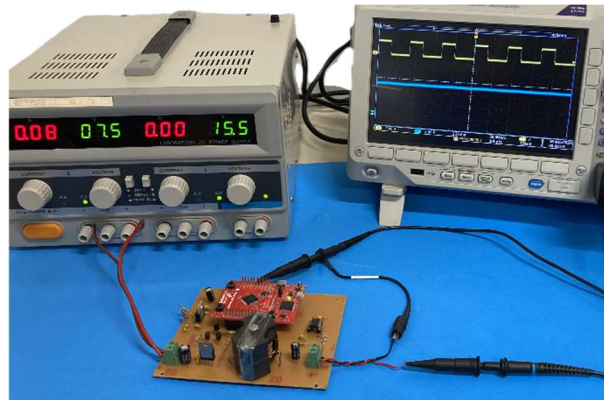
1.7 Observação Experimental

O protótipo descrito na seção dois é utilizado para a observação experimental do comportamento do conversor Buck e do controlador projetado. O projeto do controlador é implementado ao microcontrolador Tiva em um código desenvolvido em C++ e incorporado utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) *Code Composer Studio*™. O teste se desenvolve conectando o protótipo a um osciloscópio.

A fonte de alimentação de tensão é conectada ao circuito através dos bornes de entrada. A tensão de saída e o chaveamento do PWM foram monitorados através dos dois canais do Osciloscópio. A montagem do sistema é demonstrada na Figura 2.

Figura 3 – Tela de resultados demonstrando o chaveamento do PWM (canal 1 em amarelo) e a tensão de saída (canal 2 em azul).

Figura 2 – Protótipo montado com alimentação de tensão e osciloscópio para monitoramento



Fonte: Os Autores, 2024

Os resultados experimentais (Figura 3) validam o controle, demonstrando o sinal PWM de chaveamento, captado pelo canal 1 do osciloscópio, em amarelo) e a tensão de saída estável em 5V, no canal 2, em azul.

Figura 3 – Tela de resultados demonstrando o chaveamento do PWM (canal 1 em amarelo) e a tensão de saída (canal 2 em azul).



Fonte: Os Autores, 2024

1.8 Aplicações Pedagógicas

A combinação de teoria, simulação e observação experimental proporciona ao aluno uma experiência de aprendizagem abrangente e significativa. A visualização dos fenômenos dinâmicos internos do conversor auxilia o aluno a solidificar sua compreensão teórica. Enquanto a experimentação fortalece a conexão entre teoria e prática, oferecendo aos alunos a oportunidade de observar o funcionamento real do conversor e validar o projeto do controlador.

Este trabalho demonstra o valor de um sistema integrado de hardware e software para o ensino de eletrônica de potência e controle digital. O projeto aberto incentiva os alunos a explorarem modificações no controlador e a aprofundarem sua compreensão dos princípios de projeto desses sistemas.

A implementação pedagógica do sistema proposto deve envolver uma sequência estruturada entre aulas teóricas e práticas. A metodologia sequencial baseia-se no trabalho de De Oliveira e Venkataramanan (2008) e é exposta a seguir:

1. Introdução ao modelo do conversor Buck;

2. Cálculo dos componentes do conversor;
3. Apresentação da teoria de controle por avanço utilizando fator K aplicado ao conversor Buck;
4. Simulação do conversor Buck e do controlador em ambiente Matlab® e Simulink®;
5. Implementação do controlador no microcontrolador;
6. Testes e validação.

Esse processo envolve os alunos em cálculos, simulações, testes e validações do modelo apresentado de maneira orientada, motivando-os a alcançar os resultados esperados por meio dos testes de validação determinados em um roteiro pré-estabelecido. Adicionalmente, a natureza alternada das atividades, da observação à simulação e à experimentação, garante que os alunos adquiram experiência prática no trabalho com conversores de energia. Essa exposição prática é essencial para preencher a lacuna entre os conceitos teóricos e a implementação no mundo real.

A metodologia proposta concentra-se no ensino de eletrônica de potência do ponto de vista do controle, destacando os aspectos do controle dinâmico sobre as abordagens tradicionais centradas em circuitos. Ao mudar o foco para o controle, a metodologia visa aprimorar a compreensão dos alunos sobre o comportamento dos conversores eletrônicos de potência sob operação de circuito fechado, preparando-os para os desafios de engenharia do mundo real.

Além disso, emprega a metodologia "Motivação por Desafio", apresentando o problema de controle de um circuito de Eletrônica de Potência como um desafio a ser resolvido pelos alunos. Essa abordagem promove a participação ativa dos alunos, o engajamento e as habilidades de resolução de problemas, enquadrando os objetivos de aprendizagem como desafios práticos, em vez de exercícios teóricos passivos.

1.9 Autorizações/Reconhecimento

Os autores são responsáveis por garantir o direito de publicar todo o conteúdo de seu trabalho. Se material com direitos autorais foi usado na preparação deste, pode ser necessário obter a devida autorização do detentor dos direitos para a publicação do material em questão.

2 Considerações FINAIS

Este estudo apresenta uma abordagem inovadora para o ensino de eletrônica de potência e controle digital, utilizando uma plataforma didática aberta para experimentação e análise de um conversor CC-CC Buck. A combinação de teoria, simulação e observação experimental proporciona aos alunos uma experiência de aprendizado abrangente e significativa, solidificando sua compreensão teórica e fortalecendo a conexão entre conceitos teóricos e práticos.

A implementação pedagógica proposta, baseada em uma sequência estruturada de atividades teóricas e práticas, visa envolver os alunos em todas as etapas do processo de aprendizagem, desde a introdução ao modelo do conversor Buck até a implementação e validação do controlador no microcontrolador. Essa metodologia, centrada no controle dinâmico e na resolução de desafios práticos, prepara os alunos para enfrentar os desafios da engenharia do mundo real.

A plataforma educacional proposta representa uma ferramenta valiosa para o ensino de eletrônica de potência, fornecendo aos alunos uma base sólida de conhecimento teórico e prático para o projeto e análise de sistemas de conversão de energia.

Trabalhos Futuros:

- Refinamento do Protótipo: O projeto exigirá uma fase adicional de refinamento do protótipo, onde os feedbacks recebidos durante os testes serão cuidadosamente analisados para identificar áreas de melhoria. Isso pode envolver ajustes no hardware, no código de controle ou em ambos, visando otimizar o desempenho e a confiabilidade do sistema.
- Testes e Validação Continuada: A equipe continuará a realizar testes extensivos e validação do protótipo em diferentes condições de operação e cargas. Isso é essencial para garantir que o sistema atenda aos requisitos de desempenho esperados e seja robusto o suficiente para lidar com uma variedade de cenários.
- Integração de Recursos Adicionais: Com base nos resultados dos testes e nas necessidades identificadas, podem ser consideradas a integração de recursos adicionais ao protótipo. Isso pode incluir a adição de novos sensores, interfaces de comunicação ou melhorias na interface do usuário para tornar o sistema mais versátil e fácil de usar.
- Estudos de Caso e Aplicações Práticas: Uma vez que o protótipo esteja totalmente funcional e validado, serão explorados estudos de caso e aplicações práticas em diferentes contextos educacionais. Isso pode envolver a criação de materiais didáticos específicos.
- Colaborações e Parcerias: A equipe poderá buscar colaborações e parcerias com outras instituições acadêmicas ou empresas do setor para expandir o alcance do projeto e explorar novas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento. Isso pode envolver o compartilhamento de conhecimentos, recursos e experiências para enriquecer ainda mais o projeto.

Esses trabalhos futuros representam uma continuação do compromisso da equipe com a inovação e a excelência na área de educação em engenharia, visando oferecer aos estudantes uma plataforma de aprendizado robusta e eficaz.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Uninter pelo apoio financeiro e pelo comprometimento com este empreendimento de pesquisa, e ao Professor Doutor João Américo Vilela da UFPR por sua orientação e conselhos perspicazes ao longo deste estudo.

REFERÊNCIAS

AKCAYOL, M Ali; YIGIT, Tuncay. A computer-based educational tool for pulse width modulator for static converters. **Computer applications in engineering education**, v. 12, n. 4, p. 215–223, 2004.

BOUTTE Aissa, Limam Lakhdar, & Belaidi El Yazid. **DC/DC buck converter prototype for educational nanosatellite power sub-system**. 2023 International Conference on Advances in Electronics, Control and Communication Systems (ICAEECS). **Anais...IEEE**, 2023.

DE FREITAS, Luiz Carlos. **Modelagem dos conversores CC-CC PWM e ressonantes para a análise dinâmica sob perturbações de pequenas e grandes amplitudes**. 1992. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/101472>. Acesso em: 15 jan.2024:

DE OLIVEIRA, José Carlos Rodrigues; VENKATARAMANAN, Giri. Teaching Power Electronics from the control Point of View. **Eletrônica de Potência**, v. 13, n. 2, p. 125–131, 2008.

MACIEL, Wesley Henrique. **MODELAGEM DE PEQUENOS SINAIS DE CONVERSORES CC-CC NÃO ISOLADOS BASEADOS NA CÉLULA DE COMUTAÇÃO DE TRÊS ESTADOS OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO CONTÍNUA**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de São João del Rei, São João del Rei, 2016. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/104-2016-11-03-DissertacaoWesleyMaciel.pdf>. Acesso em: 15 jan.2024:

Ogata, Katsuhiko. Engenharia de controle moderno (5ª ed.). São Paulo: Pearson, 2011.

PERKINS, Brian K.; IRAVANI, M. Reza. Dynamic modeling of high power static switching circuits in the dq-frame. **IEEE transactions on power systems : a publication of the Power Engineering Society**, v. 14, n. 2, p. 678–684, 1999.

VENABLE, H. Dean. (1983). The K factor: A new mathematical tool for stability analysis and synthesis. In **Proc. Powercon** (Vol. 10, No. 1, p. 1). Citeseer.

OPEN EDUCATIONAL PLATFORM FOR EXPERIMENTATION AND CONTROL OF BUCK DC-DC CONVERTER

Abstract: *This study presents an open educational platform for experimentation and control of a Buck DC-DC converter. The platform integrates power electronics hardware with a microcontroller, providing a practical and immersive experience in the design and analysis of power converters. The adopted methodology emphasizes power electronics teaching from a control perspective, promoting an interdisciplinary and practical approach. The study highlights the importance of combining theory, simulation, and experimental observation for comprehensive and meaningful learning.*

Keywords: *educational platform, Buck DC-DC converter, power electronics, digital control, practical teaching.*

