

PROTÓTIPOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO DOS CONVERSORES CC-CC

Bruno S. Dupczak

Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAE)

Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Campus Florianópolis, Florianópolis – SC, Brasil

e-mail: bruno.dupczak@ifsc.edu.br

Resumo – O ensino de eletrônica de potência demanda a disponibilidade de aparatos experimentais que permitam aos discentes comprovar os conhecimentos teóricos adquiridos na sala de aula. Assim, propõem-se neste trabalho duas ferramentas didáticas que visam contribuir para o ensino dos conversores CC-CC. São apresentados protótipos modulares, os quais proporcionam que diversas estruturas isoladas ou não-isoladas possam ser avaliadas. Em conjunto, explora-se o reaproveitamento dos componentes eletrônicos e a facilidade de interação dos estudantes com a montagem dos circuitos. Especificações técnicas, valores de componentes e metodologia de ensino também são propostas. Ao final, são exibidas formas de onda e resultados quantitativos, visando demonstrar a viabilidade de implementação dos kits didáticos.

Palavras-chave – Educação, Ferramentas Didáticas, Eletrônica de Potência, Conversores CC-CC.

DIDACTIC PROTOTYPES FOR TEACHING CLASSES ON DC-DC CONVERTERS

Abstract – The teaching of power electronics requires the availability of experimental devices that allow students to put into practice the theoretical knowledge acquired in the classroom. In this context, this paper proposes two didactic tools that aim to contribute to classes on DC-DC converters. Modular prototypes are presented, which permit several isolated or non-isolated structures be evaluated. The reuse of electronic components is explored along with the ease of student interaction with the assembly of circuits. Technical specifications, component values and a teaching methodology are also proposed. The waveforms and quantitative results obtained are provided, aiming to demonstrate the feasibility of implementing the didactic kits.

Keywords – Education, Didactic Tools, Power Electronics, DC-DC Converters.

I. INTRODUÇÃO

Eletrônica de potência é uma ciência multidisciplinar, que envolve diversas áreas da engenharia elétrica como circuitos elétricos, eletromagnetismo, teoria de controle, processamento de sinais, dispositivos semicondutores, entre outras. Combinar e aplicar o conhecimento destas diferentes áreas, torna o

ensino de eletrônica de potência algo complexo e desafiador para professores e alunos em qualquer nível de formação [1].

Na literatura, o método de ensino orientado ao projeto (*Project-Based Learning* – PBL) é citado como uma das melhores abordagens pedagógicas para a capacitação de discentes em eletrônica de potência [2]. Com este método de trabalho em equipe, busca-se manter os estudantes motivados durante todo o decorrer do curso, oferecendo a eles a oportunidade de adquirir conhecimento por meio da resolução de problemas realistas e aplicados [3]–[5]. O resultado é o aumento do interesse dos alunos na área de conversores estáticos, além da formação de profissionais com maior capacidade de analisar e resolver problemas de engenharia [6].

Contudo, a metodologia PBL demanda uma infraestrutura laboratorial ampla, com ferramentas, espaço, equipamentos de medição e componentes eletrônicos para a elaboração dos trabalhos. Necessita também de maior envolvimento dos professores e técnicos, que devem atuar em favor da segurança dos alunos, na resolução de problemas de implementação e na preparação de novos projetos para as próximas turmas [7]. Portanto, o PBL torna-se inviável de ser ofertado em diversas instituições de ensino, que não dispõem de recursos materiais e humanos suficientes para este tipo de atividade.

Assim, a metodologia clássica de ensino, com aulas teóricas e atividades práticas em laboratório, ainda é predominante nas universidades brasileiras. Nesta abordagem, prioriza-se a análise de circuitos, com montagens prontas e experimentos predefinidos. Esses experimentos são realizados em sincronia com a teoria, e em conjunto com simulações que permitem antecipar os fenômenos que serão vistos na prática [8].

Para viabilizar as atividades experimentais, diversas ideias de kits, dispositivos e ferramentas experimentais de eletrônica de potência são encontradas em inúmeras publicações da área. Em [9], propõem-se um equipamento modular, baseado no conceito de matriz de chaveamento, visando a realização de experimentos didáticos envolvendo conversores CA-CC e CC-CA. Da mesma forma, para o ensino de conversores para o acionamento de motores de indução, uma plataforma de baixo custo é apresentada em [10]. Neste caso, desenvolve-se um *hardware* que opera em conjunto com um computador, permitindo o monitoramento dos experimentos e a interface com os usuários. Outro conceito modular para o ensino prático sobre inversores é apresentado em [11], no qual os autores dividem o estágio de potência em diversas placas de circuito impresso (PCIs). De acordo com a topologia de circuito a ser estudada, as PCIs são interligadas pelos discentes com cabos e conectores. Algo similar é sugerido em [12], visando o ensino de controle digital para conversores estáticos.

Outras abordagens sugerem o uso de *softwares* ou aplicativos pela internet [13]–[16], visando o ensino de

Manuscript received 07/20/2022; first revision 08/13/2022; accepted for publication 09/26/2022, by recommendation of Editor Telles Brunelli Lazzarin. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2022.3.0033>.

eletrônica de potência por meio de simulações dos circuitos. Posteriormente, o discente pode realizar ensaios práticos em bancada didática, com o intuito de comprovar os resultados simulados. Esta proposta é utilizada também para a capacitação em sistemas fotovoltaicos, onde por meio de emuladores e outras ferramentas computacionais, é possível apresentar aos alunos o funcionamento dos conversores estáticos relacionados a esta área de aplicação [17],[18].

No caso dos conversores CC-CC, uma técnica de ensino do conteúdo teórico é apresentada em [19]. Neste trabalho, sugere-se o uso do conceito de célula de comutação, com o objetivo de simplificar e reduzir o equacionamento das topologias básicas não-isoladas. Proposta similar é vista em [20], na qual a célula de comutação é implementada utilizando componentes fixos e com modulador por largura de pulso (PWM) programado em microcontrolador. Em [21], um protótipo é utilizado para implementar didaticamente os conversores *buck* ou *boost*, sendo cada estrutura estabelecida por meio da ação de relés eletromecânicos. A ideia de um protótipo único também é empregada em [22], no qual cada topologia é obtida através da seleção de *jumpers* em uma PCI.

Considerando a revisão bibliográfica realizada, constata-se que a maior parte das publicações sobre o ensino de eletrônica de potência não apresentam a abordagem didático-pedagógica a ser utilizada, limitando-se em apenas mostrar a ferramenta que foi desenvolvida. Além disso, muitas dessas soluções viabilizam apenas a coleta de formas de onda de um determinado circuito de potência, sem permitir que o aluno possa modificar ou escolher os componentes da topologia em estudo. Observa-se também que estas soluções didáticas são focadas na realização de experimentos acadêmicos, sendo que o uso de cabos, conectores e componentes superdimensionados tornam o experimento prático distante da realidade de implementação de um conversor estático.

Buscando aprimorar a realização de atividades experimentais em eletrônica de potência, são apresentados neste trabalho kits didáticos, voltados para o ensino dos conversores CC-CC. Essas propostas visam o melhor aproveitamento de PCIs e componentes eletrônicos, sendo soluções compactas e modulares, que permitem a implementação de diversas topologias de circuitos com apenas dois protótipos. O primeiro protótipo contempla a avaliação das estruturas não-isoladas *buck*, *boost* e *buck-boost*, dando ao discente a possibilidade de escolher os componentes eletrônicos adequados para cada especificação de circuito. No segundo protótipo, aplicado aos conversores isolados *flyback*, *push-pull*, *half-bridge* e *full-bridge*, o foco é a implementação do indutor acoplado ou transformador utilizado para cada tipo de conversor. Para ambos os casos, são apresentadas neste trabalho algumas sugestões de abordagem didático-pedagógica, que podem ser exploradas por meio das ferramentas de ensino propostas.

II. CONVERSORES NÃO-ISOLADOS

Os conversores CC-CC não-isolados do tipo *buck*, *boost* e *buck-boost* são topologias clássicas da eletrônica de potência. Assim, é essencial dispor de ferramentas que permitam a verificação experimental do funcionamento dessas estruturas.

O primeiro protótipo didático a ser apresentado, considera

as representações da Figura 1. Para os conversores *buck* e *buck-boost*, associa-se um filtro formado pelos componentes L_i e C_i , visando atenuar a ondulação existente na corrente de entrada. Além disso, observa-se nas Figuras 1.a e 1.c que o interruptor está em uma posição diferente do que é encontrado normalmente na literatura [23]. O intuito é manter o terminal de *source* do componente na mesma referência de tensão da fonte de alimentação, permitindo o uso de um circuito de comando não-isolado e comum para os três circuitos.

Pela inspeção dos circuitos da Figura 1, verifica-se que nove agrupamentos de componentes podem ser utilizados para formar as três estruturas não-isoladas, dando origem a representação vista na Figura 1.d. A ideia é que esses agrupamentos possam ser construídos por PCIs com dimensões e conectores idênticos, formando módulos que contenham os componentes necessários para implementar cada conversor. Posteriormente, estes módulos são encaixados em uma placa principal, permitindo que sejam facilmente removidos ou substituídos, conforme a especificação técnica do circuito de potência a ser estudado pelo discente.

A. Modulador

Para implementar o modulador por largura de pulso (PWM) dos protótipos deste trabalho, emprega-se o circuito integrado (CI) UC3525 [24]. Este CI opera com tensão de alimentação (V_{cc}) até 35 V, sendo que, para fins de simplicidade do circuito de comando dos interruptores, utiliza-se 12 V. Na

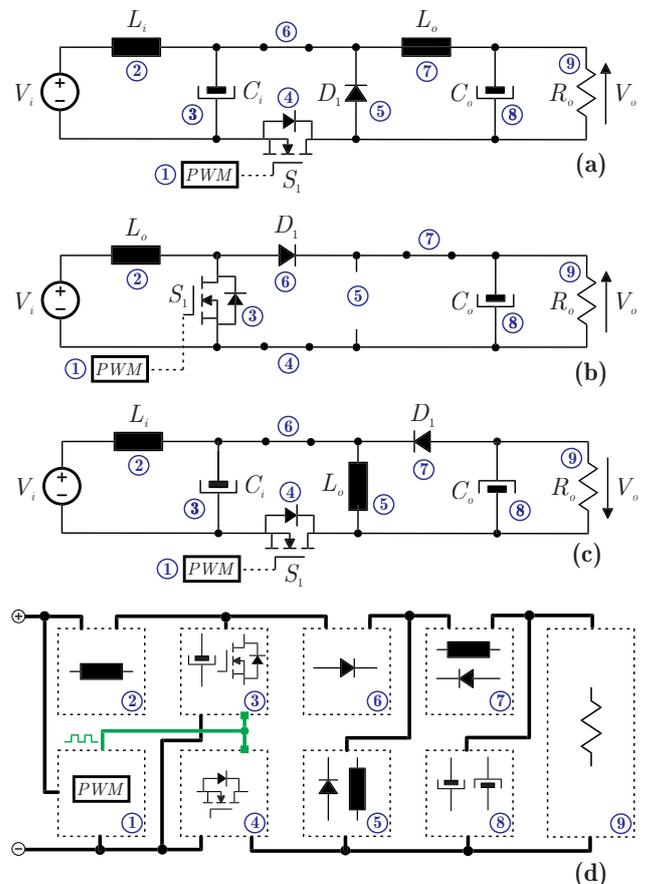


Fig. 1. Conversores (a) *buck*, (b) *boost* e (c) *buck-boost* implementados no kit didático. Em (d) é mostrado o agrupamento dos componentes, visando a construção de um protótipo modular.

Figura 2 mostra-se um diagrama com as conexões e demais componentes que devem ser utilizados em conjunto com o CI. Os componentes R_1 , R_2 e C_1 definem a frequência do circuito oscilador do modulador (f_{osc}), conforme a Equação 1.a. Na combinação paramétrica da Figura 2, f_{osc} varia entre 17,9-25,3 kHz, de acordo com o ajuste no potenciômetro R_2 .

O UC3525 possui duas saídas de pulsos (Out_A e Out_B), defasadas em 180° entre elas, e com frequência igual a metade do valor de f_{osc} . Essas saídas possuem um limite de razão cíclica (D) igual a 50% do período dos pulsos, sendo que o valor de D é definido por meio do ajuste manual realizado no potenciômetro R_3 da Figura 2. As características de limitação de razão cíclica e defasamento entre pulsos, tornam as saídas Out_A e Out_B adequadas para a modulação de conversores CC-CC isolados em ponte, conforme apresentado na Seção III.

Para as estruturas não-isoladas, é necessário que o sinal PWM possa atingir valores de razão cíclica acima de 50%. Essa característica é obtida por meio de um circuito adicional, formado pelos componentes R_6 , D_1 , D_2 , Q_1 e Q_2 da Figura 2, resultando na saída combinada Out_{AB} . Nesta saída, o sinal PWM possui frequência igual a f_{osc} . São incluídos também R_7 (resistor de gate), R_8 e D_3 para formar uma estrutura mínima de acionamento não-isolado para MOSFETs.

Como funcionalidade adicional, o UC3525 possibilita a partida suave do conversores (*soft-start*), através da adição do capacitor C_2 . Esse componente é definido conforme a Equação 1.b, onde V_{ref} corresponde a tensão de referência e I_{ss} a fonte de corrente interna do CI (com valores típicos de $50 \mu A$ e $5,1 V$ respectivamente). Na especificação de C_2 considera-se um tempo de partida suave (t_{ss}) igual a $5,7 ms$. O CI é capaz de realizar também o controle das estruturas de potência, por meio do dimensionamento de um circuito de realimentação [24]. Contudo, a possibilidade de controle dos conversores não será explorada neste trabalho.

$$f_{osc} = \frac{1}{C_1 \cdot 0,7(R_1 + R_2)} \quad (a) \quad C_2 = \frac{t_{ss} \cdot I_{ss}}{V_{ref}} \quad (b) \quad (1)$$

B. Dimensionamento e Implementação

Na Figura 3, apresenta-se a construção do kit didático proposto anteriormente na Figura 1.d. Para este protótipo, são consideradas as especificações dos conversores CC-CC descritas na Tabela I. Este conjunto de especificações é

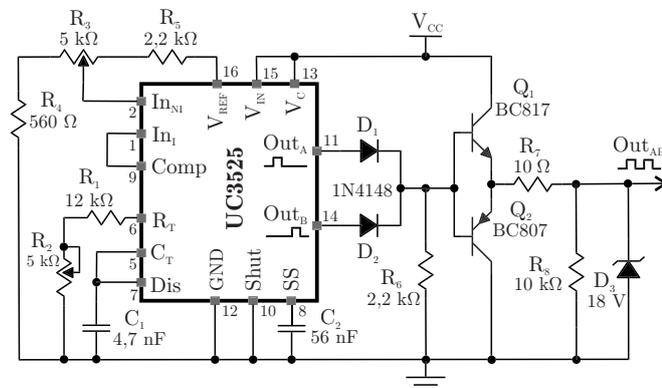


Fig. 2. Modulador por largura de pulso empregando o UC3525. Para as estruturas não-isoladas utiliza-se a saída de pulsos combinada (Out_{AB}) permitindo o ajuste da razão cíclica de 0 a 100%.

definido com o objetivo de viabilizar o uso do kit didático nos laboratórios da instituição de ensino, onde estão disponíveis fontes de alimentação com potência até 90 W (30 V, 3 A) e osciloscópios educacionais com banda passante e taxa de amostragem limitadas. Na Tabela I, os valores especificados de ΔV_{Co} e ΔI_{Lo} são definidos em relação aos valores médios das grandezas, e correspondem à máxima ondulação de tensão e de corrente admissíveis em C_o e L_o respectivamente.

A partir das especificações da Tabela I e do equacionamento dos conversores CC-CC não-isolados proposto em [23], são definidos os componentes eletrônicos apresentados na Tabela II. A escolha destes componentes considera o custo e a disponibilidade deles no mercado nacional. No caso dos indutores, estes foram produzidos localmente, empregado condutores de cobre esmaltados, núcleos de ferrite de material IP12R [25] e os procedimentos de projeto descritos em [26]. Todos os componentes listados na Tabela II são montados em PCIs independentes e com conectores (na maioria com dimensões de $35 \times 35 mm$) conferindo a modularidade desejada para o kit didático. Estes módulos são então encaixados na placa principal, visando construir o conversor a ser estudado.

A placa principal consiste em uma PCI com nove slots para conexão de componentes, sendo que dois deles são exclusivos para a conexão dos módulos de PWM e dos resistores de carga. Esta placa implementa as interconexões entre os módulos (conforme a representação da Figura 1.d), além de apresentar fusível, chave *on/off*, LED e conectores

TABELA I
Especificações dos Conversores CC-CC Não-Isolados

Parâmetro	Buck	Boost	Buck-Boost
Tensão de entrada (V_i)	12 V	12 V	12 V
Tensão de saída (V_o)	5 V	24 V	24 V
Razão cíclica teórica (D_t)	0,42	0,50	0,67
Potência de saída (P_o)	12 W	10,5 W	10,5 W
Freq. de comutação (f_s)	20 kHz	20 kHz	20 kHz
Ondulação de tensão (ΔV_{Co})	5%	3%	3%
Ondulação de corrente (ΔI_{Lo})	16%	20%	16%
Filtro de entrada	Sim	Não	Sim
Temperatura de junção (T_j)	100 °C	100 °C	100 °C
Temperatura ambiente (T_a)	30 °C	30 °C	30 °C

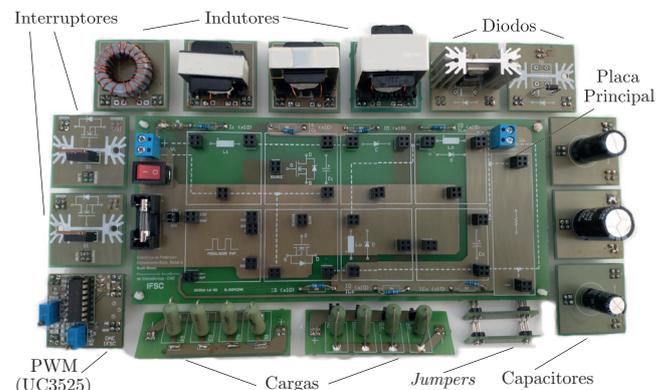


Fig. 3. Elementos que compõem o kit didático para o estudo dos conversores CC-CC não-isolados.

TABELA II
Componentes Disponíveis para a Montagem dos
Conversores CC-CC Não-Isolados

Item	Modelo	Especificação
Interruptor 1	IRFZ34 (Vishay)	MOSFET, 60 V, 21 A
Interruptor 2	IRF540 (Vishay)	MOSFET, 100 V, 20 A
Diodo 1	MUR120 (Vishay)	200 V, 1 A
Diodo 2	MUR820 (Vishay)	200 V, 8 A
Dissipador 1	HS3512 (HS Dissip.)	17 °C/W, 25 mm
Indutor 1	Fabricação própria	Toroidal, 20 μ H, 1,1 A
Indutor 2	Fabricação própria	EE, 400 μ H, 2,6 A
Indutor 3	Fabricação própria	EE, 1,7 mH, 1,0 A
Indutor 4	Fabricação própria	EE, 2,0 mH, 1,8 A
Capacitor 1	B41856 (Epcos)	220 μ F, 63 V
Capacitor 2	B41856 (Epcos)	470 μ F, 35 V
Capacitor 3	B41859 (Epcos)	1.000 μ F, 35 V
Carga 1	Resistiva	2,1 Ω (4//8,2 Ω , 5 W)
Carga 2	Resistiva	55 Ω (4//220 Ω , 5 W)

para a fonte de alimentação e uma carga externa ao kit. Devido a indisponibilidade de sondas de medição de corrente em alta frequência, é previsto na placa principal um resistor de 0,1 Ω (1/4 W) em série com cada um dos módulos de componentes. Através da medição de tensão nesses resistores, é possível avaliar as formas de onda de corrente nas diversas partes do circuito, usando as sondas de tensão tradicionais que acompanham os osciloscópios. No kit didático são incluídos também dois *jumpers*, que serão empregados para dar continuidade elétrica na placa principal, quando um determinado *slot* não estiver sendo utilizado na estrutura.

C. Abordagem Didático-Pedagógica

Após o professor transmitir aos discentes o conteúdo teórico sobre os conversores CC-CC [23], sugere-se que seja proposta uma atividade envolvendo o kit didático. Neste atividade, é apresentada uma especificação técnica (como por exemplo a da Tabela I), que servirá para os estudantes desenvolverem os cálculos necessários (preferencialmente feitos com planilha eletrônica de cálculos) para dimensionar os componentes dos circuitos. Este dimensionamento preliminar, que envolve a definição das tensões, correntes, indutâncias, capacitâncias entre outros parâmetros, é validado posteriormente com uma ferramenta de simulação [27].

Na sequência, baseado nas especificações preliminares, os estudantes devem escolher os componentes que irão compor os conversores a serem testados, considerando o conjunto que está disponível no kit didático (como por exemplo o da Tabela II). Neste momento, os discentes devem consultar os catálogos técnicos dos componentes, visando identificar quais deles atendem as especificações e que podem resultar no melhor rendimento para o circuito. Deve ser avaliado também quais semicondutores necessitam de um dissipador.

Definidos os componentes, os estudantes identificam na placa principal o local adequado para encaixar os módulos, visando formar a estrutura de potência a ser avaliada experimentalmente. Na Figura 4 apresenta-se um exemplo de montagem para os três conversores CC-CC, os quais podem ser energizados para a coleta das formas de onda e

levantamento quantitativo das grandezas de interesse.

É importante ressaltar que o protótipo didático apresentado não visa ser apenas um meio físico para obtenção de formas de onda. O propósito maior é disponibilizar aos estudantes uma forma prática de envolvê-los com a escolha dos componentes eletrônicos, de tal forma que aprendam a especificá-los com base em procedimentos técnicos. A complexidade desta atividade pode ser ampliada de acordo com a disponibilidade de recursos para aquisição de PCIs e componentes, buscando ampliar conjunto de opções apresentado na Tabela II.

Posteriormente, a verificação do aprendizado é realizada através de um questionário avaliativo, no qual o discente deve demonstrar a sua capacidade em calcular e especificar componentes, e de identificar as formas de onda em diferentes partes do circuito de cada conversor estudado.

D. Resultados

Na Figura 5 apresentam-se algumas formas de onda obtidas com o kit didático, sendo V_o a tensão de saída, V_{S1} e I_{S1} a tensão e a corrente no interruptor controlado e I_{Lo} a corrente no indutor L_o . Devido ao tamanho das PCIs e afastamento dos componentes, foram observadas inicialmente sobretensões em S_1 e D_1 causadas pelas indutâncias parasitas das trilhas de circuito impresso. Esse problema foi contornado após a adição de um *snubber* RC nas respectivas PCIs, calculados conforme o procedimento apresentado em [28]. Os valores quantitativos obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela III.

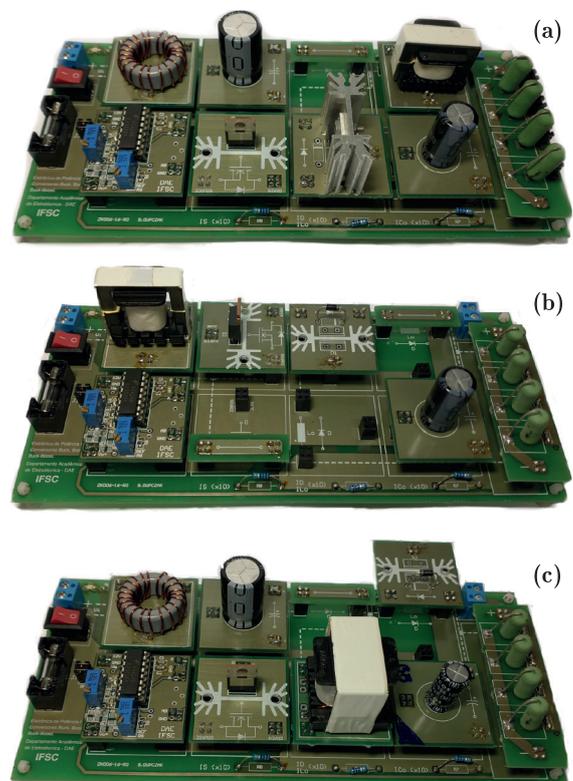


Fig. 4. Implementação dos conversores (a) *buck*, (b) *boost* e (c) *buck-boost* utilizando o kit didático. Os componentes a serem utilizados para cada conversor são escolhidos pelo discente, de acordo com a especificação técnica proposta pelo professor.

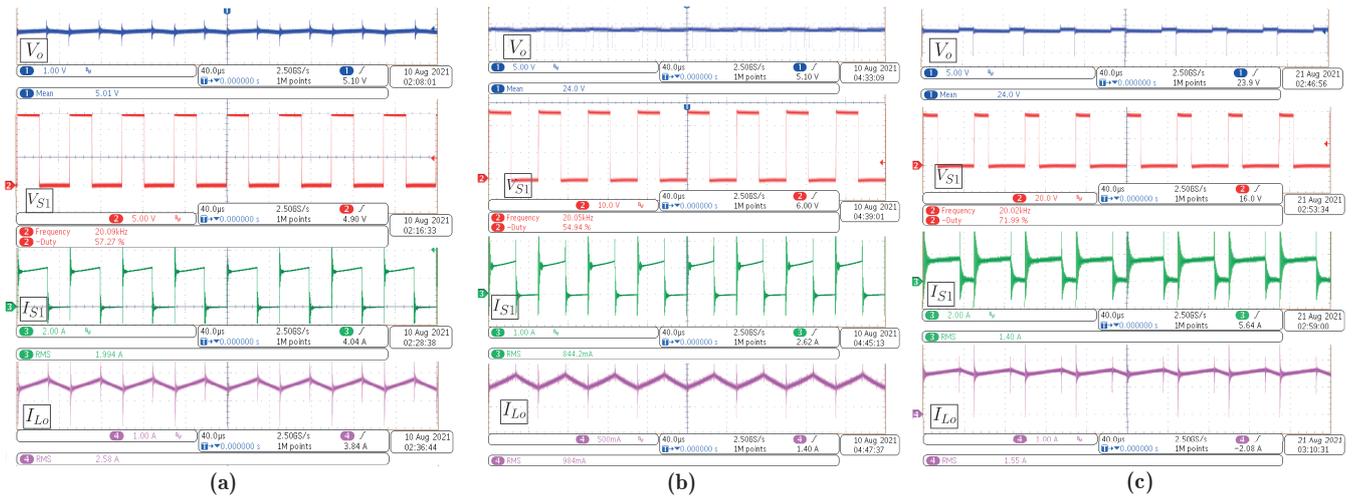


Fig. 5. Algumas formas de onda dos conversores (a) buck, (b) boost e (c) buck-boost observadas no kit didático. As medições de corrente foram obtidas indiretamente, através da tensão resultante nos resistores de $0,1 \Omega$ ($1/4$ W) e ajuste de ganho de 100 mV/A no osciloscópio.

TABELA III
Resultados Experimentais Obtidos no Protótipo para os Conversores CC-CC Não-Isolados

Parâmetro	Buck	Boost	Buck-Boost
Razão cíclica real (D_r)	0,57	0,55	0,72
Valor médio da corrente I_{in}	1,4 A	1,0 A	1,2 A
Rendimento (η)	72,9%	83,3%	72,9%
Valor eficaz da corrente em S_1	2,0 A	0,9 A	1,4 A
Valor eficaz da corrente em D_1	1,7 A	0,7 A	0,8 A
Valor médio da corrente em D_1	1,1 A	0,5 A	0,4 A
Valor eficaz da corrente em L_o	2,6 A	1,0 A	1,6 A
Valor eficaz da corrente em C_o	0,1 A	0,5 A	0,7 A
Valor eficaz da corrente em C_i	1,2 A	–	0,7 A
Ondulação de tensão (ΔV_{C_o})	1,0%	0,8%	1,4%
Ondulação de corrente (ΔI_{L_o})	12,5%	20,0%	13,6%

III. CONVERSORES ISOLADOS

Em diversas aplicações utilizam-se topologias de circuitos com transformador, buscando promover isolamento elétrico entre a entrada e a saída do conversor. Dessa forma, através da adição de múltiplos enrolamentos secundários, obtém-se conversores com diversos níveis de tensão de saída e com referências de tensão independentes. Além disso, em situações nas quais é necessário um ganho estático extremo, a relação de transformação entre enrolamentos viabiliza reduzir os esforços de tensão e de corrente nos semicondutores, contribuindo para o aumento da eficiência e redução de custo do conversor [29].

Entre as topologias propostas na literatura, foram selecionadas as estruturas *flyback* (FLY), *push-pull* (PP), *half-bridge* (HB) e *full-bridge* (FB) para fazerem parte do kit didático, o qual é apresentado na Figura 6. Estes conversores são implementados com os mesmos componentes, (exceto os elementos magnéticos de isolamento e as resistências de carga), sendo utilizados *jumpers* na PCI que permitem habilitar o funcionamento de diferentes partes do circuito. A disposição dos *jumpers* e dos demais elementos do kit são mostrados na

Figura 7, sendo que na Tabela IV mostra-se quais *jumpers* deverão ser fechados conforme cada estrutura de interesse.

Para o elemento magnético de isolamento (T_i), seja ele um indutor acoplado ou um transformador, é previsto a utilização de até três enrolamentos isolados. No caso das estruturas PP, HB e FB, apesar da maioria das ilustrações da literatura indicar transformadores com dois secundários e retificador de saída com ponto médio [29], [30], optou-se por simplificar o projeto do transformador, economizando um enrolamento secundário e substituindo por um retificador de saída em ponte completa. As resistências de carga ($R_{o,i}$), são conectadas externamente à PCI, de acordo com a potência de interesse (10,3 ou 21,3 W).

Como modulador dos conversores isolados, é utilizado o mesmo CI e circuito apresentados na Seção II–A. A saída combinada Out_{AB} é adotada para o conversor *flyback*, permitindo razão cíclica menor ou superior a 50%. Nas demais estruturas, são empregadas as saídas independentes e complementares (Out_A e Out_B), com razão cíclica inferior a 50%. Estão presentes também *gate drivers* (IRS2181), pelo fato dos interruptores das estruturas HB e FB demandarem pulsos de comando com referências de tensão distintos.

Devido a presença da indutância de dispersão, são previstos dois circuitos de grampeamento (G_{RC}), visando limitar a sobretensão que ocorre sobre os interruptores S_3 e S_4 , caso estes façam parte de um conversor *flyback*.

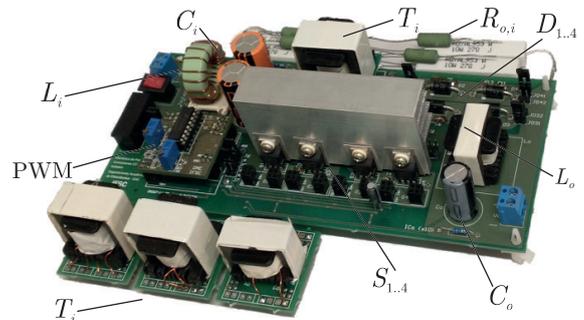


Fig. 6. Kit didático para os conversores CC-CC isolados. T_i e $R_{o,i}$ são substituídos de acordo com a topologia e potência de interesse.

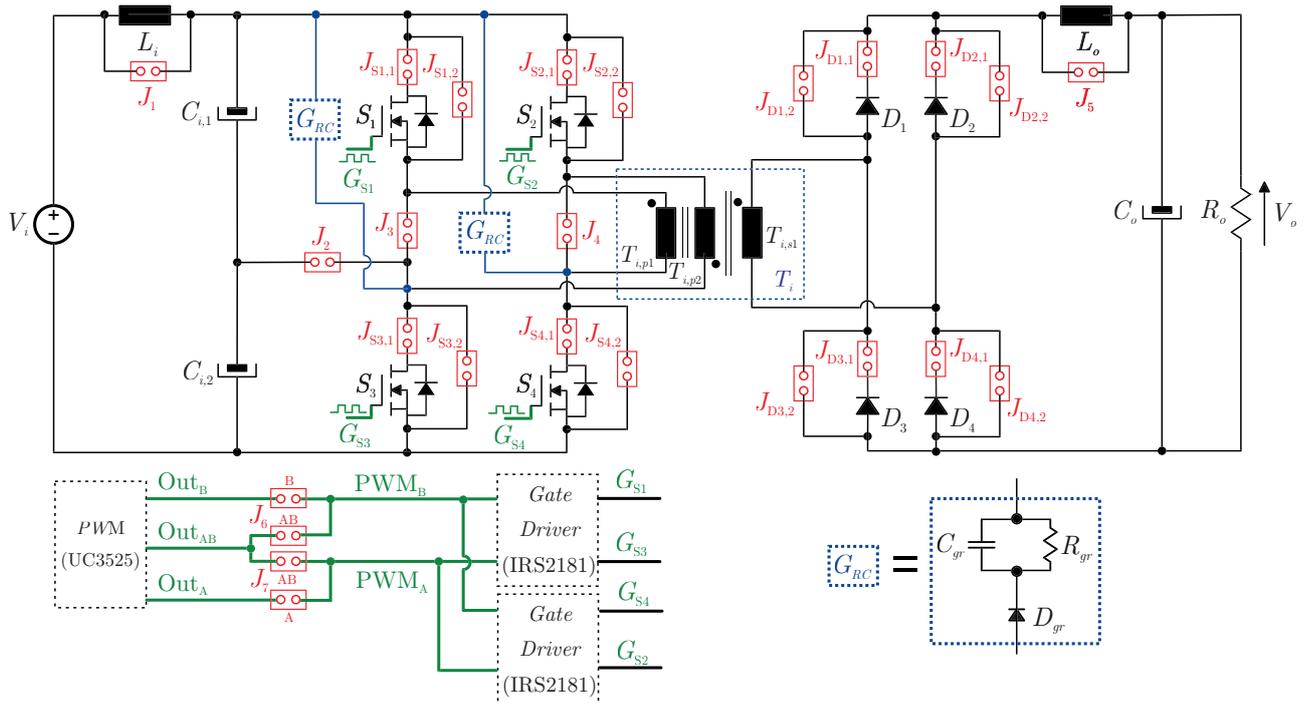


Fig. 7. Conceito do kit didático para a implementação dos conversores CC-CC isolados. Através da seleção dos *jumpers* (representados pelos retângulos vermelhos) é possível configurar o protótipo para operar como conversor *flyback*, *push-pull*, *half-bridge* ou *full-bridge*.

TABELA IV

Definição dos *jumpers* a Serem Fechados de Acordo com a Estrutura de Interesse

Estrutura	MOSFETs	Diodos	PWM	Outros
<i>Flyback</i>	$J_{S2,2}, J_{S3,1}$	$J_{D1,1}, J_{D4,2}$	$J_{7,AB}$	J_5
<i>Push-Pull</i>	$J_{S1,2}, J_{S2,2}$ $J_{S3,1}, J_{S4,1}$	$J_{D1,1}, J_{D2,1}$ $J_{D3,1}, J_{D4,1}$	$J_{6,B}$ $J_{7,A}$	
<i>Half-Bridge</i>	$J_{S2,1}$ $J_{S4,1}$	$J_{D1,1}, J_{D2,1}$ $J_{D3,1}, J_{D4,1}$	$J_{6,B}$ $J_{7,A}$	J_2 J_4
<i>Full-Bridge</i>	$J_{S1,1}, J_{S2,1}$ $J_{S3,1}, J_{S4,1}$	$J_{D1,1}, J_{D2,1}$ $J_{D3,1}, J_{D4,1}$	$J_{6,B}$ $J_{7,A}$	J_3 J_4

A. Dimensionamento e Implementação

Fazendo uso dos *jumpers* previstos na Tabela IV, as quatro estruturas CC-CC isoladas são obtidas, conforme representado na Figura 8. Por sua vez, são consideradas as especificações na Tabela V, que da mesma forma como no caso dos conversores não-isolados, são definidas com o objetivo de viabilizar o uso do kit didático nos laboratórios da instituição de ensino. Para obter o conjunto de componentes eletrônicos que é montado na PCI, utiliza-se os equacionamentos dos conversores propostos em [29]–[32], quantificando os valores de tensão, corrente e perdas em cada componente. Além disso, a escolha dos elementos leva em consideração a situação de pior caso das grandezas elétrica em cada um deles e os modelos disponíveis no mercado nacional. Os principais componentes utilizados no protótipo estão na Tabela VI.

No caso dos circuitos de grampeamento (G_{RC}), os componentes foram especificados considerando a topologia *flyback* e o procedimento proposto em [33]. Para tanto, utiliza-se a indutância de dispersão medida (L_{lk} , referida ao primário)

TABELA V

Especificações dos Conversores CC-CC Isolados

Parâmetro	FLY	PP	HB	FB
Tensão de entrada (V_i) [V]	12	12	12	12
Tensão de saída (V_o) [V]	48	48	48	48
Razão cíclica máxima (D_{max})	0,6	0,4	0,4	0,4
Relação de transformação (N_T)	2,7	6,0	12,8	12,8
Potência de saída (P_o) [W]	10,3	21,3	10,3	21,3
Freq. de comutação (f_s) [kHz]	20	20	20	20
Ond. de tensão de saída (ΔV_{Co})	3%	1%	1%	1%
Ond. de corrente de saída (ΔI_{Lo})	20%	20%	20%	20%
Filtro de entrada	Sim	Sim	Sim	Sim
Temperatura de junção (T_j) [°C]	100	100	100	100
Temperatura ambiente (T_a) [°C]	30	30	30	30

de $3,4 \mu\text{H}$ e a tensão no capacitor de grampeamento (V_g) de 60 V. Dessa forma, os valores calculados do capacitor (C_{gr}) e do resistor (R_{gr}) de grampeamento são de $2,2 \mu\text{F}$ e $5,1 \text{k}\Omega/1 \text{W}$ respectivamente. Como diodo (D_{gr}) emprega-se o modelo RS1M (ON Semi, 1 A/1 kV). Distribuem-se também pela PCI diversos resistores de $0,1 \Omega$, visando a medição da corrente nos componentes.

B. Abordagem Didático-Pedagógica

Tendo em vista o elevado número de componentes, é inviável separar cada elemento em uma PCI própria e empregar uma abordagem de ensino similar a que é utilizada com o protótipo anterior. Dessa forma, após o professor transmitir aos discentes o equacionamento sobre os conversores CC-CC isolados, sugere-se que seja realizada uma atividade para dimensionar os componentes dos circuitos,

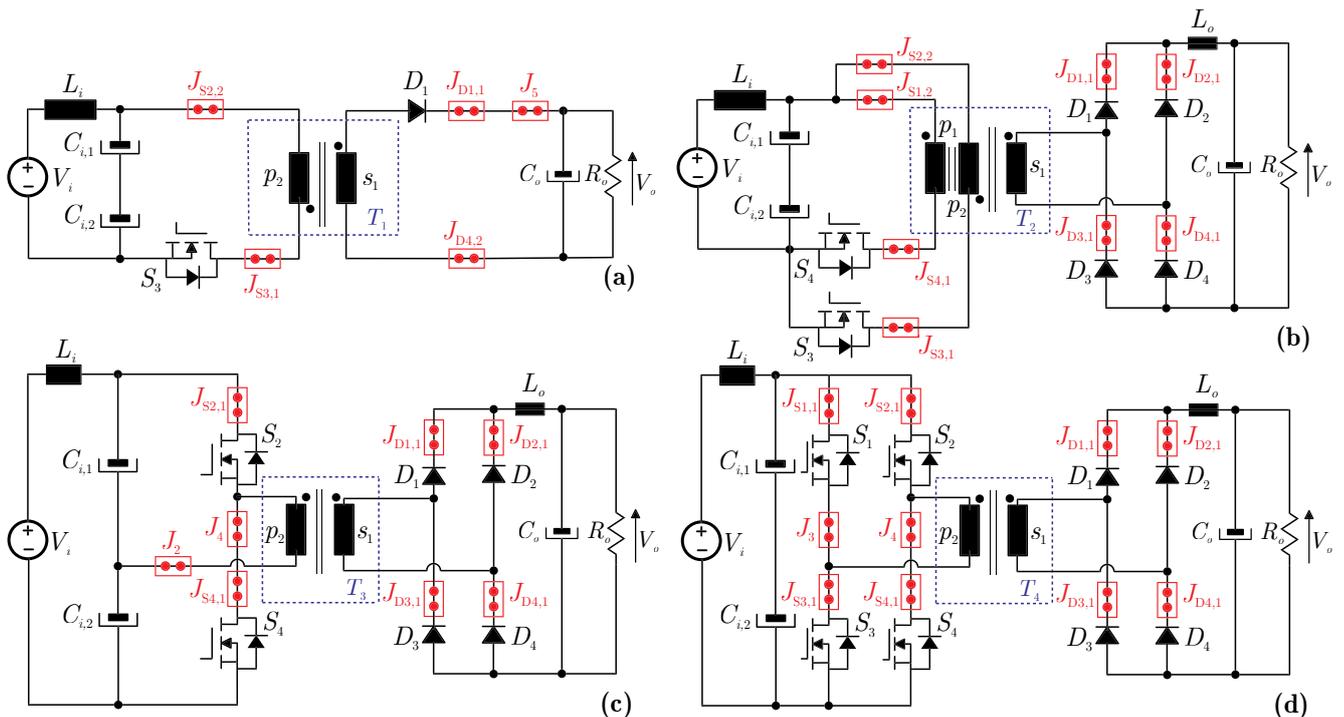


Fig. 8. Conversores obtidos a partir da seleção de *jumpers* prevista na Tabela IV: (a) *flyback*, (b) *push-pull*, (c) *half-bridge*, (d) *full-bridge*.

TABELA VI

Componentes Utilizados na Montagem do Kit Didático para Conversores CC-CC Isolados

Item	Modelo	Especificação
$S_{1..4}$	STP42N60M2 (ST)	MOSFET, 600 V, 22 A
$D_{1..4}$	UF5404 (Vishay)	400 V, 3 A
L_i	Fabricação própria	Toroidal, 20 μ H, 2,5 A
L_o	Fabricação própria	EE, 4,8 mH, 0,5 A
$T_{1..4}$	Fabricação própria	Ver Tabela VII
C_i	B41858 (TDK)	1.500 μ F, 35 V
C_o	B41856 (TDK)	220 μ F, 63 V
Carga 1	Resistiva	224 Ω (4x56 Ω , 5 W)
Carga 2	Resistiva	108 Ω (4x27 Ω , 10 W)
Gate Driver	IRS2181 (IR)	600 V, 1,4 A
Dissipador	RDD4220	6,51 $^{\circ}$ C/W, 80 mm

verificando que as especificações dos componentes montados na PCI são aceitáveis em relação aos valores calculados.

Contudo, como o componente que caracteriza as estruturas isoladas é o elemento magnético T_i , a abordagem didático-pedagógica utilizando este kit deve enfatizar o projeto e o processo de montagem deste elemento. Assim, nas aulas teóricas devem ser revistos conceitos como saturação e dispersão de fluxo magnético, efeitos pelicular e de proximidade nos condutores, perdas, entre outros. Por sua vez, deve-se correlacionar estes conteúdos com parâmetros construtivos, tal como tipos de núcleos e de materiais magnéticos, áreas disponíveis para fluxo magnético e bobinagem, seções de condutores, entreferro, etc. Ao final, após o cálculo dos parâmetros construtivos conforme proposto em [26], [32], [34], e dispondo de diferente tamanhos de núcleos magnéticos, seções de condutores entre outros

materiais isolantes, os estudantes podem montar os elementos magnéticos e avaliar o funcionamento no protótipo.

Devido ao processo de fabricação manual, e a possibilidade de utilizar núcleos e condutores diversos para atender a mesma especificação, poderão ser observadas diferenças operacionais no funcionamento dos circuitos (rendimento, sobretensão nos semicondutores, ganho estático, etc), sendo didaticamente úteis para demonstrar o impacto da construção dos elementos magnéticos no desempenho dos conversores CC-CC isolados. Na Tabela VII são apresentados os parâmetros construtivos utilizados neste trabalho.

Para a verificação do aprendizado, propõem-se a realização de uma atividade em equipes. Nesta atividade, os discentes devem escolher, calcular e simular a topologia de conversor isolado mais adequada para atender um determinado conjunto de especificações, envolvendo as tensões de entrada e de saída, frequência de comutação e potência de saída. Posteriormente, os estudantes são avaliados com base nas justificativas apresentadas por eles para a escolha da topologia, dos componentes e para os resultados obtidos nas simulações.

C. Resultados

A partir das configurações do protótipo apresentadas na Figura 8, são realizados testes experimentais no kit didático, seguindo as especificações previstas na Tabela V.

Na Figura 9 estão as formas de onda obtidas para o conversor *flyback*, sendo V_o a tensão de saída na carga e V_{S3} a tensão no interruptor controlado. Observa-se em V_{S3} um patamar de tensão de 30 V (equivalente a $V_i + nV_o$) além da sobretensão no momento do bloqueio do interruptor. Por sua vez, as correntes no indutor acoplado T_1 ($I_{T1,p2}$ e $I_{T1,s1}$), caracterizam o funcionamento do conversor em MCD.

Para o conversor *push-pull*, algumas formas de onda são

TABELA VII

Parâmetros Construtivos dos Elementos Magnéticos para os Conversores FLY (T1), PP (T2), HB (T3) e FB (T4)

Parâmetro	T1	T2	T3	T4
Núcleo (EE, Thornton, IP12)	30/11	30/14	30/14	30/14
Entreferro [mm]	0,5	-	-	-
Indutância magnetizante [mH]	0,10	1,9	0,3	0,5
Indutância de dispersão [μ H]	3,4	5,8	2,8	2,0
Núm. de espiras do primário	20	23	9	14
Condutor do primário [AWG]	24	21	21	24(x2)
Resistência do primário [Ω]	0,16	0,14	0,08	0,05
Núm. de espiras do secundário	55	139	116	90
Condutor do secundário [AWG]	24	27	29	24
Resistência do secundário [Ω]	0,40	1,8	2,4	0,7

apresentadas na Figura 10. Verifica-se que durante o estado de bloqueio o interruptor suporta uma tensão de 21,7 V, que corresponde à praticamente o dobro da tensão de alimentação. Em V_{S3} e $I_{T2,p2}$ observam-se os valores da frequência de comutação ($f_s=20$ kHz) e da razão cíclica ($D_r=41,5\%$), valores estes que dobram quando é analisada a corrente no indutor de saída (I_{Lo}), devido a ação da ponte retificadora.

No caso dos conversores *half-bridge* e *full-bridge*, apresentam-se nas Figuras 11 e 12 as formas de onda $V_{T3,p2}$ e $V_{T4,p2}$, que correspondem a tensão aplicada ao primário do transformador de cada estrutura. É possível identificar que para o conversor HB, a tensão $V_{T3,p2}$ possui a metade da amplitude da tensão $V_{T4,p2}$, que ocorre para o conversor FB. Tendo em vista que o circuito FB é dimensionado para operar com o dobro da potência do conversor HB, nota-se que $I_{T3,p2}$ e $I_{T4,p2}$, que correspondem a corrente no primário dos transformadores, possuem um valor eficaz praticamente igual. Da mesma forma como no conversor PP, a forma de onda I_{Lo} , presente nas Figuras 11 e 12, indica que a frequência da corrente de saída possui o dobro da frequência de comutação, fato este que contribui para reduzir a corrente em C_o .

Para todos os circuitos, verifica-se através das formas de onda que os conversores operam com a tensão de saída igual a 48 V. Na Tabela VIII são apresentados outros valores quantitativos obtidos experimentalmente.

IV. CONCLUSÕES

Atualmente cinco unidades de cada kit são utilizadas nas atividades práticas da disciplina de Eletrônica de Potência I, ofertada no curso de Engenharia Elétrica do IFSC (Campus Florianópolis). Nesta disciplina, com carga horária de 80 horas (sendo 20 horas destinadas para a parte experimental), são repassados também conteúdos teóricos e práticos sobre conversores CA-CC e CC-CA. No decorrer dos períodos letivos, foram os próprios discentes que montaram os kits didáticos que hoje servem para a capacitação de outros estudantes todos os semestres.

Através da experiência prévia nesta disciplina, e por meio dos resultados apresentados neste trabalho, verifica-se que os dois modelos de kits didáticos são suficientes para a avaliação experimental das principais topologias de conversores CC-CC isolados e não-isolados. Além disso, as soluções apresentadas proporcionam o reaproveitamento dos componentes, agilizam

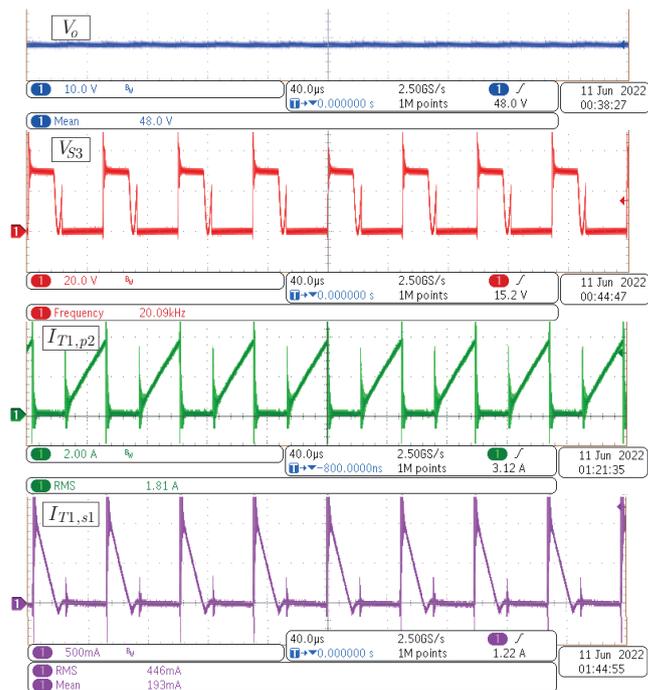


Fig. 9. Formas de onda do conversor *flyback* operando no modo de condução descontínua (MCD), sendo a tensão na carga (V_o), a tensão *dreno-source* no interruptor (V_{S3}) e as correntes nos enrolamentos do elemento magnético T_1 ($I_{T1,p2}$ e $I_{T1,s1}$).



Fig. 10. Formas de onda do conversor *push-pull*, sendo a tensão na carga (V_o), a tensão *dreno-source* no interruptor (V_{S3}) e as correntes no primário do transformador ($I_{T2,p2}$) e no indutor de saída (I_{Lo}).

as aulas e evitam erros de montagem dos circuitos eletrônicos.

Durante a montagem e os testes dos protótipos, observou-se a importância do ajuste dos *snubbers* RC nos diodos e MOSFETs (empregando [28]), não apenas para proteger os semicondutores mas para reduzir a interferência das



Fig. 11. Formas de onda do conversor *half-bridge*, sendo a tensão na carga (V_o), a tensão e a corrente no primário do transformador ($V_{T3,p2}$ e $I_{T3,p2}$) e a corrente no indutor de saída (I_{L_o}).

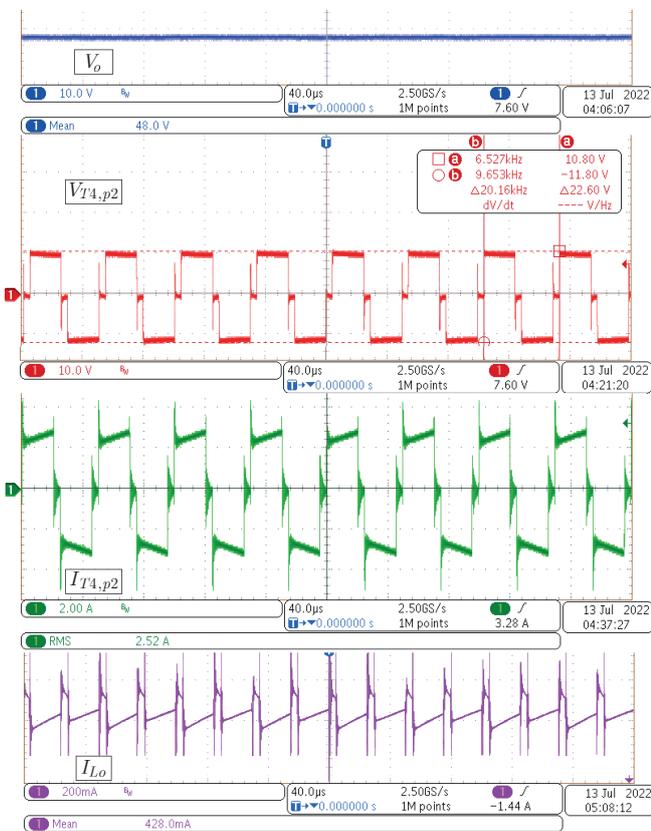


Fig. 12. Formas de onda do conversor *full-bridge*, sendo a tensão na carga (V_o), a tensão e a corrente no primário do transformador ($V_{T4,p2}$ e $I_{T4,p2}$) e a corrente no indutor de saída (I_{L_o}).

TABELA VIII

Resultados Experimentais Obtidos no Protótipo para os Conversores CC-CC Isolados

Parâmetro	FLY	PP	HB	FB
Razão cíclica real (D_r)	0,56	0,42	0,42	0,41
Val. médio da corrente I_{in} [A]	1,07	2,36	1,16	2,30
Val. eficaz da corrente em $S_{1..4}$ [A]	1,81	1,92	1,80	1,84
Val. eficaz da corrente em $D_{1..4}$ [A]	0,45	0,30	0,15	0,31
Val. médio da corrente em $D_{1..4}$ [A]	0,19	0,21	0,10	0,21
Val. médio da corrente em L_o [A]	–	0,43	0,20	0,43
Val. eficaz da corrente em C_o [A]	0,41	0,03	0,04	0,08
Val. eficaz da corrente em C_i [A]	1,16	1,12	1,40	1,05
Ond. de tensão (ΔV_{C_o}) [%]	<1	<1	<1	<1
Ond. de corrente (ΔI_{L_o}) [%]	–	18,8	22,9	23,3

comutações na aquisição das formas de onda. Assim, sugere-se também que em implementações futuras sejam inseridos circuitos de condicionamento de sinais nas PCIs, visando aumentar a relação sinal/ruído nas medições de corrente e facilitar a interpretação dos resultados pelos estudantes.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao IFSC Campus Florianópolis pelo apoio financeiro concedido por meio do edital 33/2016/PROPI, que possibilitou o desenvolvimento dos protótipos. Além disso, agradece também aos estudantes do curso de Engenharia Elétrica, que contribuem com a manutenção e ampliação dos kits didáticos utilizados nas aulas práticas da unidade curricular de Eletrônica de Potência I.

REFERÊNCIAS

- [1] Chunting Mi, Z. J. Shen, T. Ceccarelli, “Continuing education in power electronics”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 48, no. 1, pp. 183–190, Feb. 2005.
- [2] F. Martinez-Rodrigo, L. C. Herrero-De Lucas, S. de Pablo, “Using PBL to Improve Educational Outcomes and Student Satisfaction in the Teaching of DC/DC and DC/AC Converters”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 60, no. 3, pp. 229–237, Aug. 2017.
- [3] S. Bonho, R. Pizzio, F. A. B. Batista, C. A. Petry, “Teaching power electronics with engineering interdisciplinary projects”, in *13th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1–6, Nov. 2015.
- [4] Z. Zhang, C. T. Hansen, M. A. E. Andersen, “Teaching Power Electronics With a Design-Oriented, Project-Based Learning Method at the Technical University of Denmark”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, no. 1, pp. 32–38, Feb. 2016.
- [5] F. Shahnian, H. H. Yengejeh, “Various Interactive and Self-Learning Focused Tutorial Activities in the Power Electronic Course”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 62, no. 4, pp. 246–255, Nov. 2019.
- [6] P. Donoso-Garcia, P. Cortizo, “Ensino Orientado ao Projeto: Uma Experiência para o Ensino de Eletrônica nas Disciplinas de Laboratório de Eletrônica e Eletrônica de Potência”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 2, pp. 109–116, Mai. 2008.

- [7] S. A. Shirsavar, “Teaching practical design of switch-mode power supplies”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 47, no. 4, pp. 467–473, Nov. 2004.
- [8] J. A. Pomilio, “Atividades Didáticas Experimentais em Eletrônica de Potência: Convergindo Conhecimentos e Tecnologias”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 25, no. 2, pp. 146–153, Jun. 2020.
- [9] L. G. B. Rolim, *Laboratório Modular de Eletrônica de Potência*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, Mar. 1993.
- [10] F. S. Garcia, A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, “Plataforma de Ensino de Eletrônica de Potência Versátil e de Baixo Custo”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 2, pp. 85–90, Mai. 2008.
- [11] L. Koleff, G. Valentim, V. Rael, “Development of a Modular Open Source Power Electronics Didactic Platform”, in *15th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6, Dez. 2019.
- [12] F. A. B. Batista, C. A. Petry, E. L. F. Santos, B. R. Almeida, “Didactic system for digital control of power electronics applications”, in *Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 1093–1098, Feb. 2009.
- [13] U. Drogenik, J. W. Kolar, “Survey of modern approaches of education in power electronics”, in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, vol. 2, pp. 749–755, Mar. 2002.
- [14] F. A. S. Gonçalves, L. P. Sampaio, C. A. Canesin, “Interactive DC-DC converters tools for instant design and education”, in *Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 1074–1081, Sep. 2009.
- [15] C. A. Canesin, F. A. S. Gonçalves, L. P. Sampaio, “Simulation Tools for Power Electronics Courses Based on Java Technologies”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 53, no. 4, pp. 580–586, Nov. 2010.
- [16] P. F. Miaja, D. G. Lamar, M. A. P. de Azpeitia, A. Rodriguez, M. Rodriguez, “A Switching-Mode Power Supply Design Tool to Improve Learning in a Power Electronics Course”, *IEEE Transactions on Education*, vol. 54, no. 1, pp. 104–113, Feb. 2011.
- [17] L. P. Sampaio, S. A. Silva, A. N. Vargas, “Desenvolvimento de uma Plataforma Computacional Gráfica Dedicada ao Ensino de Sistemas Fotovoltaicos Usando um Emulador Eletrônico”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 22, no. 1, pp. 91–101, Mar. 2017.
- [18] L. P. Sampaio, M. A. Brito, C. A. Canesin, “Ferramentas Computacionais Aplicadas ao Ensino de Sistemas Fotovoltaicos”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 23, no. 4, pp. 424–433, Dez. 2018.
- [19] V. L. Yoshimura, “An Alternative Approach for Teaching the Basic DC-DC Converters by a Generalization of the Basic PWM Commutation Cell”, *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 2, pp. 77–83, Mai. 2008.
- [20] F. B. P. da Silva, F. A. B. Batista, M. T. Peraça, “Didactic prototype for study of DC-DC converters based on the canonical switching cell”, in *13th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6, Nov. 2015.
- [21] Y. A. da Costa, R. G. Cafure, R. C. Garcia, J. O. P. Pinto, W. I. Suemitsu, “A buck and boost didactic plant with electro-mechanical selection of the operation mode”, in *XI Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 1056–1061, Sep. 2011.
- [22] I. P. Viana, W. S. Lima, C. A. Aquino, “Didactic kit for practical testing of the basic switched mode power supply topologies”, in *Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 761–766, Oct. 2013.
- [23] D. Martins, I. Barbi, *Conversores CC-CC Básicos Não-Isolados*, 4ª edição, Florianópolis, SC, 2000.
- [24] Texas Instruments, USA, *UC3525A - Regulating Pulse Width Modulators (SLUS191C)*, Jan. 2008.
- [25] Thornton Eletrônica Ltda, “Características dos materiais Thornton”, [Online], disponível: www.thornton.com.br/materiais.htm, 2021.
- [26] C. Mclyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, 3rd ed., Taylor & Francis, USA, 2004.
- [27] PLEXIM, “Simulation Platform for Power Electronic Systems (PLECS)”, [Online], disponível: www.plexim.com/products/plecs, 2021.
- [28] NXP Semiconductors, USA, *Designing RC snubbers (AN11160)*, Apr. 2012.
- [29] R. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, Chapman & Hall, New York, USA, 1997.
- [30] D. Martins, *Conversores CC-CC Básicos Isolados*, 1ª edição, Florianópolis, SC, 2018.
- [31] C. Petry, *Curso Básico de Eletrônica de Potência - Conversores CC-CC Isolados*, IFSC, Florianópolis, SC, Mai. 2020, disponível: <https://bit.ly/3PcEZje>.
- [32] I. Barbi, *Eletrônica de Potência - Projetos de Fontes Chaveadas*, Edição do Autor, Florianópolis, SC, 2001.
- [33] I. Barbi, *Estudo do Circuito Grampeador para os Conversores Flyback e Forward e do Circuito Equivalente do Transformador de Três Enrolamentos*, UFSC, Florianópolis, SC, Nov. 2007, disponível: <https://bit.ly/3yGgYd4>.
- [34] A. Bossche, V. Valchev, *Inductors and Transformers for Power Electronics*, Taylor & Francis, USA, 2005.

DADOS BIOGRÁFICOS

Bruno S. Dupczak, membro da SOBRAEP desde 2009. Possui graduação (2006), mestrado (2008) e doutorado (2013) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Tem experiência na área de eletrônica de potência, atuando principalmente nos seguintes temas: fontes de alimentação, transformadores de alta frequência, conversores PWM trifásicos para o acionamento de máquinas elétricas e qualidade da energia elétrica. Atualmente é professor do IFSC no Campus Florianópolis.