

# MÓDULO FLEXÍVEL PARA ESTUDO DE CONVERSORES ESTÁTICOS DE POTÊNCIA

OTÁVIO R. GOMES, MARIA EDUARDA S. BASTOS, MATUSALÉM M. LANES

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG- Unidade Leopoldina Rua José Peres, 558, Centro, Leopoldina MG, Brasil, 36700-000

E-mails: ot.rodrigues32@gmail.com, mariaeduarda\_bastos@hotmail.com, mmlanes@cefetmg.br

**Abstract**— Power electronics enabled a major technological transformation. It is unquestionable how this science has been established in modern technologies and expanding its field of applications. Due to the importance of this area in the face of impacts on society over the years, the study of static power converters has proved to be essential. The difficulty and time spent in assembling converter topologies and in the design and implementation of their drive circuits are limiting factors found in power electronics teaching. In this context, this article presents a didactic switching module, capable of assisting the studies of the converters for their practicality and flexibility. In order to validate the system, the buck and boost converters were implemented. The results of the simulation are compared with the real ones, verifying operating characteristics and changing the parameters of the converters.

**Keywords**— Power Electronics, Static Converters, Didactic Module, Switching Circuits, Simulation.

**Resumo**— A eletrônica de potência permitiu uma grande transformação tecnológica. É indiscutível como essa ciência vem se estabelecendo nas tecnologias modernas e ampliando o seu campo de aplicações. Devido à importância dessa área frente aos impactos causados na sociedade ao longo dos anos, o estudo dos conversores estáticos de potência tem se mostrado essencial. A dificuldade e o tempo despendido na montagem das topologias de conversores e no projeto e implementação de seus circuitos de acionamento são fatores limitantes encontrados no ensino da eletrônica de potência. Frente a este contexto, o presente artigo apresenta um módulo de chaveamento de cunho didático, capaz de auxiliar os estudos dos conversores por sua praticidade e flexibilidade. Com a finalidade de validar o sistema, foram implementados os conversores *buck* e *boost*. Os resultados da simulação são confrontados com os reais, verificando características de funcionamento e a mudança de parâmetros dos conversores.

**Palavras-chave**— Eletrônica de Potência, Conversores Estáticos, Módulo Didático, Circuitos de Chaveamento, Simulação.

## 1 Introdução

Quando se fala de avanços tecnológicos ao longo dos anos é imprescindível citar a importância da eletrônica de potência neste cenário. Alguns exemplos são o sistema de geração e transmissão de energia elétrica, o desenvolvimento de computadores cada vez mais compactos e potentes, e os transportes eletrificados (trens, metrô, veículos elétricos, etc.). A eletrônica de potência se estabeleceu nas tecnologias modernas, possuindo um campo de aplicação bastante amplo e que tende a se dilatar cada vez mais, principalmente com o constante desenvolvimento de dispositivos de potência e microprocessadores que prezam pela eficiência (RASHID, 2014) (AHMED, 2000).

A eletrônica de potência, portanto, é baseada no controle de chaveamento de dispositivos semicondutores, tais como diodos, tiristores e transistores, visando a conversão da energia elétrica (RASHID, 2014) (AHMED, 2000).

Circuitos de eletrônica de potência são chamados de conversores estáticos de potência por converterem ou condicionarem grandezas como corrente e tensão, alterando sua forma de onda. Os conversores formam uma conexão entre a fonte e a carga, conforme ilustrado na Figura 1, a fim de permitir que os requisitos de tensão e corrente da carga sejam atendidos (HART, 2012).



Figura 1. Conversor sendo interface entre fonte e carga.

Estes circuitos são importantes agentes no acionamento de máquinas elétricas e, também, na geração de eletricidade e de sua conexão à rede elétrica (HART, 2012). Reconhecendo a importância dos conversores estáticos de potência, muitos estudos nessa área são desenvolvidos dentro das instituições de ensino superior e técnico. Todavia, a dificuldade e o tempo despendido na montagem das topologias de conversores e no projeto e implementação de seus circuitos de acionamento são fatores limitantes no ensino da eletrônica de potência. Na literatura são encontrados alguns trabalhos que visam contribuir com o processo de ensino-aprendizado dentro dessa área.

Em (REIS et al., 2001) é apresentado uma plataforma didática para o ensino da Eletrônica de Potência. Os autores relatam uma melhoria significativa no processo de ensino-aprendizado na adoção destes kits e citam a economia obtida em relação aos kits educacionais presentes no mercado.

Em (BARBOSA et al., 2017) é proposto um sistema de controle para a validação experimental de conversores estáticos de potência. No trabalho são estudados os conversores CC-CC das topologias *buck* e *buck-boost*, mas os autores destacam a capa-

cidade de serem estudadas outras topologias de conversores, bem como inversores e motores. O sistema conta com dois IGBTs e dois diodos.

No mesmo campo, o presente artigo apresenta um módulo didático flexível no que diz respeito à configuração de topologias monofásicas de conversores estáticos de potência. O diferencial pontua-se no maior número de chaves semicondutoras ofertadas e na praticidade das conexões, bem como, na facilidade de troca de seus componentes. A proposta se mostra adequada quando se deseja realizar testes rápidos sobre um circuito a fim de validar o seu funcionamento, eliminando assim, a necessidade de desenvolvimento de um sistema de acionamento na fase inicial de um projeto. O fato de o módulo permitir a personalização das ligações entre os componentes de chaveamento, o torna ainda, uma excelente ferramenta didática para o estudo de conversores em salas de aulas.

Para validar o seu funcionamento, o módulo foi utilizado para acionar os conversores *buck* e *boost* e os resultados encontrados foram confrontados com os simulados no software MATLAB/Simulink.

O artigo encontra-se dividido da seguinte forma: na Seção 2 são abordadas algumas topologias de conversores que podem ser aplicadas no módulo proposto; na Seção 3 a descrição da proposta é feita com maiores detalhes; os experimentos e resultados são apresentados na Seção 4 e, por fim, na Seção 5 são feitas as considerações finais e apresentados os trabalhos futuros.

## 2 Topologias de Conversores Aplicáveis ao Módulo

Os conversores estáticos de potência são classificados pela relação existente entre as formas de onda de entrada e saída. Devido ao número de chaves e diodos disponíveis no módulo didático proposto, seu emprego se restringe a aplicações monofásicas. Algumas das topologias de conversores aplicáveis no sistema são apresentadas nesta seção.

### 2.1 Retificadores CA-CC Não-Controlados

Os retificadores são conversores que transformam uma fonte de corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) (HART, 2012). Tendo em vista que o fornecimento de energia elétrica ocorre de maneira alternada, retificadores são amplamente utilizados para cargas que exigem uma alimentação CC, como carregadores de celulares e acionamento de motores CC.

Este tipo de conversor pode ser não-controlado ou controlado. Os retificadores não-controlados utilizam diodos para retificar a tensão, fornecendo para a carga uma tensão CC fixa, proporcional a entrada CA. Já os retificadores controlados utilizam tiristores, sendo capazes de ajustar o valor da tensão média CC entregue à carga (POMILIO, 2014).

Quanto ao tipo de conexão dos seus elementos, os retificadores não controlados podem ser de meia-onda ou de onda completa, conforme ilustrado na Figura 2.

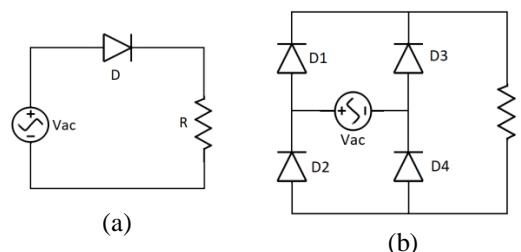


Figura 2. Retificadores não-controlados meia-onda (a) e onda completa (b).

### 2.2 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC são circuitos eletrônicos que não mudam a natureza da forma de onda, ou seja, a entrada e a saída destes conversores são em CC. Por meio destes circuitos a carga recebe níveis de tensão ou corrente regulados provenientes de uma entrada não-regulada (HART, 2012).

Os conversores *buck* e *boost* são as topologias básicas dessa categoria, e a combinação destes levam a outras topologias como o conversor *buck-boost* e o conversor *Cúk*.

O conversor *buck* (ou ainda, *step-down*) possui tensão de saída menor que a tensão de entrada. Suas principais aplicações são fontes reguladas de tensão CC e controle de velocidade de motores CC (MOHAN, UNDELAND e ROBBINS, 2003). Ao contrário deste, o conversor *boost* (também chamado *step-up*) possui tensão de saída superior ao valor de entrada, sendo aplicado também em fontes reguladas de tensão CC e em aplicações que envolvam frenagem regenerativa de motores CC (MOHAN, UNDELAND e ROBBINS, 2003).

Já o conversor *buck-boost* permite que a tensão de saída seja maior ou menor que a tensão de entrada. Este ajuste é feito variando o ciclo de operação da chave. A saída deste conversor possui polaridade invertida (HART, 2012).

De modo semelhante é o funcionamento do conversor *Cúk*, apresentado na Figura 3, que se baseia no princípio da dualidade do conversor *buck-boost*. Também possui polaridade negativa e sua tensão de saída pode ser maior ou menor que a tensão de entrada.

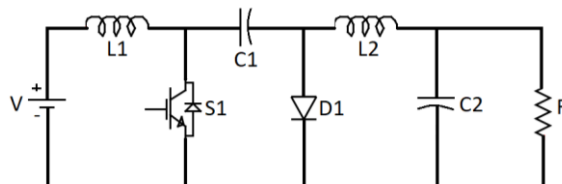


Figura 3. Conversor Cúk.

### 2.3 Inversores CC-CA

Os inversores são responsáveis por transferir a potência de uma fonte CC para uma carga CA (HART, 2012). São utilizados no ajuste de velocidade de motores CA, em fontes de alimentação ininterruptas (UPS), dentre outras aplicações (HART, 2012).

Os inversores podem ser monofásicos ou trifásicos, tendo esta característica determinada pela associação de seus componentes de chaveamento e pela lógica de controle do acionamento destas chaves. Diversas topologias de conversores CC-CA monofásicos foram desenvolvidas ao longo dos anos, destacando-se as configurações ponte completa, meia ponte e *push-pull* (GERENT, 2005). A Figura 4 apresenta as topologias meia-onda e onda completa.

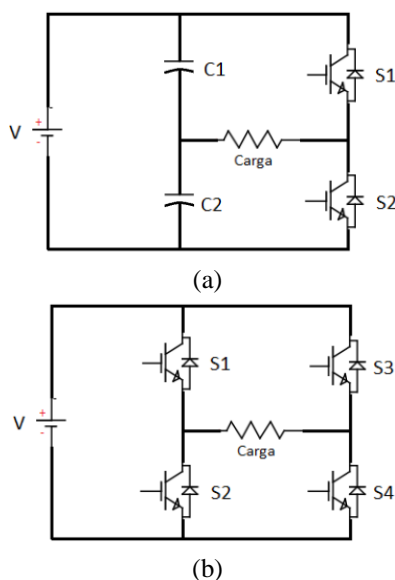


Figura 4. Inversor meia-onda (a) e onda completa (b).

## 3 Descrição da Proposta

Este artigo tem o objetivo de apresentar um módulo de chaveamento flexível para diversas topologias de conversores estáticos de potência. A Figura 5 apresenta, além do módulo, o *driver* de isolamento e o *driver* de acionamento, elementos essenciais para o funcionamento dos IGBTs. Além destes, também es-

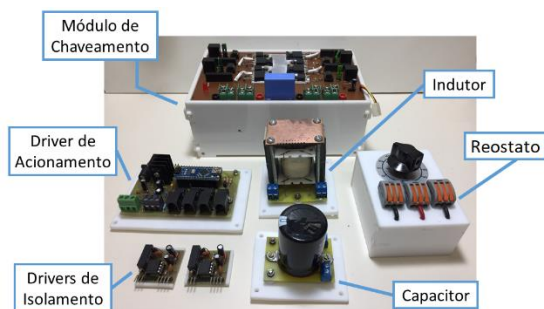


Figura 5. Visão geral do módulo e seus componentes.

tão presentes um indutor, um capacitor e um reostato, confeccionados com encaixes facilitados para a manipulação das conexões, a fim de facilitar a montagem dos circuitos eletrônicos.

Para uma melhor descrição do projeto, a sequência desta seção é apresentada na seguinte forma: módulo de chaveamento, driver de isolamento e driver de acionamento.

### 3.1 Módulo de Chaveamento

O módulo de chaveamento é apresentado na Figura 6. Nele, a placa de circuito impresso se encontra anexa a uma caixa-suporte, de policarbonato, projetada exclusivamente para acomodação do circuito e de seus elementos constituintes.

O módulo conta com chaves semicondutoras e conectores de componentes tais como driver de isolamento, fonte de alimentação, carga e elementos extras de entrada ou saída.

O sistema possui oito chaves semicondutoras, sendo quatro diodos e quatro IGBTs (do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistor*). Tal característica construtiva limita seu emprego a conversores monofásicos. Os IGBTs foram escolhidos neste projeto por reunirem as características de facilidade de acionamento dos MOSFETs (do inglês, *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) e as pequenas perdas em condução dos BJT's (do inglês, *Bipolar Junction Transistor*) (POMILIO, 2014). Além disso, esse tipo de chave permite o controle em elevadas tensões e correntes, operando em frequências na casa de algumas dezenas de kHz.

A concepção do módulo proposto objetivou facilitar a troca de seus componentes, permitindo a substituição de algum elemento com mal funcionamento ou a adaptação do módulo. Dessa forma, é possível, por exemplo, realizar a troca dos IGBTs por MOSFETs.

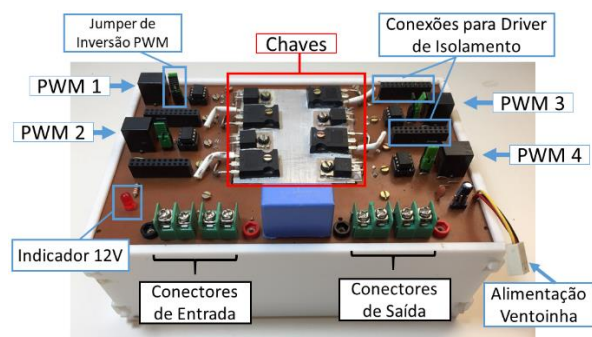


Figura 6. Módulo de chaveamento.

Os conectores para fonte de alimentação possibilitam que o módulo de chaveamento seja conectado diretamente a uma fonte externa, ou ainda, a ligação de componentes que precedam as chaves semicondutoras. Por outro lado, os conectores para carga permitem a ligação de elementos externos que procedam as chaves, tais como indutores, capacitores e resistores.

Um capacitor em paralelo com a conexão para carga foi anexado no módulo, a fim de filtrar perturbações de alta frequência.

Ademais, o módulo conta com um sistema de ventilação forçada, por intermédio de um *cooler* no interior do suporte, a fim de dissipar o calor gerado pelo chaveamento, conservando assim a vida útil dos componentes. A Figura 7 apresenta o interior do módulo.



Figura 7. Vista inferior do módulo de chaveamento.

### 3.2 Driver de Isolamento

O *Driver* de isolamento, apresentado na Figura 8, é uma interface entre o microcontrolador e a chave semicondutora. Trata-se de um importante circuito para o acionamento das chaves. Esse dispositivo é composto por um conversor CC-CC isolado, que converte uma tensão de alimentação externa de 12V em saídas simétricas +15V e -15V, utilizadas no acionamento dos IGBTs.

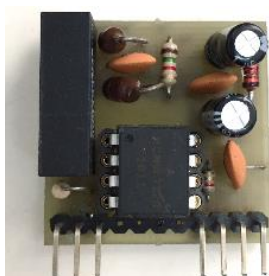


Figura 8. Driver de isolamento.

Além da fonte CC isolada o circuito possui um opto-acoplador de alta velocidade que recebe sinais digitais do microcontrolador, através do canal PWM diferencial, e então aciona as chaves de potência com +15 V para fechá-la e -5 V para abri-las. Para o correto chaveamento dos conversores, é necessário que exista um driver de isolamento para cada IGBT utilizado.

### 3.3 Driver de Acionamento

O *driver* de acionamento, apresentado na Figura 9, é o circuito responsável pelo envio de sinais de

PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) ao módulo de chaveamento proposto. Nele é possível conectar um microcontrolador, onde será embarcado o algoritmo da lógica de chaveamento para a comutação das chaves semicondutoras. O microcontrolador utilizado neste *driver* é o Arduino Nano V3.0.

Os sinais de PWM gerados pelo microcontrolador passam por circuitos integrados (SN75176BP) que os convertem em sinais diferenciais para a transmissão. Ao chegarem no módulo de chaveamento estes sinais são reconvertidos aos sinais originais, eliminando os ruídos de modo comum e reduzindo as interferências externas.

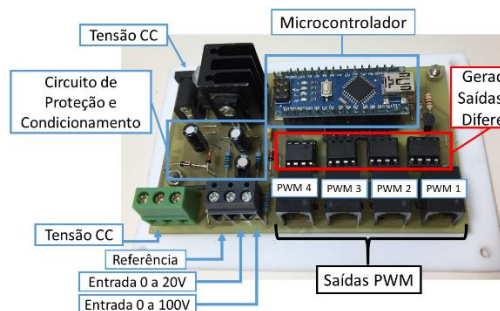


Figura 9. Driver de acionamento.

O driver também agrega um sensor de tensão, com escalas de 0-20V e de 0-100V, permitindo assim, a realimentação do circuito para o seu controle em malha fechada. O circuito do sensor inclui etapas de condicionamento de sinais e proteção, adequando a tensão lida no conversor aos níveis compatíveis com o microcontrolador.

O microcontrolador Arduino foi programado para controlar o chaveamento. O código desenvolvido permite o ajuste de parâmetros via porta serial, conforme mostra a Figura 10. Vários comandos foram implementados possibilitando que o professor ou aluno possa modificar o esquema de controle do conversor com simplicidade, permitindo observar o seu comportamento em diferentes condições de acionamento.

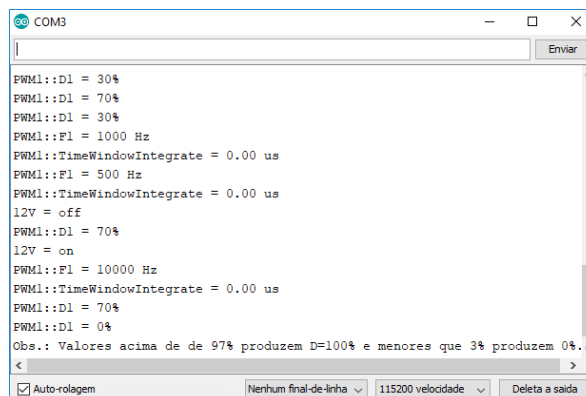


Figura 10. Janela serial do Arduino contendo alguns ajustes de chaveamento.



Dentre as diversas opções de configuração estão:

- Escolha da saída PWM a ser utilizada.
- Definição da frequência de chaveamento de 1 Hz a 20 kHz.
- Ciclo de trabalho ajustável de 0 a 100%.
- Escolha da operação em malha fechada ou aberta.
- Escolha da entrada analógica a ser utilizada, ou seja, de 0 a 20 V ou 0 a 100 V.
- Modificação dos parâmetros  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$  do PID interno.
- Monitoramento da tensão de saída do conversor.
- Leitura do valor atual do ciclo de trabalho.
- Leitura da frequência de operação.

#### 4 Testes e Resultados

Nesta seção são descritos os experimentos realizados com o objetivo de examinar a performance do módulo didático, demonstrando sua funcionalidade, facilidade e flexibilidade. São focos de estudo os conversores CC-CC das topologias *buck* e *boost*.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros dos componentes externos utilizados nas montagens dos conversores.

Tabela 1. Parâmetros das partes constituintes dos conversores.

Componente	Valor
Indutor	$L = 3,14 \text{ mH}$
Capacitor	$C = 409 \mu\text{F}$
Resistência	$R = 60,7 \Omega$

É importante ressaltar que todos os experimentos foram obtidos em malha aberta sem aplicar qualquer tipo de controle.

##### 4.1 Conversor Buck

O esquema de ligação do conversor *buck* por intermédio do módulo didático é representado na Figura 11. A conexão das chaves semicondutoras ocorre internamente ao módulo e sua interface com o ambiente externo se dá por meio dos conectores de fonte e de carga.

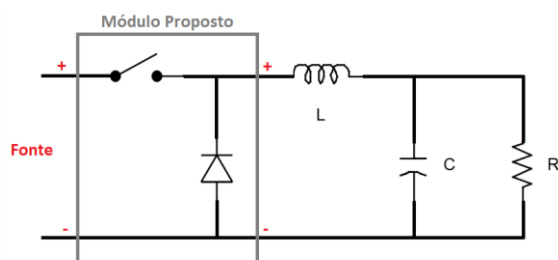


Figura 11. Esquema de ligação do conversor *buck*.

A fonte de alimentação foi inserida no circuito por meio do conector de fonte. Já o conector de carga permitiu a ligação das chaves semicondutoras ao indutor, capacitor e resistência, de acordo com a topologia do conversor *buck*. A montagem do sistema é mostrada na Figura 12.

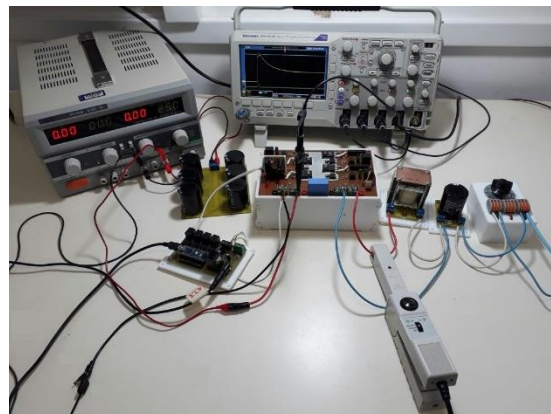


Figura 12. Foto da montagem do conversor *buck* junto ao módulo e demais componentes.

Para o conversor *buck* a fonte de alimentação CC foi configurada em 25V. E, desejando-se uma saída de 20V, o valor do ciclo de operação da chave é igual a 0,8 (1). A frequência de operação da chave foi configurada em 1 kHz e foi feita via porta serial por intermédio da interface de desenvolvimento do Arduino.

$$D = \frac{V_{saída}}{V_{entrada}} \quad (1)$$

Durante a realização dos testes verificou-se uma diferença anormal nas formas de onda dos resultados do experimento e da simulação. A investigação do ocorrido permitiu identificar o problema na fonte de alimentação, que apresentava um afundamento de tensão no instante de início do chaveamento. Assim, o fato modificava a dinâmica do sistema real em comparação com o sistema simulado. Na tentativa de corrigir a situação, utilizou-se um banco de capacitores em paralelo com a fonte a fim de suprir a energia requerida pelo sistema. Mas, sem êxito, os sinais de tensão obtidos da fonte também foram salvos (Figura 13) para serem utilizados como sinal de entrada na simulação. Com a mesma condição de entrada, o comportamento da simulação poderia, então, ser comparado com o experimento.

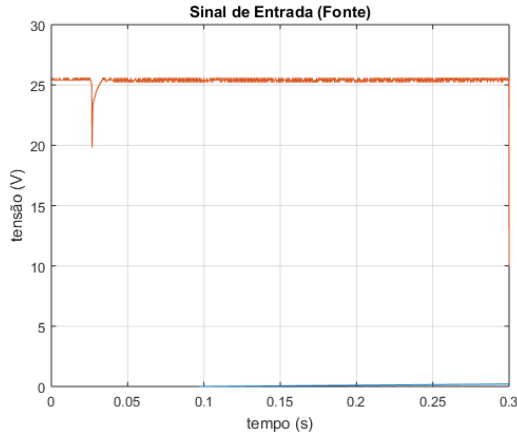


Figura 13. Curva de tensão da fonte de alimentação contendo o afundamento de tensão no instante de início do chaveamento.

A Figura 14 mostra as curvas obtidas na simulação, em vermelho, e das medições ensaiadas em laboratório, em azul, da tensão de saída do conversor para a tensão de entrada apresentada anteriormente na Figura 13.

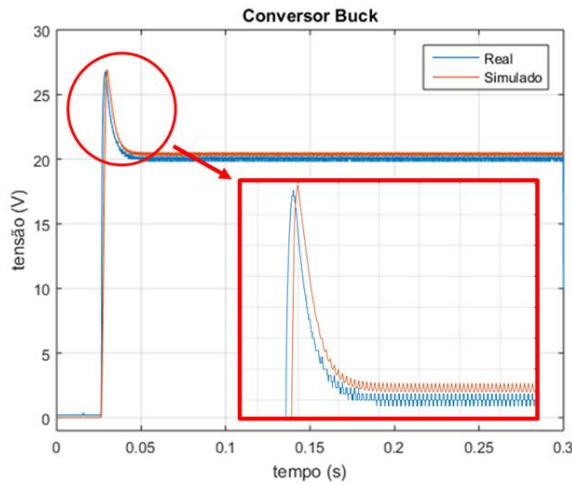


Figura 14. Curva da tensão de saída do conversor buck.

Através da análise gráfica é possível observar que o resultado experimental é consideravelmente próximo ao simulado. A tensão de saída da simulação é pouco mais elevada em comparação com a curva do sistema real. Isso se deve ao fato de que simulações levam em conta um modelo simplificado e aproximado do sistema real, sem considerar a presença de determinadas perdas e outros fenômenos que podem afetar o sistema. A Figura 15 apresenta o erro relativo percentual encontrado. Nos primeiros instantes, quando ainda não há o chaveamento, a tensão de saída é nula. Em função da fórmula do erro relativo, que tem o valor simulado como denominador da equação, os primeiros instantes do gráfico apresentaram tal aparência. O erro médio quadrático<sup>1</sup> calculado foi 0,85 V<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Fórmula utilizada para o cálculo do erro médio quadrático:  

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}$$

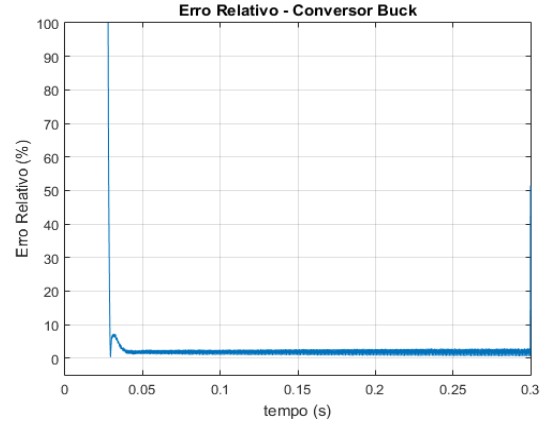


Figura 15. Erro relativo do conversor buck.

#### 4.2 Conversor Boost

A Figura 16 representa a estrutura do conversor boost e do esquema de ligação entre o módulo proposto e os demais componentes do conversor. As chaves semicondutoras são ligadas na parte interna do módulo e, por intermédio das conexões de fonte e de carga, são realizadas as ligações dos demais componentes.

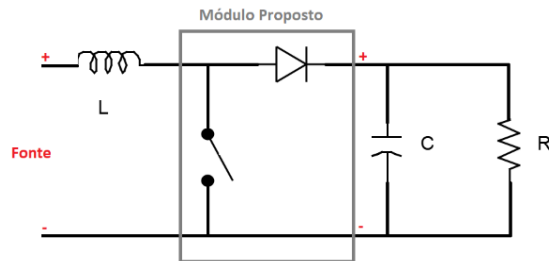


Figura 16. Esquema de ligação do conversor boost.

A Figura 17 apresenta a disposição do conversor após a conexão de todos os componentes.

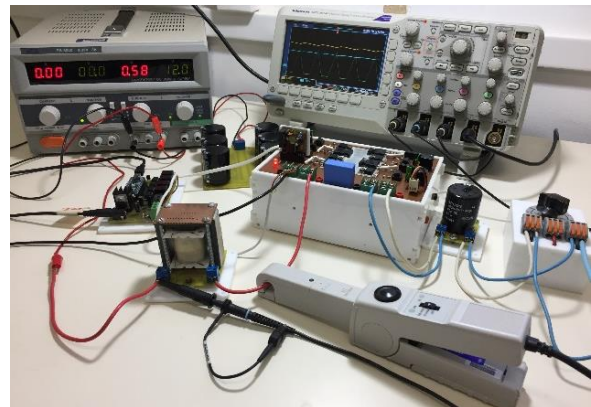


Figura 17. Foto da montagem do conversor boost junto ao módulo e demais componentes.

Para a realização dos experimentos foi determinada uma entrada CC de 12V desejando-se uma

saída de 24V. Com isso, pela relação entre tensões de entrada e saída para o *boost* (2), o ciclo de operação será de 0,5. A frequência de operação também foi de 1 kHz.

$$D = 1 - \frac{V_{entrada}}{V_{saída}} \quad (2)$$

A Figura 18 apresenta as curvas da tensão de saída do conversor *boost* obtidas do sistema real, em azul, e de sua simulação, em vermelho.

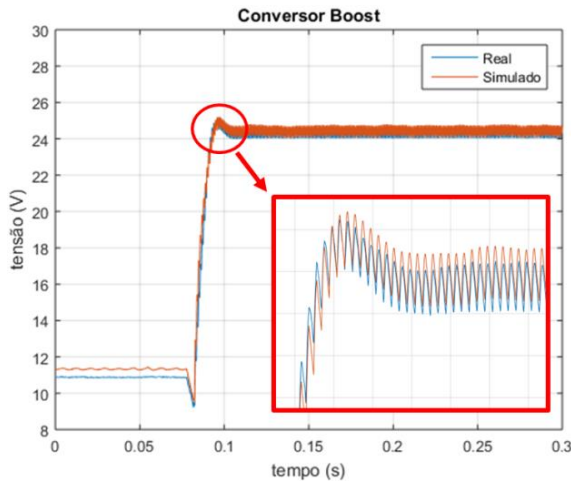


Figura 18. Curva da tensão de saída do conversor *boost*.

Experimento e simulação apresentaram resultados bastante satisfatórios com valores muito próximos um do outro. Assim como no caso do conversor *buck*, essas diferenças do real e simulado se devem pela não consideração de outros fatores que influenciam um sistema real e que não são considerados na simulação. A Figura 19 representa o erro relativo percentual para o conversor *boost*, enquanto o erro médio quadrático calculado foi 0,12 V<sup>2</sup>.

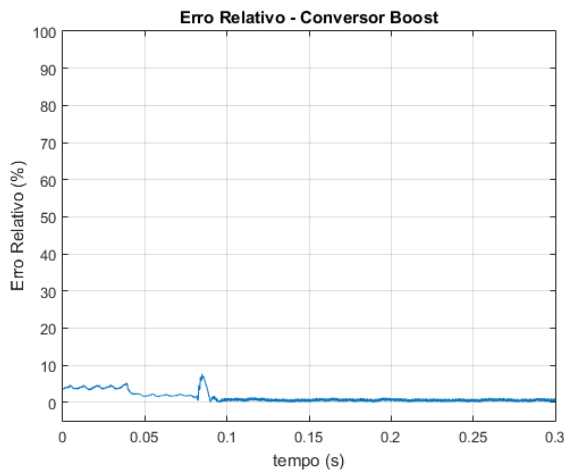


Figura 19. Erro relativo do conversor *boost*.

Um outro estudo que poderia ser levantado é o da corrente sobre o indutor, o que permitiria analisar o circuito quanto ao modo de condução. Para o mes-

mo conversor apresentado acima, a forma de onda é mostrada na Figura 20.

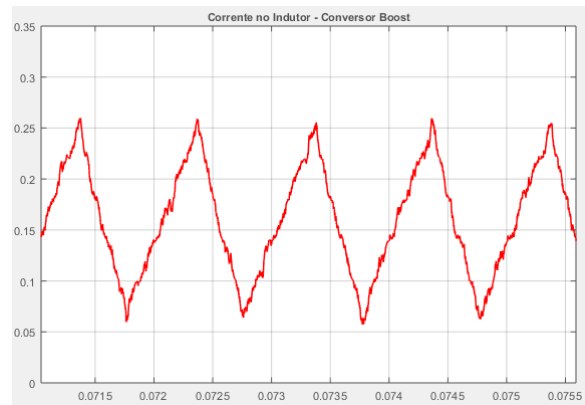


Figura 20. Modo de condução contínua do conversor *boost*.

Portanto, para o conversor *boost* foco dos estudos, tem-se que sua operação se dá em modo de condução contínua.

A fim de visualizar uma situação onde o conversor opere em modo de condução descontínua, a frequência de operação da chave foi alterada para 500 Hz. O resultado para a corrente no indutor pode ser visto na Figura 21.

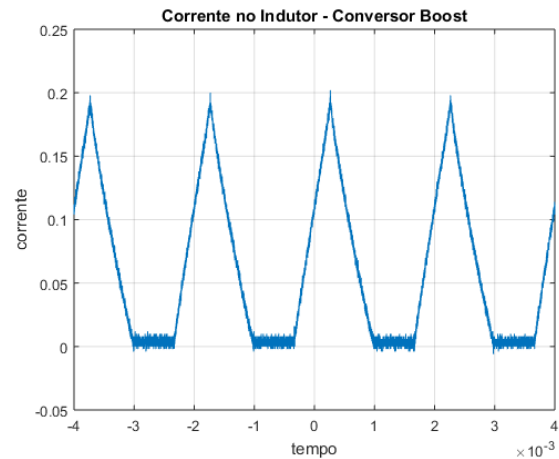


Figura 21. Modo de condução descontínua do conversor *boost*.

Em ambas as análises da forma de onda da corrente, as curvas foram obtidas do sistema real utilizando o osciloscópio para a captação dos sinais.

A mudança do modo de condução contínua para o de condução descontínua pôde ser feita facilmente utilizando a programação desenvolvida para o Arduino, permitindo a alteração de parâmetros via porta serial. Essa variação é facilitada, ainda mais, com a utilização do módulo. Esta característica facilita os estudos dos conversores em sala de aula e permite explorar a seu modo de funcionamento em diversas condições de operação, alterando a frequência, o ciclo de trabalho, dentre tantos outros parâmetros de maneira simplificada.

## 5 Conclusão

A partir dos resultados verificou-se que a utilização do módulo proposto é bastante prática e confiável, haja vista que os resultados reais foram bem próximos dos simulados e os erros foram pequenos. A continuidade de sua utilização na experimentação de conversores permitirá, com o tempo, a obtenção de resultados mais expressivos e sugestões de melhorias que poderão ser implementadas num projeto futuro.

O módulo se mostra robusto e sua usabilidade pôde ser verificada em algumas situações em que este foi utilizado dentro da instituição como, por exemplo, em aulas de eletrônica do curso de eletrotécnica do CEFET-MG, unidade Leopoldina, durante o ensino prático de conversores estáticos CC-CC. O módulo também pôde ser utilizado como ferramenta de teste para um conversor de potência de um aluno, do curso de Engenharia de Controle e Automação, em seu trabalho de conclusão de curso. A contribuição do módulo neste último projeto se deu na facilidade dos ensaios iniciais de controle do conversor em malha fechada, permitindo a averiguação de erros no algoritmo embarcado em um microcontrolador Tiva C Series TM4C123G da *Texas Instruments*.

Dessa maneira, o sistema implementado mostra-se como uma ferramenta didática apta a ser utilizada no desenvolvimento de projetos de pesquisa e no ensino de Eletrônica de Potência, reduzindo assim a distância entre os conteúdos teóricos da área e a prática. Portanto, em aulas de Eletrônica de Potência, o módulo permite demonstrar a operação e os princípios de funcionamento de diversos conversores, em qualquer nível acadêmico – técnico, graduação ou pós-graduação. No que tange a pesquisa, o módulo pode ser utilizado para agilizar resultados de conversores específicos que, por ventura, não existam na relação de equipamentos e, ainda, o experimento de estratégias de controle.

Algumas propostas de melhoria para o módulo proposto e que já estão sendo implementadas são: o acréscimo de chaves semicondutoras a fim de permitir a montagem de topologias trifásicas; uma nova disposição das chaves eletrônicas para um melhor aproveitamento do espaço interno da estrutura de policarbonato; a substituição dos conectores KRE por conectores WAGO tornando a montagem dos conversores mais ágil e robusta; e o desenvolvimento de sensores para monitoramento e controle de variáveis, além da criação de outras cargas, tais como motores, resistores, indutores com diferentes especificações.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CEFET-MG e a FAPEMIG pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

## Referências Bibliográficas

- BARBOSA, P. S. S. et al. Flexible control system for experimental evaluation of static converters applied to DC/DC converters. In: POWER ELECTRONICS CONFERENCE. Juiz de Fora, 19 nov. 2017.
- GERENT, F. H. Metodologia de Projeto de Inversores Monofásicos de Tensão para Cargas Não-Lineares. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- HART, D. W. Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2012.
- POMILIO, J. A. Eletrônica de Potência, 2014. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/eltpot/apresent.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018
- RASHID, M. H. Eletrônica de Potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson Education Brasil, 2014.
- REIS, F. S. DOS et al. Plataforma Didática para o Ensino de Eletrônica de Potência. In: XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA - COBENGE. Porto Alegre, 2001. . Acesso em: 3 jul. 2018