

Análise de eficiência de conversores CC-CC *buck*: convencional e síncrono

Efficiency analysis of buck DC-DC converters: conventional and synchronous

RESUMO

Elias Junior Biondo
eliasbiondo@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Alberto Vinicius de Oliveira
avdo@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência de conversão global de conversores CC-CC *buck* convencional e síncrono, inspecionando as perdas de potência em chaves de eletrônicas (MOSFET e diodo) em função de parâmetros, tais como: ciclo de trabalho, frequência de chaveamento e resistência de carga. Neste contexto, o estudo é baseado em implementações de simulações de circuitos eletrônicos para os dois modelos de conversores, considerando potência máxima de saída de 100 W. Pela comparação de desempenho de ambos, é confirmado que o modelo síncrono apresenta maior eficiência frente ao circuito convencional para todos os parâmetros avaliados.

PALAVRAS-CHAVE: Consumo de energia. Conversores de corrente elétrica. Eletrônica de potência.

ABSTRACT

This work aims to analyze the conversion efficiency of both conventional and synchronous buck DC-DC converter circuits, inspecting the power losses in the electronic switches (MOSFET and diode) as a function of different parameters, such as duty cycle, switching frequency, and load electric resistance. In this context, electronic circuit simulations have been performed, implementing the two models of buck converters that have maximum output power of 100 W. From the comparison between their performances, it is confirmed that the synchronous DC-DC buck converter presents higher efficiency than the conventional one in all evaluated parameters.

KEYWORDS: Energy consumption. Electric current converters. Power electronics.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Atualmente, as áreas de microeletrônica e eletrônica de potência têm evoluído cada vez mais graças ao desenvolvimento do transistor, o qual é um dos dispositivos que mais contribuiu para a evolução das indústrias de semicondutores (MOLLICK, 2006). O *Metal-Oxide-Semiconductor-Field-Effect-Transistor* (MOSFET) é uma das principais tecnologias de transistores, possui grande destaque na área de eletrônica de potência devido às suas características elétricas, dentre elas, destaca-se a de operação como uma chave semicondutora sob altas frequências (AHMED, 2000).

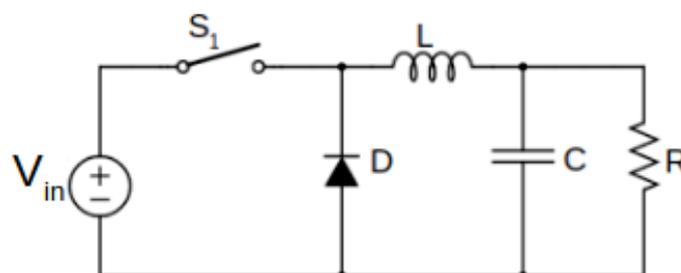
Neste trabalho o MOSFET é usado como chave para o conversor CC-CC *buck*, um circuito elétrico com topologia de fonte chaveada composto por um conjunto de chaves de potência e componentes passivos (resistor, indutor e capacitor). Como o próprio nome já diz, sua função consiste em converter um nível de tensão ou corrente contínua em outro. O modelo *buck*, ou *step-down*, de conversor é capaz de fornecer um valor preestabelecido de tensão elétrica contínua para a carga, de valor menor que o valor da tensão da fonte de alimentação da entrada do circuito (PINILLOS, 2014).

O acionamento da chave é feito através de um circuito auxiliar, conhecido como *bootstrap*, capaz de fornecer à entrada do MOSFET o valor de tensão necessário para acioná-lo, ou seja, um valor de tensão acima da tensão limiar do dispositivo. Esse trabalho tem como objetivo geral, analisar perdas de potência de chaves e comparar o impacto dessas perdas sobre a eficiência de conversão dos circuitos conversores *buck* convencional e síncrono de até 100 W de potência de saída.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Figura 1 apresenta a topologia básica do conversor *buck*, composta por uma fonte de alimentação V_{in} , diodo D, chave S_1 , indutor L, capacitor C e carga resistiva R. Este modelo de conversor possui a capacidade de fornecer para uma carga, um valor de tensão contínua menor ou igual a tensão de entrada, realizando assim uma conversão CC-CC. O processo de conversão acontece pela variação do ciclo de trabalho do sinal de controle da chave S_1 , geralmente, do tipo *Pulse Width Modulation* (PWM) (AHMED, 2000).

Figura 1 – Circuito equivalente do conversor CC-CC *buck* convencional



Fonte: Adaptado de (LENG; LIU, 2017).

Um dos dispositivos utilizados como chave para o conversor é o MOSFET, no qual as perdas de potência presentes são (AHMED, 2000):

$$P_{ON} = R_{DS(ON)} I_{DMED}^2 \frac{t_{ON}}{T}, \quad (1)$$

$$P_{OFF} = V_{DS(max)} I_{DSfuga} \frac{t_{OFF}}{T}, \quad (2)$$

$$P_{SON} = \frac{V_{DS(max)} I_{DMED} t_{rif}}{6}, \quad (3)$$

$$P_{SOFF} = \frac{V_{DS(max)} I_{DMED} t_{fif}}{6}, \quad (4)$$

onde, P_{ON} são as perdas por condução, $R_{DS(ON)}$ representa o valor da resistência entre os terminais de dreno e fonte quando o dispositivo estiver conduzindo, I_{DMED} é o valor médio da corrente que circula pela chave, t_{ON} representa o período em que a chave se encontra ligada, T é o período total do chaveamento, P_{OFF} são as perdas quando o MOSFET se encontra desligado, $V_{DS(max)}$ representa o valor máximo de tensão sobre os terminais de dreno e fonte do MOSFET quando ele estiver desligado, I_{DSfuga} é a corrente de fuga que circula através do dispositivo, t_{OFF} é o intervalo de tempo em que o MOSFET permanece desligado, P_{SON} é a potência dissipada durante o processo em que a chave está sendo ligada, P_{SOFF} é a potência dissipada durante o processo em que a chave está sendo desligada, t_{ri} representa o tempo de atraso do início da condução até o momento em que o MOSFET passa a conduzir toda a corrente a qual foi submetido, t_{fi} é o tempo necessário para bloquear a passagem de corrente e f é a frequência do sinal de controle do transistor (AHMED, 2000).

Por fim, é possível calcular a perda total (P_{total}) no MOSFET somando todas as perdas de potência da chave, com base nas Eqs. (1)-(4).

O diodo também desempenha um papel de chave do circuito da Figura 1 e, como o MOSFET, dissipa potência ao realizar o processo de chaveamento. As perdas presentes no diodo podem ser calculadas como (AHMED, 2000):

$$P_{cond} = V_f I_{DMED}, \quad (5)$$

onde P_{cond} representa as perdas por condução do diodo, V_f representa a tensão direta sobre o dispositivo quando estiver conduzindo e I_{DMED} é a corrente de carga.

A perda total de potência do conversor CC-CC convencional (P_{conv}) é dada pela soma das Eqs. (1)-(5).

A eficiência de conversão do circuito da Figura 1 pode ser calculada como (AYACHIT; KAZIMIERCZUK, 2014):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{conv}}, \quad (6)$$

sendo P_{out} o valor da potência de saída do conversor medida sobre a carga.

O circuito de conversor CC-CC *buck* síncrono baseia-se no do modelo convencional, porém emprega um segundo MOSFET no lugar de D da Figura 1, permitindo a transferência de energia bidirecional, além de suportar valores de corrente acima que um diodo do circuito convencional (DEEKSHITHA; SHENOY, 2018). Desta forma, sua perda total de potência (P_{total}) é a soma das perdas em cada MOSFET, baseada nas Eqs. (1)-(4).

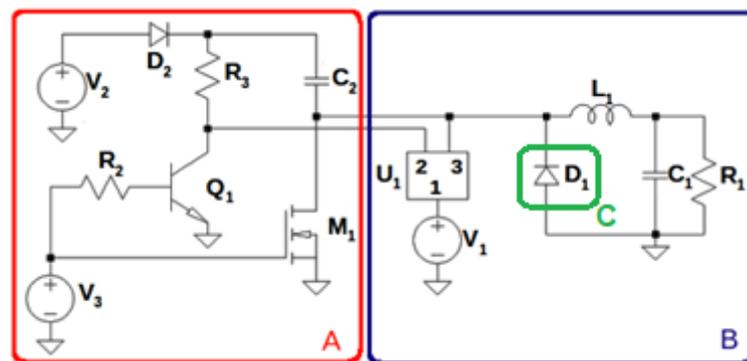
METODOLOGIA

Após concluída a revisão bibliográfica, dá-se início as etapas de projeto e simulação dos conversores: *buck* convencional e *buck* síncrono. Realizadas através do *software* LTSpice (LINEAR TECHNOLOGY, 2011).

MODELO CONVENCIONAL

O primeiro circuito simulado é o modelo convencional, apresentado na Figura 2. O acionamento do MOSFET é realizado através de um circuito *bootstrap* (Figura 2A) que garante um valor de tensão do sinal de controle suficiente para o funcionamento da chave (WENDT; THOMA; WICHT; LANDSIEDEL, 2007).

Figura 2 – Circuito básico do conversor *buck* A) circuito auxiliar (*bootstrap*) e B) elementos do conversor *buck* convencional



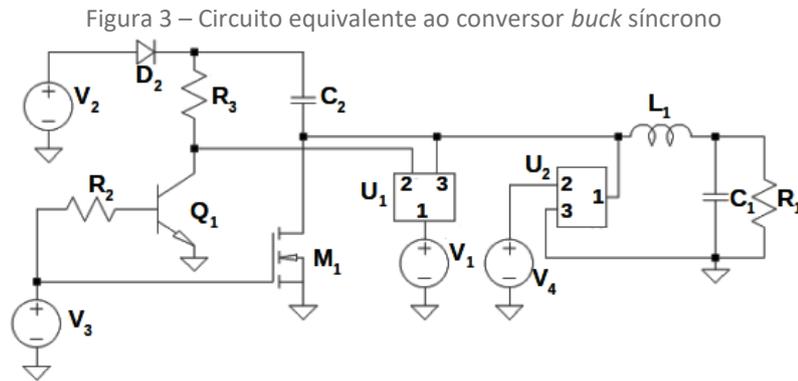
Fonte: Autoria própria, adaptado de (RAUBER, 2019).

O primeiro ensaio tem como objetivo verificar a influência da resistência de carga sobre eficiência de conversão do circuito (Eq. 6), medindo-se a potência de saída e calculando as perdas de potência e eficiência do conversor, ao variar R_L de 100 Ω a 1 k Ω . Particularmente neste trabalho, as perdas no estado desligado e perdas por chaveamento do diodo são desconsideradas, assim como as perdas presentes do indutor e capacitor, pois não apresentam valor significativo em relação as perdas totais de potência do circuito conversor. Em seguida, fixa-se o valor da resistência de carga em 100 Ω , enquanto varia-se o ciclo de trabalho do sinal de controle entregue ao MOSFET de 10 % a 100 %, medindo-se a potência de saída para cada ciclo de trabalho ajustado. Por fim, com o ciclo de trabalho e o valor resistivo de carga fixados em 50 % e 100 Ω , respectivamente. Em seguida, novas simulações são realizadas, variando-se a frequência do sinal de controle na faixa de 30 kHz a 300 kHz. Para cada valor de frequência, é medida a potência de saída do conversor e, posteriormente, as perdas de potência são calculadas baseadas nas Eqs. (1)-(5).

MODELO SÍNCRONO

Após os ensaios do modelo convencional do conversor, o circuito da Figura 2 é adaptado de modo a implementar o circuito do conversor síncrono, como apresentado na Figura 3. Para isso, substitui-se o diodo D_1 (Figura 2C) por outro MOSFET, o qual é acionado através de um sinal de controle, do tipo PWM,

fornecido por um gerador de função ligado ao componente. Os ensaios para este circuito seguem os mesmos métodos e critérios adotados ao modelo convencional. No entanto, neste caso as perdas de potência do conversor são calculadas somando as perdas presentes nos dois MOSFETs, com base nas Eqs. (1)-(4).

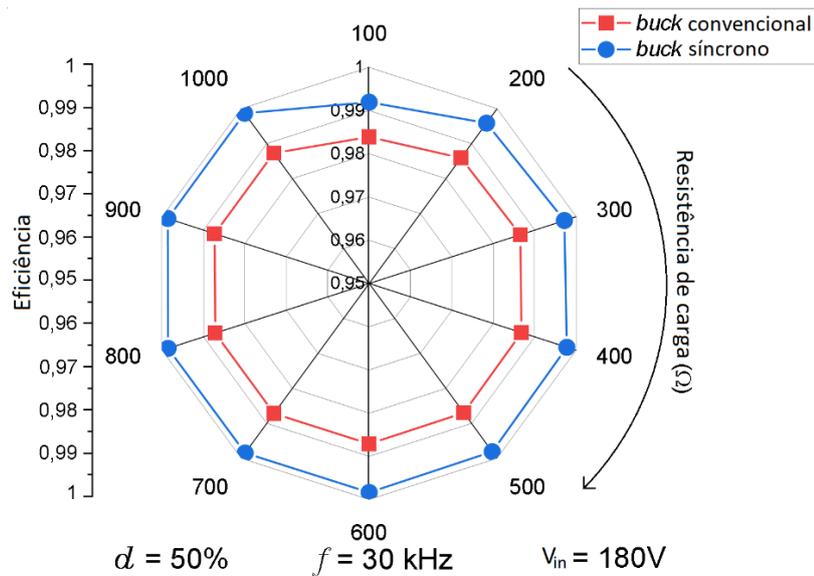


Fonte: Autoria própria (2020).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta a eficiência de conversão dos circuitos em função da resistência de carga. Observa-se que o conversor síncrono apresenta cerca de 1% a mais de eficiência em relação ao modelo convencional, devido as perdas durante o processo de conversão do circuito síncrono serem menores que as do convencional.

Figura 4 – Eficiência de conversão em função da resistência de carga dos conversores *buck* convencional e *buck* síncrono

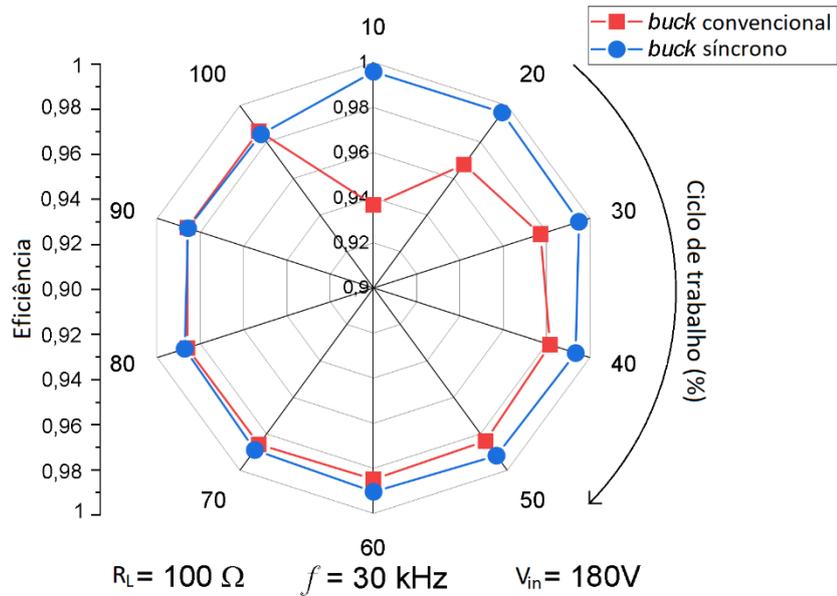


Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 5 apresenta a influência de d sobre a eficiência de conversão dos conversores. Para valores do ciclo de trabalho do sinal de controle de até 80%, o

conversor síncrono apresenta maior eficiência de conversão em relação ao conversor convencional. Por outro lado, para valores de d acima de 90 %, o modelo síncrono apresenta maiores perdas, cerca de 10 % a mais que o modelo convencional, resultando em uma eficiência de cerca de 1 % menor.

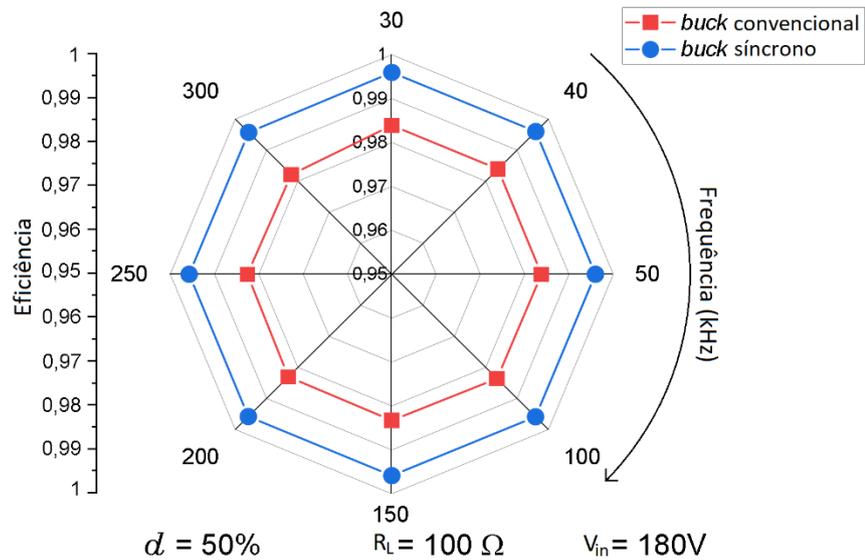
Figura 5 – Eficiência de conversão em função do ciclo de trabalho dos conversores *buck* convencional e síncrono



Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 6 mostra a eficiência dos conversores em função da frequência do sinal de controle. Nota-se que o modelo síncrono se sobressai em relação ao convencional apresentando maior eficiência de conversão durante todo o ensaio variando a frequência do sinal de controle.

Figura 6 – Eficiência de conversão em função da frequência do sinal de controle dos conversores *buck* convencional e *buck* síncrono



Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu verificar como o valor resistivo de carga, o ciclo de trabalho do sinal de controle e a frequência do sinal de controle afetam as perdas de potência do conversor, em relação ao MOSFET e ao diodo, e a eficiência dos conversores *buck* convencional e *buck* síncrono. Nos três ensaios realizados, o modelo síncrono se mostrou melhor, apresentando, em grande parte dos ensaios, cerca de 1% a mais de eficiência que o modelo convencional até valores acima de 5% a mais de eficiência (ensaio com ciclo de trabalho em 10%). Em trabalhos futuros, é válido a realização de um levantamento de custo dos circuitos apresentados, a fim de verificar se vale a pena o investimento em um conversor síncrono, quando o quesito de avaliação é custo por benefício e não apenas eficiência de conversão, como foi o foco deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela participação no Programa de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica (Edital PROPPG 042019 — PIVICT).

REFERÊNCIAS

AHMED, A. **Eletrônica de potência**. 1. ed. São Paulo: Pearson Education, 2000. ISBN 85-87918-03-6.

DEEKSHITHA, C.; SHENOY, K. L. Design and simulation of synchronous buck converter for LED application. 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT TRENDS IN ELECTRONICS, INFORMATION COMMUNICATION TECHNOLOGY. Bangalore, **Anais...** India: IEEE, jan. 2018. DOI [10.1109/RTEICT.2017.8256574](https://doi.org/10.1109/RTEICT.2017.8256574). Acesso em: 30 ago. 2020.

LENG, Z.; LIU, Q. A simple model predictive control for Buck converter operating in CCM. IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PREDICTIVE CONTROL OF ELECTRICAL DRIVES AND POWER ELECTRONICS. **Anais...** Pilsen: IEEE, 2017. DOI [10.1109/PRECEDE.2017.8071262](https://doi.org/10.1109/PRECEDE.2017.8071262). Acesso em: 30 ago. 2020.

LINEAR TECHNOLOGY. LTSPICE. [s.l.], p. 1-53, 2011. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/simulation-models/spice-models/LTspiceGettingStartedGuide.pdf?modelType=spice-models>. Acesso em: 19 ago. 2020

MOLLICK, E. Establishing Moore's Law. **IEEE Annals of the History of Computing**, v. 28, n. 3, p. 62–75, 2006. DOI [10.1109/MAHC.2006.45](https://doi.org/10.1109/MAHC.2006.45). Acesso em: 30 ago. 2020.

PINILLOS, A. S. **Conversores de energia elétrica CC/CC para aplicações em eletrônica de potência**: conceitos, metodologia de análise e simulação. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014. ISBN 978-85-365-1830-5.

RAUBER, E. A.; OLIVEIRA, A. V. Aquisição da eficiência de um conversor buck utilizando um MOSFET como chave. SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR. **Anais...** Pato Branco: UTFPR, 2019.

WENDT, M.; THOMA, L.; WICHT, B.; LANDSIEDEL, D. S. A configurable high-side/low-side driver. 33RD EUROPEAN SOLID-STATES CIRCUITS CONFERENCE Munich: IEEE, 2007. DOI [10.1109/ESSCIRC.2007.4430292](https://doi.org/10.1109/ESSCIRC.2007.4430292). Acesso em 30 ago 2020.