

Aquisição da eficiência de um conversor *buck* utilizando um MOSFET como chave

Acquisition of efficiency of a buck converter using a MOSFET as electronic switch

RESUMO

Eduardo Alexandre Rauber
eduardorauber@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

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

Este trabalho tem por finalidade analisar a eficiência do conversor CC-CC: topologia *buck*, operado em malha aberta. O acionamento do conversor é realizado por um Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET), o qual é acionado por um circuito de *bootstrap*. Na fase inicial do estudo, utilizou-se o simulador de circuitos elétricos *NI MultiSim*, criado pela empresa *Electronics Workbench*, a fim de analisar as características elétricas do conversor. Neste contexto, analisou-se períodos de chaveamento entre 30 μ s e 50 μ s, para ciclo de trabalho entre 20 % e 80 %, utilizando-se frequência de chaveamento entre 20 kHz e 30 kHz. Com o intuito de validar os resultados de simulação, realizou-se a implementação prática do circuito, encontrando-se resultados aproximados entre a prática, teoria e simulação, quando observado a eficiência e o ganho do conversor.

PALAVRAS-CHAVE: Acionamento. Fonte chaveada. Rendimento.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

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



ABSTRACT

This study aims to analyze the DC-DC converter efficiency: buck topology, operated open loop. The converter switching is by a Field Effect Transistor Metal-Oxide-Semiconductor (MOSFET), which is driven by a bootstrap circuit. In the initial phase of the study, it has been used the NI MultiSim circuit simulator, created by the company Electronics Workbench, in order to analyze the electrical characteristics of the converter. In this context, it was analyzed the switching periods between 30 μ s and 50 μ s and the duty cycle between 20% and 80%, using 30 kHz switching frequency. In order to validate the simulation results, there was a practical circuit implementation, which presents similar results among practice, theory and simulation, taking in to account both figures of merit: efficiency and converter gain.

KEYWORDS: Triggering. Switched source. Yield.

INTRODUÇÃO

O conversor estático de Corrente Contínua para Corrente Contínua (CC-CC) topologia *buck* é uma fonte chaveada amplamente utilizada na engenharia moderna, devido à sua simplicidade e eficiência; comparado a outras topologias de aplicação similar, segundo David Knight (2015). No entanto, para Michael Wendt (2007, p. 1), este conversor apresenta problemas em seu acionamento, quando operado por um Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET) do tipo enriquecimento e canal n. Isto se deve pelo fato da diferença de potencial entre os terminais de porta e a fonte do transistor não atingir o valor mínimo de tensão necessário para o acionamento do MOSFET, ou seja, o valor de tensão de limiar.

De acordo com Michael Wendt (2007, p. 2) para resolver este problema, há duas possibilidades: 1) requer que o valor de tensão aplicado à porta seja maior do que o valor de tensão no dreno. Entretanto, esta aplicação não é comumente utilizada, pois para circuitos de potência se torna inviável; e 2) demanda a utilização do circuito auxiliar, conhecido como *bootstrap*, usualmente utilizado na prática, uma vez que, este circuito dá referência ao terminal da fonte do transistor. Assim, é possível acionar o MOSFET de forma simples, com o auxílio de uma fonte de alimentação regulável e um gerador de função.

Com aplicação do circuito auxiliar, faz-se possível extrair uma boa resposta do conversor, aproximando seus resultados da simulação e da teoria. O objetivo deste estudo é analisar a eficiência e as perdas de potência na chave do conversor CC-CC: topologia *buck*, operado com MOSFET e circuito de *bootstrap*, para carga resistiva.

REFERENCIAL TEÓRICO

David Knight (2015) afirma que “o conversor *buck* é um conversor CC-CC onipresente que converte eficientemente uma alta tensão para uma baixa tensão”. Esta conversão de tensão de entrada para tensão de saída, em valores médios, é dada por (Ashfaq Ahmed, 2000, p. 317):

$$V_o = V_{IN} d, \quad (1)$$

em que V_{IN} é a tensão de entrada do conversor, V_o é a tensão de saída do conversor e d é o ciclo de trabalho em que chave permanece em estado ligado, como visto em (Ashfaq Ahmed, 2000, p. 317):

$$d = \frac{T_{on}}{T}, \quad (2)$$

sendo T_{on} o tempo que a chave se encontra ligada e T é o período total analisado.

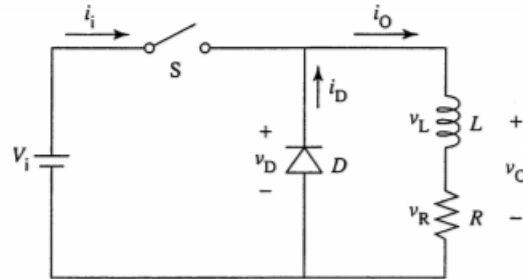
A eficiência que o conversor *buck* pode oferecer, é encontrada a partir de (Lourdes Mendes, 2018):

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_t}, \quad (3)$$

onde η é o rendimento do conversor, P_o é a potência sobre a carga e P_t é a potência total de chaveamento.

O circuito *buck* convencional pode ser visto na figura 1.

Figura 1 - Circuito básico de conversor CC-CC: *buck*.



Fonte: Ashfaq Ahmed (2000, p. 313)

O circuito *buck* convencional pode ser visto na figura 1, no qual é composto por uma alimentação fixa, um diodo, uma chave eletrônica, um indutor, um capacitor e um resistor. Assim, i_i representa a corrente sobre a chave (S), i_o representa a corrente sobre a carga (R) e sobre o indutor (L), i_d representa a corrente sobre o diodo (D), V_i representa a tensão de entrada, V_D representa a tensão sobre o diodo e V_R representa a tensão de saída.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o melhor funcionamento do circuito abaixador de tensão, definiu-se o circuito *bootstrap* como acionador da chave eletrônica, observado na figura 1; seus componentes são especificados no quadro 1.

Quadro 1 – Lista de materiais utilizados.

Componentes/equipamentos	Especificação
VDR	Tensão do circuito acionador
VIN	Tensão de entrada do conversor
D1	Diodo de <i>bootstrap</i> 1N4007
D2	Diodo do conversor 1N4007
R1	Resistor de 100 Ω do circuito acionador
R2	Resistor de 100 Ω do circuito acionador
RL	Resistor de saída (carga resistiva) de 18 Ω
C	Capacitor do conversor de 32 μF
CBS	Capacitor de <i>bootstrap</i> de 1 μF
M1	MOSFET IRFZ44N (chave eletrônica)
Q1	Transistor de junção bipolar BC548A
Q2	MOSFET BS170 do circuito acionador
L	Indutor do conversor de 200 mH
XFG1	Gerador de função
XSC1	Osciloscópio digital 100 MHz – DSO1012A-AB9

Fonte: Autoria própria

Ao realizar o projeto de um conversor *buck*, é necessário realizar o dimensionamento dos valores mínimos de capacitância e de indutância presentes no circuito, pois estes parâmetros irão assegurar que o conversor permanecerá operando. Os valores mínimos de capacitância e indutância podem ser vistos como (Lourdes Mendes, 2018):

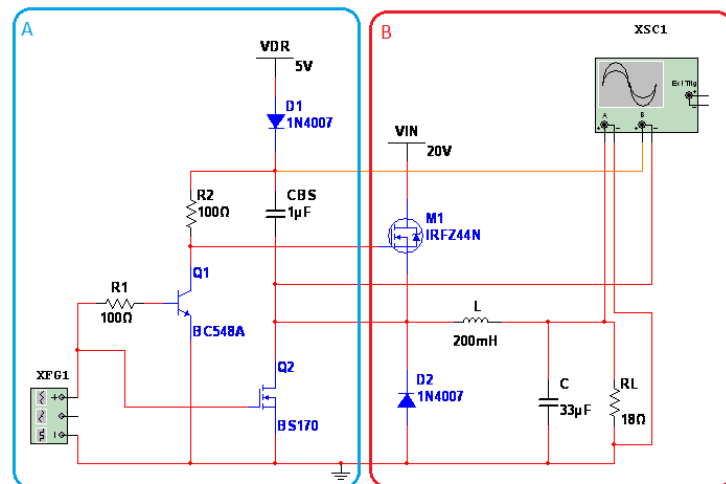
$$C_{\min} = \frac{(\Delta I_p)}{12 F_s (\Delta V_o)} \quad (4)$$

e

$$L_{\min} = \frac{(V_{in} - V_o) d}{F_s (\Delta I_L)} \quad (5)$$

onde, C_{\min} representa a capacitância mínima; ΔI_p representa a corrente de pico no capacitor; ΔI_L representa ondulação da corrente sobre o indutor; F_s representa a frequência de chaveamento do conversor; ΔV_o representa a variação máxima da tensão de saída e L_{\min} representa a indutância mínima

Figura 2 – Conversor CC-CC: buck. (A) Bloco acionador: *bootstrap*. (B) Bloco de controle.



Fonte: Autoria própria

Os valores de capacitância mínima e indutância mínima foram adequados aos valores comerciais mais próximos. Além disso, durante o trabalho, o valor da carga resistiva foi alterado para obter uma melhor resposta do circuito, a partir de simulações utilizando o software NI MultiSim.

Após obter os resultados de simulação sobre a saída do circuito da figura 1, iniciou-se o período de testes práticos, com o intuito de analisar a eficiência do conversor. Com o auxílio de um osciloscópio digital, verificou-se a diferença de potencial na saída do conversor, sobre uma carga resistiva.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após extraídos os dados de tensão e corrente sobre a carga, pode-se calcular as perdas de potência na chave nos estados ligado (P_{on}) e desligado (P_{off}), bem como na comutação (P_c), (Ashfaq Ahmed, 2008), dado por:

$$P_{on} = \frac{I_d^2 R_{ds(on)} T_{on}}{T} \quad (6)$$

$$P_{off} = V_{ds(máx)} I_{dss} \frac{T_{off}}{T} \quad (7)$$

$$P_c = V_{ds(máx)} I_d 2 T_c F_s \frac{1}{6} \quad (8)$$

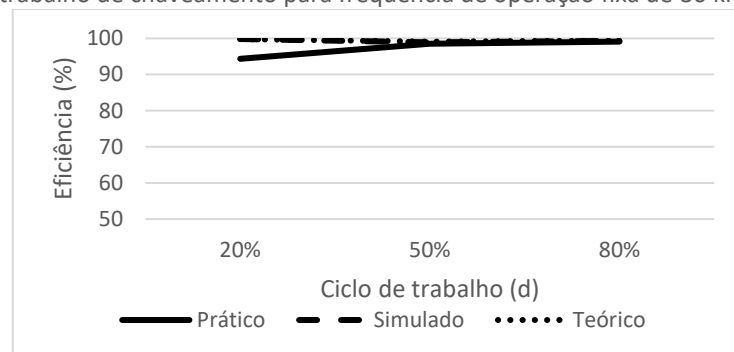
$$P_t = P_{on} + P_{off} + P_c \quad (9)$$

onde, I_D representa a corrente média sobre a carga, $V_{ds(máx)}$ representa a queda de tensão que ocorre ao ligar o transistor, $R_{ds(on)}$ representa a resistência interna do

MOSFET, T_{on} representa o período de estado ligado da chave, T_{off} representa o período de estado desligado da chave, T representa o período total da chave, I_{dss} representa o valor de saturação da corrente que passará sobre o transistor quando estiver desligado, T_c representa o tempo de comutação, entre a borda de subida para atuar no modo de condução; e a borda de descida para sair do modo de condução.

Na figura 3 é apresentada a eficiência do conversor a partir da potência de saída e de suas perdas no chaveamento, para frequência de chaveamento fixa em 30 kHz. Os resultados teóricos e simulados são semelhantes em todos os pontos. Aumentando o ciclo de trabalho, o resultado experimental obteve um aumento de rendimento em relação aos resultados teóricos e simulados, aproximando-se de seus valores, ao passo que as perdas na chave são inversamente proporcionais ao aumento do ciclo de trabalho, tratando-se de seu valor percentual.

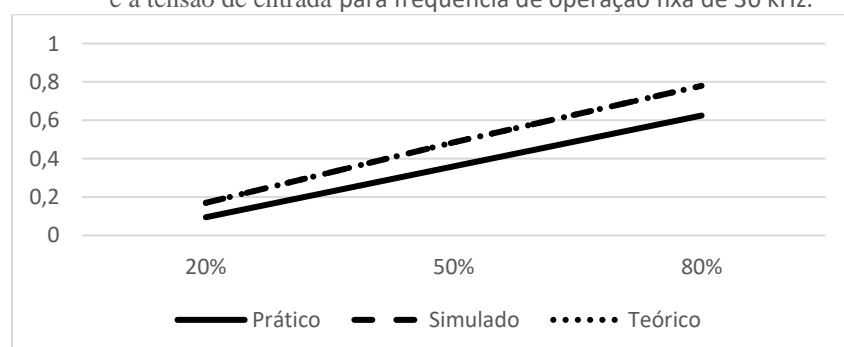
Figura 3 – Comparação da eficiência do conversor em função do ciclo de trabalho de chaveamento para frequência de operação fixa de 30 kHz.



Fonte: Autoria própria

A figura 4 representa a curva de tensão de saída do conversor normalizada em função do ciclo de trabalho para uma frequência de chaveamento de 30 kHz. Quando o ciclo de trabalho se aproxima de 100 %, a diferença de potencial observada na carga tende ao valor de V_{IN} , ou seja, 20 V. Por outro lado, à medida que o ciclo de trabalho é diminuído para 20 %, a tensão verificada na saída se aproxima de V_{DR} , ou seja, 5 V. Portanto, o ganho do conversor *buck* é diretamente proporcional ao ciclo de trabalho. Verifica-se que há distinção nos valores práticos, comparados com os valores simulados e teóricos, isto ocorre devido a não idealidade dos componentes, além das perdas por chaveamento na chave e da queda tensão sobre o diodo e o indutor

Figura 4 - Gráfico do ganho do conversor ao analisar a tensão sobre a carga e a tensão de entrada para frequência de operação fixa de 30 kHz.



Fonte: Autoria própria

CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu um estudo acerca do conversor CC-CC abaixador de tensão de malha aberta, topologia *buck*. Constatou-se seu rendimento acima de 90 % com a implementação de um circuito acionador a partir de um MOSFET utilizado como chave eletrônica, o que tornou sua elaboração viável para circuitos de potência. Dessa maneira, possibilita-se um aumento do rendimento e otimização do seu uso em circuitos que necessitam converter a tensão de entrada em tensão de saída reduzida de forma eficaz.

AGRADECIMENTOS

Deixo um agradecimento em especial à instituição de ensino Universidade Tecnológica Federal do Paraná por possibilitar a execução deste trabalho científico.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência**. Pearson Education do Brasil, 2008.

KNIGHT, David. Buck Converters and Their Cool Applications. All About Circuits, 2015. Disponível em: <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/buck-converters-and-their-cool-applications/>>. Acesso em: 17 de agosto de 2019.

MENDES, Lourdes Aparecida. Comparação de desempenho dos conversores *buck* entrelaçado de três fases e *buck* baseado na célula de comutação de quatro estados. Disponível em: <[https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/180-2018-10-15-DissertacaoLourdesMendes\(1\).pdf](https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/180-2018-10-15-DissertacaoLourdesMendes(1).pdf)>. Acesso em: 19 de agosto de 2019.

MOREIRA, Josemar de Souza; et.al. **Projeto e Construção de um Conversor Didático CC-CC Buck**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 02, Vol. 03, pp. 157-165, fevereiro de 2018.

WENDT, Michael. A configurable High-Side/ low-Side Driver. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4430292>>. Acesso em: 17 de agosto de 2019.