

PROJETO OTIMIZADO DOS ELEMENTOS DE FILTRO E SEMICONdutoRES DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DO CONVERSOR BUCK CC/CC

Alexandre Rodrigues Vaz – arodrigues@cefetmg.br

Walbert Luiz Martins – walbertluiz1224@gmail.com

Yan Ambrósio de Oliveira – yanambrosio@hotmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG
Av. Monsenhor Luiz de Gonzaga, 103
37250-000 – Nepomuceno – Minas Gerais

Resumo: O uso de comutação em alta frequência implica a utilização de elementos de filtro, indutor e capacitor, menores e mais leves, reduzindo as perdas de energia quando comparadas com as perdas relacionadas a estruturas convencionais. Entretanto, circuitos reguladores de tensão chaveados apresentam uma maior complexidade de projeto e operação. Análise da literatura técnica especializada revela a existência de uma certa carência de maiores informações relacionadas ao projeto dos elementos do circuito de potência das estruturas clássicas de conversores CC/CC como, por exemplo, o Buck. Diante do exposto, é apresentado um estudo detalhado sobre a especificação dos elementos do circuito de potência (indutor, capacitor e dispositivos semicondutores) do conversor Buck CC/CC, destinado a atender uma determinada aplicação prática.

Palavras-chave: Buck. Circuito de potência. Conversores CC/CC. Regulador de tensão.

1 INTRODUÇÃO

Diversos problemas relacionados ao aquecimento global, devido em grande parte ao contínuo crescimento da demanda de energia elétrica, tem despertado o interesse da comunidade científica pela adoção de políticas mais adequadas de uso da energia elétrica. Dentre as alternativas em potencial para atingir tal objetivo, podem ser citadas o uso em larga escala de fontes alternativas de energia, sistemas e equipamentos com maior eficiência energética. Os conversores CC/CC chaveados são circuitos eletrônicos amplamente utilizados em aplicações onde se faz necessário o processamento de energia elétrica com maior eficiência, isso graças a utilização de uma elevada frequência de comutação do interruptor associado a diferentes estruturas. Cabe destacar que a natureza não linear desse circuito eletrônico torna sua análise, tanto qualitativa quanto quantitativa, mais complexa se comparada a estruturas de circuitos do tipo linear (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 1989). Portanto, especial atenção é exigida neste estudo investigativo relacionado ao projeto de tais elementos de circuito, afim de garantir a correta especificação dos mesmos tanto em nível de simulação quanto prático (RASHID, 1999).

No projeto do conversor *Buck* são considerados aspectos extremamente importantes, tais como: frequência de comutação, ganho de tensão, modo de operação (condução contínua, condução descontínua ou condução crítica), ondulação de tensão na saída, corrente e potência a serem utilizados no processamento de energia. Posteriormente, com o intuito de validar as Equações de projeto obtidas através da análise teórica e matemática são apresentados vários resultados de simulação, analisados em detalhe por meio de gráficos e tabelas. Além disso, são exibidos resultados experimentais incluindo sinais de tensão e corrente no interruptor e também tensão e corrente no diodo.

Importante destacar que um dos subsídios do ponto de vista prático para o desenvolvimento deste trabalho de iniciação científica, foi um outro projeto de Bic-Jr (VAZ; FARIA, 2013), cujo protótipo encontra-se disponível em perfeitas condições operacionais no laboratório de Eletrônica Geral e Industrial do CEFET-MG, unidade de Nepomuceno. Este trabalho também possui conexão com outro projeto de Bic-Jr (VAZ; SANTOS, 2015).

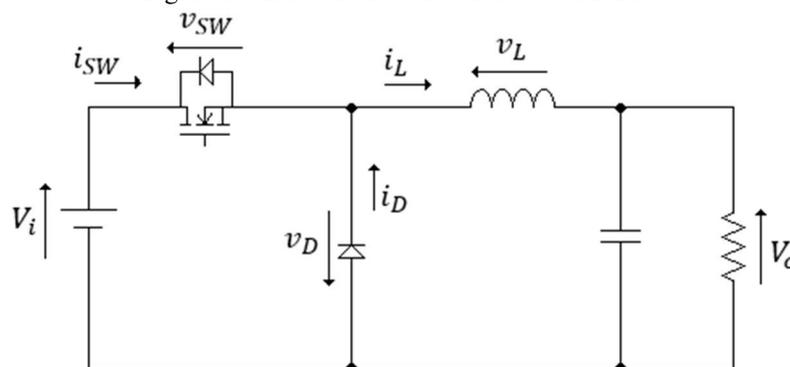
2 ANÁLISE TEÓRICA E MATEMÁTICA

Esta seção tem como objetivo fazer uma abordagem teórica da estrutura do conversor CC/CC do tipo abaixador de tensão, o *Buck*.

2.1 Conversor *buck* CC/CC

Seu princípio de funcionamento está baseado no carregamento de energia em um indutor com o nível de tensão equivalente a diferença entre a tensão de entrada e a tensão de saída ($V_i - V_o$). Posteriormente, essa energia é transferida para a saída do circuito (LANDER, 1996). Análise de pequenos detalhes são indispensáveis no projeto otimizado dos elementos de filtro e semicondutores do circuito de potência do conversor, os quais resultam em um melhor aproveitamento da eficiência energética desse tipo de circuito. A Figura 1 exibe a estrutura do conversor *Buck* CC/CC.

Figura 1 – Estrutura do conversor *buck* CC/CC.



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Ao longo desta etapa são desenvolvidas Equações de projeto para a especificação dos elementos do circuito de potência do conversor *Buck*. No entanto, devido a limitação de espaço, neste artigo serão apresentados somente as Equações finais do desenvolvimento teórico e matemático.

2.2 Ganho estático

O cálculo do ganho estático pode ser obtido através da relação entre a tensão de saída (V_o) e a tensão de entrada (V_i) do circuito. Alternativamente, o ganho também pode ser calculado através da relação do tempo de carga (t_c) e descarga (t_d) do indutor. Matematicamente, o ganho pode ser expresso através da Equação (1).

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{t_c}{(t_c + t_d)} \quad (1)$$

2.3 Tempo de carga (t_c) e descarga (t_d) do indutor

O tempo de carga e descarga do indutor, pode ser calculado através de parâmetros de entrada pré-estabelecidos, tais como: período de comutação do interruptor (T_s), razão cíclica de operação do indutor (D_I), indicado em (2) e também do ganho estático (G), descrito em (1). Matematicamente, o cálculo do tempo de carga e descarga pode ser expresso através das Equações (3) e (4), respectivamente.

$$D_I = \frac{t_c + t_d}{T_s}, D_I \in [0,1] \quad (2)$$

$$t_c = G \cdot D_I \cdot T_s \quad (3)$$

$$t_d = D_I \cdot T_s \cdot (1 - G) \quad (4)$$

2.4 Indutor de filtro (L)

O cálculo do indutor de filtro pode ser descrito matematicamente através da Equação (5). Além dos parâmetros descritos anteriormente, para obtenção do seu valor é necessário conhecer a potência de entrada do circuito (P_i) e o valor mínimo de corrente no indutor (K).

$$L = \frac{(V_i - V_o) \cdot t_{c(max)}}{\left[\frac{2 \cdot P_i \cdot T}{V_i \cdot t_{c(max)}} - 2 \cdot K \right]} \quad (5)$$

2.5 Capacitor de filtro (C)

Para o cálculo do capacitor de filtro do circuito de potência do conversor *Buck* CC/CC é necessário levar em consideração duas situações de projeto: conversor operando no modo de condução contínuo ou conversor operando no modo de condução descontínuo. No primeiro caso, deve-se utilizar para cálculo do capacitor de filtro a Equação (6). Caso contrário, deve-se utilizar a Equação (7). Outro parâmetro importante a ser considerado no cálculo do capacitor de filtro é a ondulação da tensão de saída (ΔV_o), definido nas especificações do projeto.

$$C = \frac{1}{\Delta V_o} \left\{ \frac{[(V_i - V_o) \cdot t_{cmax} + L \cdot (K - I_o)]^2}{2 \cdot L \cdot V_o} + \frac{L \cdot (K - I_o)^2}{2 \cdot (V_i - V_o)} \right\} \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{\Delta V_o} \left\{ \frac{[(V_i - V_o) \cdot t_{Cmax} - L \cdot I_o]^2}{2 \cdot L \cdot V_o} + \frac{(V_i - V_o) \cdot t_{Cmax}^2}{2 \cdot L} - I_o \cdot t_{Cmax} + \frac{L \cdot I_o^2}{2 \cdot (V_i - V_o)} \right\} \quad (7)$$

2.6 Interruptor

As Equações para cálculo da corrente média (I_{SWmed}), corrente eficaz (I_{SWef}) e tensão máxima (V_{SWmax}) no interruptor, podem ser descritas matematicamente em (8), (9) e (10), respectivamente. Além dos parâmetros descritos anteriormente é considerado no cálculo o valor do estresse tensão adicional no interruptor (X) e a ondulação da corrente no indutor (ΔI).

$$I_{SWmed} = \frac{t_c}{T} \cdot \left(K + \frac{\Delta I}{2} \right) \quad (8)$$

$$I_{SWef} = \sqrt{\frac{t_c}{T} \cdot \left(K^2 + K\Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right)} \quad (9)$$

$$V_{SWmax} = V_i + X \quad (10)$$

2.7 Diodo

Análogo a análise do interruptor, as Equações para cálculo da corrente média (I_{Dmed}), corrente eficaz (I_{Def}) e tensão máxima (V_{Dmax}) no diodo, podem ser descritas matematicamente nas Equações (11), (12) e (13), respectivamente.

$$I_{Dmed} = \frac{t_d}{T} \cdot \left(K + \frac{\Delta I}{2} \right) \quad (11)$$

$$I_{Def} = \sqrt{\frac{t_d}{T} \cdot \left(K^2 + K\Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right)} \quad (12)$$

$$V_{Dmax} = V_i \quad (13)$$

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Esta seção tem por finalidade apresentar e analisar os resultados de simulação do conversor *Buck*. São consideradas diferentes situações, incluindo individualmente em cada caso mudança no nível de frequência, tensão, potência, e também no modo de operação do conversor (contínuo, descontínuo e crítico). Análogo ao motivo da seção anterior, neste artigo serão apresentados somente os resultados de simulação considerando os modos de operação contínuo e descontínuo do conversor. Por conseguinte, busca se a comprovação dos equacionamentos obtidos a partir da análise teórica e matemática.

Os resultados de simulação apresentados a seguir foram obtidos através do *software* de simulação *Psim*. É importante destacar que para garantir a operação estável em regime permanente da estrutura analisada, foi necessário a inclusão de um resistor de entrada (0,15Ω).

Isso porque tal resistor permite o amortecimento da oscilação natural do sistema e pouco afeta a operação do sistema em termos de perdas.

3.1 Caso 1

No Caso 1, tem-se o conversor operando no modo de condução contínuo. Considerando os dados de entrada da Tabela 1 e utilizando as Equações de projeto, resulta os parâmetros de saída da Tabela 2.

Tabela 1 - Parâmetros de entrada – Caso 1.

Parâmetro	Valor
V_i	100 V
V_o	50 V
f	25 kHz
P	300 W
K	2 A
D_I	1
ΔV_o	0,5 V

Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

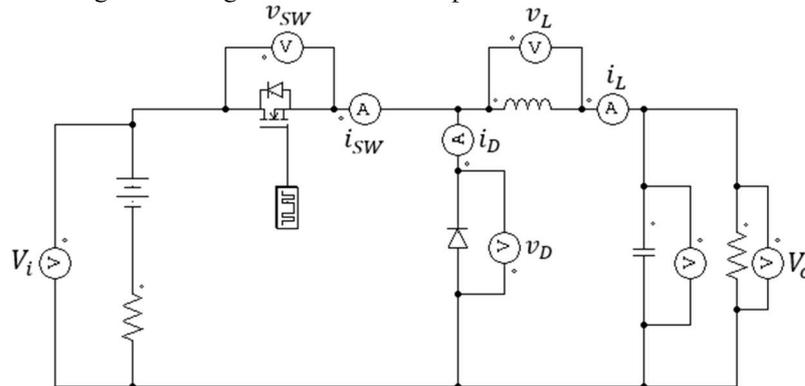
Tabela 2 - Parâmetros de saída – Caso 1.

Parâmetro	Valor
$t_c + t_d$	40 μ s
t_c	20 μ s
t_d	20 μ s
I_o	6 A
ΔI	8 A
G	0,5
L	125 μ H
C	80 μ F

Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Com os dados partir das Tabelas 1 e 2 aplicados ao diagrama do circuito da Figura 2 e por meio do *software* de simulação supracitado, foram obtidos os resultados das Figuras 3, 4, 5 e 6.

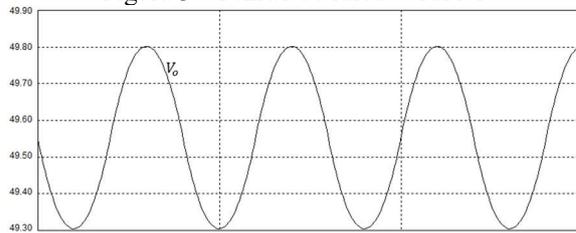
Figura 2 - Diagrama do circuito de potência do conversor Buck.



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

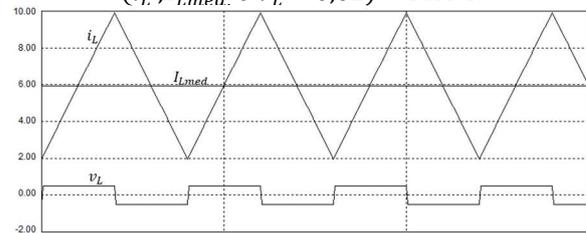
A Figura 3 revela o comportamento da tensão de saída (V_o). Já na Figura 4 é exibido o comportamento de corrente e tensão no indutor (i_L) e (v_L). Na Figura 5 é mostrado os sinais de corrente e tensão no interruptor (i_{SW}) e (v_{SW}). Por final, na Figura 6 temos os sinais de corrente e tensão no diodo (i_D) e (v_D).

Figura 3 - Tensão de saída – Caso 1.



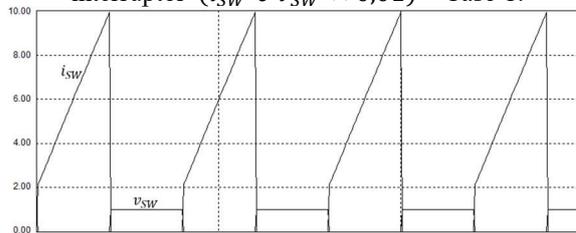
Fonte: (VAZ; MARTINS 2017).

Figura 4 - Corrente e tensão no indutor (i_L , I_{Lmed} e $v_L \times 0,01$) – Caso 1.



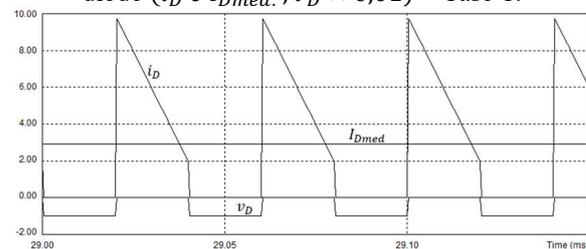
Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Figura 5 - Corrente e tensão no interruptor (i_{SW} e $v_{SW} \times 0,01$) – Caso 1.



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Figura 6 - Corrente e tensão no diodo (i_D e I_{Dmed} , $v_D \times 0,01$) – Caso 1.



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Análise dos sinais apresentados revela que nesse caso o circuito opera no modo de condução contínuo, conforme previsto inicialmente. Além disso, os níveis de V_o e ΔV_o alcançados estão de acordo com o esperado (Tabela 1). Isso revela coerência na escolha dos elementos de filtro calculados com base nas condições de projeto definidas na Tabela 1 e nas respectivas Equações de projeto. A Tabela 3 apresenta a comparação entre os valores obtidos.

Tabela 3 - Comparação de valores – Caso 1.

Parâmetros	Valor teórico	Valor simulado
I_{Lmed}	6 A	5,93 V
I_{Lef}	6,42 A	6,49 V
I_{SWmed}	3 A	3,02 A
I_{SWef}	4,54 A	4,72 A
I_{Dmed}	3 A	2,91 A
I_{Def}	4,54 A	4,45 A
V_o	50 V	49,54 V
ΔV_o	0,5 V	0,4 V

Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

3.2 Caso 2

Já no Caso 2, tem-se mudança essencialmente em relação ao modo de operação do conversor. Nesse caso, o conversor deixa de operar no modo contínuo e passa a funcionar no modo descontínuo. Observando a Tabela 4 é possível notar uma alteração na razão cíclica do indutor. As Tabelas 4 e 5 exibem os parâmetros de projeto utilizados, onde na Tabela 5 é possível verificar que para atender a nova condição de projeto imposta, temos um indutor de filtro 36% menor e um capacitor de filtro 4% maior.

Tabela 4 - Parâmetros de entrada – Caso 2.

Parâmetro	Valor
V_i	100 V
V_o	50 V
f	25 kHz
P	300 W
K	0 A
* D_I	1
ΔV_o	0,5 V

Fonte: (VAZ; MARTINS 2017).

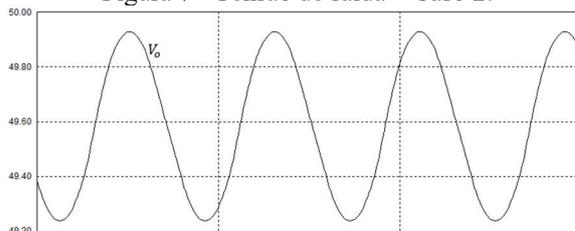
Tabela 5 - Parâmetros de saída – Caso 2.

Parâmetro	Valor
$t_c + t_d$	32 μs
t_c	16 μs
t_d	16 μs
I_o	6 A
ΔI	15 A
G	0,5
L	53,33 μH
C	124,8 μF

Fonte: (VAZ; MARTINS (2017)).

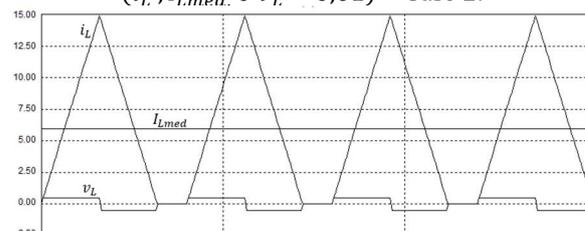
As Figuras 7, 8, 9 e 10 exibem os resultados de simulação. Já a Tabela 6 apresenta a comparação entre diferentes valores teóricos e simulados.

Figura 7 - Tensão de saída – Caso 2.



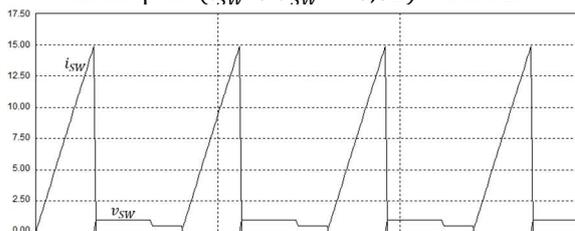
Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Figura 8 - Corrente e tensão no indutor (i_L , $I_{Lmed.}$ e $v_L \times 0,01$) – Caso 2.



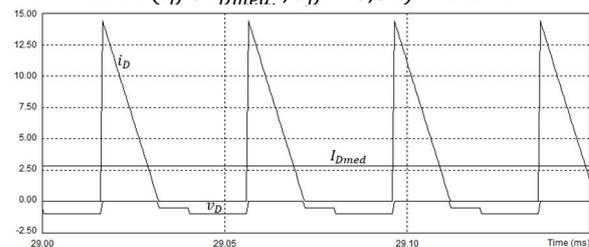
Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Figura 9 - Corrente e tensão no interruptor (i_{SW} e $v_{SW} \times 0,01$) – Caso 2.



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Figura 10 - Corrente e tensão no diodo (i_D e $I_{Dmed.}$, $v_D \times 0,01$) – Caso 2.



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Tabela 6 - Comparação de valores – Caso 2.

Parâmetros	Valor teórico	Valor simulado
$I_{Lmed.}$	6 A	5,93 A
$I_{Lef.}$	7,74 A	7,93 A
$I_{SWmed.}$	3 A	3,08 A
$I_{SWef.}$	5,47 A	5,76 A
$I_{Dmed.}$	3 A	2,85 A
$I_{Def.}$	5,47 A	5,45 A
V_o	50 V	49,58 V
ΔV_o	0,5 V	0,6 V

Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A presente seção tem como objetivo apresentar os resultados experimentais do conversor *Buck* CC/CC e ainda abordar detalhes práticos importantes quanto ao seu funcionamento. É importante observar a aplicabilidade e harmonia na operação do circuito. Os resultados exibidos demonstram a operação do circuito de potência do conversor *Buck* incluindo um circuito auxiliar *snubber* dissipativo aplicado ao diodo principal. Cabe destacar que a presença deste circuito na prática é imprescindível para garantir a operação normal do conversor *Buck* em termos de controle do nível de estresse de tensão nos terminais do interruptor (VAZ; SANTOS, 2015). As Tabelas 7 e 8, exibem as especificações de projeto do conversor e os componentes utilizados no protótipo experimental (Figura 11), respectivamente.

Tabela 7 - Especificação de projeto do conversor *Buck* CC/CC.

Parâmetro	Especificação
Tensão de entrada	100 V
Tensão de saída	200 V
Potência de saída	200 W
Corrente máxima de saída	4 A
Frequência de comutação	40 KHz
Soma dos tempos de carga e descarga do indutor	$1/f_s$
Tempo de recuperação direta típico do diodo auxiliar	280 ns
Ondulação máxima de tensão de saída	$0,5 \cdot V_0$
Fator de deslocamento	3,2
Razão cíclica associada a operação do indutor (MCCC)	1
Estresse de tensão no interruptor	$0,5 \cdot V_i$
Corrente mínima no indutor	1 A

Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

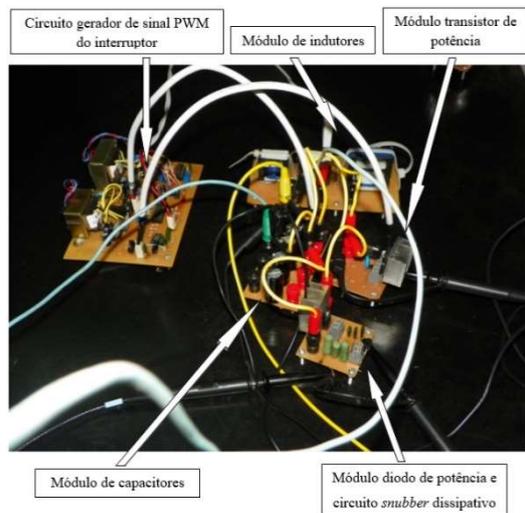
Tabela 8 - Componentes utilizados no protótipo experimental.

Parâmetro	Especificação
Tensão de entrada	100 V
Tensão de saída	200 V
Potência de saída	200 W
Corrente máxima de saída	4 A
Frequência de comutação	40 KHz
Soma dos tempos de carga e descarga do indutor	$1/f_s$
Tempo de recuperação direta típico do diodo auxiliar	280 ns
Ondulação máxima de tensão de saída	$0,5 \cdot V_0$
Fator de deslocamento	3,2
Razão cíclica associada a operação do indutor (MCCC)	1
Estresse de tensão no interruptor	$0,5 \cdot V_i$
Corrente mínima no indutor	1 A

Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

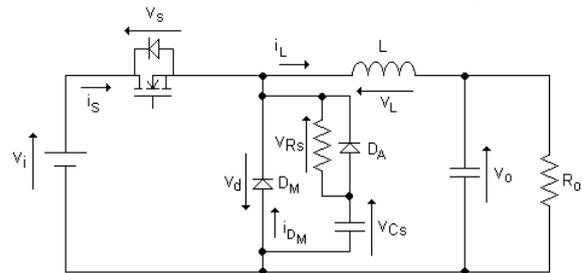
A Figura 11 apresenta uma foto da bancada de testes com o kit de módulos para montagem e teste do conversor *Buck* CC/CC incluindo o módulo de um circuito *snubber* dissipativo. Já a Figura 12 representa o esquema do circuito de potência do conversor *Buck* incluindo circuito auxiliar de proteção do tipo *snubber* dissipativo ligado ao diodo de saída.

Figura 11 - Foto do protótipo destacando os módulos.



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Figura 12 - Diagrama do circuito de potência real do conversor *Buck* incluindo *snubber* dissipativo.

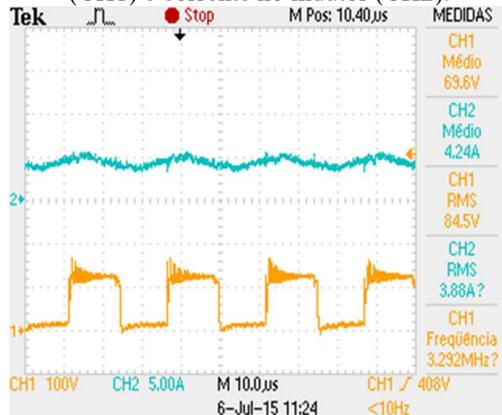


Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Dados Experimentais: $R_i = 3,5\Omega$; $V_i = 100V$; $f = 40KHz$; $L = 400\mu H$; $C_o = 100\mu F$; $V_o = 50V$; $R_o = 12,5\Omega$; $P_o = 200W$; $R_s = 75\Omega$; $C_s = 5,4nF$; $X = 0,5xV_o = 25V$.

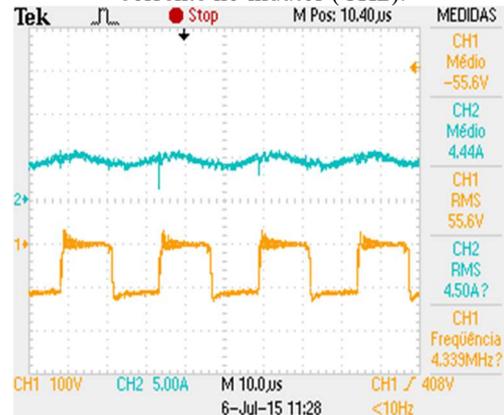
A Figura 13 apresenta os sinais de tensão nos terminais do interruptor (CH1) e corrente no indutor (CH2). É possível observar que o estresse de tensão neste caso foi mantido em cerca de 60V. A linearidade do sinal de corrente do indutor revela sua operação na região linear da curva de histerese magnética. Já a Figura 14 apresenta os resultados de tensão nos terminais do diodo principal (CH1) e corrente no indutor (CH2). Observe que o sinal de tensão do diodo principal é o oposto do sinal de tensão do interruptor.

Figura 13 - Tensão nos terminais do interruptor (CH1) e corrente no indutor (CH2).



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

Figura 14 - Tensão nos terminais do diodo (CH1) e corrente no indutor (CH2).



Fonte: (VAZ; MARTINS, 2017).

5 CONCLUSÃO

A comparação entre os resultados teóricos e matemático, simulados e experimentais, permite validar com eficácia o estudo proposto nesse projeto. Importante ressaltar que quando o conversor opera abaixo da sua potência nominal, tanto o nível de estresse de tensão no interruptor quanto o nível de potência dissipada pelo circuito *snubber* são inferiores aos seus

respectivos níveis relacionados à operação do conversor com potência nominal. Por fim, vale destacar a importância de um projeto criterioso para o indutor, pois só assim será possível garantir sua operação na região linear da curva de histerese de seu núcleo magnético, algo imprescindível para o correto funcionamento do conversor *Buck* CC/CC.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG pelo apoio financeiro durante a produção deste trabalho.

REFERÊNCIAS

LANDER, Cyril W. **Eletrônica Industrial: teoria e aplicações**. 4ª edição, São Paulo: Makron Books, 1996. 647p.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. **Power Electronics: Converters, Applications and design**. 1ª edição, New York: J. Wiley, c1989. 667p.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. 1ª edição, São Paulo: Makron Books do Brasil, c1999. 828p.

VAZ, Alexandre; FARIA, Jonas. **Projeto e Implementação de Kit Didático para Montagem de Conversores CC/CC Chaveados**. Bic-Jr, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Nepomuceno, 2013.

VAZ, Alexandre; SANTOS, Ângelo. **Projeto Otimizado de Circuito Snubber Dissipativo Aplicado a Conversores CC/CC**. Bic-Jr, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Nepomuceno, 2015.

VAZ, Alexandre; MARTINS, Walbert. **Projeto Otimizado dos elementos de filtro e semicondutores do circuito de potência do conversor *Buck* CC/CC**. Bic-Jr, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Nepomuceno, 2017.

OPTIMIZED PROJECT OF FILTER ELEMENTS AND SEMICONDUCTOR DEVICES OF DC/DC *BUCK* CONVERTER POWER CIRCUIT

Abstract: *The use of high frequency switching, implies the use of filter elements, inductor and capacitor, smaller and lighter, reducing energy losses when compared to losses related to conventional structures. However, switched voltage regulator circuits have a greater complexity of project and operation. Analysis of the specialized technical literature reveals the existence of a certain lack of more information related to project of the power circuit elements of classical converter structures DC/DC, for example, the Buck. In view of the above, a detailed study was developed about the specification of the power circuit elements (inductor, capacitor and semiconductor devices) of the Buck converter DC/DC, to meet a specific practical application.*

Key-words: *Buck, Power circuit, Converters DC/DC, Voltage regulator.*