

APLICAÇÃO DIDÁTICA DE CIRCUITOS *SNUBBERS* PASSIVOS

Ana Carolina Moreira – moreira.ana.1996@gmail.com
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)
R. dos Imigrantes, 445 - Rau, Jaraguá do Sul - SC
89254-430 – Jaraguá do Sul – Santa Catarina

Daniel Cesar Piccoli – danicpiccoli@gmail.com
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)
R. dos Imigrantes, 445 - Rau, Jaraguá do Sul - SC
89254-430 – Jaraguá do Sul – Santa Catarina

Julio Cesar Lopes Oliveira – julio.oliveira@ifsc.edu.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)
R. dos Imigrantes, 445 - Rau, Jaraguá do Sul - SC
89254-430 – Jaraguá do Sul – Santa Catarina

Rodrigo José Piontkewicz – rodrigo.piontkewicz@ifsc.edu.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)
R. dos Imigrantes, 445 - Rau, Jaraguá do Sul - SC
89254-430 – Jaraguá do Sul – Santa Catarina

Luiz Fernando Henning – luizh@ifsc.edu.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC)
R. dos Imigrantes, 445 - Rau, Jaraguá do Sul - SC
89254-430 – Jaraguá do Sul – Santa Catarina

Resumo: *Este artigo visa estudar o melhor tipo e configuração da atuação do circuito snubber dissipativo passivo, apresentando resultados teóricos e experimentais. Equações correspondentes, são apresentados nos projetos de RC e RCD. Desta forma, será analisado a simulação computacional e os dados empíricos, a atuação de cada tipo de snubber, verificando os resultados obtidos.*

Palavras-chave: *snubber. circuito buck. circuito de amortecimento. RC. RCD.*

1 INTRODUÇÃO

Softstarters, inversores de frequência ou servomotores, são alguns exemplos da grande atuação da eletrônica hoje em dia. Elas utilizam chaves semicondutoras para seu correto funcionamento. Devido à este processo de chaveamento constante, ocorrem distúrbios indesejáveis na alimentação, e com o intuito de amortecer estes efeitos, são utilizados *snubbers*.

O *snubber* tem a simples função de servir de amortecimento para uma chave. Eles podem ser passivos, formados com resistores, diodos, capacitores e indutores; e ativos, formados basicamente de transistores e entre outros elementos ativos.

"Quando a chave é aberta, o capacitor funcionará como um curto para o enrolamento e oferecerá um caminho para a corrente, desviando-a da fonte CC e da chave." (BOYLESTAD, 2005)

A transição rápida de comutação nos dispositivos de comutação, faz com que criem-se ruídos, interface e oscilação eletromagnética em formato de onda. Isto se deve a dispositivos de potência semicondutores, capacitores e resistores, sendo que estes geralmente possuem indutância e capacitância parasita.

“Durante a comutação dos semicondutores do conversor CC/CC, pode ocorrer oscilações de alta frequência devido a indutância e capacitâncias parasitas que ocorrem nos transistores, diodos e na placa de circuito impresso devido as altas variações de tensão e corrente.” (OLIVEIRA, 2014, p.89)

O conversor Buck é um conversor CC-CC abaixador de tensão, ou seja, sempre sua tensão de saída é inferior à de entrada, ou no limite teórico, igual. Devido ao fato de apresentar características de fonte de tensão na entrada, a corrente drenada por um conversor Buck é naturalmente pulsada, implicando em alto conteúdo harmônico e em sobre tensões destrutivas ao interruptor durante sua abertura, causadas devido às indutâncias parasitas. Para corrigir este problema, propõe-se a utilização de um *Snubber* RCD. (COELHO, 2008)

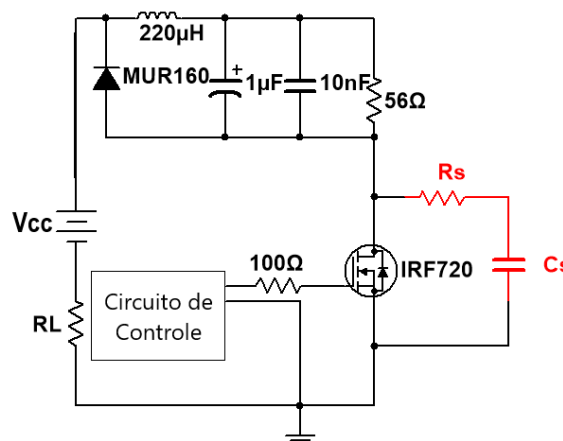
Pesquisas relacionas a aplicabilidade dos circuitos *snubbers* são bastantes escassas. Quando se analisa o panorama atual de publicações científicas, observa-se que não há enfoque no estudo do melhor tipo e configuração de *snubber* para cada situação de carga. Desta forma, o objetivo desta pesquisa é preencher estas lacunas, através de resultados teóricos e experimentais. Como se trata de um trabalho inicial, serão estudados apenas circuitos passivos.

2 METODOLOGIA

2.1 Projeto do *snubber* RC

O *snubber* RC, apresentado na Figura 1 através do capacitor C_s e o resistor R_s , é utilizado para qualquer semicondutor atuando como chave, reduzindo o pico de tensão no desligamento e amortecendo oscilações indesejadas de tensão e corrente.

Figura 1 – *snubber* RC.



Fonte: os autores.

O pico de tensão no dreno do MOSFET pode causar falhas e danificar o interruptor. Para superar este problema, o *snubber* RC pode ser empregado. O circuito de amortecimento é usado para limitar a sobretensão e sobrecorrente.

O resistor (R_s) do *snubber* é utilizado para eficácia na frequência de oscilação, enquanto o capacitor (C_s), da Figura 1, é utilizado para reduzir a dissipação da frequência de

chaveamento. Para projetar um circuito de *snubber* RC pode-se utilizar a Equação (3) e a Equação (4). (VACULIK, 2014)

Onde ζ é o circuito de amortecimento, L_p é a indutância parasita total, C_p a capacitância parasita da chave semicondutora, R_s e C_s são os valores *snubber* RC que são necessários, e f_{osc} frequência de oscilação do circuito. O circuito *snubber* RC depende do amortecimento que é classificado em três casos: (ALGADDAFI, 2016)

$\zeta < 1$ é chamado sob amortecimento;

$\zeta = 1$ é chamado de amortecimento crítico;

$\zeta > 1$ é chamado de sobre amortecimento.

Calculando R_s e C_s

Para o cálculo do valor do resistor é preciso saber ζ , L_p e C_p . O valor escolhido de ζ é 1, na situação de amortecimento crítico.

O C_p são as capacitâncias parasitas que pode ser aproximada a capacitância de saída (C_{oss}) do MOSFET. Esta pode ser obtida pelo datasheet do componente. O MOSFET utilizado no conversor *buck* foi o IRF720. Como no datasheet o seu valor tabelado tem uma condição de tensão de dreno para a fonte de 25 V e no circuito esta tensão será no máximo 12 V. No gráfico observa-se que em aproximadamente 12 V o C_{oss} é igual à 200 pF. A frequência de oscilação (f_{osc}) adotada é de 8 MHz.

O circuito equivalente da indutância parasita (L_p) do conversor *buck* com o *snubber* RC pode ser representado conforme a Figura 1. Sabe-se que um capacitor e um indutor em série em um circuito de corrente alternada possui uma frequência angular (ω) de acordo com a Equação (1). (SEVERNS, 2008)

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_p L_p}} \quad (1)$$

Sendo assim, a frequência angular igual a $2\pi f_{osc}$, isolando L_p e substituindo os valores de frequência e capacitância obtêm-se a Equação (2).

$$L_p = \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{RING}}\right)^2}{C_p} = \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 8M}\right)^2}{200p} \cong 1,979 \mu H \quad (2)$$

Substituindo os valores de frequência, grau de amortecimento, capacitância parasita e indutância parasita na Equação (3) e Equação (4), obtêm-se os valores do capacitor (R_s) e do resistor (C_s) do *snubber* RC.

$$R_s = \frac{1}{2\zeta} \sqrt{\frac{L_{LK}}{C_{LK}}} = \frac{1}{2 \cdot 1} \sqrt{\frac{1,979\mu}{200p}} \cong 49,737 \Omega \quad (3)$$

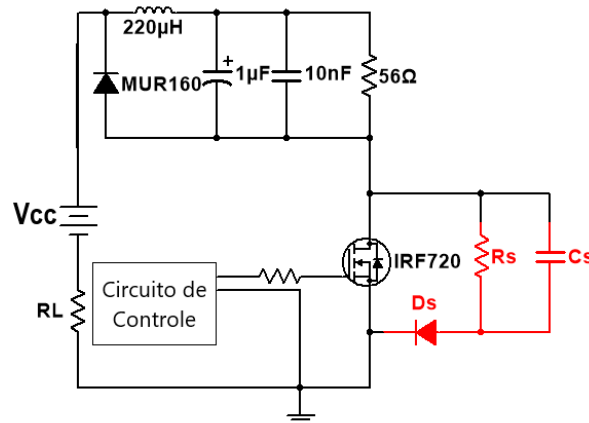
O valor de um resistor comercial mais próximo é de 51 Ω , portanto $R_s = 51 \Omega$.

$$C_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_s \cdot f_{RING}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 51.8M} \cong 397,89 pF \quad (4)$$

2.2 Projeto do snubber RCD

O *snubber* RCD, como mostrado na Figura 2, através do capacitor C_s , do resistor R_s e do diodo D_s , tem certas vantagens. Além de limitar a tensão de pico, o circuito pode reduzir a perda total do circuito, incluindo ambas as perdas de comutação e *snubber*.

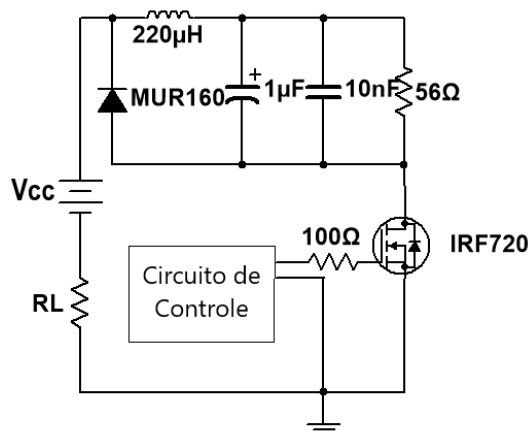
Figura 2 – snubber RCD.



Fonte: os autores.

Utiliza-se do circuito do conversor *buck* sem *snubber* acrescido de um pequeno valor de indutância (100 mH) para simular a oscilação na tensão da chave conforme Figura 3.

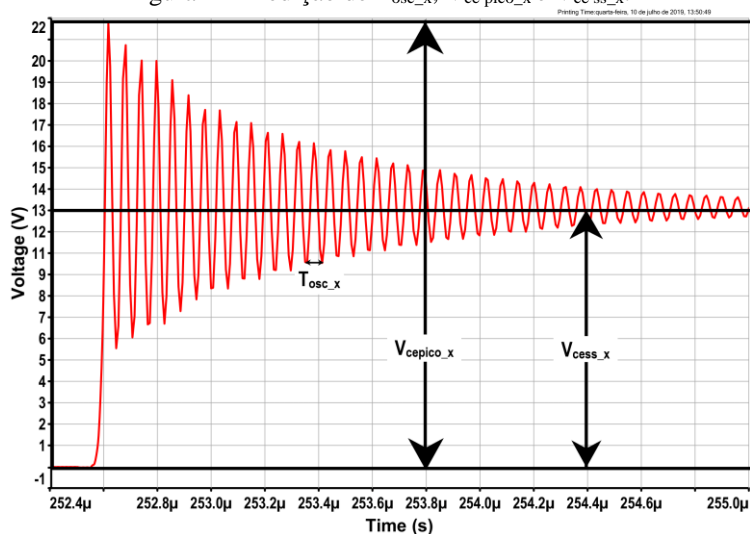
Figura 3 – Conversor sem snubber.



Fonte: os autores.

Para o cálculo da indutância parasita (L_p), da capacitância parasita (C_p), deve-se medir o valor da tensão estabilizada (V_{cess_x}), o período de oscilação (T_{osc_x}) e a tensão de pico (V_{cepico_x}) entre dreno e fonte da chave semicondutora conforme Figura 4. Os valores são apresentados na Tabela 1. (MEJÍA; MUÑOZ; CANO, 2014)

Figura 4 – Medição de T_{osc_x} , $V_{ce\ pico_x}$ e $V_{ce\ ss_x}$.



Fonte: Adaptado de Mejía, Muñoz, Cano (2014).

Deve-se acrescentar um capacitor de 1 nF (*snubber* C) e realizar novamente as medições de valor da tensão estabilizada (V_{cess_x}), o período de oscilação (T_{osc_x}) e a tensão de pico (V_{cepico_x}) entre dreno e fonte da chave semicondutora apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores práticos sem *snubber*.

| | SEM Capacitor adicional | COM Capacitor adicional |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| V_{cepico_x} (V) | 19 | 16,8 |
| V_{cess_x} (V) | 13 | 13 |
| T_{osc_x} (ns) | 120 | 300 |

Fonte: os autores.

Obtém-se os valores de amortecimento do conversor sem *snubber* (ξ_1) e com *snubber* C (ξ_2) conforme Equação (5) e Equação (6). (MEJÍA; MUÑOZ; CANO, 2014)

$$\xi_1 = -\frac{\ln\left(\left(\frac{V_{cepico1}}{V_{cess1}}\right) - 1\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln\left(\left(\frac{V_{cepico1}}{V_{cess1}}\right) - 1\right)\right)^2}} = 0,239 \quad (5)$$

$$\xi_2 = -\frac{\ln\left(\left(\frac{V_{cepico2}}{V_{cess2}}\right) - 1\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln\left(\left(\frac{V_{cepico2}}{V_{cess2}}\right) - 1\right)\right)^2}} = 0,239 \quad (6)$$

Os valores de amortecimento (ξ_1 e ξ_2) são inseridos na equação da indutância parasita, conforme Equação (7). A capacitância parasita na chave semicondutora é obtida na Equação (8). (MEJÍA; MUÑOZ; CANO, 2014)

$$L_p = \frac{(T_{osc2})^2 \cdot (1 - (\xi_2)^2) - (T_{osc1})^2 \cdot (1 - (\xi_1)^2)}{4 \cdot \pi^2 \cdot C_{adic}} = 1,633 \mu H \quad (7)$$

$$C_p = \frac{C_{adic} \cdot (T_{osc1})^2 \cdot (1 - (\xi_1)^2)}{(T_{osc2})^2 \cdot (1 - (\xi_2)^2) - (T_{osc1})^2 \cdot (1 - (\xi_1)^2)} = 2,106 \cdot 10^{-10} F \quad (8)$$

Para a definição de um *snubber* RCD são necessárias mais algumas informações pertinentes, como a corrente de carga (I_l), a tensão de nominal (V_s) e a frequência de chaveamento (f_{sw}), que possuem os respectivos valores, 96 mA, 12 V e 200 kHz. O valor do capacitor (C_s) é obtido na Equação (9). O valor do resistor (R_s) e a sua potência é obtida, respectivamente, na Equação (10) e na Equação (11). (MEJÍA; MUÑOZ; CANO, 2014)

$$C_s = \frac{L_p \cdot (I_l)^2}{(V_{cepicol} - V_s)^2} - C_p = 9,647 \cdot 10^{-11} F \quad (9)$$

$$R_s = \frac{0,1}{5 \cdot C_s \cdot f_{sw}} = 1036,590 \Omega \quad (10)$$

$$P_{R_s} = \frac{1}{2} \cdot (V_s)^2 \cdot f_{sw} = 1,400 \cdot 10^{-3} W \quad (11)$$

O capacitor comercial a ser utilizado na montagem do circuito *snubber* é um capacitor de 100 pF e a resistência será de 1 k Ω X 1/8 W. O diodo utilizado no projeto foi o MUR160.

3 RESULTADOS

3.1 Valores Práticos X Simulação Computacional

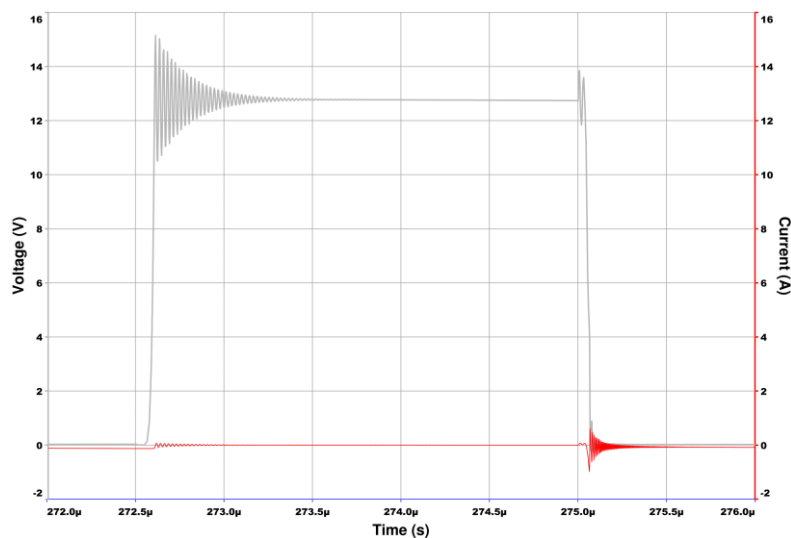
A comparação entre os dados obtém-se através de simulação computacional e valores empíricos. O conversor *buck* foi montado e simulado, tendo a tensão e corrente medidas através do MOSFET, antes e depois do *snubber* RC e RCD.

Sem snubber

Com o intuito de verificar a eficácia do experimento, realizou-se uma medição sem a presença de um *snubber* conforme Figura 3.

Na Figura 5, mostra a forma de onda de tensão e corrente no circuito *buck* sem *snubber*, ou seja, não há amortecimento.

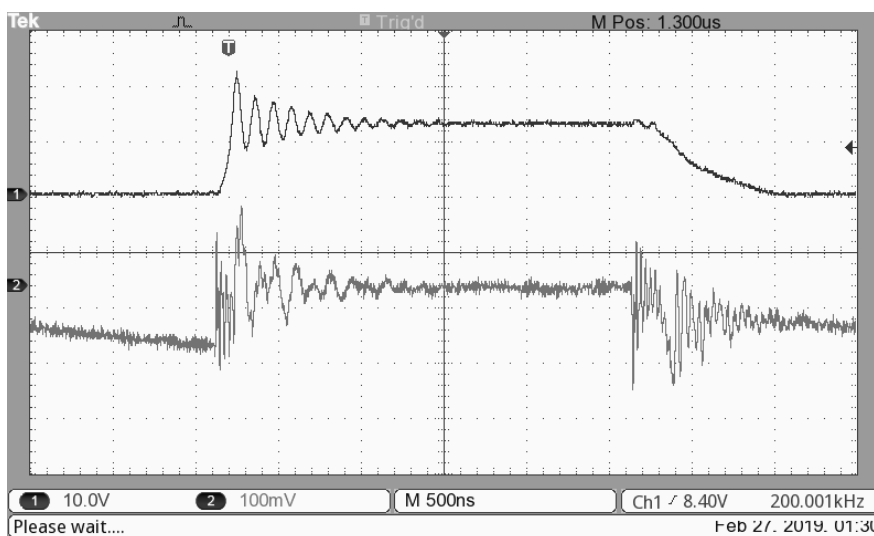
Figura 5 – Corrente e tensão sem snubber –
Simulação.



Fonte: os autores.

A Figura 6 demonstra os valores empíricos.

Figura 6 – Formas de onda de corrente e tensão sem
snubber – Valores práticos.

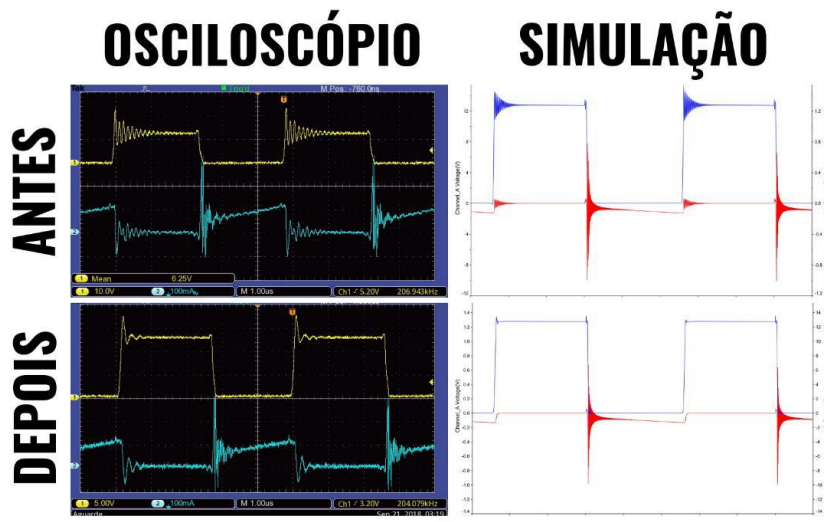


Fonte: os autores.

Snubber RC

O conversor *buck* foi montado e simulado, tendo a tensão e corrente medida através do MOSFET de forma prática e no simulador computacionalmente, antes e depois do *snubber* RC, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Snubber RC sendo comparado de forma
prática e simulado no computacionalmente.



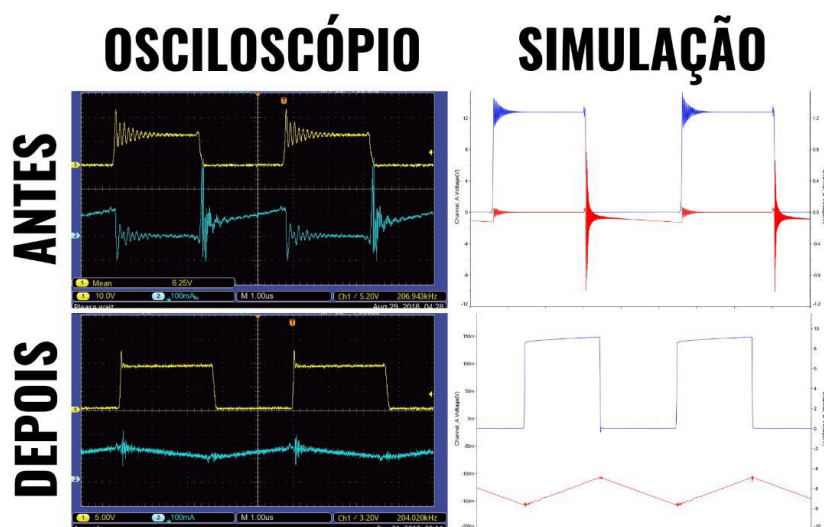
Fonte: os autores

As formas de onda do conversor *buck* antes da aplicação do *snubber*, tanto de forma prática quanto na simulação, sofreu uma grande oscilação de tensão e corrente. A tensão de pico da oscilação no MOSFET é praticamente o dobro da tensão de entrada. Os valores de tensão e corrente são amortecidos acrescentando um *snubber* RC conforme Figura 7. A variação da tensão é diminuída porém a corrente não possui variações significativas.

Snubber RCD

A Figura 8 ilustra a forma de onda de tensão e de corrente medida através do MOSFET de forma prática e na simulação computacional, antes e depois do *snubber* RCD.

Figura 8 – Snubber RCD sendo comparado de forma empírica
e simulação computacional.



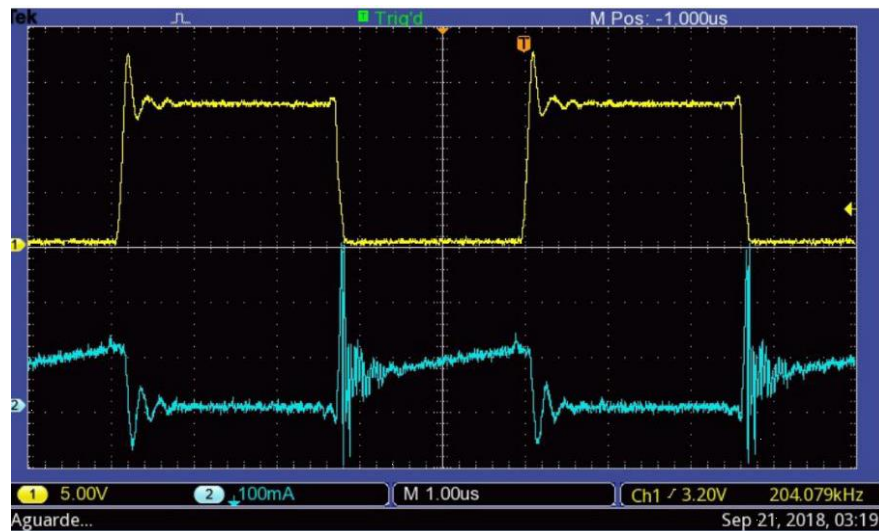
Fonte: os autores

Analisando as formas de ondas de tensão e corrente, após a aplicação do *snubber* RCD, verifica-se que a tensão é amortecida e ainda há uma melhora significativa na forma de onda de corrente.

Snubber RC X RCD

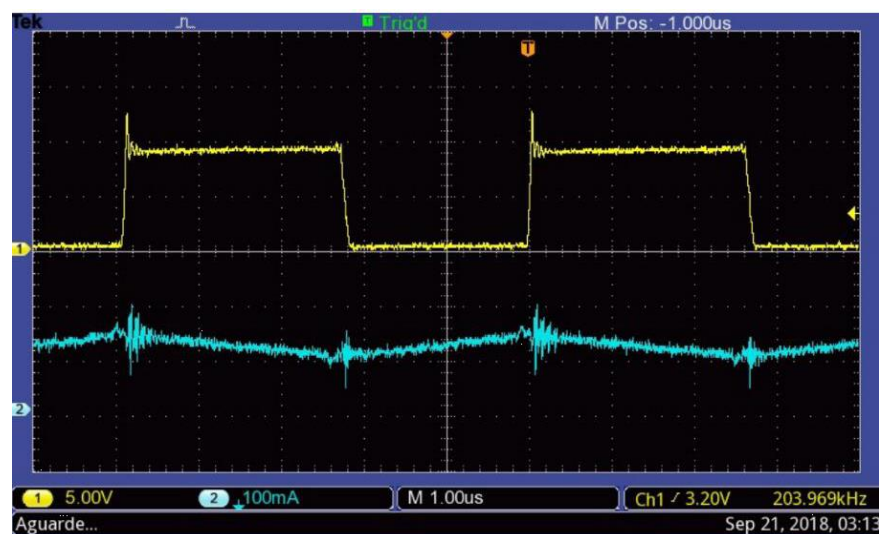
A forma de onda da tensão e da corrente do *snubber* RC é apresentado na Figura 9 e a forma de onda de tensão e da corrente do *snubber* RCD é apresentado na Figura 10.

Figura 9 – Corrente e tensão RC – Valores práticos.



Fonte: os autores

Figura 10 – Corrente e tensão RCD – Valores práticos.



Fonte: os autores

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha do conversor *buck* foi devido a necessidade de diminuir a tensão do circuito, sem prejudicar a sua eficiência.

As capacitâncias parasitas em RC e RCD são muito similares, devido a faixa de atuação com baixo valor de carga.

Observa-se que o circuito RC e RCD são bons amortecedores de tensão para um circuito chaveado, porém não há nenhum impacto significativo de amortecimento da corrente.

Para tentar determinar a melhor configuração para o *snubber* RCD, foi-se realizado diversos testes, como:

- Resistor em paralelo com o diodo e em série com o capacitor;
- Diodo em paralelo com o capacitor e em série com o resistor;
- Resistor em paralelo com o capacitor em série com o diodo.

Porém, a configuração que teve maior impacto, foi a última. No *snubber* RC, a preferência de ordem é irrelevante.

Ao analisar as formas de onda apresentadas, verifica-se que a oscilação da tensão nos dois *snubbers* é praticamente eliminada, sendo o RCD ligeiramente melhor, no entanto, apenas o *snubber* RCD apresentou uma melhora significativa na oscilação de corrente.

REFERÊNCIAS

ALGADDAFI, A.; ELNADDAB, K. Modelling and designing the RC snubber circuit for a buck converter and testing its effectiveness. In: International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2016, Marrocos. **Anais**. Marraquexe, 2016.

BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11ª edição, São Paulo: Person Education, 2013.

OLIVEIRA, Júlio Cesar Lopes de. **Projeto e Estudo de um Conversor CA/CC de Alta Potência, 14,4 V e 300 A para Aplicações Automotivas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina (UEL), Paraná, 2014.

MEJÍA, Gabriel; MUÑOZ, Nicolás; CANO, Juan. **Procedimiento novedoso para el diseño del circuito amortiguador RCD (snubber RCD) y deducción matemática de las ecuaciones**. Dissertação (Mestrado) – Universidad de Antioquia, Medellín, 2014.

COELHO, Roberto Francisco. **Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2008.

SEVERNS, Rudy. **Snubber Circuits For Power Electronics**. Oregon: Rudy Severns, 2008.

VACULIK, Petr. The experience with sic mosfet and buck converter snubber design. In: World Academy of Science, Engineering and Technology, 2014, Inglaterra. **Anais**. Londres, 2014.

DIDACTIC APPLICATION FOR A CIRCUIT PASSIVE SNUBBER

Abstract: *This article aims to study the best type and configuration of the passive dissipative snubber circuit for each load situation, presenting theoretical and experimental results. Corresponding equations are presented in the RC and RCD projects. In this way, the performance of each type of snubber will be analyzed computationally and in a practical way, verifying the results obtained.*

Key-words: *snubber. buck converter. camping circuit. RC. RCD.*