



Estudo sobre a aplicabilidade do *snubber* em circuitos de comutação

Ana Carolina Moreira¹
Daniel Cesar Piccoli²
Júlio Cesar Lopes de Oliveira³
Luiz Fernando Henning⁴
Rodrigo Jose Piontkewicz⁵

Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia (IFSC)

Resumo

Este artigo apresenta resultados teóricos e experimentais da atuação do circuito *snubber* dissipativo passivo, utilizando o conversor *buck*, visando obter o melhor tipo e configuração para cada situação de carga. São apresentados os projetos RC e RCD, com suas equações correspondentes. Será analisado a atuação de cada tipo de *snubber* de forma computacional e prática, verificando os resultados obtidos e descobrindo qual é o tipo mais adequado para cada situação.

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

Introdução

Devido à grande atuação da eletrônica nos dias atuais, principalmente em controle de máquinas elétricas, como: softstarters, inversores de frequência ou servomotores, a

¹ Graduando em Engenharia Elétrica. moreira.ana.1996@gmail.com

² Graduando em Engenharia Elétrica. danicpiccoli@hotmail.com

³ Graduado em Engenharia Elétrica, Mestre em Engenharia Elétrica. julio.oliveira@ifsc.edu.br

⁴ Graduado em Engenharia Elétrica, Mestre em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Doutor em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. luizh@ifsc.edu.br

⁵ Graduado em Engenharia Elétrica, Mestre em Engenharia Elétrica. rodrigo.piontkewicz@ifsc.edu.br



utilização de chaves semicondutoras para o seu correto funcionamento é muito importante. Porém, este processo de chaveamento provoca distúrbios indesejáveis na alimentação. Deste modo, com o intuito de amortecer estes efeitos, são utilizados os *snubbers*.

Dispositivos de potência de semicondutores, resistores e capacitores geralmente têm indutâncias e capacitâncias parasitas. Quando ocorre uma transição rápida de comutação nos dispositivos de comutação, ela cria um ruído, uma interferência e uma oscilação eletromagnética, nas formas de onda.

A comutação dos interruptores de energia pode ser feita de forma dura ou suave. A comutação dura ocorre quando o comutador não possui circuitos ressonantes que ajudam na mesma, já a suave ocorre quando os elementos reativos são conectados em série ou em paralelo com o interruptor de alimentação, amortecendo a tensão ou a corrente.

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. (VIEIRA, 2005, p.79)

Uma das maneiras de evitar tais efeitos é instalar um capacitor (chamado *snubber* ou "supressor") nos terminais do enrolamento do circuito. De modo geral, capacitores em paralelo com elementos indutivos ou chaves costumam agir como elementos de proteção, e não como capacitores em circuitos tradicionais.

Pesquisas relacionadas a aplicabilidade dos circuitos *snubbers* são bastante escassas. Sendo assim, quando se analisa o panorama atual de publicações científicas, observa-se que não se enfoca 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.

Fundamentação Teórica



Definição

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."

Neste projeto será apresentado apenas sobre o *snubber* dissipativo passivo.

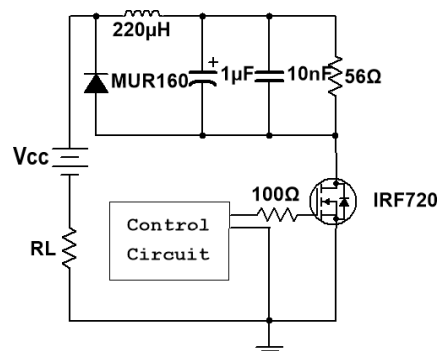
Conversor *buck*

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.

Metodologia

O circuito utilizado do conversor *buck* é representado pela Figura 1.

FIGURA 1. Conversor *buck*.



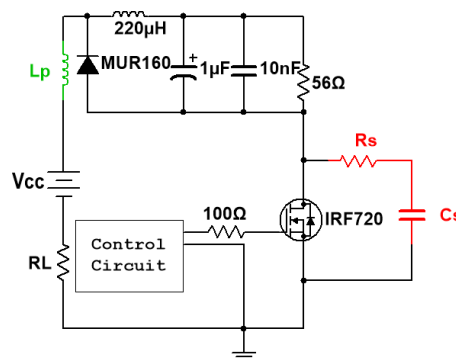


Fonte: os autores

Projeto do *snubberRC*

O *snubberRC*, apresentado na Figura 2, através do capacitor C_s e o resistor R_s , e utilizado para qualquer semicondutor atuando como chave, reduzindo o pico de tensão no desligamento e amortecendo oscilações indesejadas de tensão e corrente. Este é definido como um resistor e um capacitor conectados em série através de um interruptor.

FIGURA 2. *SnubberRC*.



Fonte: os autores

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

O resistor do *snubber* é utilizado para eficácia na frequência de oscilação, enquanto o capacitor é utilizado para reduzir a dissipação da frequência de chaveamento. Para projetar um circuito de *snubberRC* pode-se utilizar as seguintes equações, Equação (1) e Equação(2).

$$R_s = \frac{1}{\omega C_s} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{1}{2\omega^2 L_p} \quad (2)$$



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

- $\zeta < 1$ é chamado sobamortecimento;
- $\zeta = 1$ é chamado de amortecimentocrítico;
- $\zeta > 1$ é chamado de sobreamortecimento.

Calculando R_s e C_s

Reescrevendo a Equação (1) e Equação (2), obtemos a Equação (3) e Equação (4):

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_p}{C_p}} \quad (3)$$

$$C_s = \frac{1}{2 \zeta \omega_{osc} L_p} \quad (4)$$

Para o cálculo do valor do resistor é preciso saber ζ , L_p e C_p . O valor escolhido de ζ é 1, a fim de obter-se um amortecimentocrítico.

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 25V e no circuito esta tensão será no máximo 12V. No gráfico observa-se que em aproximadamente 12V o C_{oss} é igual à 200pF. A frequência de oscilação (f_{osc}) adotada é de 8MHz.[7]

$$C_p \approx C_{oss} \approx 200 \text{ pF} \quad (5)$$



O circuito equivalente da indutância parasita (L_p) do conversor *buck* com o *snubberRC* pode ser representado conforme a Figura 2. 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(6).

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_p C}} \quad (6)$$

Sendo assim, a frequência angular igual a $2 \cdot \pi \cdot f_{osc}$ e isolando L_p , obtêm-se a Equação (7):

$$L_p = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f_{osc}}\right)^2}{C} \quad (7)$$

Substituindo os valores de frequência e capacitância obtêm-se a Equação (8).

$$L_p = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 8000}\right)^2}{200 \times 10^{-6}} \approx 1,979 \mu H \quad (8)$$

Substituindo os valores de frequência, grau de amortecimento, capacitância parasita e indutância parasita na Equação (3) e Equação (4), obteremos os valores do capacitor e do resistor do *snubberRC*. Conforme e apresentado nas Equação (9) e Equação (10).

$$R_s = \frac{1}{2 \cdot 1} \sqrt{\frac{1,979 \mu H}{200 \times 10^{-6}}} \approx 49,737 \Omega \quad (9)$$

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

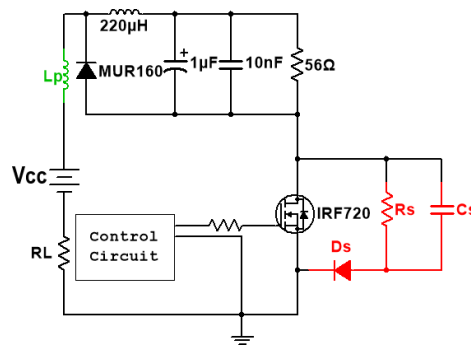


$$\eta = \frac{1}{2 \cdot 51 \cdot 8} = 397,890 \quad (10)$$

Projeto do *snubber*RCD

O *snubber*RCD, como mostrado na Figura 3, 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 3. *Snubber*RCD.



Fonte: os autores

Com o intuito de dar início a resolução dos cálculos, através dos valores práticos obtidos quando o circuito estava sem *snubber* e em seguida foi colocado um capacitor adicional de 1nF. [2]

TABELA 5 – Valores práticos sem *snubber*.

| | <i>SEM</i> capacitor adicional ₁ | <i>COM</i> capacitor adicional ₂ |
|---------------------------|--|--|
| $V_{ce\text{pico}_x}$ (V) | 19 | 16,8 |
| V_{cess_x} (V) | 13 | 13 |
| T_{osc_x} (ns) | 120 | 300 |

Fonte: os autores



$$\zeta_1 = - \frac{\ln\left(\frac{\zeta_{\text{parasita}}}{\zeta_{\text{parasita}} - 1}\right)}{\sqrt{\zeta^2 + \left(\ln\left(\frac{\zeta_{\text{parasita}}}{\zeta_{\text{parasita}} - 1}\right) - 1\right)^2}} = 0,239 \quad (11)$$

$$\zeta_2 = - \frac{\ln\left(\frac{\zeta_{\text{parasita}}}{\zeta_{\text{parasita}} - 1}\right)}{\sqrt{\zeta^2 + \left(\ln\left(\frac{\zeta_{\text{parasita}}}{\zeta_{\text{parasita}} - 1}\right) - 1\right)^2}} = 0,239 \quad (12)$$

Depois de obter os valores de amortecimento, eles são colocados na equação da indução parasita, como mostrado abaixo:

$$\zeta_{\text{parasita}} = \frac{(\zeta_{\text{parasita}})^2 \cdot (1 - (\zeta_2)^2) - (\zeta_{\text{parasita}})^2 \cdot (1 - (\zeta_1)^2)}{4 \cdot \zeta^2 \cdot \zeta_{\text{parasita}}} = 1,633 \zeta \quad (13)$$

Em seguida, a capacitância parasita presente no MOSFET, pode-se descobrir através da equação que está abaixo:

$$\zeta_{\text{parasita}} = \frac{\zeta_{\text{parasita}} \cdot (\zeta_{\text{parasita}})^2 \cdot (1 - (\zeta_1)^2)}{(\zeta_{\text{parasita}})^2 \cdot (1 - (\zeta_2)^2) - (\zeta_{\text{parasita}})^2 \cdot (1 - (\zeta_1)^2)} = 2,106 \cdot 10^{-10} \zeta \quad (14)$$

Os dados obtidos até o momento são de fundamental importância para conseguir determinar o capacitor e a resistência que serão utilizados como parte do *snubber*RCD, como poderá ser visto nas próximas equações. Porém, antes são necessárias mais algumas informações pertinentes, como a corrente de carga (I_1), a tensão de nominal (V_s) e a frequência de chaveamento (f_{sw}), que possuem os respectivos valores, 96mA, 12V e 200kHz.

Com isso, a equação para descobrir o valor do capacitor que será colocado no *snubber*RCD e a seguinte:

$$\zeta_{\text{parasita}} = \frac{\zeta_{\text{parasita}} \cdot (\zeta_1)^2}{(\zeta_{\text{parasita}} - \zeta_1)^2} - \zeta_{\text{parasita}} = 9,647 \cdot 10^{-11} \zeta \quad (15)$$



Colocando o valor da capacitância calculado e a frequência aproximada que foi obtida através de valores práticos, para que se calcule a resistência precisa-se da próxima equação:

$$R = \frac{0,1}{5 \cdot C \cdot f} = 1036,590\Omega \quad (16)$$

Sendo assim, o capacitor comercial a ser utilizado na montagem do *snubber* de 100 pF e a resistência a ser colocada no circuito *snubber* será de 1 kΩ. Sendo que a potência do mesmo deve ser inferior a:

$$P = \frac{1}{2} \cdot (V)^2 \cdot C = 1,400 \cdot 10^{-3} \text{ W} \quad (17)$$

O diodo utilizado no projeto foi o MUR160. Desta forma, com o intuito de se aproximar do resultado real na simulação computacional, foi posto a indutância parasita calculada, Equação (13), como no circuito apresentado na Figura 3.

Resultados e Discussão

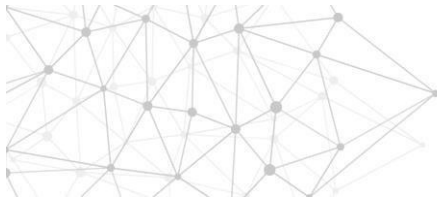
Nesta seção serão apresentados os resultados simulados e obtidos experimentalmente.

Valores Práticos X Simulação Computacional

A comparação entre os dados que foram simulados computacionalmente e os valores práticos. O conversor *buck* foi montado e simulado, tendo a tensão e corrente medidas através do MOSFET, antes e depois do *snubber* RC e RCD.

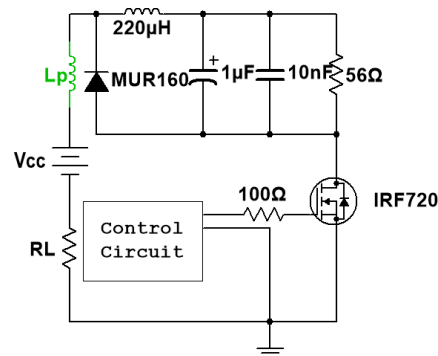
Sem *snubber*

Antes de se iniciar a comparação dos resultados que obtidos com o *snubber* RC e RCD, realizou-se a medição sem nenhum *snubber*, para poder verificar a sua eficácia. Analisa-se os gráficos experimentais e computacionais, para usar como base de



comparação com os *snubber*RC e RCD. Para extrair dados mais concretos, colocou-se um indutor com o valor irrisório de 100 nH na simulação. Como mostra na figura 4.

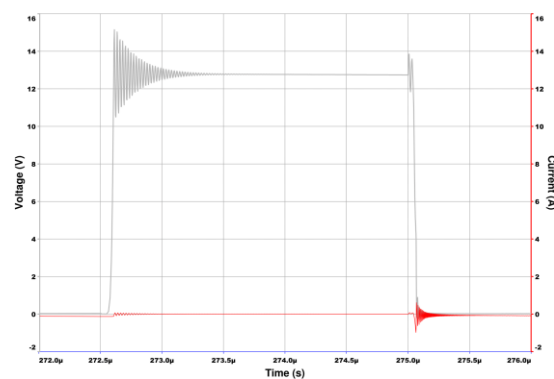
FIGURA 4. Conversor buck sem snubber e com indutância parasita.



Fonte: os autores

No gráfico simulado, como mostrado na Figura 5, podem ser vistos algumas oscilações decorrentes da comutação de semicondutores, sendo que neste não há amortecimento.

FIGURA 5. Corrente e tensão sem snubber – Simulação.

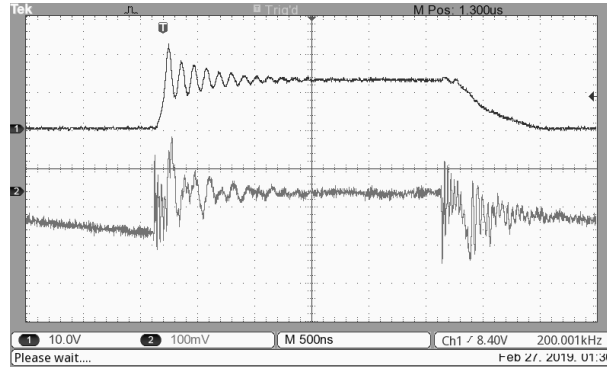


Fonte: os autores

A Figura 6 demonstra os valores obtido na pratica. Com isso pode-se observar que tais valores são próximos aos simulados, o que valida o experimento realizado, tal fator ocorre também nos demais circuitos.



FIGURA 6. Corrente e tensão sem snubber – Osciloscópio.

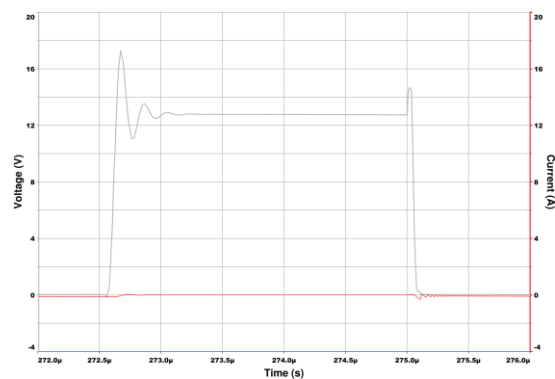


Fonte: os autores

SnubberRC

Na Figura 7 e mostrado o gráfico simulado de tensão e de corrente do circuito *buck* com o *snubberRC*.

FIGURA 7. Corrente e tensão RC – Simulação.

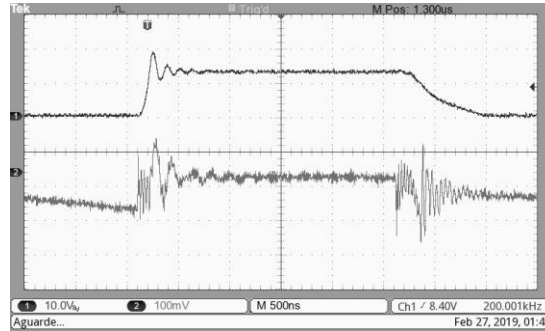


Fonte: os autores

Na Figura 8, o gráfico do circuito *buck*, com *snubberRC*, realizado experimentalmente.



FIGURA 8. Corrente e tensão RC – Osciloscópio.



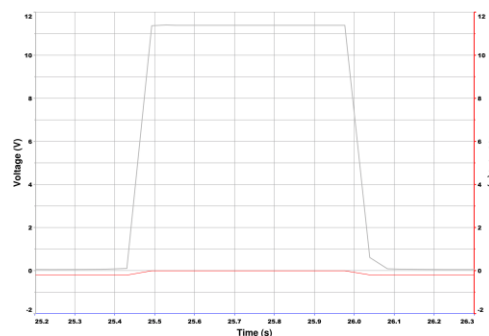
Fonte: os autores

Percebe-se que houve um grande impacto no amortecimento da tensão nesse circuito, isso por causa do *snubber*RC. Mas quando olha-se para a tensão esse impacto não foi tão evidente assim, pois esse circuito é focado no amortecimento da tensão e não na corrente, o mesmo ocorreu com o circuito de *snubber*RCD, como visto nas Figura 7 e Figura 8.

*Snubber*RCD

Os gráficos de tensão e de corrente do circuito com o conversor *bucke snubber* RCD como mostrado na Figura 9.

FIGURA 9. Corrente e tensão RCD – Simulação.

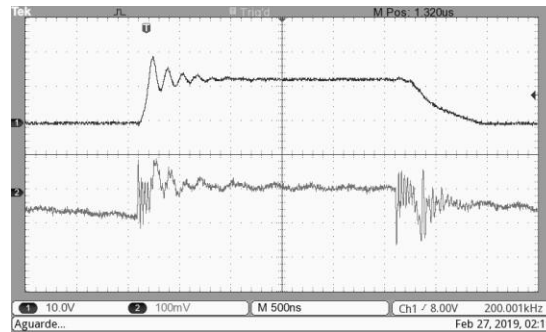


Fonte: os autores



Como mostrado na Figura 10, o gráfico do circuito *buck* com *snubber*RCD realizado experimentalmente.

FIGURA 10. Corrente e tensão RCD – Osciloscópio.



Fonte: os autores

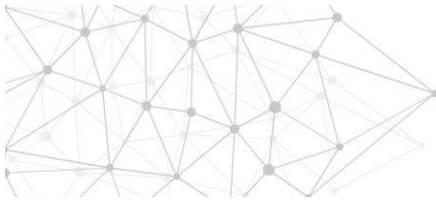
Quando visualiza-se os gráficos do *snubber*RCD, percebe-se um maior impacto no amortecimento da tensão do MOSFET e um leve impacto no amortecimento da corrente também.

Considerações Finais

Durante a execução do projeto, devido à falta de dados necessários para obter um resultado mais correto, teve-se muitos problemas, principalmente com a do *snubber*RCD. Após muitas pesquisas conseguiu-se achar um artigo que continham todas as deduções matemáticas que iria-se precisar para projetar o circuito RCD. Após a resolução desses cálculos pode-se perceber, que a capacitância parasita em RC e RCD são similares, pois estão na faixa de microhenry.

Com relação a indutância presente no circuito sem *snubber*, utilizou-se apenas um valor de indutância irrisório, com o intuito de que para efeito de simulação fosse similar aos dados práticos obtidos. Como isso, pode-se utilizar este valor para o circuito RC também, além do circuito RCD.

Como observado, tanto o circuito RC quanto RCD servem como um bom amortecedor de tensão para um circuito chaveado, porem o mesmo não se observa na corrente, já que ambos não tem um impacto equivalente na mesma.



No *snubber*RCD foram realizados diversos testes para analisar qual a melhor configuração para um maior amortecimento, tanto colocando o resistor em paralelo com o diodo e em série com o capacitor, quanto o diodo em paralelo com o capacitor e em série com o resistor, porém a que teve um maior impacto foi a configuração resistor em paralelo com o capacitor em série com o diodo. O *snubber*RC não tem preferência de ordem sendo que alterando-se a frequência do sinal observou-se alterações no seu formato de onda.

Referências

- [1] Algaddafi, A., & Elnaddab., K. (2016). **Modelling and designing the RC Snubber circuit for a buck converter and testing its effectiveness.** 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), (pp. 554-559). Marrakech.
- [2] Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2013). **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos.** (11^a ed.). São Paulo: Person Education.
- [3] Coelho, R. R. (2008). **Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos.** Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- [4] Mejía, G. E., Muñoz, N., & Cano, J. B. (2014). **Procedimiento Novedoso para el Diseño del Circuito Amortiguador RCD (Snubber RCD) y Deducción Matemática de las Ecuaciones.** Master's thesis, Universidad de Antioquia, Medellín.
- [5] Oliveira, J. C. (2014). **Projeto e Estudo de um Conversor CA/CC de Alta Potência, 14,4 V e 300 A para Aplicações Automotivas.** mathesis, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Paraná.
- [6] (6 de 2008). Power MOSFET IRF720.
- [7] Vaculik, P. (2014). **The Experience with SiC MOSFET and Buck Converter Snubber Design.** World Academy of Science, Engineering and Technology. London.