

Investigação sobre o Processo de Geração de Alta Tensão em Sistemas de Ignição de Automóveis

Gabriel Mancini (UTFPR) mancini.bdc@gmail.com
Rodrigo Pereira Alves (UTFPR) rodrygorpa@gmail.com
Diogo Marujo (UTFPR) diogomarujo@utfpr.edu.br

Resumo:

O processo de geração de alta tensão para centelhamento em sistemas de ignição de automóveis é fundamental para que ocorra a partida do veículo. A vela, que tem a função de liberar uma fagulha (centelha), provoca a ignição e, conseqüentemente, a explosão. No entanto, a fagulha não ocorre espontaneamente e é preciso que haja uma excitação externa, produzida através de um circuito elétrico acoplado ao sistema de ignição do automóvel. Este trabalho pretende investigar o processo de geração de alta tensão para centelhamento em sistemas de ignição de automóveis. Para atingir este objetivo, será comparado o comportamento do processo do ponto de vista teórico e prático. O modelo matemático do processo é simulado por meio do software Matlat® e comparado com o circuito montado no Multisim®. Posteriormente, é realizada a montagem prática do processo em bancada de laboratório. Por fim, foi efetuada uma comparação entre os resultados obtidos nas abordagens teóricas com os dados obtidos em laboratório, visando compreender as divergências e semelhanças entre as abordagens.

Palavras chave: Modelagem Matemática, Sistemas Dinâmicos, Geração de Alta Tensão, Sistema de Ignição, Motores de Combustão Interna com Ignição por Faísca

Research on the Process of High Voltage Generation in Automotive Ignition Systems

Abstract

The process of generating high voltage for spark-ignition in vehicle ignition systems is fundamental for starting the vehicle. The spark plug, which has the function of releasing a spark, causes the ignition and consequently the explosion. However, the spark does not occur spontaneously and there needs to be an external excitation, produced through an electric circuit coupled to the car's ignition system. This work intends to investigate the process of high voltage generation for spark ignition in automobile ignition systems. To achieve this goal, the process behavior will be compared from a theoretical and practical point of view. The mathematical model of the process is simulated using the Matlat® software and compared to the Multisim®-mounted circuit. Subsequently, the practical assembly of the process is performed on the laboratory bench. Finally, a comparison is made between the results obtained in the theoretical approaches with the data obtained in the laboratory, aiming at understanding the divergences and similarities between the approaches.

Key-words: Mathematical Modeling, Dynamic Systems, High Voltage Generation, Ignition system, Spark Ignition Internal Combustion Engines

1. Introdução

O motor de um carro funciona através da queima de combustível, processo esse denominado combustão, que consiste numa mistura de ar e combustível no interior do cilindro. O processo de combustão ocorre quando a válvula de admissão libera combustível e ar para o cilindro enquanto ele está na fase de admissão. Em seguida, o pistão comprime o combustível dentro do cilindro, e então uma vela, que tem a função de liberar uma faísca (centelha), provoca a ignição e consequentemente a explosão. Na sequência, a válvula de escape libera o CO_2 (dióxido de carbono) proveniente da explosão (OLIVEIRA, 2003).

O processo de geração de alta tensão para centelhamento em sistemas de ignição de automóveis é fundamental para que se tenha a explosão, uma vez que são necessários três componentes essenciais para que o processo de combustão: combustível, comburente (CO_2) e o calor. O calor produzido pela faísca aciona o processo de combustão. No entanto a faísca não ocorre espontaneamente e é preciso que haja uma excitação externa, produzida através de um circuito elétrico acoplado ao sistema de ignição do automóvel. Segundo (BRAGA, 2015), o modelo do sistema de ignição de automóveis é basicamente constituído pelos seguintes elementos: uma fonte de tensão (bateria), um indutor (bobinado), um capacitor (condensador), um resistor e uma chave (comutador) para curto circuitar os terminais do capacitor. O circuito elétrico que representa o sistema de ignição de automóveis é mostrado na Figura 1.

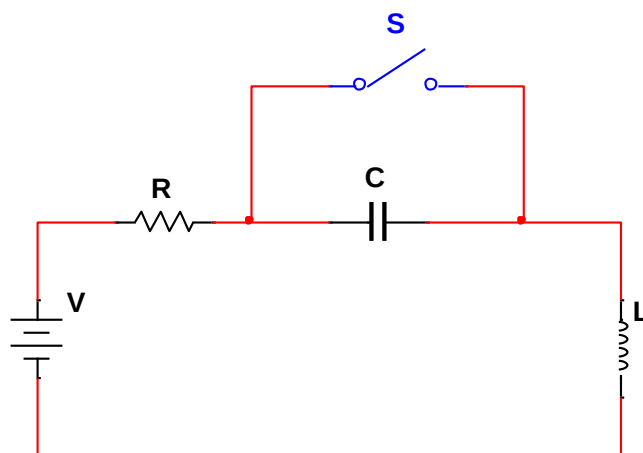


Figura 1 - Circuito elétrico do sistema de ignição de automóveis

A fonte de tensão (Figura 1) representada pela bateria do automóvel, tem como objetivo carregar o indutor quando a chave S encontra-se fechada, após ser carregado a corrente no indutor permanece constante. O capacitor mantém-se descarregado pois seus terminais estão em curto. No momento em que a chave S é aberta, o capacitor começa a carregar e o indutor a descarregar, em seguida tem-se uma variação na corrente que flui no indutor, essa variação provoca um pico de tensão nos terminais do indutor (SADIKU, 2013, pág. 314 e 315). A vela que está conectada em paralelo com os terminais do indutor, recebe o pico de tensão e gera a centelha que provoca a ignição do automóvel.

Este artigo tem como objetivo investigar o processo de geração de alta tensão para centelhamento em sistemas de ignição de automóveis, a partir da análise teórica e prática do processo. No experimento deste trabalho foram obtidos algumas centenas de volts nos terminais do indutor. Para que ocorra, a centelha, é necessário, de fato, uma tensão entre 10.000 a 12.000 V (BRAGA, 2015). Esses valores de tensão não são fáceis de serem produzidos e manipulados no laboratório, pois seriam necessários equipamentos com isolamento especial. Em vista das

limitações mencionadas, este trabalho busca apresentar o princípio de funcionamento dos sistemas de ignição de automóveis, estabelecendo uma comparação entre modelo teórico, desenvolvido com o auxílio dos *softwares* Multsim e Matlab®, e os resultados experimentais, desenvolvidos em laboratório.

2. Materiais e Métodos

A seguir são apresentadas as abordagens teóricas e práticas utilizadas para o desenvolvimento do trabalho. Para a realização do experimento prático em laboratório e, desenvolvimento da modelagem matemática, referente ao circuito da figura 1, utilizou-se os seguintes dispositivos: resistor $R = 10\Omega$, capacitor de poliéster $C = 0,330\mu F$, indutor de $L = 115mH$ e uma fonte de tensão de 12V.

2.1 Análise Teórica

2.1.1 Descrição do Modelo Matemático

A princípio desenvolveu-se a modelagem matemática para a tensão nos terminais do indutor, considerando o circuito de ignição de automóveis mostrado previamente na Figura 1. A fonte de tensão representada por V tem função de excitar o circuito. O resistor R é um limitador de corrente e funciona de acordo com a lei de ohm que estabelece:

$$V_R = R \cdot I_R \quad (1)$$

onde: V_R é tensão no resistor; I_R corrente no resistor; R – resistência.

O capacitor, também conhecido como condensador, tem função de evitar que ocorram faíscas na comutação da corrente quando a chave S é aberta, o que desgastaria os contatos de S e também provocaria ruído elétrico capaz de interferir no sinal de rádio (BRAGA, 2015). A lei que governa o funcionamento do capacitor é:

$$I_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt} \quad (2)$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int I_C \cdot dt \quad (3)$$

onde: C é capacitância, V_C a tensão no capacitor e I_C - corrente no capacitor.

O bobinado, como é comumente conhecido o indutor, é responsável por aumentar a tensão da bateria de 12 V para um valor suficientemente elevado que produza a faísca na vela de ignição (BRAGA, 2015). O funcionamento do indutor é regido pela seguinte equação:

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (4)$$

$$I_L = \frac{1}{L} \int V_L \cdot dt \quad (5)$$

onde: V_L – tensão no indutor; L – indutância; I_L – corrente no indutor.

A lei de Kirchhoff das tensões (LKT) estabelece que o somatório das quedas de tensão ao longo de uma malha é zero. Portanto, analisando o circuito da Figura 1 e aplicando LKT ao longo da malha, pode-se determinar a expressão que descreve o comportamento da tensão nos terminais do indutor:

$$V = V_R + V_C + V_L \quad (6)$$

Substituindo as equações (1), (3) e (4) na equação (6) tem-se:

$$V = R \cdot I_R + \frac{1}{C} \int I_C \cdot dt + L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (7)$$

Como o circuito da Figura 1 é um circuito série, $I_R = I_C = I_L = I$. pode-se reescrever a equação (7) como:

$$V = R \cdot I + \frac{1}{C} \int I \cdot dt + L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (8)$$

Derivando a equação (8) uma vez para eliminar a integral e sabendo que a fonte V é contínua, isto é, constante, obtém-se:

$$L \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} + R \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = 0 \quad (9)$$

Tomando a equação (9) e dividindo-a por L tem-se:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{I}{L \cdot C} = 0 \quad (10)$$

Substituindo os valores do resistor (10 Ω), indutor (115 mH) e do capacitor (0,330 μF) na equação (10), tem-se:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + 86.956 \cdot \frac{dI}{dt} + 26350461.13 \cdot I = 0 \quad (11)$$

Note que a equação diferencial obtida em (11) é de segunda ordem, pois trata-se de um circuito RLC. Para resolvê-la, deve-se encontrar as raízes do polinômio característico, logo:

$$s^2 + 86,956 \cdot s + 26350461,13 = 0 \quad (12)$$

$$s_{1,2} = -43,475 \pm 5133,085j \quad (13)$$

Como as raízes do polinômio característico são complexas e conjugadas, o circuito é subamortecido ($0 < \xi < 1$) e a solução da EDO é do tipo:

$$I(t) = e^{-\alpha t} [B_1 \cos(\omega_d t) + B_2 \sin(\omega_d t)] \quad (14)$$

onde: α – representa a parte real e ω_d a parte imaginária da raiz do polinômio característico.

Substituindo os valores de obtidos em (13), vem:

$$I(t) = e^{-43,475t} [B_1 \cos(5133,085t) + B_2 \sin(5133,085t)] \quad (17)$$

Considerando que, por um longo período de tempo ($t < 0$), a chave S permanece fechada, o circuito apresenta as seguintes condições iniciais.

$$I(0^+) = \frac{12}{10} = 1,2A \quad (18)$$

$$\dot{I}_L(0^+) = 0 \quad (19)$$

Derivando a equação (17) uma vez temos:

$$\begin{aligned} \dot{I}_L(t) = & -43,475e^{-43,475t} [B_1 \cos(5133,085t) + B_2 \sin(5133,085t) \\ & + 513,085(-B_1 \sin(5133,085t) + B_2 \cos(5133,085t))] \end{aligned} \quad (20)$$

Para $t = 0$, substituindo-se $I(0^+) = 1.2 \text{ A}$ em (17) e $\dot{I}(0^+) = 0 \text{ A}$ em (20), obtém-se um sistema linear cuja solução é: $B_1 = 1.2$ e $B_2 = 0.0101$. Substituindo os valores de B_1 e B_2 na equação (17), chega-se a função que descreve o comportamento da corrente no indutor.

$$I(t) = e^{-43,475t}(1,2 \cos(5133,085 t) + 0.0101 \sin(5133,085t)) \quad (21)$$

A equação (4) relaciona a corrente do indutor com a tensão nos seus terminais. Portanto fazendo a derivada de (21) e multiplicando por L tem-se o comportamento da tensão nos terminais do indutor, como mostra a equação (22).

$$V_L(t) = e^{-43,475t}[-0,0374 \cos(5133,085t) - 708,41 \sin(5133,085t)] \quad (22)$$

2.1.2 Montagem do Sistema no Multisim®

Realizou-se a montagem do circuito da Figura 1 com auxílio do *software* Multisim® 14.0. Para analisar o sinal de saída (tensão no indutor), utilizou-se a ferramenta osciloscópio do Multisim® 14.0, uma vez que a mesma apresenta todas as funções de um osciloscópio real. As ponteiros do osciloscópio foram conectadas no ponto em que a vela de ignição é ligada, isto é, em paralelo com o indutor. Inicialmente manteve-se a chave S fechada por um período de 10 segundos, até a corrente no circuito atingir seu valor nominal conforme mostrado na Figura 2. Posteriormente, a chave S foi aberta e os dados registrados.

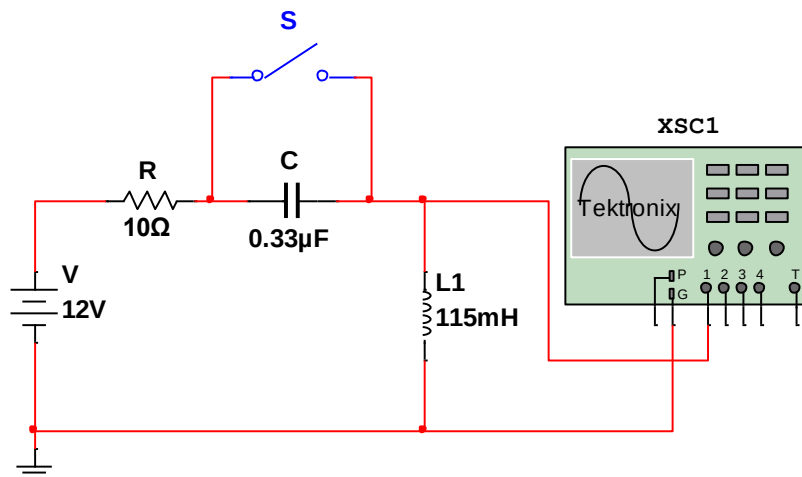


Figura 2 - Circuito simulado no Multisim

2.1 Análise Prática

Para a realização do experimento prático em laboratório além dos elementos descritos previamente, foram utilizados os seguintes materiais:

- ✓ Um multímetro;
- ✓ Uma fonte contínua de 12 V;
- ✓ Uma chave ON-OFF;
- ✓ Um osciloscópio Tectronix de dois canais e ponteiros;
- ✓ Uma mini protoboard;
- ✓ Fios e jumpers para conexão;

Na realização do experimento em laboratório, o circuito RLC série foi montado em bancada, através da ligação da fonte de 12 V em série com o resistor ($R = 10 \Omega$), o capacitor ($C = 0,330 \mu\text{F}$) e o indutor ($L = 115 \text{ mH}$). Em seguida, colocou-se a chave S em paralelo com o capacitor e as ponteiros do osciloscópio em paralelo com o indutor. A princípio utilizou-se o capacitor eletrolítico. Posteriormente, substituiu-se o capacitor eletrolítico pelo capacitor de poliéster. A chave S foi mantida inicialmente fechada para que a corrente no indutor se estabilizasse. Por fim a chave S foi aberta e o comportamento do sinal de tensão nos terminais do indutor registrado.

Dessa forma finalizou-se a montagem experimental do circuito da Figura 1, para verificação dos resultados e posterior análise, conforme mostra a Figura 3.

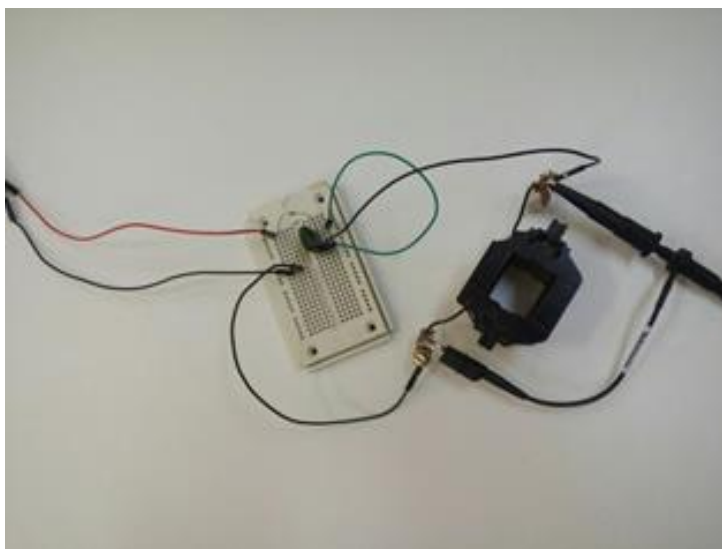


Figura 3 - Montagem realizada no laboratório

3. Resultados e Discussões

Para avaliar o comportamento do sistema frente a abordagem prática e teórica, inicialmente, foi traçado em um gráfico o modelo matemático que descreve o comportamento da tensão nos terminais do indutor, equação (22), cujos resultados são mostrados na Figura 4. Para isso, foi utilizado o software Matlab®, através da função “plot”, considerando o intervalo de tempo de simulação de 0 até 0.1 segundos.

Pode-se notar que foi obtido um valor de pico de aproximadamente 680 V, com oscilações decrescentes. O resultado é coerente, pois trata-se de uma resposta subamortecida, conforme descrito anteriormente.

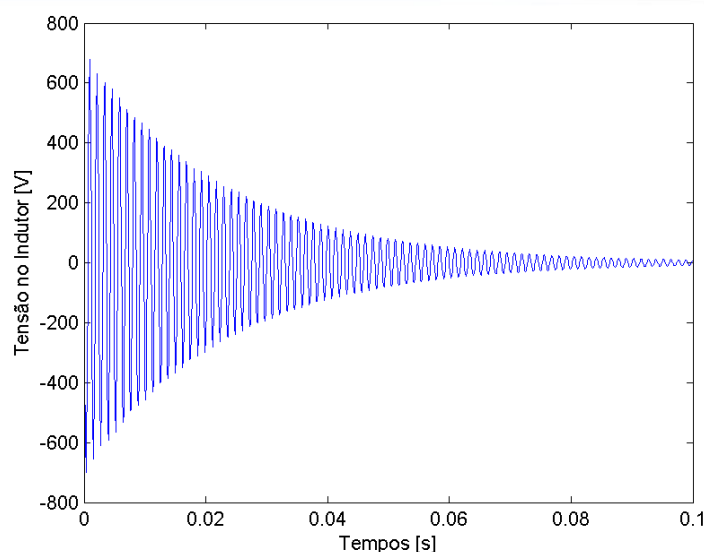


Figura 4 - Resultado obtido no Matlab®

O resultado obtido com a simulação realizada no *software* Multisim® é mostrado na Figura 5. Cabe destacar que os valores de pico máximo e mínimo foram de 680 volts e -698 volts, respectivamente. Na comparação com o Matlab® (Figura 4), o resultado obtido no Multisim® foi similar.

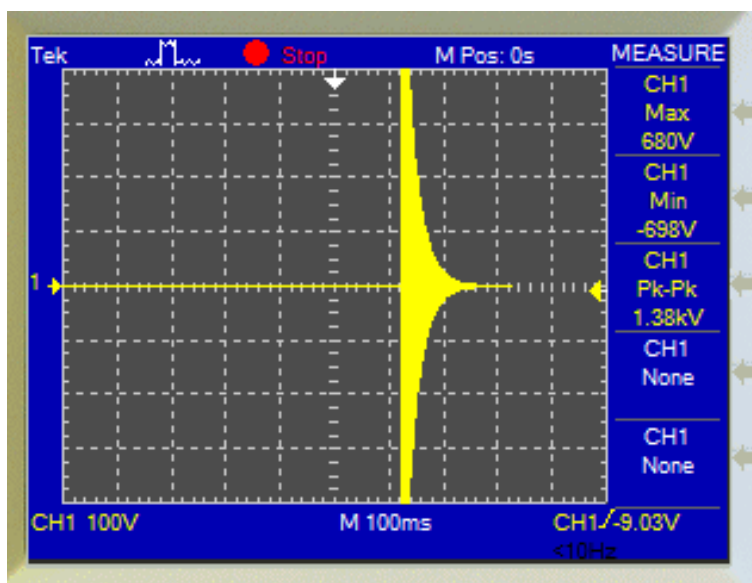


Figura 5 - Resultado da simulação no Multisim

No experimento realizado em laboratório, primeiramente usando capacitor eletrolítico, o resultado é mostrado na Figura 6. É possível perceber que o sinal de saída, tensão no indutor, apresentou muitos ruídos e, conseqüentemente, um comportamento atípico de circuitos RLC. Isso se dá em função do erro associado aos instrumentos utilizados na medida, como protoboard, cabos de conexão e devido ao uso do capacitor eletrolítico, que possui polarização, por este motivo conduz corrente apenas em um sentido.



Figura 6 - Resultado com o capacitor eletrolítico

Ao executar-se a montagem prática com o capacitor de poliéster, alcançou-se o resultado mostrado na Figura 7. Nota-se que o valor máximo e mínimo de pico atingido foram respectivamente 5.28 e -6.72 volts. Isso se dá porque a ponteira do osciloscópio mediu um valor 100 vezes menor do que o sinal real. Portanto a tensão máxima e mínima nos terminais do indutor, no momento em que a chave abriu-se, foram respectivamente de 528 e -672 volts. Os valores obtidos são satisfatórios já que deve-se levar em consideração os erros de medição e a variação dos componentes físicos envolvidos na montagem. O sinal apresenta um comportamento oscilatório, típico de sinais subamortecidos.

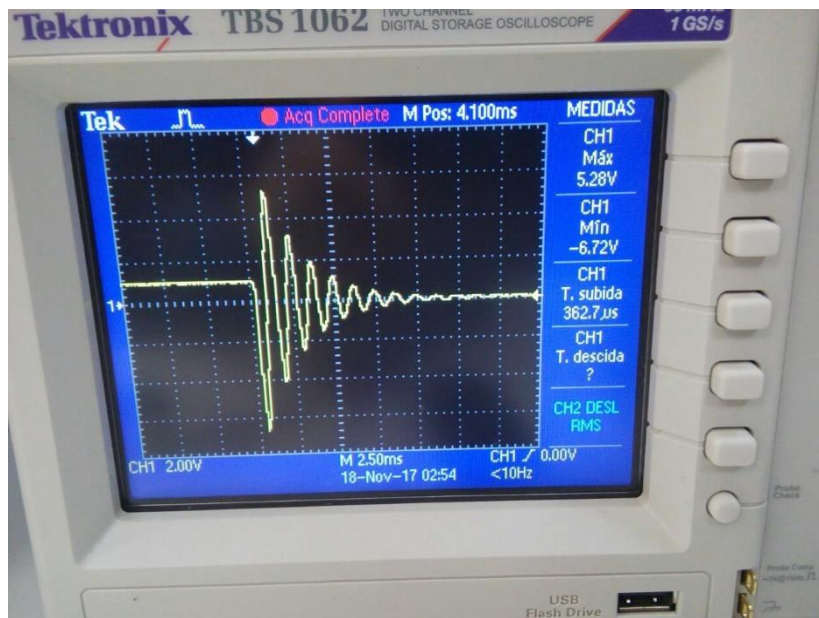


Figura 7 - Resultado obtido em laboratório com capacitor de poliéster

Dessa forma, é possível concluir que a tensão de saída nos terminais do indutor, após a abertura chave S, apresentou um comportamento semelhante com a simulação desenvolvida nos *softwares* Matlab® e Multsim. Isso ocorreu porque se trata de um circuito de segunda

ordem (RLC) subamortecido. No entanto para o sinal obtido com o capacitor eletrolítico observou-se um comportamento incoerente com o esperado, essa incompatibilidade entre os sinais é consequência de características construtivas do capacitor em questão.

4. Conclusão

Este trabalho apresentou uma investigação sobre a geração de alta tensão para centelhamento, utilizada na ignição de automóveis. O problema foi desenvolvido a partir da comparação da abordagem teórica com a prática, obtida em laboratório.

Com a chave fechada, os terminais do capacitor estão em curto e a tensão na saída dos terminais do indutor é nula. Isso ocorre porque não há variação de corrente no interior do indutor e, conseqüentemente, não há fluxo magnético. Posteriormente, notou-se que, ao se abrir a chave, a corrente flui pelos terminais do capacitor, pois o mesmo se encontra descarregado, diminuindo gradualmente. Percebe-se, então, que a variação de corrente no interior do indutor provoca um pico de tensão nos seus terminais. Essa tensão é usada para alimentar as velas, que produzem a centelha, em sistemas de ignição de automóveis e fazem o motor funcionar.

Em relação a comparação entre as abordagens teóricas e práticas, primeiramente, foi observado que os resultados obtidos via simulação no Matlab® ou Multisim® foram muito parecidas. Quando comparado com os resultados práticos, os resultados foram incoerentes com o capacitor eletrolítico. Para o caso do capacitor de poliéster, os resultados foram similares, seguindo a mesma tendência dos resultados teóricos. Entretanto, como já era esperado, os resultados não foram idênticos, uma vez que a simulação teórica possui um cenário ideal, sem considerar possíveis imprecisões no processo de medição ou variações no valor nominal dos parâmetros dos elementos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao professor Filipe Marangoni pelo auxílio no desenvolvimento prático do trabalho.

Referências

- BRAGA, N. C.;** *Como Funciona o Sistema de Ignição*. Disponível em:
<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6713-como-funciona-o-sistema-de-ignicao-art1342>
- CHARLES, K. A.; SADIKU, M. N.;** *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. 5. Ed. - Porto Alegre: AMG, 2013, p.223-318.
- OLIVEIRA, C. A.; ROSA, A.** *Mecânica de Automóveis: Motores de Combustão Interna: Álcool e Gasolina*. Santa Maria: CEP SENAI, 2003.