

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA / ENGENHARIA ELÉTRICA
Trabalho Final de Curso II

Hugo Ramos Barbosa de Oliveira

CONSTRUÇÃO DE UMA BOBINA DE TESLA ELETRÔNICA

Trabalho Final de Curso II como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás

BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc. Carlos Alberto Vasconcelos Bezerra – Orientador - ENG-PUC Goiás
Prof. MSc. Carlos Daniel de Souza Bezerra - IFG
Prof. MSc. Marcelo Antônio Adad de Araujo - ENG-PUC Goiás.

Goiânia, 08 de junho de 2021.

CONSTRUÇÃO DE UMA BOBINA DE TESLA ELETRÔNICA

HUGO R.B. DE OLIVEIRA, CARLOS ALBERTO VASCONCELOS BEZERRA

Abstract - This Final Course Work (TFC2) presents the study and construction of a tesla coil and the application of a HALF-BRIDGE inverter to control its resonance, in order to develop a prototype that can be used in applications for the study of Engineering in solving problems that use the tesla coil as the main element.

From a bibliographical survey on the subject, the main physical characteristics of the coil were dimensioned. With the aid of a computational tool, all the calculated values could be compared with the simulated ones and these, in turn, could be analyzed with the values measured after the physical construction of the coil. The choice of the static energy converter (HALF-BRIDGE Inverter) and the oscillator to control the resonance of the tesla coil proved to be extremely important since their applications made the operation of the coil occur without the need for the spark gap present in traditional coils.

The results presented and discussed allow us to glimpse the great application potential of the developed system.

Keywords - Tesla coil, resonant transformer, HALF-BRIDGE Inverter, oscillator.

Resumo – Este Trabalho Final de Curso (TFC2) apresenta o estudo e construção de uma bobina de tesla e a aplicação de um inversor HALF-BRIDGE no controle da ressonância desta, com a finalidade de se desenvolver um protótipo que possa ser utilizado em aplicações do estudo de Engenharia na solução de problemas que utilizam a bobina de tesla como principal elemento.

A partir de um levantamento bibliográfico sobre o tema, foram dimensionadas as principais características físicas da bobina. Com o auxílio de uma ferramenta computacional todos os valores calculados puderam ser comparados com os simulados e estes por sua vez puderam ser analisados com os valores medidos após a construção física da bobina. A escolha do conversor estático de energia (Inversor HALF-BRIDGE) e do oscilador para o controle da ressonância da bobina de tesla se mostraram de extrema importância uma vez que as aplicações destes fez com que a operação da bobina ocorre sem a necessidade do centelhador presentes nas bobinas tradicionais. Os resultados apresentados e discutidos permitem vislumbrar o grande potencial de aplicação do sistema desenvolvido.

Palavras chave - Bobina de Tesla, transformador ressonante, Inversor HALF-BRIDGE, oscilador.

I. INTRODUÇÃO

A compreensão de circuitos ressonantes é uma parte muito importante dentro da eletrônica. Em praticamente qualquer circuito eletrônico existe um oscilador e por mais rudimentar que este seja, ainda assim, este é responsável pelo correto funcionamento do circuito como um todo controlando o ligar e o desligar dos componentes a ele associado [1].

Objetivando uma melhor compreensão a respeito de circuitos osciladores, bem como a formalização do término do curso junto à instituição de ensino superior o presente trabalho abordou a construção de uma bobina de tesla que usa um oscilador eletrônico no lugar do usual spark gap das bobinas de tesla convencionais.

Fundamentando-se inicialmente em base matemática para estruturação das montagens, este estudo passou por mínimos problemas até sua completude variando de cálculos até componentes eletrônicos de complexo manuseio. Destarte, a maior parte do tempo foi destinada a montagem e a testes, bem como construções de circuitos eletrônicos.

Após compreendidos os problemas, soluções foram implementadas, componentes foram substituídos e testes foram feitos. Por fim, obteve-se o resultado esperado, ou seja, a bobina soltou as primeiras fugas de corona. Desta forma, é necessário que a posteriori sejam realizadas outras pesquisas, a fim de implementar os resultados favoráveis já obtidos neste trabalho.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Tratando-se de um transformador ressonante, com núcleo de ar no qual uma tensão alternada é injetada no primário, a fim de induzir no secundário uma tensão também alternada, promovida pela variação do campo magnético do primário, a construção de uma bobina de tesla eletrônica diferencia-se da bobina de tesla convencional em basicamente 2 pontos, sendo eles a tensão entregue ao primário e o método utilizado para se gerar a ressonância entre os enrolamentos [2].

Na bobina eletrônica, a tensão entregue ao primário é normalmente contínua e não passa de algumas centenas de volts, o método utilizado para se gerar a oscilação costuma ser o chaveamento de componentes semicondutores, tais como transistores (MOSFETs ou IGBTs).

Na bobina convencional, o primário normalmente recebe tensão alternada da ordem de alguns Quilovolts, e o método utilizado para se gerar oscilação é por tanque ressonante com centelhador.

A frequência de trabalho da bobina de Tesla depende da frequência de ressonância do enrolamento secundário (de sua indutância e capacitância), sendo esta da ordem de alguns Quilohertz.

A relação de tensão de entrada por tensão de saída é proporcional à relação de espiras entre os enrolamentos, no entanto, o nível de acoplamento entre as bobinas acaba influenciando diretamente na tensão entregue pelo secundário.

III. METODOLOGIA

O dimensionamento dos componentes para a montagem da bobina foi feito seguindo as fórmulas encontradas no site stolzweb [3] e com o auxílio do canal retro ciência [4] disponível no youtube. Com o auxílio do software *winTesla*, foram feitas algumas escolhas de parâmetros do projeto, uma vez que o programa permite que ao se parametrizar valores, respostas como nº de espiras e indutância sejam mostradas, assim, ao se utilizar da simulação alguns dados foram definidos.

Foi definido inicialmente para o enrolamento do secundário, os seguintes parâmetros:

- Enrolado em tubo de PVC de 75 mm;
- O número de espiras não superior a 1700;
- Fio esmaltado de 32 AWG.

O fio de 32 AWG foi escolhido por conta de seu diâmetro que permitiria colocar mais espiras por centímetro, o que por sua vez permitiria diminuir a altura da torre do secundário, além disso, também por conta do diâmetro, o fio é menos quebradiço e por isso de maior facilidade de manuseio.

Já para o enrolamento do primário, os parâmetros atribuídos foram:

- Número de espiras igual 10;
- Forma de construção cônica;
- Ângulo de abertura (θ) de 20° ;
- Condutor em fio rígido de $2,5 \text{ mm}^2$;
- Espaçamento entre as espiras de $0,006 \text{ m}$ ($0,24''$);
- Tensão de operação 300V .

A figura 1 representa como será a estrutura de montagem escolhida para a elaboração deste trabalho.

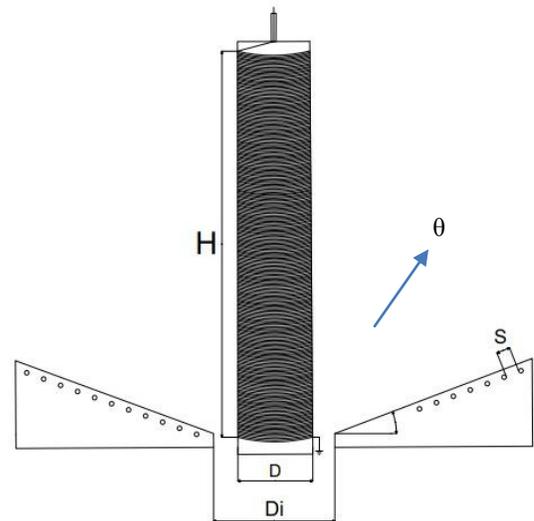


Fig. 1. Esboço representativo do design escolhido

Por se tratar de uma aproximação eletrônica, todos cálculos para dimensionar a bobina de Tesla começam a partir do secundário da bobina.

Dados complementares:

- Comprimento total do tubo: $0,539 \text{ m}$;
- Altura do secundário (H): $0,507 \text{ m}$ ($19,96''$);
- Diâmetro das espiras (D): $\varnothing_e = 0,075 \text{ m}$ ($2,95''$);
- Fio do secundário: 32 AWG, $\varnothing_2 = 0,0003 \text{ m}$ ($0,01181''$);
- Fio rígido: $2,5 \text{ mm}^2$; $\varnothing_1 = 0,001875 \text{ m}$ ($0,0738''$);
- Diâmetro inicial do primário (Di): $\varnothing_i = 0,09144 \text{ m}$ ($3,6''$).

Todos os cálculos feitos foram comparados com os resultados obtidos no simulador winTesla. Todas as fórmulas encontradas faziam uso de valores em polegadas.

A. Cálculo do secundário

Neste item, serão abordados os cálculos utilizados para encontrar os dados referentes à construção da bobina secundária da bobina de Tesla.

1) Cálculo do nº de espiras do secundário

A equação (1) fornece o número de espiras do secundário.

$$N_s = \frac{H}{\varnothing_2} \quad (1)$$

Assim, vem:

$$N_s = \frac{19,96}{0,01181} \rightarrow N_s = 1690,09 \text{ ou } N_s = 1690 \text{ espiras}$$

2) Cálculo da quantidade de fio necessária

A equação (2) é utilizada para se determinar o comprimento total do condutor do secundário.

$$\text{comprimento} = N * \pi * \emptyset e \quad (2)$$

Assim, vem:

$$\text{comprimento} = 1690 * \pi * 75 * 10^{-3} m$$

$$\text{comprimento} = 398,19 m$$

3) Cálculo da indutância L2

Sabendo-se o diâmetro $\emptyset e$ das espiras, é possível calcular a indutância L2, pelo uso da equação (3).

$$L2 = \frac{N^2 * \emptyset e^2}{9\emptyset e + 10H} \quad (3)$$

Desta forma, tem-se:

$$L2 = \frac{1690^2 * 1,475^2}{9 * 1,475 + 10 * 19,96} \rightarrow L2 = 29,18 \text{ mH}$$

4) Cálculo da auto capacitância de L2

Por se tratar de uma bobina grande a auto capacitância não pode ser desprezada. Esta, em conjunto com a indutância, são responsáveis pela frequência de oscilação da mesma. Com o uso da equação (4) foi possível determinar a auto capacitância (C_{self}) de L2.

$$C_{self} = 0,29H + 0,41R + 1,94 \sqrt{\frac{\emptyset e^3}{H}} \quad (4)$$

$$C_{self} = 0,29 * 19,96 + 0,41 * 1,475 + 1,94 \sqrt{\frac{1,475^3}{19,96}}$$

$$C_{self} = 7,17 \text{ pF}$$

5) Cálculo da frequência de ressonância de L2

Conhecendo-se os valores de L2 e C_{self} é possível pelo uso da equação (5) determinar a frequência de ressonância de L2.

$$F = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

$$F2 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L2 * C_{self}}} \quad (5)$$

$$F2 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{29,18 * 10^{-3} * 7,17 * 10^{-12}}}$$

$$F2 = 347,95 \text{ KHz}$$

B. Cálculo do primário

Com a quantidade de espiras atribuídas para o primário (N = 10) e sabendo que configuração deste seria do tipo cônica é possível determinar sua indutância e o comprimento do condutor para sua construção.

1) Cálculo da indutância do primário

Foram utilizadas as equações (6), (7) e (8) para determinar a indutância cônica L_C .

- Cálculo da indutância flat

$$L_{flat} = \frac{(N * (\frac{D_i + N * (\emptyset 1 + S)}{2}))^2}{8(\frac{D_i + N * (\emptyset 1 + S)}{2}) + 11 * N * (\emptyset 1 + S)} \quad (6)$$

$$L_{flat} = \frac{(10 * (\frac{3,6 + 10 * (0,01181 + 0,24)}{2}))^2}{8(\frac{3,6 + 10 * (0,01181 + 0,24)}{2}) + 11 * 10 * (0,01181 + 0,24)}$$

$$L_{flat} = 17,93 \text{ } \mu\text{H}$$

- Cálculo da indutância helicoidal

$$L_H = \frac{(N * \emptyset i)^2}{9\emptyset i + 10 * N * (\emptyset 1 + S)} \quad (7)$$

$$L_H = \frac{(10 * 1,8)^2}{9 * 1,8 + 10 * 10 * (0,01181 + 0,24)}$$

$$L_H = 7,82 \text{ } \mu\text{H}$$

- Cálculo da indutância cônica

A indutância cônica é determinada pela hipotenusa entre as indutâncias flat e helicoidal, logo:

$$L_C^2 = L_H^2 + L_{flat}^2 \quad (8)$$

$$L_C^2 = (L_H * \text{sen}\theta)^2 + (L_{flat} * \text{cos}\theta)^2$$

$$L_C = \sqrt{((7,82 * \text{sen } 20)^2 + (17,27 * \text{cos } 20)^2)}$$

$$L_C = 17,05 \text{ } \mu\text{H}$$

- Comprimento do enrolamento.

O comprimento do condutor é determinado utilizando a equação (9).

$$L = N * 2 * \pi * (\frac{\emptyset i + N(\emptyset 1 + S) \text{cos } \theta}{2}) \quad (9)$$

Assim, vem:

$$L = 10 * 2 * \pi * \left(\frac{3,6 + 10(0,0618 + 0,24) \cos 20}{2} \right)$$

$$L = 5,08 \text{ m}$$

2) Comparação entre valores calculados e simulados

No programa de simulação, foram adicionadas todas as variáveis utilizadas nos cálculos, de forma que os valores pudessem ser comparados. O resultado para a bobina secundária pode ser visto na tabela 1.

Tabela1 - Tabela de comparação de valores calculados e simulados para o secundário

Cálculos manuais	WinTesla	Erro (%)
$N_s = 1690 \text{ espiras}$	$N_s = 1622,8 \text{ espiras}$	3,97
Compr. = 398,19 m	Compr. = 382,01 m	4,06
$L2 = 29,18 \text{ mH}$	$L2 = 26,99 \text{ mH}$	7,5
$C_{self} = 7,17 \text{ pF}$	$C_{self} = 7,30 \text{ pF}$	1,81
$F2 = 347,95 \text{ KHz}$	$F2 = 356,09 \text{ KHz}$	2,33

A tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a bobina do primário.

Tabela 2 – Tabela de comparação de valores calculados e simulados para o primário

Cálculos manuais	WinTesla	Erro (%)
$N_p = 10 \text{ espiras}$	$N_p = 10 \text{ espiras}$	-
Compr. = 5,08 m	Compr. = 5,08 m	-
$L1 = 17,05 \mu\text{H}$	$L1 = 17,1 \mu\text{H}$	0,2

O erro foi calculado pela equação (10) levando em consideração que o valor obtido no simulador winTesla era a referência tanto para a tabela 1 quanto para a tabela 2.

$$Erro_{relativo} = \frac{Valor_{referência} - Valor_{calculado}}{Valor_{calculado}} \quad (10)$$

C. Relação entre primário e secundário da bobina

Para um sistema ideal, a relação de transformação descrita pela equação (11) pode ser utilizada para determinar a tensão induzida no secundário da bobina.

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \quad (11)$$

Desta forma, levando os valores na equação, vem:

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \rightarrow \frac{300}{10} = \frac{V_s}{1690} \rightarrow V_s = 50700 \text{ volts}$$

Sendo este o valor máximo de tensão no secundário caso o acoplamento fosse total.

Porém, o sistema não é ideal e depende principalmente do acoplamento entre as bobinas para que haja uma eficiente troca de energia entre primário e secundário, desse modo, a equação (11) não pode ser usada para realizar uma aproximação da tensão no secundário. Para isto a equação (12) foi utilizada levando em consideração as indutâncias do primário e secundário [2].

$$V_s = V_p * \sqrt{\frac{L2}{L1}} \quad (12)$$

Desta forma, vem:

$$V_s = 300 * \sqrt{\frac{29,18 * 10^{-3}}{17,05 * 10^{-6}}}$$

$$V_s = 12410,85 \text{ volts}$$

A construção da bobina de tesla foi realizada de modo a reproduzir a estrutura ilustrada na figura 1. Para isto os dados calculados e simulados foram utilizados na determinação da forma final desta. Na figura 2 é possível ver como ficou a construção final.

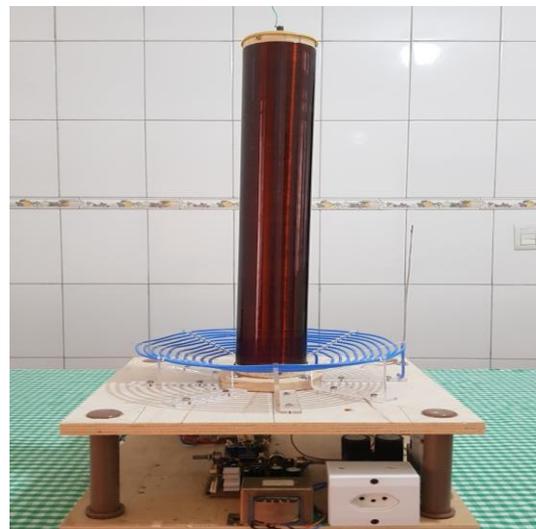


Fig. 2. Bobina de Tesla

As 1690 espiras do secundário foi enrolada utilizando um mecanismo em uma parafusadeira. Após enroladas, uma camada de verniz transparente foi passada no enrolamento para impedir que as espiras se soltassem. Para firmar a torre da bobina secundária, foram feitos tampões de madeira que foram fixados ao tubo. Na parte superior o tampão possui um parafuso central para uma possível utilização de toroide. Na parte inferior, o tampão se fixa a um disco de madeira que possibilita sua fixação por parafusos à base quadrada alta que por sua vez se fixa à base quadrada baixa por sustentadores de pvc. Esta última base possui “pezinhos” de borracha para um melhor acabamento.

Os sustentadores foram construídos com canos de PVC de 32mm que foram cortados com 15 cm de comprimento e fechados em ambas extremidades por tampões de modo que as bases pudessem se prender no cano.

A estrutura que sustenta e dá forma cônica a bobina primária foi feita em acrílico, tendo seu corte e dobra feitos por uma empresa especializada.

IV. RESULTADOS

Para verificar a operação da bobina de tesla, circuitos eletrônicos foram simulados e construídos de forma que os testes pudessem ser realizados e a operação da bobina verificada.

Os circuitos construídos foram: Fonte de alimentação, oscilador, Driver de MOSFET, Inversor Half-Bridge (Meia-ponte) e Retificador de potência.

Na figura 3 é possível ver como ficou montado o retificador de potência de entrada. Este retificador alimenta o inversor Half-Bridge que irá controlar a bobina de Tesla.

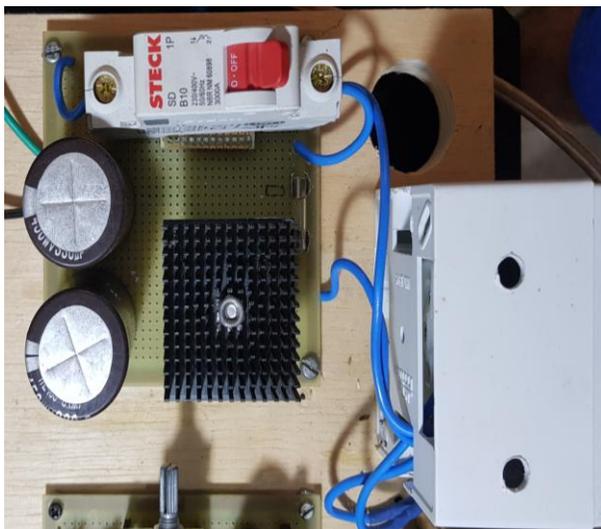


Fig. 3. Circuito de entrada

A figura 4 ilustra os circuitos eletrônicos montados de forma modular de modo a facilitar a manutenção e conexões entre os mesmos. Nesta figura é possível verificar os seguintes circuitos:

1-> fonte de alimentação;

2-> oscilador;

3-> Aterramento artificial;

4-> Driver de Mosfet;

5-> Etapa de áudio (Não utilizada).

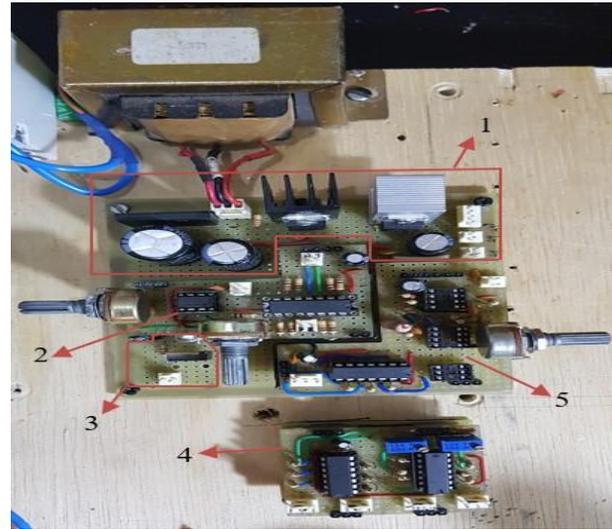


Fig. 4. Circuitos de controle

A. Fonte de alimentação

A fonte foi construída de forma a oferecer 3 níveis de tensão contínua, sendo 20V, 13.3V e 5.2V. Um trafo 220V/(18+18)V foi utilizado e para alcançar os níveis desejados de tensão foram utilizados reguladores de tensão do tipo LM317T. A figura 5 representa o diagrama elétrico do circuito construído.

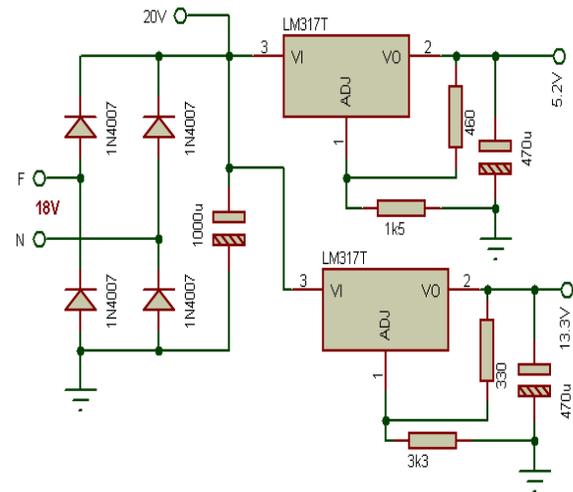


Fig. 5. Circuito fonte.

B. O oscilador

A figura 6 ilustra o diagrama elétrico do circuito oscilador construído utilizando o circuito integrado 555.

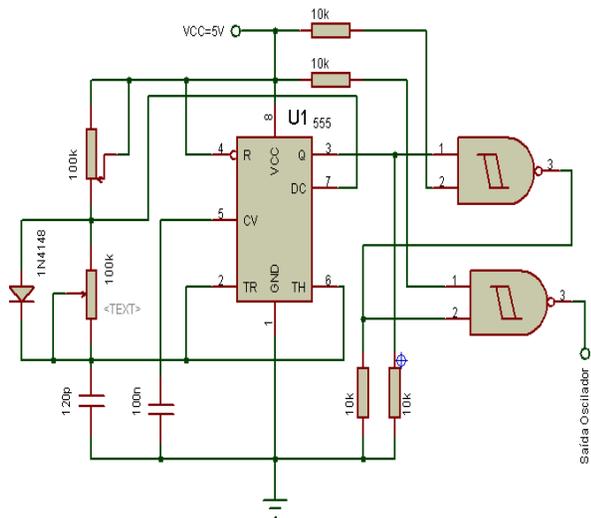


Fig. 6. O circuito oscilador.

Considerando a frequência de 95,42 KHz e um potenciômetro de 100K Ω , para determinar o valor do capacitor que irá compor o oscilador, foi utilizada a equação (13).

$$C = \frac{1}{1,1 * R * F} \quad (13)$$

Assim, vem:

$$C = \frac{1}{1,1 * 100 * 10^3 * 95,42 * 10^3}$$

$$C = 9,52 * 10^{-11} F \rightarrow C = 95,2 \text{ pF}$$

Neste caso, quando a resistência for máxima (100K Ω) a frequência de 95,42 KHz será alcançada. Para permitir um alcance um pouco maior, será adotado um capacitor C=120 pF que é um pouco maior o que permitirá frequências entre 75,75 KHz e 378,78 KHz (supondo a menor resistência 20 K Ω).

C. O Driver para MOSFETs

Para o acionamento dos MOSFETs do Inversor é necessário um Driver, pois estes possuem capacitâncias internas que precisam ser carregadas e descarregadas corretamente [7]. Para este trabalho foi desenvolvido um circuito de Driver conforme figura 7. Neste circuito foi introduzido um atraso necessário para a operação correta do inversor.

Este circuito permite que o sinal do oscilador seja utilizado para controlar os dois MOSFETs do inversor HALF BRIDGE. Para o acionamento dos MOSFETs do inversor está indicado na figura apenas o controle do MOSFET superior. Para o inferior deve ser acrescido mais um estágio com o opto acoplador, cuja entrada será QL.

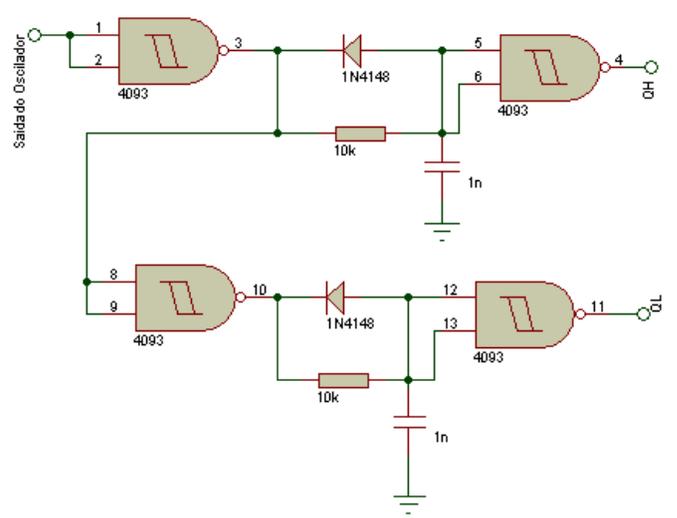


Fig. 7. Driver MOSFETs.

Na figura 8, é possível ver as formas de ondas obtidas nas entradas e saídas do Driver. Está ilustrado o atraso nestes sinais.

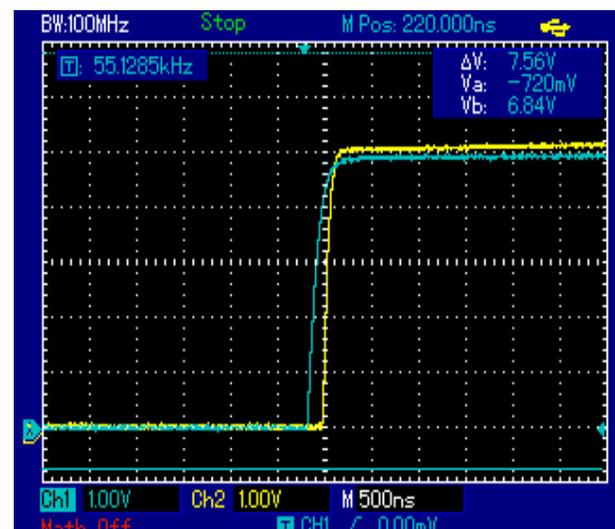


Fig. 8. Atraso nos sinais no Driver.

O traço azul representa a onda quadrada do oscilador enquanto que o traço amarelo representa a mesma onda na saída do Driver.

A figura 9 ilustra os sinais aplicados nos MOSFETs superior e inferior do Inversor HALF-BRIDGE, ficando assim nítido o

atraso nas duas chaves, não possibilitando que as mesmas estejam fechadas simultaneamente.

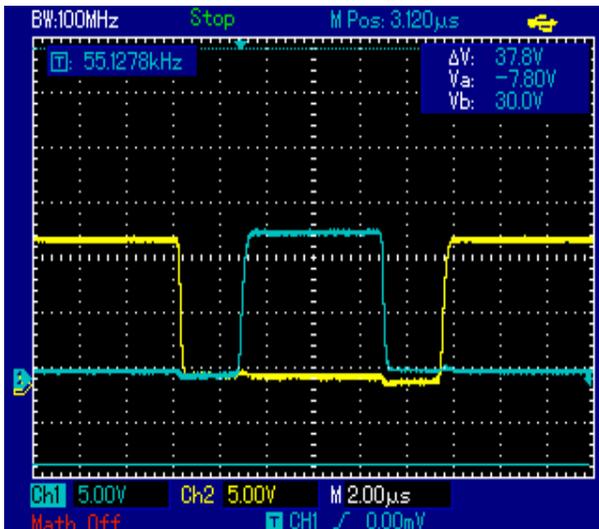


Fig. 9. Sinais de acionamento dos MOSFETs.

D. Retificador de entrada

A figura 10 apresenta o diagrama elétrico do retificador de entrada que alimentará o inversor HALF-BRIDGE. A proteção do circuito é realizada por um Disjuntor de 10A, com características de proteção destinada a semicondutores.

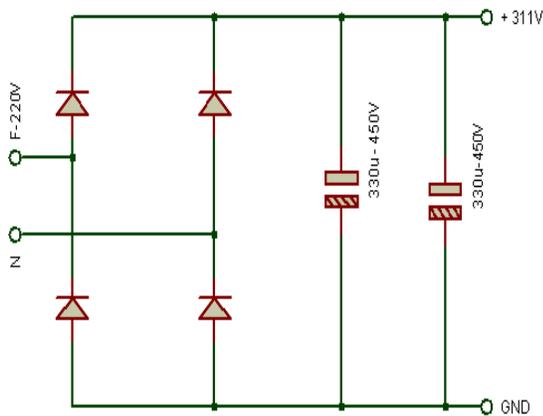


Fig. 10. Circuito retificador de entrada

E. Inversor HALF-BRIDGE

O diagrama elétrico do Inversor HALF-BRIDGE está ilustrado na figura 11. Neste circuito é possível verificar os dois MOSFETs superior e inferior. Este circuito alimenta o primário da Bobina de Tesla. Através do controle da frequência de chaveamento, o circuito entrará em ressonância.

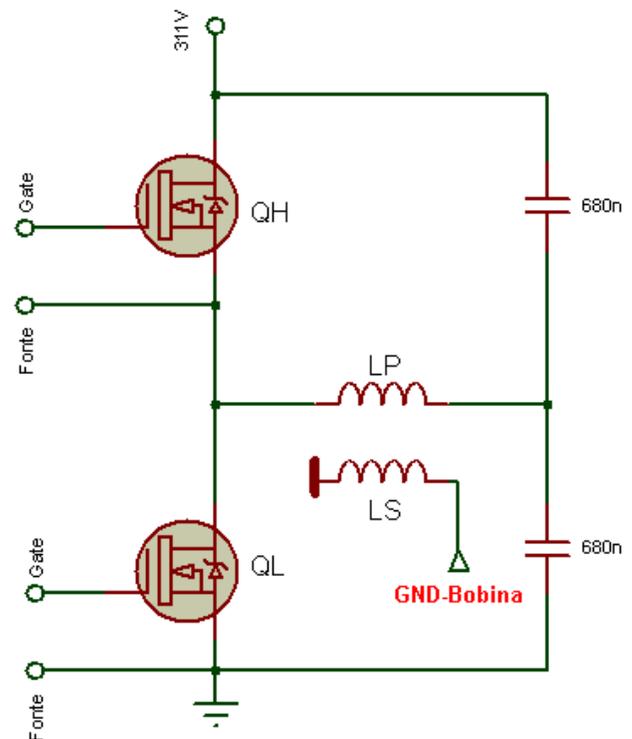


Fig. 11. Circuito de chaveamento.

F. A antena e o aterramento

A antena e o aterramento são 2 etapas peculiares. A antena que é possível de ser vista na figura 3 como um fio esticado em um dos cantos próximo ao enrolamento primário e distante de 20 cm do enrolamento secundário é conectada a um capacitor de 100nF cerâmico que é colocado apenas próximo à saída da onda quadrada (pino 3 do oscilador 555) sem ser conectado ao circuito.

O aterramento (GND-Bobina) por sua vez foi feito de forma artificial com o uso de um transistor TIP31C. A extremidade do enrolamento secundário foi ligada à base do transistor por ser o ponto de menor corrente e por ser uma região de dreno de corrente.

G. Valores medidos

As bobinas de tesla eletrônicas e as convencionais partilham de mesmo aspecto construtivo, desta forma, todo o conjunto matemático foi utilizado para dimensionar a bobina eletrônica. Após a construção de ambos enrolamentos, foi possível a aferição de seus valores reais, as indutâncias podem ser encontradas na tabela 3 e a capacitância pode ser encontrada na tabela 4. Os valores foram obtidos com o auxílio de um equipamento de precisão do tipo ponte LCR.

Tabela 3 – Tabela de comparação entre valores de indutância calculados e medidos

Indutância calculada	Indutância medida	Erro (%)
L1 = 17,05 μH	L1 = 25,9 μH	51,9
L2 = 29,18 mH	L2 = 31,12 mH	6,64

Para a tabela 3 o erro foi calculado utilizando-se a equação (11) sendo o valor de referência o medido.

Tabela 4 – Tabela de valores de auto capacitância medidos no secundário

Frequência de teste (KHz)	Capacitância medida
0,1	80,56 μF
0,12	56,27 μF
1	814,1 nF
10	8,18 nF
100	89,38 pF

Pode-se notar que com exceção de L2, os demais valores diferiram consideravelmente tanto da simulação quanto do valor calculado em especial a capacitância, que para nenhum dos valores medidos para diferentes frequências de teste disponíveis no instrumento de medição não aproximou dos valores anteriormente encontrados.

Para efeito de cálculo, foi considerada a aferição obtida para a frequência de 100 KHz, pois desse modo, uma maior frequência de ressonância é obtida e considerada como o limite superior para a construção do oscilador.

Utilizando a equação (5), tem-se:

$$F = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

$$F = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{31,12 * 10^{-3} * 89,38 * 10^{-12}}}$$

$$F = 95,42 \text{ KHz}$$

Depois de todos os testes realizados, foi possível perceber que o que de fato é importante no processo de construção da bobina é a frequência e a relação de indutâncias entre as bobinas primária e secundária. Tal relação foi feita observando-se a bobina construída em relação a uma mini bobina de tesla adquirida para comparação.

Em ambos os casos, a bobina secundária apresenta uma indutância que é 1000 vezes maior que a primária. Não necessariamente uma elevada tensão é necessária para que a bobina opere bem como foi possível notar em uma comparação feita em laboratório entre a bobina construída e a mini bobina. Sendo que a bobina construída (com 10 espiras de primário/1690 espiras de secundário) usava 12 volts com uma frequência de 95 KHz e a mini bobina (com 3 espiras de primário/450 espiras de secundário) usava 12 volts com uma

frequência de 4,3MHz. A minibobina conseguiu ser muito mais eficiente e gerar fugas de corona maior que a construída.

Por fim, foi possível notar que com a experiência do projetista em relação à construção da Bobina de Tesla, muitos parâmetros de projeto podem ser atribuídos de modo que o desempenho da mesma seja ótimo.

Após escolhidos aspectos como formato do enrolamento primário, altura da torre do secundário, entre outros, os seguintes pontos devem ser considerados:

1-> Se o enrolamento secundário tiver uma indutância maior que o do primário o sistema irá funcionar, porém, o que irá definir o quão maior ou menor a indutância do secundário deverá ser é a frequência utilizada, quanto maior a frequência, menor poderá ser a indutância do secundário;

2-> A frequência utilizada pode ser a calculada com os valores medidos de indutância e auto capacitância da bobina secundária, no entanto, se puder, com o auxílio de um gerador de frequência, teste qual frequência ficará melhor para o projeto;

3-> Quanto maior a frequência, menor a tensão necessária para promover fugas de corona na ponta do secundário;

4-> A seção do condutor para o enrolamento do secundário, deverá atender às necessidades do projeto, ou seja, se alcançar a indutância necessária.

H. O teste de funcionamento

Após ajustar todos os componentes e verificar a frequência que seria entregue aos MOSFETs, o sistema foi energizado para atestar seu funcionamento. Na figura 12 é possível visualizar uma pequena fuga de corona na ponta do secundário, bem como a intensidade do campo magnético ao redor, sendo este capaz de acender uma lâmpada fluorescente.

Em virtude da operação do inversor, em função do Driver utilizado, o ciclo de trabalho de operação da bobina foi muito reduzido, chegando a 30% do que poderia ser entregue na prática. Diante disto, a bobina conseguiu operar por um tempo reduzido.



Fig. 12. Teste de funcionamento.

Para controlar o aquecimento, os MOSFETs foram instalados em dissipadores de calor de alumínio e a estes foram anexados coolers para ajudar no resfriamento. Ainda assim, o sistema tinha que ser limitado para que não passasse de 280 W que era o limite do MOSFET utilizado.

V. PROBLEMAS ENCONTRADOS

A bobina de tesla requer aterramento do secundário, porém, uma grande quantidade de locais não possui aterramento e ou não o possuem de forma adequada. Para resolver tal problema foi implementado um aterramento artificial com o uso de um transistor polarizado.

Foi possível perceber em testes que a bobina não funciona bem sem a presença de uma antena. Ao se ligar a tensão para o circuito de chaveamento a bobina não oscilava, sendo sempre necessária uma aproximação para que começasse a funcionar. Com a antena o funcionamento se tornava instantâneo.

O Inversor HALF-BRIDGE, quando operando com uma carga altamente indutiva, apresenta sérios problemas na comutação dos MOSFETs, assim o Driver tem que está muito bem projetado para não ocorrer queimas de componentes.

A dissipação de calor nos MOSFETs deve ser muito bem controlada, pois o efeito térmico pode representar uma falha na operação do Inversor, danificando os componentes do mesmo.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma proposta de desenvolvimento de uma Bobina de Tesla eletrônica, que poderá ser utilizada em várias atividades do ensino da Engenharia. Inicialmente são desenvolvidos uma fundamentação teórica da Bobina de Tesla, que deu suporte para o projeto da mesma. A Bobina foi projetada seguindo uma rotina de cálculos definida na literatura que envolve o assunto e na sequência foi empregado um software específico para validar o projeto proposto. Após o projeto da bobina de Tesla, foi executada a construção da mesma, seguindo as orientações do projeto. As bobinas primárias e secundárias foram montadas em uma bancada didática com a finalidade de se executar a melhor forma de controle da mesma.

Após a montagem da Bobina de Tesla, foi realizado um estudo das possibilidades de controle desta planta. Chegou-se a conclusão que o conversor estático de energia que melhor se adaptava ao projeto era o Inversor HAL-BRIDGE. Então foi desenvolvido um estudo de aplicação do mesmo e dos Drivers de acionamento deste. O inversor foi montado, juntamente com o Driver proposto no trabalho. Para acionar a bobina foi empregado um oscilador astável com o circuito integrado 555. Este oscilador atende as faixas de frequências utilizadas no projeto. Para alimentar o inversor foi projetado e montado um retificador para operar com nível da tensão da rede elétrica. As fontes de alimentações necessárias ao projeto foram construídas com os níveis de tensões requeridas no mesmo. Após montado todo o sistema eletrônico necessário a operação do sistema, foi realizado testes na planta. A bobina de Tesla oscilou na frequência desejada, apresentando uma resposta satisfatória e atendendo os requisitos de projeto. O tempo de

operação da mesma pode ser aumentado melhorando o projeto em relação aos componentes eletrônicos utilizados. Par os MOSFETs do inversor, poderá ser utilizados módulos que atendam a demanda de potencia requerida.

Conclui-se então, que a sequência de projeto proposto neste trabalho de conclusão de curso, pode ser utilizado na fabricação de bobinas de Tesla Eletrônica para aplicações em engenharia.

O projeto pode ser melhorado aplicando uma realimentação no sistema, uma vez que o mesmo operou em malha aberta. A técnica de controle pode ser digitalizada, empregando microcontroladores.

REFERÊNCIAS

- [1] CHIQUITO, A; LANCIOTTI JR., F.J. **Bobina de Tesla: Dos circuitos ressonantes LC aos princípios das telecomunicações**. Rio de Janeiro, RJ: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, 2000;
- [2] TESLA, N.: CHILDRESS, D. H. **The fantastic inventions of Nikola Tesla**. Illinois: Adventures Unlimited Press. 1993;
- [3] Retrociência. **BOBINA DE TESLA (SGTC) – Parte 2 – Cálculos**. 2020. (24m49s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=PmWCO2UKILA&t=1115s>>. Acesso em: 09 set. 2020;
- [4] List of Tesla coil formulas. Stolzweb, 2020. Disponível em: <<http://teslacoils4christ.org/TCFormulas/TCFormulas.htm#spiral>>. Acesso em: 09 set. 2020;
- [5] Circuitos ressonantes LC. Newton C. Brags, 2020. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/almanaque/1368-alm18.html>>. Acesso em: 27 out. 2020;
- [6] Circuitos reativos. Aviação Marte. 2020. Disponível em: <<http://aviacaomarte.com.br/wp-content/uploads/2015/04/01-Circuitos-reativos.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2020;
- [7] HART, DANIEL W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos** – Porto alegre, RS: AMGH, 2012



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
PRO-REITORIA DE DESENVOLVIMENTO
INSTITUCIONAL

Av. Universitária, 1069 | Setor Universitário
Caixa Postal 86 | CEP 74605-010
Goiânia | Goiás | Brasil
Fone: (62) 3946.3081 ou 3089 | Fax: (62) 3946.3080
www.pucgoias.edu.br | prodin@pucgoias.edu.br

RESOLUÇÃO n°038/2020 – CEPE

ANEXO 3

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O estudante, Hugo Ramos Barbosa de Oliveira, do Curso de Engenharia Elétrica matrícula 2020.2.0038.0004-9, telefone: (62) 984206699 e-mail hugo170593@gmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei n° 9.610/98 (Lei dos Direitos do autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado CONSTRUÇÃO DE UMA BOBINA DE TESLA ELETRÔNICA, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto (PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 08 de junho de 2021.

Hugo Ramos Barbosa de Oliveira

Professor - Orientador - Carlos Alberto Vasconcelos Bezerra