

Desenvolvimento de experimento interdisciplinar para o ensino de Eletromagnetismo: Bobina de Tesla

Pedro M. Botelho, José B. Junior, Gabriel B. Martins, Antonio J. R. de Castro

¹Universidade Federal do Ceará (UFC) - Av. José de Freitas Queiroz, 5003, 63902-580
Cedro – Quixadá – Ceará - Brasil

Abstract. *This article deals with the development of a Tesla Coil, also known as a resonant transformer. This system is a device capable of generating a broad magnetic field and high voltages from low voltages. The main objective of this article is to explore how electromagnetic principles behave at high voltages and frequencies in practice, just as Tesla proposed in 1891.*

Resumo. *Este artigo trata do desenvolvimento de uma Bobina de Tesla, também conhecido como transformador ressonante. Este sistema é um dispositivo capaz de gerar um campo magnético amplo e altas tensões a partir de baixas tensões. O objetivo principal deste artigo é explorar como os princípios eletromagnéticos se comportam à altas tensões e frequências na prática, assim como Tesla propôs em 1891.*

1. Introdução

O uso simbólico da Bobina de Tesla como experimento para a demonstração dos conceitos do eletromagnetismo data da metade do século XIX, por volta de 1891, onde Nikola Tesla desenvolveu, sob diversas controvérsias comuns à época, uma máquina que transmitia energia elétrica utilizando o ar como condutor, por meio de um campo eletromagnético. Estudos atuais ainda elaboram na transmissão de energia sem fio com base em seus estudos, como (P. D. A. Aziz 2016).

Esse artigo elabora o projeto de uma Bobina de Tesla que funciona em corrente contínua, a baixas tensões, gerando a corrente alternada necessária para o funcionamento da bobina por meio de um circuito auxiliar, com o objetivo de demonstrar de forma visual e prática os conceitos da disciplina de Eletromagnetismo.

Nas próximas seções é dissertado sobre o projeto e construção do demonstrador didático, bem como problemas encontrados na construção e no uso deste projeto.

2. Trabalhos Relacionados

Sendo um projeto relativamente comum, muitos trabalhos contribuíram de forma relevante para aprimorar algum aspecto diferente da Bobina de Tesla.

Em M. B. Farriz 2010 é projetada uma Bobina de Tesla alimentada por corrente contínua, ao invés de corrente alternada (de forma semelhante a este artigo), o que simplifica a fonte de energia necessária para o funcionamento. Isso envolve a adaptação dos componentes e circuitos internos, de forma a operar de maneira eficiente usando corrente contínua, bem como em C. D. Ghilinfã 2015.

Em S. Rahman 2022 é projetada uma Bobina de Tesla em miniatura alimentada pelos 5 V fornecidos pela porta USB, reduzindo o consumo de energia e deixando o

projeto mais acessível, além de documentar os efeitos e comportamentos da bobina. O real desafio foi fazer com que a baixa potência fornecida pela porta USB permita que a bobina produza um campo magnético forte o suficiente.

3. Fundamentação Teórica

A construção de uma Bobina de Tesla envolve a utilização de vários princípios básicos da eletrônica e do eletromagnetismo. Entre estes, dois princípios fundamentais da física podem ser explorados: a **lei de Ampère-Maxwell**, que, de acordo com Halliday 2016, diz que “*cargas elétricas em movimento geram um campo magnético*”, e a **lei de Faraday-Lenz**, que, de acordo com Griffiths 2011, enuncia que “*um campo magnético que varia induz um campo elétrico*”, onde as cargas em movimento denotam uma **corrente elétrica**.

A priori, a principal característica relacionada à Bobina de Tesla é a **indutância eletromagnética**, dada em *henries* (H), associada à bobina (ou indutor, um condutor enrolado). Essa propriedade faz aparecer um campo magnético ao redor de um condutor quando a corrente que o atravessa varia, induzindo uma tensão em seus terminais. De acordo com (C. K. Alexander 2014), “*a tensão elétrica induzida é proporcional à variação de fluxo magnético ϕ* ”, sendo consequência direta da lei de Faraday. A polaridade da tensão induzida é determinada pela **lei de Lenz**, que afirma que “*a corrente induzida cria um fluxo que se opõe ao que produziu a corrente*”.

Um componente que denota uma configuração muito utilizada de bobinas é o **transformador**, que transfere energia elétrica de um circuito para outro por meio de duas bobinas: uma principal B_p , que envia energia elétrica para a outra bobina, a secundária B_s , por meio de acoplamento magnético. Dessa forma, uma corrente I_p que varia (CA), passa pela bobina primária, induzindo um campo magnético no núcleo do transformador, que por sua vez induz uma tensão V_s na bobina secundária, por meio de indutância mútua.

Circuitos que contém uma associação entre capacitores e indutores, circuito LC, podem ser submetidos a oscilações elétricas. A **frequência de ressonância**, ou frequência de oscilação, é a frequência na qual a energia é armazenada no capacitor e liberada para o indutor, e viceversa, criando oscilações de alta frequência no circuito, sendo f_s a frequência em que ocorre a **máxima transferência de potência**, onde o sinal de entrada é transferido de forma mais eficiente para o sistema elétrico.

Por fim, **MOSFET**, ou *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, é um dispositivo de 3 terminais: porta (G), dreno (D) e fonte (S), composto por um canal semicondutor. De acordo com A. Malvino 2016, “*a tensão de alimentação força os elétrons livres a circular da fonte para o dreno pelo canal*”, onde o terminal S é uma fonte de elétrons para o terminal D, que “drena” os elétrons. Esse fluxo de elétrons é controlado por uma tensão aplicada no terminal G. Vale ressaltar que, este dispositivo eletrônico tem muitas utilidades, podendo ser utilizado como um elemento chaveador, controlado por meio de uma tensão, ou como uma **fonte de corrente**, fornecendo uma corrente específica “independentemente” da tensão necessária.

4. Procedimentos Metodológicos

O objetivo deste artigo é explicitar os conceitos do eletromagnetismo de forma prática, por meio da Bobina de Tesla, de forma a facilitar a visualização de como os efeitos teóricos

do eletromagnetismo se mostram presentes, por meio de um experimento real, a altas frequências e tensões.

Para tanto, várias métricas foram levadas em consideração, como uma boa (e barata) construção do dispositivo, um circuito elétrico diminuto e efetivo, a utilização de uma interface de controle simples para o usuário e, é claro, o cunho didático.

4.1. Efeito Didático

Visando preencher a lacuna de experimentos práticos da disciplina, foi construído um demonstrador didático da Bobina de Tesla neste artigo, tornando possível a demonstração dos principais conceitos da eletricidade e do magnetismo de forma prática em sala de aula. Dessa forma o demonstrador didático torna-se um modelo prático para aplicação dos conteúdos (teóricos) vistos, da mesma forma proposta por Tesla.

Vários efeitos interessantes podem ser demonstrados com o uso da Bobina de Tesla: fenômenos da resistência, capacitância e indutância, e suas associações, bem como as leis de Ampère, Faraday e Lenz. Isso foi constatado quando o projeto foi apresentado ao final da disciplina de Eletromagnetismo, tornando visível os vários conceitos da disciplina, sendo um exemplo direto do assunto, e atraindo a atenção dos visitantes.

4.2. Projeto e Construção

O projeto divide-se em duas partes principais: uma **fonte de corrente chaveada** (usando um MOSFET de potência) à esquerda, que controla a quantidade de corrente provida ao **transformador**, à direita, como mostra a figura 1.

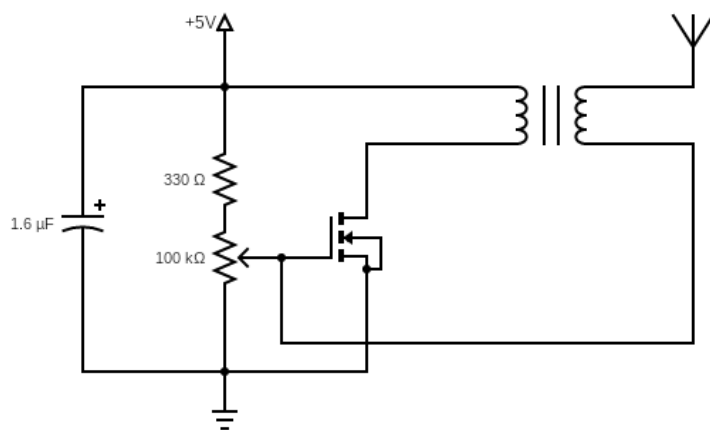


Figura 1. Diagrama esquemático do circuito da Bobina de Tesla

O projeto da Bobina de Tesla foi baseado em uma versão modificada da famosa configuração *Slayer Exciter*, semelhante à usada em S. Rahman 2022, que define um circuito auxiliar que opera em corrente contínua, provendo corrente alternada para o transformador (a bobina propriamente dita, com razão de 1:375) por meio de um ciclo de carga e descarga de capacitor. Essa configuração visa um baixo custo de produção e de consumo, sendo o circuito projetado para operar na faixa de 12 V a 24 V, fornecidos por uma fonte externa, com consumo de no máximo 25 W. Dessa forma evitam-se acidentes, como choques e incêndios.

4.3. Interface do Usuário

Sendo o dispositivo voltado para o uso do professor e dos alunos foi necessário encapsular o *hardware* em um recipiente de madeira, de forma a proteger o utilizador e o próprio dispositivo, ficando a bobina secundária acima da tampa do recipiente. Dessa forma, para realizar o controle da bobina foi integrada uma placa microcontrolada ao projeto, que controla um *relé* que liga e desliga o dispositivo ao pressionar de um interruptor.

O microcontrolador ainda fornece interfaces básicas ao usuário, como um *display* LCD 16x2 para mostrar informações do projeto, bem como um sinalizador sonoro. A placa escolhida foi o Arduino Uno, pelo seu baixo custo e para facilitar a replicação do projeto. O código utilizado, bem como os esquemáticos do projeto estão disponíveis em (GitHub 2023).

5. Resultados

Foram realizados experimentos e medições para avaliar o desempenho e as características elétricas da Bobina de Tesla. Para que o circuito tenha o funcionamento adequado o potenciômetro no terminal G do MOSFET precisou ser calibrado, de forma a polarizar corretamente o MOSFET e obter a frequência necessária para a operação da Bobina de Tesla. Dessa forma o circuito foi calibrado para operar com 16 V e 750 mA.

Os principais resultados são descritos a seguir, onde alguns resultados foram distintos dos resultados obtidos analiticamente, de forma idealizada. Porém, na prática os valores tendem a divergir, dependem do meio, das condições experimentais e estão sujeitos a erros humanos.

Tensão de alimentação: A bobina foi projetada para funcionar na faixa de 12 V a 24 V, fornecida por uma fonte de alimentação regulada, em regime de corrente contínua. Essa faixa de tensão é segura e permite obter descargas elétricas visíveis. Em 24 V a corrente pode ser maior que 1 A, ocasionando superaquecimento no MOSFET, podendo queimá-lo.

Relação do transformador: Com uma relação de 1:375, há uma amplificação significativa da tensão, sendo um elevador de tensão. Para a entrada de 16 V, com 750 mA, era esperado uma saída de 6 kV, com 2 mA. Porém, devido às perdas do MOSFET (em torno de 400 mV a 1 V), a tensão de saída ainda foi aceitável, a pouco mais de 5800 V, o suficiente para desencadear choques com as partículas do ar.

Frequência de operação: A frequência de operação do circuito esperada era de 4,19 MHz, porém foi percebida uma frequência de 5,56 MHz, após feito o ajuste fino no MOSFET. Isso se dá devido a efeitos indesejados, como: mal contato, interferência entre dispositivos eletromagnéticos, capacitância parasita do MOSFET, divisor de tensão da polarização do mesmo, o que influencia na tensão de saída, estando bastante ruidoso.

Amplio campo magnético: Como o campo magnético criado pela bobina é muito potente, bem como o campo elétrico, outros dispositivos próximos sensíveis ao campo magnético foram afetados durante o uso deste projeto, sofrendo os efeitos da **interferência eletromagnética**. O próprio circuito interno do dispositivo sofreu interferência, onde o Arduino ocasionalmente desligava, necessitando de uma blindagem.

Ligando uma lâmpada fluorescente: Lâmpadas fluorescentes tem seu gás interno excitado pelo campo elétrico e ligam, ao serem aproximadas da bobina. Isso é

possível porque a lâmpada fluorescente funciona com a ionização do gás argônio e vapor de mercúrio, onde o campo elétrico induzido pela bobina secundária gera eletricidade para a ionização desse gás, quebrando a rigidez dielétrica do ar e tornando-o um condutor.

Desse modo, um potente dispositivo eletromagnético foi construído, com resultados satisfatórios e baixos custos, sendo capaz de criar um campo elétrico intenso o suficiente para quebrar a resistência do ar, o ionizando e gerando pequenos choques com as partículas suspensas, gerando plasma visível a partir da antena na bobina secundária, fenômeno conhecido como **descarga corona**, sendo um efeito interessantíssimo.

6. Conclusão

Este trabalho apresentou o projeto e a construção de uma Bobina de Tesla, demonstrando resultados satisfatórios. A bobina foi capaz de realizar vários feitos notórios, como gerar descargas elétricas com as partículas do ar, podendo visualizar-se o plasma, bem como ligar uma lâmpada a distância, por meio do campo magnético.

Além desse experimento ter revolucionado os sistemas elétricos da época, o seu uso didático se mostra eficaz para demonstrar a importância dos efeitos eletromagnéticos, como os circuitos oscilatórios e os campos magnéticos. Foi demonstrado como a bobina primária atua sobre a secundária, e também como os capacitores e os indutores atuam em conjunto na criação de uma corrente alternada, trazendo a tona a configuração *slayer exciter*.

A apresentação da bobina atraiu olhares, principalmente por demonstrar um modo diferente de enxergar a eletricidade, pois além de conduzir eletricidade pelo ar, a Bobina de Tesla foi capaz de gerar pequenos raios azuis, sendo um fenômeno espetacular.

Referências

- A. Malvino, D. B. (2016). Eletrônica: Volume 1. *Mc Graw Hill Education*.
aaaa.
- C. D. Ghilintă, S. C. S. T. P. N. (2015). Portable audio-modulated tesla coil for demonstrative actions. *IEEE*.
- C. K. Alexander, M. N. O. Sadiku, S. M. M. (2014). Análise de circuitos elétricos com aplicações. *Mc Graw Hill Education*.
- GitHub (2023). Repositório do Projeto. https://github.com/boltragoons/tesla_coil.
- Griffiths, D. (2011). Eletrodinâmica. *Pearson*.
- Halliday, R. (2016). Fundamentos de física - eletromagnetismo. *LTC*.
- M. B. Farriz, A. Din, A. A. R. M. S. Y. J. M. H. (2010). A simple design of a mini tesla coil with dc voltage input. *IEEE*.
- P. D. A. Aziz, A. L. A. Razak, M. I. A. B. N. A. A. (2016). A study on wireless power transfer using tesla coil technique. *IEEE*.
- S. Rahman, S. K. (2022). The usb powered miniature tesla coil, with filament bulb, fluorescent lamp and discharge to body. *IEEE*.