

Projeto e Construção de uma Bobina de Tesla

Pedro M. Botelho, José B. Junior, Gabriel B. Martins, Joel 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 how a Tesla Coil, or resonant transformer, a device capable of generating a large magnetic field and high voltages from low voltages can be designed. The main objective of this article is to explore how electromagnetic principles behave at high voltages and frequencies in practice, as Tesla proposed in 1891.*

Resumo. *Este artigo trata de como pode ser projetada uma Bobina de Tesla, ou um transformador ressonante, um dispositivo capaz de gerar um campo magnético amplo e altas tensões a partir de baixas tensões. O objetivo central 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 simbólico uso do experimento da **Bobina de Tesla** para a demonstração dos conceitos do eletromagnetismo data da metade do século XIX, por volta de 1891, onde Nikola Tesla, que, sob diversas controvérsias comuns à época, desenvolveu uma máquina que transmitia energia elétrica utilizando o ar como um condutor direto, por meio de um campo eletromagnético. Seu objetivo era criar um novo sistema de transmissão de energia elétrica para longas distâncias, sem usar fios. Estudos atuais ainda elaboram na transmissão de energia sem fio com base em seus estudos, como [P. D. A. Aziz 2016].

Sua demonstração estimulou o uso da corrente alternada, caracterizado pela alternância no sentido da corrente elétrica de forma periódica, o que se opunha ao regime de condução utilizado na época, a corrente contínua, fortemente defendida por Thomas Edison, dando início ao que conhecemos por **guerra das correntes**.

A Bobina de Tesla contribuiu substancialmente para desenvolvimento do rádio e de outros meios de comunicação que utilizam o ar como meio de propagação de informações. Nikola Tesla é tido então como um dos fundadores do rádio, descobrindo no final do século XIX, em seu laboratório, que a sua bobina poderia transmitir e receber ondas de rádio. O projeto original de Tesla não era perfeito, tendo atualmente construções mais avançadas, o que é o foco do estudo em [Craven 1997], que busca melhorar a performance da Bobina de Tesla e conseguir efeitos mais espetaculares

Esse projeto, então, tem como objetivo demonstrar de forma visual e prática os conceitos do eletromagnetismo, podendo ser usado em sala de aula, pelo professor, para exemplificar os conceitos ensinados. O circuito construído é alimentado por corrente contínua, à baixas tensões, gerando uma corrente alternada para o transformador por meio de um circuito auxiliar.

Nas próximas seções será dissertado sobre o projeto e construção da Bobina de Tesla, de forma a criar um demonstrador dos princípios básicos do eletromagnetismo, bem como problemas encontrados na construção e no uso deste projeto.

2. Trabalhos Relacionados

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

O trabalho [M. B. Farriz 2010] tem como foco desenvolver uma Bobina de Tesla alimentada por corrente contínua (diferentemente do projeto original que usa corrente alternada), de forma semelhante à este artigo, o que simplifica a fonte de energia necessária para o funcionamento. Isso envolve a adaptação dos componentes, e circuitos internos, do sistema da bobina, de forma a operar de maneira eficiente usando corrente contínua.

Em [C. D. Ghilintă 2015] uma Bobina de Tesla musical é projetada para produzir correntes elétricas que correspondem à notas musicais específicas. Isso permite que a bobina crie sons audíveis por meio da modulação das faíscas elétricas geradas. Além disso, são exploradas técnicas de controle e sincronização para que os sons emitidos pela bobina estejam em harmonia com a música selecionada. Esse artigo fornece bases para uma futura melhoria deste projeto.

Em [S. Rahman 2022] uma miniatura da Bobina de Tesla é projetada para ser alimentada apenas pelos 5V fornecidos pela porta USB, de forma a deixar o projeto mais acessível, já que consome menos energia e é mais barata, além de documentar os efeitos e comportamentos da bobina. O real desafio é fazer com que a baixa tensão, e corrente, da porta USB produza um campo magnético forte o suficiente.

3. Fundamentação Teórica

A construção de uma Bobina de Tesla envolve vários princípios básicos da eletrônica, e por extensão, da física, princípios esses que foram inseridos no projeto por meio de componentes elétricos, usados na construção do circuito que controla a bobina.

3.1. Leis Fundamentais do Eletromagnetismo

O eletromagnetismo aborda dois princípios fundamentais da física: 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** i , em ampère (A), que pode ser descrita como um fluxo de carga q por unidade de tempo t , como denota a equação 1, ou a partir da densidade de corrente \vec{J} (consequentemente também da velocidade a deriva \vec{v}_d e da densidade de carga ne) como mostra as equações 2 e 3:

$$i = \frac{dq}{dt} [\text{A}] \quad (1)$$

$$i = \int \vec{J} \cdot d\vec{A} [\text{A}] \quad (2)$$

$$\vec{J} = (ne)\vec{v}_d \quad (3)$$

Nas equações 4 e 5 estão as formas integrais e diferenciais da lei de Ampère-Maxwell, que relacionam o campo magnético \vec{B} com a corrente elétrica i envolvidas por uma curva *amperiana*.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(i_c + \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}) \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \quad (5)$$

Já nas equações 6 e 7, que são as formas integrais e diferenciais da lei de Faraday-Lenz, relaciona-se o campo elétrico \vec{E} induzido com a variação do fluxo magnético ϕ_B .

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7)$$

Com base nas equações acima, e na lei de Faraday, é possível deduzir a fórmula da **força eletromotriz** ε , ou fem, em volts (V) indicada na equação 14, que, de acordo com [Griffiths 2011], é o “*trabalho exercido pelo campo elétrico para levar cargas de um ponto a outro*”. Outra forma de escrever a força eletromotriz, ou **tensão elétrica** v , está denotada na equação 9.

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (8)$$

$$v = \frac{dw}{dq} [\text{V}] \quad (9)$$

Essas duas leis relacionam o campo magnético com o campo elétrico e são fundamentais para o entendimento de alguns fenômenos físicos envolvidos ao utilizar-se de componentes elétricos específicos, como será visto na seção 3.2.

3.2. Componentes Elétricos

Os componentes usados em circuitos elétricos são aplicações reais dos efeitos eletromagnéticos vistos na seção 3.1, construídos a partir de modelos físicos que buscam introduzir ao mundo real os efeitos elétricos teóricos estudados.

3.2.1. Gerador

O **gerador**, também conhecido na engenharia como **fonte de tensão**, mantém uma tensão elétrica v , ou uma diferença de potencial (DDP), entre seus terminais, fornecendo a corrente necessária de forma a manter a tensão predeterminada (obviamente, há uma corrente máxima que o gerador pode fornecer). O símbolo utilizado para indicar o gerador

(bem como os símbolos de outros componentes) está indicado na figura 1.a, retirada de [M. N. O. Sadiku 2013], está o símbolo usado na engenharia, e na figura 1.b, onde está o símbolo usado na física. Na figura 1.c está um exemplo real de gerador, uma pilha de 3V.

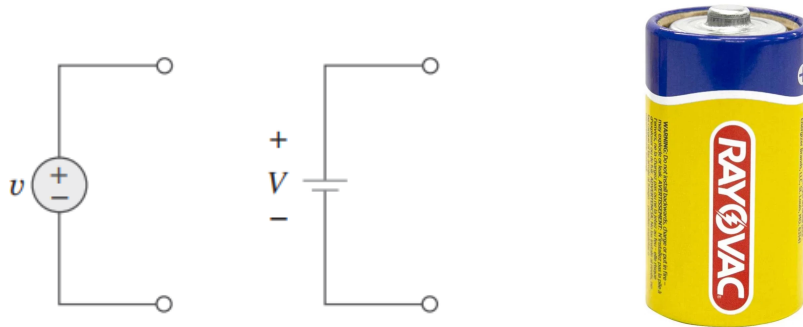


Figura 1. (a) e (b) Símbolos do gerador elétrico (c) Fonte de tensão real de 3V

O gerador, então, fornece energia elétrica, tendo como importante característica o fornecimento de **potência elétrica** p , que indica a velocidade com que se consome, ou fornece (indicado pelo sinal negativo), energia w , em watts (W). A equação da potência está indicado na equação 10 (não levando em conta as perdas e o desgaste):

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = vi \text{ [W]} \quad (10)$$

3.2.2. Resistência

De acordo com [M. N. O. Sadiku 2013], “*Os materiais geralmente possuem um comportamento característico de resistir ao fluxo de carga elétrica [...] conhecido como **resistência***”, onde cada material pode resistir mais ou menos à corrente. A resistência de um material depende de sua geometria: área (A), comprimento (l), bem como de sua resistividade ρ , própria de cada material, como visto na figura 2.a. A equação 11, também conhecida como segunda lei de Ohm, descreve a resistência de um material cilíndrico, dada em ohms (Ω).

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ [\Omega]} \quad (11)$$

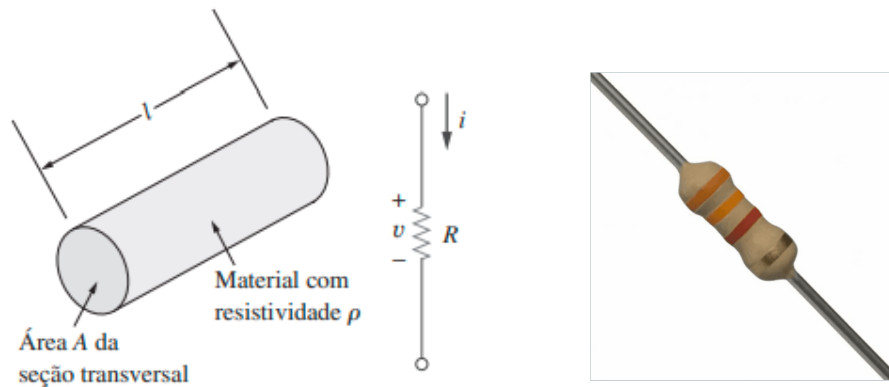


Figura 2. (a) Resistência de um condutor (b) Símbolo do resistor (c) Resistor real

O componente que modela esse comportamento é o **resistor**, que tem seu símbolo representado na figura 2.b, que pode ser usado em esquemáticos para representar a resistência de alguma parte do projeto, ou realmente representar um resistor real, como mostra a figura 2.c, que limita a corrente que passa pelo componente com uma certa resistência R . A equação 12, também conhecida com (primeira) **lei de Ohm**, relaciona a tensão v nos terminais do resistor com a sua resistência R e com a corrente i que passa pelo resistor.

$$v = Ri \text{ [V]} \quad (12)$$

3.2.3. Indutância

A priori, o principal fundamento relacionado à Bobina de Tesla é a **indutância eletromagnética**, dada em *henries* (H) que é a propriedade de um condutor que faz aparecer um campo magnético ao seu redor quando a corrente elétrica varia, induzindo uma fem em seus terminais, uma consequência direta da lei de Faraday. Comumente associada à **bobina** (ou indutor, um condutor enrolado, como mostra a figura 3.c) que armazena energia no campo magnético criado.

A indutância L , dada pela equação 13, está relacionada à geometria do componente, como a quantidade de voltas (n), a área da seção central (A), o comprimento da bobina (l) e a permeabilidade do núcleo (μ_0), como mostra a figura 3.a.

$$L = \frac{\mu_0 n^2 A}{l} \text{ [H]} \quad (13)$$

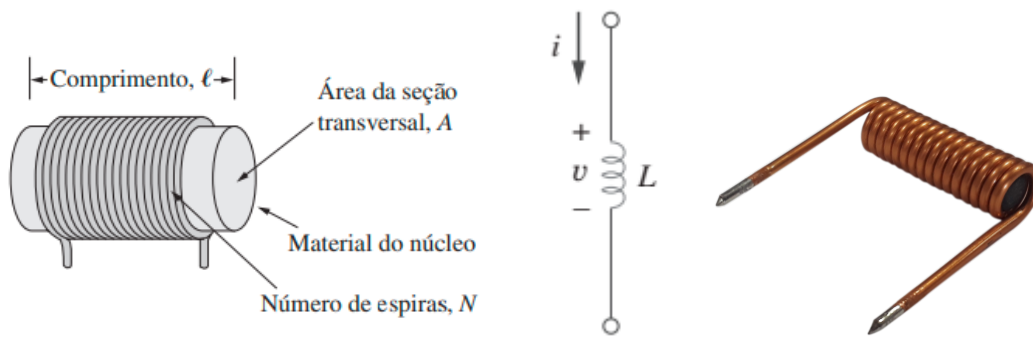


Figura 3. (a) Modelo de um indutor (b) Símbolo do indutor (c) Indutor real

De acordo com [M. N. O. Sadiku 2013], “*Indutância (L) é a propriedade segundo a qual um indutor se opõe à mudança do fluxo de corrente através dele*”, ou seja, quando há variação na corrente elétrica i que passa pela bobina, há uma variação no fluxo do campo magnético ϕ , que por sua vez irá induzir uma fem ε em seus terminais, como mostra a figura 3.b. Essa relação está representada pela equação 14:

$$\varepsilon = L \frac{di}{dt} \text{ [V]} \quad (14)$$

A lei de Faraday, conforme vista anteriormente, se aplica perfeitamente ao indutor. De acordo com [C. K. Alexander 2014], “*a tensão ε induzida em um circuito é proporcional à variação de fluxo magnético ϕ através do circuito*”, como mostra a figura 4. A polaridade da fem induzida no indutor, e o sentido da corrente são determinados pela **lei de Lenz**. Ainda de acordo com [C. K. Alexander 2014], “*a lei de Lenz afirma que a corrente induzida cria um fluxo que se opõem ao que produziu a corrente*”. Essas duas leis juntas são expressas pela equação 15, onde n é o número de espiras da bobina:

$$\varepsilon = -n \frac{d\phi}{dt} \text{ [V]} \quad (15)$$

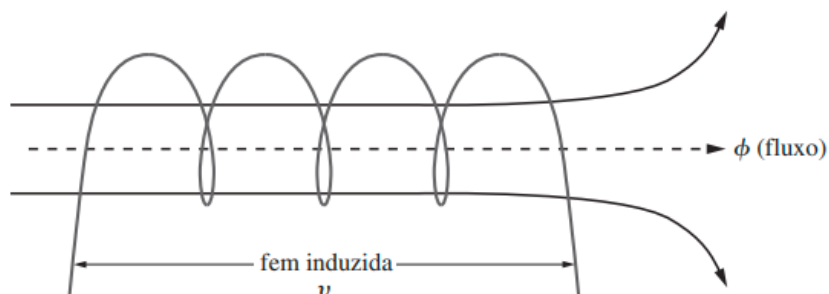


Figura 4. Fluxo magnético produzido através de uma bobina de n espiras

O indutor, então, pode ser usado para modelar um efeito de indutância em um circuito, por meio de seu símbolo, como mostra a figura 3.b, bem como denotar uma bobina real.

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 (como mostra a figura 5.a): uma principal, que envia energia elétrica para a outra bobina, a secundária, por meio de acoplamento magnético. Dessa forma, uma corrente I_p que varia (CA), que passa pela bobina primária B_p , induzindo um campo magnético no núcleo do transformador, que por sua vez induz uma fem V_s na bobina secundária B_s , por meio de indutância mútua. A fórmula da razão $N_p:N_s$ do transformador está denotada pela equação 16:

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s} \quad (16)$$

A quantidade de voltas nas bobinas do transformador dita como a energia elétrica é transmitida de B_p para B_s . A frequência do sinal de saída é a mesma do de entrada, bem como a potência, que é conservada, sendo as potências $P_p = P_s$, conforme a **lei da Conservação de Energia**. Dessa forma, como diz a equação 16, se a tensão aumenta, a corrente diminui (elevador de tensão), e vice versa (abaixador de tensão). O símbolo do transformador está denotado na figura 5.b, sendo um componente com quatro terminais: dois de entrada (em B_p) e dois de saída (em B_s).

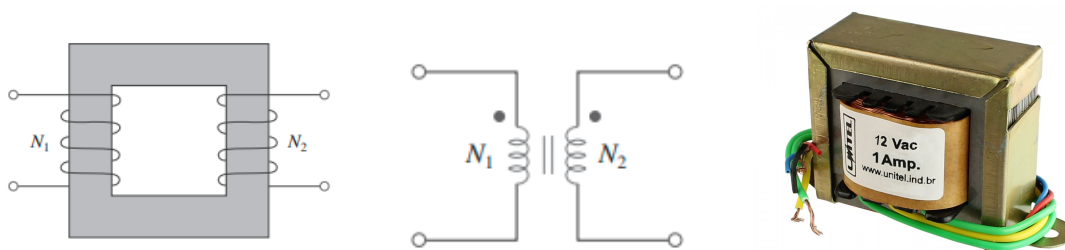


Figura 5. (a) Modelo de um transformador (b) Símbolo do transformador (c) Transformador real

3.2.4. Capacitância

O fenômeno da **capacitância** é outra propriedade relacionada ao fato de poder armazenar cargas em um campo elétrico. Essa grandeza indica o grau da capacidade que um dispositivo tem de armazenar cargas. O componente que possui capacitância como sua característica principal é o **capacitor**, que armazena cargas em um campo elétrico gerado pela polarização de placas paralelas separadas por um dielétrico, como mostra a figura 6.a. A capacitância C , então, depende da geometria do dispositivo, podendo ser de placas paralelas, cilíndrico (como mostra a figura 6.d) ou esférico.

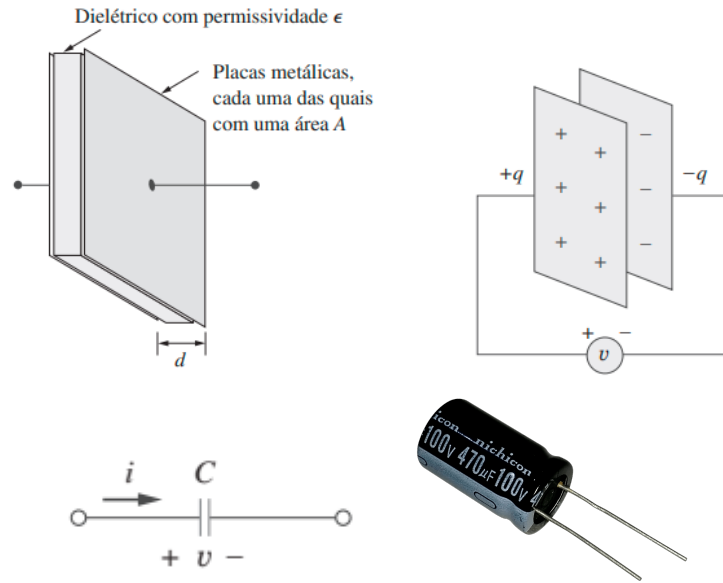


Figura 6. (a) Modelo de um capacitor (b) Polarização de um capacitor (c) Símbolo do capacitor (d) Capacitor real

O capacitor, com o símbolo denotado na figura 6.c, pode ser usado para representar um efeito de capacitância (como uma capacitância parasita gerada por dois condutores paralelos), ou para modelar um capacitor real, como mostra a figura 6.d. Quando uma corrente passa pelo capacitor cargas positivas são acumuladas em uma de suas placas, enquanto cargas negativas são acumuladas na outra, como mostra a figura 6.b.

A equação 17 determina a corrente i que flui pelo capacitor, que depende da variação da tensão v em seus terminais, que por sua vez depende da quantidade de cargas Q armazenadas em suas placas, como mostra a equação 18. Dessa forma, a medida que o capacitor é carregado (cargas são dispostas em suas placas) a tensão em seus terminais cresce.

$$i = C \frac{dv}{dt} \text{ [A]} \quad (17)$$

$$V = \frac{Q}{C} \text{ [V]} \quad (18)$$

Circuitos que contenham uma associação entre capacitores e indutores (ou circuito LC) podem ser submetidos a oscilações da energia elétrica. 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 vice versa, criando oscilações de alta frequência no circuito, sendo f_s a frequência em que ocorre a **máxima transferência de potência** do circuito, onde o sinal de entrada é transferido de forma mais eficiente para o sistema elétrico, sendo dada pela equação 19:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad (19)$$

3.2.5. Transistor de Efeito de Campo

O **MOSFET**, ou *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, é um dispositivo de três terminais: porta (G), dreno (D) e fonte (S), composto por um canal semicondutor, como mostra a figura 7. De acordo com [A. Malvino 2016], “a tensão de alimentação força os elétrons livres a circular da fonte para o dreno”, 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, que geralmente é maior que 0,5V, para um MOSFET de canal N (dependendo da operação). Para o canal P esse limiar de tensão é negativo. Os símbolos do MOSFET para os canais N e P são mostrados nas figuras 7.a e 7.b.

Esse dispositivo tem muitas utilidades na eletrônica, podendo ser utilizado como um elemento chaveador controlado por meio de uma tensão. O MOSFET geralmente é utilizado como uma **fonte de corrente** (fornecendo uma corrente específica “independentemente” da tensão necessária), onde uma fonte de tensão é conectada ao terminal dreno, e uma carga é conectada ao terminal fonte, de forma que a fonte é controlada pela tensão aplicada em seu terminal porta.

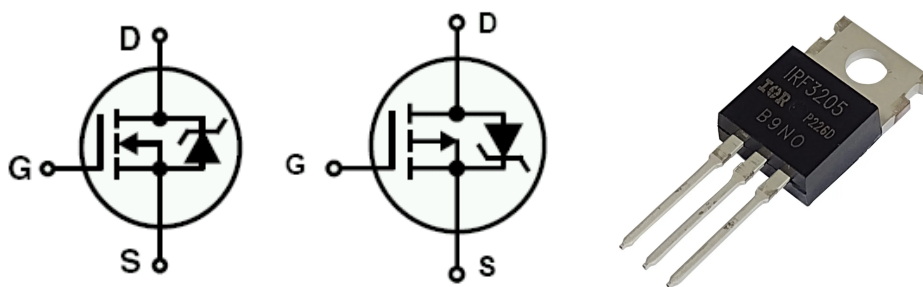


Figura 7. (a) Símbolo do MOSFET Canal N (b) Símbolo do MOSFET Canal P (c) MOSFET real

4. Procedimentos Metodológicos

Como dito anteriormente, o objetivo deste artigo é explorar os conceitos do eletromagnetismo e explicitá-los de uma forma prática, por meio da Bobina de Tesla. Dessa forma, o objetivo geral desse experimento é mostrar como os efeitos teóricos do eletromagnetismo se mostram presentes, por meio de um experimento real, a altas frequências e tensões.

Várias métricas são levadas em consideração, como uma boa (e barata) construção do dispositivo, um circuito elétrico simples e efetivo, a utilização de um sistema embarcado para controle via *software* e, é claro, o cunho didático na demonstração da teoria por meio da experiência. Essas métricas serão discutidas nas próximas seções.

4.1. Efeito Didático

Visando preencher a lacuna de experimentos práticos da dinâmica de ensino dada em aula, é possível demonstrar os principais conceitos da eletricidade e do magnetismo de forma prática usando a Bobina de Tesla construída nesse projeto, usando-a em sala de aula como modelo prático para aplicação dos conteúdos (teóricos) vistos, da mesma forma como foi proposto por Tesla.

Vários efeitos interessantes podem ser demonstrados com o uso da Bobina de Tesla construída neste projeto: fenômenos da resistência, capacitância e indutância, e suas associações, bem como as leis de Ampère, Faraday e Lenz. Esses experimentos podem ser feitos com a utilização deste dispositivo e algum dispositivo de medição externo, como osciloscópio ou multímetro, caso precise.

Dito isso, que fique reiterado que, por mais que o principal objetivo desse projeto não seja esse, ainda está entre os objetivos do projeto, sendo um derivado direto do objetivo principal.

4.2. Projeto

A idealização desse projeto teve pontos de vista voltadas para a engenharia e para a física, já que a construção de um dispositivo desta natureza necessita tanto da teoria quanto da prática. Dessa forma o projeto foi fortemente baseado na eletrônica e análise de circuitos, para o circuito que controla a quantidade de corrente a passar para bobina principal, bem como a utilização da análise dos fenômenos físicos para a descrição do comportamento da bobina, como o campo magnético gerado.

Sendo o objeto de estudo deste artigo uma integração de áreas da física e da eletrônica, nada mais justo que levar em consideração elementos destas duas áreas no projeto. Não ironicamente, o projeto divide-se em duas partes: a bobina em si (o transformador), que irá gerar o campo magnético, onde os conceitos físicos são melhores aplicados, e um circuito que irá controlar a bobina, onde entram os conceitos do mundo da eletrônica (que por sua vez são conceitos da física aplicados no contexto dos circuitos).

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 transformador ressonante simples que opera com alimentação em corrente contínua, provendo corrente alternada para o transformador por meio de um circuito auxiliar. Na figura 8 se encontra o diagrama esquemático do circuito.

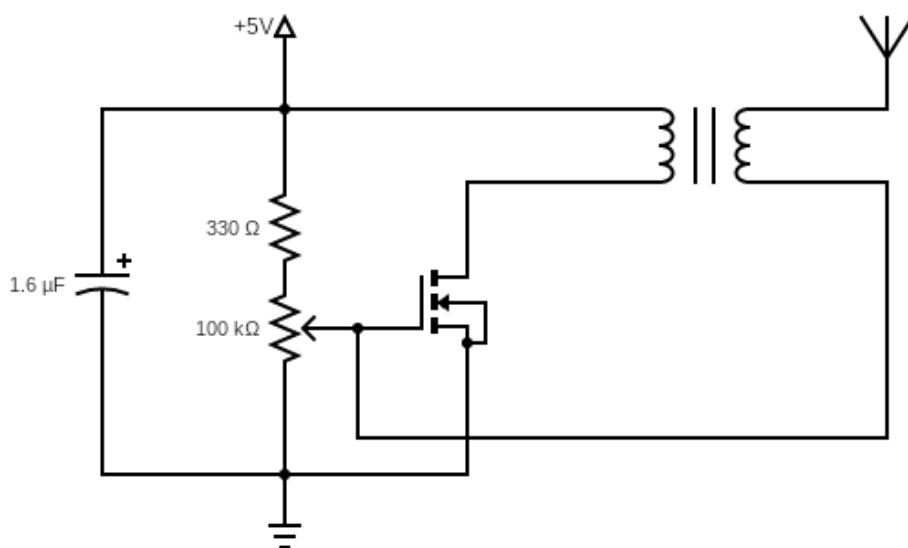


Figura 8. Diagrama esquemático do circuito da Bobina de Tesla

A configuração utilizada visa um baixo custo de produção e baixo consumo. O circuito foi projetado para operar na faixa de tensão de 12V a 24V (fornecidos por uma fonte externa), com consumo de no máximo 25W. Isso tem vários benefícios, como baixas tensões e correntes, evitando acidentes, como choques e incêndios, bem como baixos custos para manter o dispositivo ligado.

É possível ver que o circuito se divide em duas partes principais: uma **fonte de corrente chaveada** à esquerda, e o **transformador** em si à direita. Nas próximas seções será elaborado sobre estas estruturas, bem como sobre cada componente do circuito.

4.2.1. Transformador

O elemento mais fundamental da Bobina de Tesla é o elemento indutivo: o transformador. O experimento chama-se “Bobina de Tesla”, mas a construção deste projeto na verdade utiliza-se de duas bobinas, a primária, a menor, e a secundária, a maior, que por sua vez é envolvida pela menor, de forma a construir um transformador. Portanto, o nome dado ao experimento, no singular, se refere a bobina maior, a secundária.

Neste transformador a bobina principal transmite energia para a bobina secundária, por meio de acoplamento magnético. Como visto na seção 3.2.3, uma corrente alternada que passa pela bobina primária irá induzir uma tensão na bobina secundária, mantendo a tensão. O projeto da Bobina de Tesla necessita de uma tensão de saída muito alta, o que necessita de um transformador elevador de tensão com uma razão N_s/N_p muito grande.

Com uma alimentação na faixa de 12V a 24V, com a bobina principal com apenas uma espira e a secundária com muitas espiras (de 200 a 400) é possível aumentar muito o nível de tensão. Para conseguir sinais a altas frequências, e uma alta tensão de saída, foram acatados valores de indutância de $80nH$ para bobina primária, e $600\mu H$, para a bobina secundária.

Para o projeto, a bobina secundária tem 375 voltas (logo uma razão de 1:375, de acordo com a equação 16), de forma a conseguir uma tensão de saída 375 vezes maior, de aproximadamente 6000V, ou 6kV (com uma corrente 375 vezes menor, chegando a menos de 2mA), criando 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**.

4.2.2. Fonte de Corrente Chaveada

Muitas iterações da Bobina de Tesla se utilizam de um transformador adicional (abaixador de tensão), que é ligado diretamente à rede elétrica residencial e à Bobina de Tesla em si, de forma a operar com a corrente contínua fornecida pela tomada. Esse projeto acaba sendo mais caro e mais perigoso, já que envolve altas correntes.

Nesta iteração da Bobina de Tesla é utilizado um **circuito de drive**, que irá controlar o fornecimento de energia ao transformador. Esse circuito obtém energia em regime

corrente contínua de uma fonte de alimentação, e, por meio de um ciclo de carga e descarga de um capacitor, emite um sinal em corrente alternada para a bobina principal, induzindo uma fem na bobina secundária.

Como é possível ver na figura 8 há um capacitor de $1.65\mu F$ em paralelo com a bobina primária, de indutância de $80nH$, estruturando um circuito ressonante LC de alta frequência, conforme falado na seção 3.2.4. O MOSFET, polarizado pelos resistores na base (onde é feita posterior sintonização), atua com um interruptor de alta frequência, ligando e desligando o circuito.

Quando o MOSFET está conduzindo, a corrente flui pela bobina primária e pelo capacitor, carregando o capacitor. Essa energia é armazenada no capacitor enquanto o MOSFET está ligado. Quando o MOSFET está em corte, a energia armazenada no capacitor é liberada novamente para a bobina primária. Essa oscilação gera um campo magnético que se estende até a bobina secundária, onde uma “antena” está posicionada (qualquer ponta de condutor solta age como uma antena), induzindo tensões de até 6000V na bobina secundária, gerando efeitos visuais fantásticos por meio da antena!

Dessa forma, o circuito auxiliar irá criar um sinal de corrente alternado, chaveando o MOSFET, que por sua vez entrega energia elétrica para o transformador elevador de tensão. É importante salientar que um MOSFET de potência é melhor aplicado, já que aguenta maiores níveis de tensão, corrente e principalmente frequência. De todo modo, pela simples construção e entendimento essa configuração é amplamente usada.

4.3. Construção

Sendo um projeto com uma alta tensão de saída é importante garantir a segurança (do dispositivo e de seus utilizadores) de forma a ter um funcionamento adequado. Para tanto, um dissipador de calor foi usado para resfriar o MOSFET, que esquenta bastante, já que há um chaveamento de alta frequência (logo o porquê da escolha do MOSFET de potência IRF840). Portanto, este trabalho foi dividido em etapas, com o objetivo de elucidar os processos necessários para a construção da bobina. Uma fonte de alimentação CC controlada foi utilizada para alimentar o circuito.

A construção da Bobina de Tesla se utilizou de princípios e componentes eletrônicos, componentes estes listados na tabela 1:

Componente	Quantidade
Capacitor Eletrolítico de 3.3uF/50V	2
Bobina de 1 volta (1.2mm)	1
Bobina de 375 voltas (0.3mm)	1
Resistor de 330R	1
Potenciômetro de 100k	1
MOSFET IRF840	1
Fonte de Tensão	1
Dissipador de Calor	1

Tabela 1. Lista de componentes usados na construção do projeto

A construção do dispositivo se deu pelo auxílio de materiais como ferro de solda, para a junção dos componentes, bem como cola quente, para os acabamentos na base de

sustentação das bobinas primária e secundária. A seguir estão os procedimentos para a construção da bobina.

- (I) Em primeiro momento foi realizado a construção da bobina solenoidal secundária, conforme mostra a figura 9. Em torno de um cano PVC de 25mm foram dadas 375 voltas, usando um fio de cobre com espessura de 0.3mm. A bobina primária possui apenas uma volta, feita em torno de um cano PVC de 32mm, usando um fio de cobre com espessura de 1.2mm.

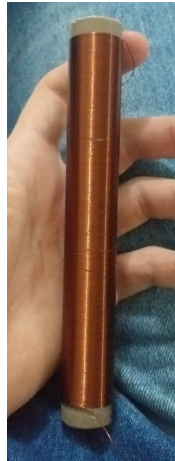


Figura 9. Bobina secundária finalizada, com 375 voltas

- (II) Logo após a construção das bobinas, foram realizado testes para examinar se a construção das bobinas foi bem sucedida, onde a bobina primária foi submetida tensões diferentes, de forma a testar, com osciloscópio, o aparecimento de tensão na bobina secundária (sem a presença do circuito *drive*), conforme mostra a figura 10.



Figura 10. Bobinas primária e secundária finalizadas sob fase de teste

- (III) Os terminais do transformador foram acoplados ao circuito já montado, como mostra a figura abaixo, utilizando dos componentes definidos anteriormente. Alguns componentes do esquemático foram aproximados, como uma associação série entre dois capacitores de $3,3\mu F$ de forma a conseguir uma capacitância de $1,65\mu F$. O MOSFET foi parafusado no dissipador de calor, onde teve os componentes do circuito soldados ao seu redor, em “3D”.

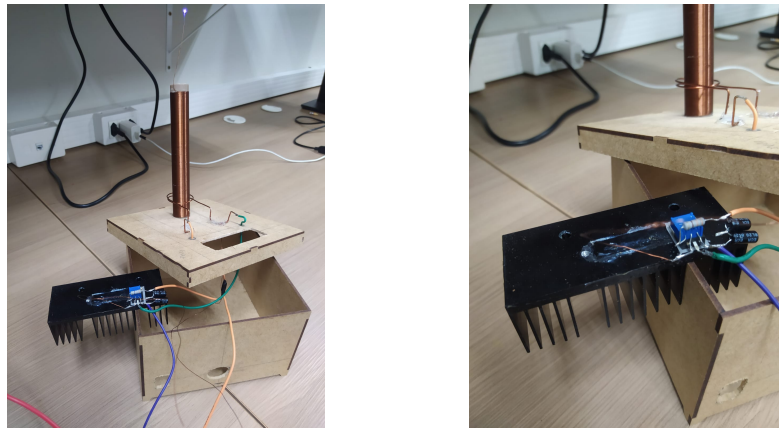


Figura 11. Bobinas já acopladas ao circuito de comutação

- (IV) Após inserido o circuito dentro de uma caixa de madeira, e a bobina em si acoplada na tampa da caixa, foi inserido o sistema embarcado em si: a placa **Arduino** com os componentes controlados via software, conforme será tratado na seção 4.4. Em especial, um pequeno *display* LCD 16x2 foi adicionado à tampa, que pode servir para mostrar informações da bobina.

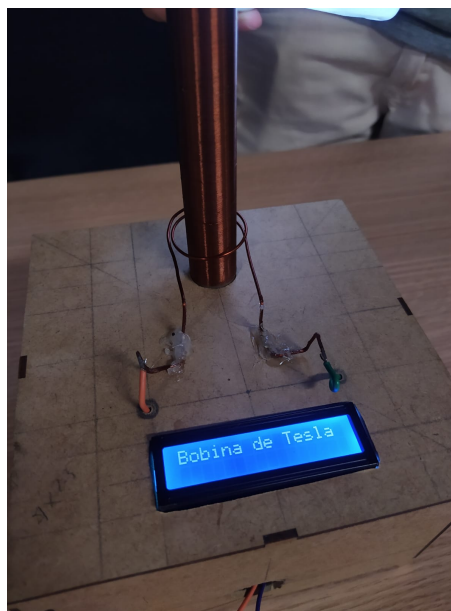


Figura 12. Dispositivo completamente montado, com o *display* na tampa

- (V) Na última etapa está a demonstração do experimento funcional. Na imagem

abaixo é possível observar que uma lâmpada fluorescente acende ao se aproximar da bobina, devido ao campo elétrico induzido na bobina secundário.

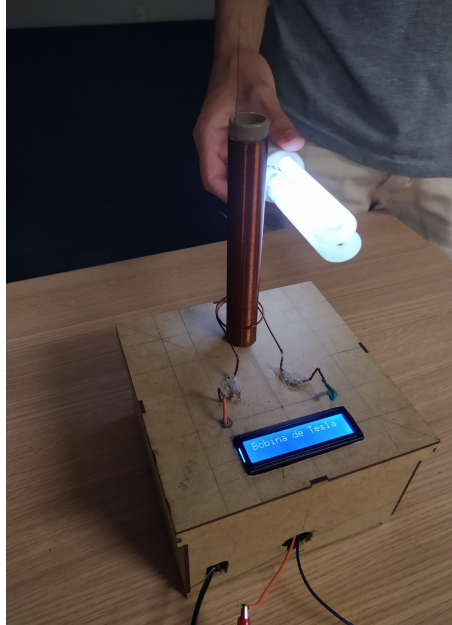


Figura 13. Bobina de Tesla funcional ligando uma lâmpada fluorescente à distância

4.4. Controle via Placa Microcontrolada

Decidiu-se utilizar uma placa microcontrolada para automatizar o projeto e dar-lhe uma identidade mais computacional, trazendo o projeto ainda mais para perto da **Engenharia de Computação**. Essa placa será responsável por controlar um relé que liga e desliga a bobina, além de exibir o nome do projeto em um *display* LCD 16x2, emitindo sinais sonoros quando a bobina é ligada ao pressionar de um botão, compreendendo um sistema a parte, embarcado na bobina. A placa escolhida foi o **Arduino Uno**, equipado com o microcontrolador o ATmega328P, da Microchip.

Essa escolha foi feita devido à sua versatilidade, facilidade, compatibilidade, baixo consumo de energia e custo acessível, de forma que seria facilmente replicável em outro projeto, ou trocado em caso de defeito. Esses fatores tornam o Arduino uma opção popular para uma ampla variedade de aplicações em controle. A programação da placa foi realizada usando o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, que é disponibilizado gratuitamente pela Arduino. Devido à facilidade de operar com essa placa esse projeto é facilmente expansível, podendo ser adicionadas ainda mais características, como um monitoramento mais eficaz da tensão de saída da bobina secundária.

Na tabela 02 estão os componentes usados na construção do sistema embarcado à Bobina de Tesla. É importante salientar que, o invés do Relé SPDT, um módulo relé pode ser usado, e ao escolher um *buzzer* não se preocupar se é de material piezoelétrico ou se é eletromecânico.:

Componente	Quantidade
Arduino Uno R3	1
LCD 16x2	1
Potenciômetro de 5k	1
Resistor de 220R	1
Interruptor	1
Relé SPDT	1
Buzzer	1

Tabela 2. Lista de componentes usados no circuito do sistema embarcado

O sistema embarcado é então compreendido pelo *software* de controle e pelo *hardware*, ou seja, os componentes. Para a placa Arduino controlar os vários componentes, bem como a própria Bobina de Tesla (por meio de um relé, para segurança), esses componentes devem estar conectados à placa. As conexões dos componentes podem ser vistos na figura 14. Por causa de limitações do software de modelagem, os terminais de alimentação da Bobina de Testa foram substituídos simbolicamente por uma lâmpada, que terá o circuito fechado com a fonte de alimentação pelo relé.

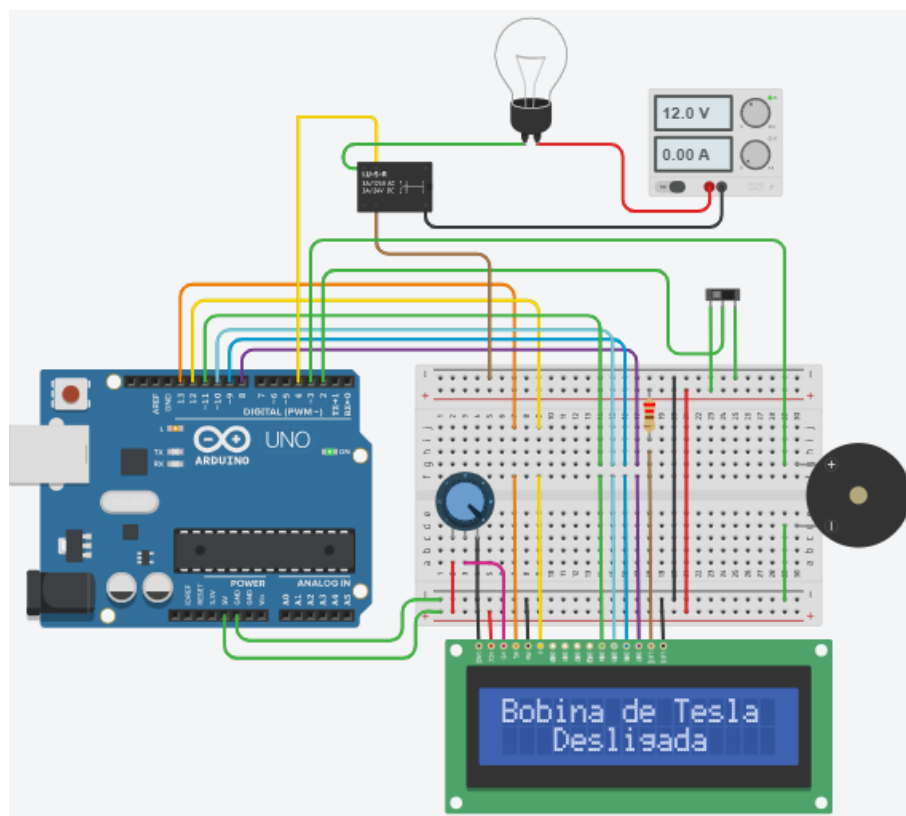


Figura 14. Circuito do sistema embarcado que irá controlar a bobina via *software*

O controle dos componentes é feito por um software gravado na placa. Ao ligar o dispositivo (na fonte) a bobina não é imediatamente ligada, devendo apertar um interruptor para que a bobina seja ligada pelo Arduino. Antes de ligá-la, uma contagem


```

51 void loop() {}
52
53 // Quando o interruptor eh apertado a bobina eh
54 // ligada, se estiver desligada, ou vice-versa.
55 void isrAcionarAlimentacao() {
56     if (!bobina_ligada) {
57         tone(buzzer, c5);
58         delay(500);
59         noTone(buzzer);
60         lcdTelaArranque();
61         tone(buzzer, c5);
62         delay(500);
63         noTone(buzzer);
64     }
65     bobina_ligada = !bobina_ligada;
66     digitalWrite(relay, bobina_ligada);
67     lcdTelaInicial();
68 }

```

Código 1. Código da placa Arduino que controla a Bobina de Tesla

Ao unir a parte física com a parte lógica têm-se um incrível dispositivo de geração de campos magnéticos, muito bem organizado em uma caixa, controlado por um sistema embarcado e de baixo custo.

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 precisa ser calibrado (muito gentilmente), de forma a polarizar corretamente o MOSFET e obter o sinal necessário para a operação da Bobina de Tesla. Dessa forma o circuito foi calibrado para operar com 16V e 750mA.



Figura 15. (a) e (b) Fonte de tensão em corrente contínua usada para alimentar o dispositivo

A figura 15 mostra a fonte de tensão usada para alimentar o circuito. A corrente está menor que 750mA em 15.a por causa da interferência causada pela presença de outros equipamentos, e pessoas, ao seu redor. Vários outros valores de tensão foram testados, como mostra 15.b, onde quanto maior a tensão de entrada maior a quantidade de plasma gerado. Obviamente, o circuito esquenta muito mais, então uma tensão de 16V foi o meio termo entre temperatura, fornecimento de energia e performance.

Os principais resultados são descritos a seguir, onde alguns resultados foram diferentes dos esperados. É importante notar que os parâmetros calculados anteriormente são idealidades calculadas analiticamente, e que na prática os valores sempre são diferentes.

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

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

Indutâncias: As indutâncias obtidas foram o suficiente para alcançar os valores desejados para esse projeto, mais especificamente: 87,2nH para a bobina primária, e 588,85 μ H para a bobina secundária, conforme a equação 13.

Frequência de operação: Por meio da fórmula 19, a frequência de operação do circuito encontrada é 4,19MHz. Ao checar o sinal entre a bobina primária com um osciloscópio, como mostra a figura 16, é perceptível uma frequência de 5,56MHz, 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, etc... Isso também influi na tensão de saída. Por conta disso o sinal está bastante ruidoso.

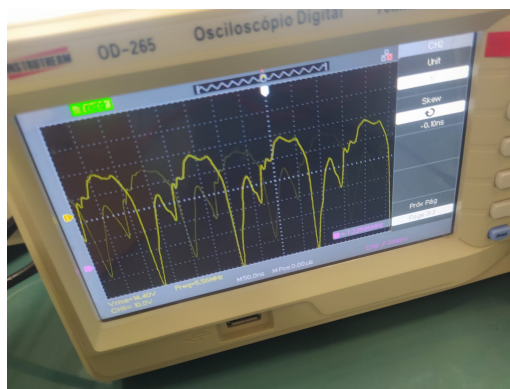


Figura 16. Sinal alternado gerado pela associação LC

Ampla campo magnético: Como o campo magnético criado pela bobina é muito potente, bem como o campo elétrico, outros dispositivos 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. Para sanar esse feito uma melhor blindagem deverá ser feita. O campo magnético foi forte o suficiente para ter efeito em uma sala ampla por inteiro, bem como em outras salas, diferentes da que estava o dispositivo. Outros dispositivos também são afetados, como lâmpadas fluorescentes.

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.

6. Conclusão

Este trabalho apresentou o projeto e construção de uma Bobina de Tesla, demonstrando resultados satisfatórios. A bobina foi capaz de gerar descargas elétricas, sendo possível ver o plasma e as descargas de choque com as partículas do ar, bem como ligar uma lâmpada a distância, por meio do campo magnético. Essa estrutura representa uma fonte eficiente de descargas elétricas e pode ser aplicada em diversas áreas, desde fins educativos até pesquisas científicas avançadas.

Além desse experimento ter revolucionado os sistemas elétricos da época, o seu uso didático na apresentação se mostrou eficaz para demonstrar a importância dos circuitos oscilatórios e do campo magnético de um solenoide. Além do mais, foi demonstrado como o campo magnético da bobina primária atuava sobre o a secundária, e também como os capacitores e os indutores atuavam em conjunto na construção de uma corrente alternada, trazendo a tona a configuração *slayer exciter*.

O projeto em si foi essencial para demonstrar a importância e eficácia de trabalhar com eletromagnetismo em diversas áreas. A apresentação da bobina atraiu olhares de muitas pessoas, 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 artificiais. Além disso a bobina pode funcionar com uma pequena fonte de alimentação, que, através do campo magnético, é capaz de aumentar a tensão em várias de vezes. No mais, uma experiência incrível.

Referências

- A. Malvino, D. B. (2016). Eletrônica: Volume 1. *Mc Graw Hill Education*.
- 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*.
- Craven, R. M. (1997). Design improvements in tesla coil performance. *IEEE*.
- 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*.
- M. N. O. Sadiku, C. K. A. (2013). Fundamentos de circuitos elétricos. *Mc Graw Hill*.
- 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*.