



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

EMANUEL WALLISON DE OLIVEIRA COSTA

**CONSTRUÇÃO DA BOBINA DE TESLA: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DO
ELETROMAGNETISMO**

**CAMPINA GRANDE
2018**

EMANUEL WALLISON DE OLIVEIRA COSTA

**CONSTRUÇÃO DA BOBINA DE TESLA: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DO
ELETROMAGNETISMO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso em Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Me. Gilson Aciole Rodrigues.

**CAMPINA GRANDE
2018**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

C837c Costa, Emanuel Wallison de Oliveira.
Construção da bobina de Tesla [manuscrito] : uma proposta para o ensino do eletromagnetismo / Emanuel Wallison de Oliveira Costa , Thiago Araújo. - 2018.
34 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia , 2018.

"Orientação : Prof. Me. Gilson Aciole Rodrigues , Coordenação do Curso de Física - CCT."

1. Bobina de Tesla. 2. Campo magnético. 3. Eletromagnetismo.

21. ed. CDD 537

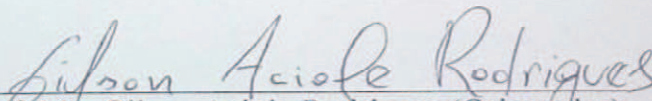
EMANUEL WALLISON DE OLIVEIRA COSTA

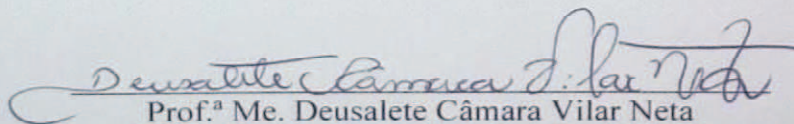
CONSTRUÇÃO DA BOBINA DE TESLA: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DO
ELETROMAGNETISMO

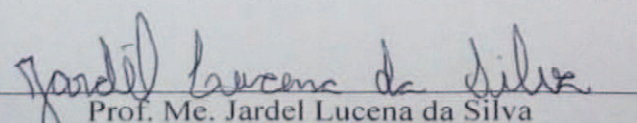
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso em Licenciatura em Física da
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial à obtenção do título de
Licenciado em Física.

Aprovada em: 19/06/2018.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Me. Gilson Acirole Rodrigues (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof.^a Me. Deusalete Câmara Vilar Neta
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)


Prof. Me. Jardel Lucena da Silva
Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN)

Ao meu pai (*in memoriam*), com todo o meu
amor e gratidão, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À minha família que sempre me deu formação e me instruiu nos caminhos do saber, me motivando a gostar de estudar.

A todos que fazem a Universidade Estadual da Paraíba, em particular aos professores do Curso de Licenciatura em Física, os quais foram mestres em apresentar o conhecimento que hoje tenho.

Ao técnico do Laboratório de Física Thiago Araújo minha gratidão e admiração pelo excelente profissional, a qual não mediu esforços em orientar principalmente na construção do experimento.

Ao professor Dr. Edivaldo de Oliveira (*in memoriam*), embora fisicamente ausente, sentia sua presença ao meu lado, dando-me força em continuar o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Me. Gilson Aciole pela orientação e suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

A todos os meus amigos pelo incentivo e grande ajuda com o fornecimento de material para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	08
2	NIKOLA TESLA E O DESENVOLVIMENTO DO ELETROMAGNETISMO ..	09
2.1	Ensino do Eletromagnetismo	11
2.2	Indução Magnética.....	11
2.3	Corrente e Tensão Alternada.....	12
2.4	Indutância Mútua	13
2.5	Coeficiente de Acoplamento	15
2.6	Bobina de Tesla: Transformador de Núcleo de Ar	17
2.7	Frequência Angular	17
2.8	Diferença de Potencial	18
3	APLICAÇÕES DA BOBINA DE TESLA	22
4	EXPERIMENTO: CONSTRUÇÃO DA BOBINA DE TESLA	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	31
	REFERÊNCIAS.....	32
	APÊNDICE	34

CONSTRUÇÃO DA BOBINA DE TESLA: UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DO ELETROMAGNETISMO

EMANUEL WALLISON DE OLIVEIRA COSTA¹

RESUMO

O presente trabalho visa relatar os principais desafios e resultados observados durante e após o projeto de construção de uma Bobina de Tesla. A construção foi realizada no laboratório de Física da Universidade Estadual da Paraíba. Portanto, objetivou-se construir a bobina de Tesla, que é tida como um dos mais tradicionais experimentos físicos envolvendo fenômenos eletromagnéticos, demonstrando a maneira como as correntes elétricas se comportam na presença de campos magnéticos, originando o efeito chamado Indução Eletromagnética. O experimento permitiu a visualização de vários fenômenos e a determinação de forma experimental de alguns valores. Desta forma, o resultado foi obtido de forma satisfatória.

Palavras-Chave: Bobina de Tesla. Campo magnético. Indução eletromagnética.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a utilização de experimentos no ensino de física vem sendo intensamente debatida entre pesquisadores da área de educação, sinalizando como um importante recurso no desenvolvimento de saberes conceituais, procedimentais e atitudinais (GALIAZZI et al., 2001).

A Física é uma ciência experimental e, por isso, é necessário que os alunos que estudam Física sejam incentivados a desenvolver atividades experimentais que lhes possibilitam verificar melhor o mundo ao seu redor e seus aparatos tecnológicos. A atividade experimental permite ao aluno associar a razão à observação e pode gerar estímulo do que se vai estudar, como constatação do que foi estudado (RIBEIRO et al., 2012).

Sendo assim, a abordagem experimental, aliada aos conceitos teóricos da física, desempenham um papel cada vez mais importante no Ensino (PASSOS e MOREIRA, 1982). A utilização de um experimento científico pelo estudante colabora para aumentar sua curiosidade sobre o tema estudado, permitindo que certos conceitos de física sejam absorvidos naturalmente, mesmo que inicialmente, não recorra ao uso de equações. Desta forma, contribui na compreensão de temas fundamentais como, o eletromagnetismo.

¹ Aluno de Graduação em Licenciatura em Física na Universidade Estadual da Paraíba – Campus I.
Email: wallisonareial@gmail.com.br

Neste trabalho objetivou-se construir uma bobina de Tesla, determinando alguns valores de forma experimental. Entretanto, foram utilizados materiais acessíveis e de baixo custo, permitindo o estudo teórico e prático sobre indução eletromagnética. A exposição deste conteúdo possibilita ainda uma conexão com outros temas, tais como: rigidez dielétrica do ar, ionização de gases, produção de ozônio, entre outros.

2 NIKOLA TESLA E O DESENVOLVIMENTO DO ELETROMAGNETISMO

Nikola Tesla nasceu na atual Croácia (na época, parte da Áustria-Hungria), em 10 de julho de 1856, e morreu em 7 de janeiro de 1943. Tesla foi um inventor que fez importantes descobertas no campo da eletricidade (FERREIRA, 2012).

Considerado por muitos como um dos maiores e mais excêntricos gênios da ciência, Nikola Tesla contribuiu com suas descobertas, mudando a nossa sociedade, através do sistema de geração e transmissão de energia elétrica, corrente alternada, motor de indução, controle remoto, entre outros (RODRIGUES, 2014).

Uma das invenções mais importantes na vida de Tesla foi o seu motor de corrente alternada (CA). E foi após ter trabalhado na Central Telefônica do Governo Húngaro no início de 1881, que Nikola Tesla conseguiu emprego numa empresa que prestava serviço para *Continental Edison Company* em Paris. E depois de ter passado por algumas cidades da Europa, melhorando o sistema elétrico e realizando invenções, Nikola Tesla recebeu o convite em 1884, pelos mesmos dirigentes da *Continental Edison Company* para continuar o aperfeiçoamento de dinamos² nos Estados Unidos (LIMA, 2017).

A ida de Tesla para os Estados Unidos da América em 6 de Junho de 1884, marca o encontro com Thomas Alva Edison (1847-1931), o maior investidor em transmissão de energia elétrica através da corrente contínua. Porém a falta de pagamento por suas invenções fez com que Tesla pedisse demissão do cargo.

Nikola Tesla acabou conseguindo despertar o interesse de Alfred S. Brown e Charles F. Peck, com o seu motor (CA) e em 1887, eles fundaram a *Tesla Electric Company*. Desde que chegou aos Estados Unidos essa foi a primeira possibilidade efetiva que recebeu para desenvolver o seu motor de corrente alternada. A esse respeito, Lima (2017, p.29) assevera que:

² Os dinamos são usados para converter baixas tensões DC, normalmente fornecidas pelas baterias, em altas tensões DC.

[...] É preciso salientar que Nikola Tesla não foi o desbravador na utilização de corrente alternada em motores. Mesmo nos Estados Unidos, onde o uso de corrente contínua era dominante nesse período, já havia tentativas como a de Elihu Thomson, para produzir iluminação por meio de corrente alternada. Todavia é preciso ressaltar também que os avanços nesse campo foram tímidos e não obtiveram muito sucesso. A novidade de Tesla foi fazer funcionar com eficácia um motor de corrente alternada, por meio da utilização de princípios do campo magnético rotativo descoberto por ele ainda na Europa.

Em 1888, com a sua descoberta de que um campo magnético pode ser utilizado para girar duas bobinas perpendiculares, caso for suprida com corrente alternada 90° fora de fase e dessa forma surgiu o motor de indução de corrente alternada. Todavia, sua vantagem era o seu funcionamento sem escovas. Esse novo sistema de motores e transformadores de corrente alternada, fez com que sua posição na história da ciência fosse para sempre estabelecida (WY SOCK et al, 2001).

George Westinghouse (1846-1914), inventor e empresário estadunidense, interessado pela corrente alternada, e decidido a desenvolver um sistema de iluminação com esse tipo de corrente e assim poder competir com Edison, iniciou uma propaganda acerca dos perigos que esse tipo de corrente oferecia aos clientes. Alguns investidores abriram processos judiciais contra a legalidade das patentes, dificultando a instalação desse novo sistema elétrico.

A pedido de Westinghouse, Tesla abriu mão de todos os seus direitos que possuía sobre os motores e assim continuar com o projeto de iluminação. Em 1892 os motores de corrente alternada iluminaram as minas de ouro de Telluride, no Colorado. No ano seguinte esse sistema elétrico foi utilizado para iluminar a Exposição Universal de Chicago. Tais acontecimentos foram indícios da vitória de um novo sistema elétrico, que além de iluminar, foi pensado também para movimentar máquinas.

Diante de todas as invenções, a que mais impressionou Tesla foi o “Transmissor Amplificador”. Como afirma Tesla (2012, p.74)

Se não me falha a memória, foi em novembro de 1890 que realizei uma experiência de laboratório das mais extraordinárias e espetaculares jamais registradas nos anais da ciência. Ao investigar o comportamento de correntes de alta frequência, eu me convenci de que se poderia produzir um campo elétrico de intensidade suficiente num recinto para acender tubos de vácuo sem eletrodos. Para testar a teoria, foi construído um transformador, e o primeiro teste foi um sucesso imenso.

A maioria dos inventos de Nikola Tesla esteve ligada com seu projeto de transmissão de energia e informação sem fio. Consistia então uma ideia central e, mais tarde, tornou-se uma obsessão. O projeto de Tesla tinha em vista o transporte de energia gratuita sem fio para toda a humanidade, bem como a recepção e transmissão de mensagens.

Nikola Tesla contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento do eletromagnetismo através de suas invenções, o motor de corrente alternada e o transmissor amplificador, esse último, atualmente carrega seu nome, Bobina de Tesla.

2.1 ENSINO DO ELETROMAGNETISMO

Em um curso de eletromagnetismo, muitas vezes algumas demonstrações experimentais não são feitas em função da falta de equipamentos adequados à sua realização. A bobina de Tesla nos dá a oportunidade de visualizar certos efeitos elétricos interessantes, em virtude de ampliá-los e simulá-los, estimulando, de certo modo, a curiosidade pelo estudo em pauta. Apesar de os fenômenos eletromagnéticos ligados à bobina se basearem em princípios eletrodinâmicos, analogias podem ser feitas à eletrostática, ampliando a aplicação demonstrativa do aparelho.

Essa abordagem torna-se uma ferramenta eficaz para o ensino do eletromagnetismo, seja no relacionamento da ciência com questões sociais, utilizando o caso da “Guerra das Correntes” ou com a exploração dos conceitos físicos: campo elétrico, campo magnético, corrente elétrica, diferença de potencial, indução magnética, a “presença” do campo eletromagnético no espaço, o efeito de altas tensões em gases sob-baixa pressão, o comportamento de isolantes sob altas tensões, envolvidos no experimento da Bobina de Tesla.

2.2 INDUÇÃO MAGNÉTICA

Para compreender o funcionamento da Bobina de Tesla, é necessário fazer um estudo dos conceitos fundamentais envolvidos no experimento. Uns dos conceitos é o fenômeno de Indução Magnética, observado por Michael Faraday, observando que uma corrente elétrica era induzida quando se fazia variar o fluxo magnético³ e conseqüentemente a intensidade do campo magnético numa espira. O mesmo fenômeno de Indução Magnética ocorre, quando uma corrente elétrica sofre variação de intensidade no condutor, gerando um campo magnético também variável ao seu redor.

Com a descoberta do fenômeno de Indução Magnética, tornou-se capaz a produção de energia elétrica quando um conjunto de espiras fechadas, formando um retângulo ou círculo, gira no meio de dois polos magnéticos, Norte e Sul. A corrente elétrica induzida não é

³ Existem três possibilidades de variar o fluxo magnético: varia-se a intensidade do campo, ou a área da “espira”, ou as direções entre campo e área.

contínua no decorrer do tempo e sim alternada, pois a diferença de potencial muda de direção a cada meio ciclo da rotação. Consequentemente a corrente elétrica muda também com o tempo.

2.3 CORRENTE E TENSÃO ALTERNADA

Matematicamente é possível descrever essa corrente e tensão variável no tempo através de uma função periódica, *seno ou cosseno*. As funções periódicas se repetem a cada 2π radianos (um ciclo) e a quantidade de repetições por unidade de tempo é denominado frequência (f). No caso da rede elétrica nas residências, $f = 60 \text{ Hz}$, ou seja, a corrente elétrica muda de direção 120 vezes por segundo.

No experimento da Bobina de Tesla será utilizado correntes e tensões variáveis no tempo, logo torna-se necessário analisar o comportamento dos componentes elétricos, como capacitores e indutores quando uma corrente elétrica, não mais contínua e sim variável, circula nesses componentes. Essa nova análise é importante porque a frequência angular da fonte ω_d , denominada de frequência de excitação, é diferente da frequência angular natural do circuito primário ω_1 .

A diferença entre as frequências angulares ω_d e ω_1 , além de proporcionar defasagem nas correntes e tensões, impede que a transferência de energia do capacitor para o indutor primário seja máxima. Para que a transferência de energia seja máxima é necessário que $\omega_d = \omega_1$, nesse caso o circuito está no estado de *ressonância* e toda energia acumulada no capacitor é transferida para o indutor primário. É importante lembrar, que no fenômeno de indução também há transferência de energia entre o indutor primário e o secundário, isso faz com que a corrente no indutor secundário oscile com uma frequência angular ω_2 . Então, quando as frequências ω_1 e ω_2 são próximas, a transferência de energia entre os indutores é máxima $\omega_1 = \omega_2 = \omega_d = \omega$ (CHIQUITO e LANCIOTTI, 2000).

No caso de resistores a corrente elétrica e a tensão oscila de acordo com a frequência angular da fonte, isso significa que as duas grandezas, resistência e tensão da fonte, estão em fase, ou seja, passam ao mesmo tempo pelos máximos e mínimos da amplitude da onda. Diferente dos capacitores e indutores, onde a corrente elétrica está adiantada e atrasada sucessivamente, em relação a diferença de potencial (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

É justamente por causa dessa diferença de fase nos capacitores e indutores quando submetidos a corrente e tensões alternadas, que surgem os conceitos de *reatância capacitiva* χ_C e *reatância indutiva* χ_L . Onde

$$\chi_C = \frac{1}{\omega_d C} \quad e \quad \chi_L = \omega_d L \quad (1)$$

Quando as unidades de capacitância e indutância é expresso no Sistema Internacional de Unidades, as reatâncias capacitivas e indutivas tem unidade de resistência Ω (Ohm).

Dessa forma, a diferença de potencial do capacitor e indutor pode ser expresso através da reatância capacitiva χ_C e indutiva χ_L . Ou seja,

$$V_C = I_C \cdot \chi_C \quad e \quad V_L = I_L \cdot \chi_L \quad (2)$$

Onde V_C , V_L , I_C e I_L são as amplitudes da tensão e corrente no capacitor e indutor sucessivamente, ou seja, o valor máximo que a tensão e a corrente podem assumir.

Na expressão dos potenciais V_C e V_L existe uma ângulo de fase θ , inserida implicitamente, devido a defasagem da amplitude da tensão e da corrente. O seu valor aparece explicitamente quando é introduzido o conceito de *impedância capacitiva* Z_C e *impedância indutiva* Z_L (KERCHNER e CORCORAN, 1962).

$$Z_C = \chi_C [\cos(\theta) + j \sin(\theta)] \quad e \quad Z_L = \chi_L [\cos(\theta) + j \sin(\theta)] \quad (3)$$

Esta é a forma cartesiana ou retangular de escrever as impedâncias⁴. O conceito de impedância é importante principalmente na hora de realizar operações matemáticas, porque o ângulo de fase deve ser considerado (KERCHNER e CORCORAN, 1962).

2.4 INDUTÂNCIA MÚTUA

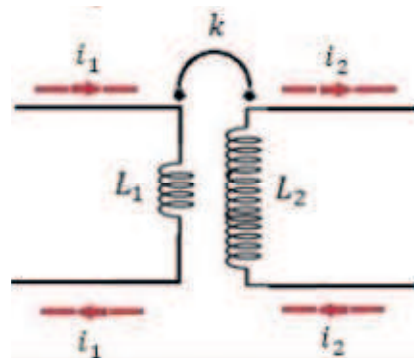
Outra característica importante no fenômeno de Indução Magnética, está na capacidade do circuito primário transferir energia para o circuito secundário.

Essa transferência de energia se dá através do fluxo magnético (Φ) que envolve os indutores L_1 e L_2 (figura 1). Compreende-se o fluxo magnético Φ_{12} , com origem no indutor L_1 , devido a corrente i_1 , que intercepta o indutor L_2 . Consequentemente Φ_{21} , com origem em L_2 , devido i_2 , que intercepta L_1 .

⁴ A impedância também pode ser escrita na forma polar $Z = \chi e^{j\theta}$, porém na hora de realizar soma e subtrações a impedância deve ser inscrita na forma cartesiana. Os ângulos de fase para os capacitores e indutores são $\theta = -90^\circ$ e $\theta = +90^\circ$ respectivamente.

A interceptação dos fluxos magnéticos provoca um acoplamento magnético entre os dois circuitos e a energia pode ser transferida de um circuito para o outro por meio do campo magnético que é comum para os dois circuitos. Na figura 1 foi introduzida uma constante k , que indica o grau de acoplamento que existe entre os dois indutores.

Figura 1. O coeficiente de acoplamento magnético k dos indutores L_1 e L_2 .



Fonte: próprio autor

É importante calcular a constante de acoplamento magnético k , pois os fluxos magnéticos Φ_{12} e Φ_{21} variam quando aumenta ou diminui a distância entre L_1 e L_2 .

Os dois indutores L_1 e L_2 estão acoplados através do fluxo magnético Φ_{12} , dado pela equação.

$$\Phi_{12} = M_{12} \cdot i_1 \quad (4)$$

Sendo i_1 a corrente elétrica que circula no indutor L_1 e M_{21} denominado *Indutância Mútua do circuito 2 em relação ao circuito 1*. Da mesma forma para Φ_{21} , têm-se M_{21} denominado *Indutância Mútua do circuito 1 em relação ao circuito 2* (LORRAIN et al., 2000).

A introdução do conceito de *Indutância Mútua* tem como finalidade explicar a ação magnética entre os dois circuitos ou entre porções do mesmo circuito, devido a interação dos dois indutores, através do fluxo magnético. Quando essa interação é feita na ausência de material ferromagnético, ou seja, quando a permeabilidade (μ) ao longo da trajetória do fluxo magnético for constante, M_{12} e M_{21} serão constantes (KERCHNER e CORCORAN, 1962) e

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (5)$$

Considerando uma única espira do indutor L_1 , onde circula uma corrente i_1 e sendo atravessada pelo seu próprio fluxo magnético Φ_{11} . A proximidade da outra espira do indutor L_2 intercepta uma fração deste fluxo (LORRAIN et al., 2000), assim.

$$\Phi_{12} = k_{12} \cdot \Phi_{11} \quad (6)$$

Onde $|k_{12}| \leq 1$. A auto-indutância da espira do indutor L_1 é

$$L_1 = \frac{\Phi_{11}}{i_1} \quad (7)$$

Da equação (4)

$$M_{12} = \frac{\Phi_{12}}{i_1} = \frac{k_{12} \cdot \Phi_{11}}{i_1} = k_{12} \cdot L_1 \quad (8)$$

De forma análoga

$$M_{21} = k_{21} \cdot L_2 \quad (9)$$

A equação (5) indica que

$$M^2 = k_{21}k_{12} \cdot L_1L_2 \quad \Rightarrow \quad M = \pm \sqrt{k_{21}k_{12}} \cdot \sqrt{L_1L_2} \quad (10)$$

Denominando k como *Coefficiente de Acoplamento magnético*

$$k = \sqrt{k_{21}k_{12}} \quad (11)$$

A equação (10) assumiu a forma

$$M = k \cdot \sqrt{L_1L_2} \quad (12)$$

O *Coefficiente de Acoplamento* k é uma medida do quão rápido os indutores trocam energia e terá maior eficiência de acordo com o quanto de fluxo magnético intercepta os indutores.

2.5 COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO

Para calcular o coeficiente de acoplamento k , é necessário conhecer o valor da indutância mútua M entre os indutores e suas próprias indutâncias L_1 e L_2 . De acordo com a equação (4), a indutância mútua pode ser inscrita da seguinte forma

$$M_{12} = N_2 \frac{\Phi_{12}}{i_1} \quad (13)$$

No entanto, o fluxo Φ_{12} gerado pelo indutor L_1 intercepta somente uma fração l_1/l_2 Voltas do indutor L_2 . Sendo l_1 o comprimento do indutor L_1 e l_2 o comprimento do indutor L_2 (LORRAIN et al., 2000). Assim, o fluxo magnético também pode ser calculado utilizando a equação

$$\Phi_{12} = \frac{l_1}{l_2} \int_2 \vec{B}_1 \cdot d\vec{A}_2 \quad (14)$$

Onde \vec{B}_1 é o campo magnético gerado pelo indutor L_1 e $d\vec{A}_2$ é um elemento de área transversal do indutor L_2 (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 i_1 N_1}{l_1} \quad \vec{A}_2 = \pi r_2^2 \quad (15)$$

Substituindo os valores dado pela equação (15) na equação (14), obtêm-se

$$\Phi_{12} = \frac{l_1 \mu_0 i_1 \pi r_2^2 N_1}{l_2 l_1} \quad (16)$$

Onde r_2 é o raio do indutor L_2 . Substituindo o fluxo magnético na equação (13), encontra-se⁵

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \pi r_2^2 N_1 N_2}{l_2} \quad (17)$$

O mesmo procedimento pode ser feito, levando em conta o fluxo magnético Φ_{21} gerado pelo indutor secundário. As indutâncias L_1 e L_2 , dependem somente da geometria do dispositivo (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

$$L_1 = \frac{\mu_0 N_1^2 \pi r_1^2}{l_1} \quad e \quad L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2 \pi r_2^2}{l_2} \quad (18)$$

Portanto, utilizando as equações (12), (17) e (18) para calcular o coeficiente de acoplamento (LORRAIN et al., 2000)

⁵ De acordo com a equação (5) $M_{12} = M_{21} = M$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\frac{\mu_0 \pi r_2^2 N_1 N_2}{l_2}}{\sqrt{\frac{\mu_0^2 \pi^2 N_1^2 N_2^2 r_1^2 r_2^2}{l_1 l_2}}} = \sqrt{\frac{l_1 r_2}{l_2 r_1}} \quad (19)$$

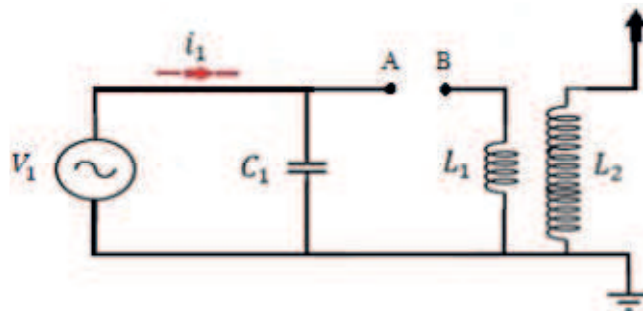
A medida que r_1 aumenta, o coeficiente de acoplamento k diminui. Como era de se esperar, porque a intensidade do fluxo magnético no indutor secundário também diminui. Se $r_1 = r_2$, ou seja, os dois indutores estão o mais próximo possível, o acoplamento magnético é máximo (embora k ainda possua valor menor que 1). O valor de k é próximo da unidade, quando o núcleo entre os indutores é preenchido com material ferromagnético.

2.6 BOBINA DE TESLA: TRANSFORMADOR DE NÚCLEO DE AR

Um equipamento chamado transformador tem como objetivo transformar a tensão e consequentemente a corrente elétrica para valores maiores ou menores, como também mudar a característica da corrente e tensão de alternada para contínua ou de maneira recíproca, de acordo com o objetivo do fabricante. No caso da transmissão de energia elétrica, da geração para o consumo nas residências, é necessário um dispositivo que seja capaz de aumentar para a transmissão (minimizando as perdas ôhmicas) e diminuir para o consumo os valores de tensão nos circuitos, mantendo o produto (corrente \times tensão) praticamente constante.

A figura 2 é um esquema elétrico da Bobina de Tesla, que pode ser entendida como sendo um transformador de núcleo de ar. Os componentes do circuito primário são formados pela fonte V_1 , capacitor C_1 , centelhador (os pontos A e B) e o indutor L_1 . Somente o indutor L_2 constitui o circuito secundário.

Figura 2. Circuito Elétrico da Bobina de Tesla.



Fonte: próprio autor

Normalmente, os transformadores comerciais utilizam um material ferromagnético entre os indutores primários e secundários para aumentar o fluxo magnético e conseqüentemente a eficiência de transferência de energia. No caso da Bobina de Tesla não existe entre os indutores material ferromagnético e portanto é preenchido pelo ar. Uns dos efeitos mais impressionantes no experimento da Bobina de Tesla são as descargas elétricas (pequenos relâmpagos, que surgem na parte superior do indutor L_2).

2.7 FREQUÊNCIA ANGULAR

A diferença entre as frequências ω_d e ω , não permite que a energia acumulada no capacitor primário seja totalmente transferida para o indutor L_1 . Entretanto, a introdução de uma abertura no circuito primário, chamado de centelhador (os pontos A e B), como mostra a figura 2. Somente irá permite que a energia acumulada no capacitor C_1 seja transferida para o indutor L_1 , se a rigidez dielétrica do ar for rompida. Quando ocorre essa ruptura, toda a energia do capacitor primário é transferida para o indutor L_1 de forma pulsada, devido a carga e descarga do capacitor. Nesse caso a transferência de energia é máxima e $\omega_d = \omega$.

2.8 DIFERENÇA DE POTENCIAL

A relação entre o número de espiras N_1 e N_2 dos indutores L_1 e L_2 é que proporciona uma tensão maior no indutor secundário, assim, quando $N_2 > N_1$ o transformador é chamado de transformador elevador de tensão, caso contrário $N_2 < N_1$, recebe o nome de transformador abaixador de tensão (HALLIDAY e RESNICK, 2009). Portanto, a tensão no indutor secundário V_2 é calculada da seguinte forma:

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} \quad (20)$$

Onde V_1 é a tensão no indutor primário (tensão da fonte)

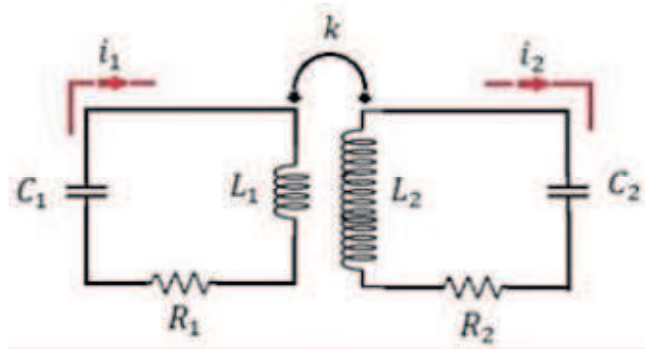
Essa equação é apresentada nos diversos livros didáticos, porém no caso da Bobina de Tesla não representa um resultado adequado, porque é levado em conta um caso ideal, independente da geometria dos indutores, do acoplamento e da frequência. Portanto o ganho em voltagem em L_2 é uma relação entre as indutâncias primárias e secundárias (CHIQUITO e LANCIOTTI, 2000).

$$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (21)$$

Para chegar a esse resultado é necessário realizar uma análise mais específica da Bobina de Tesla. Para isso, o esquema elétrico (figura 2) pode ser representado por dois circuitos acoplados (figura 3) (CHIQUITO e LANCIOTTI, 2000).

Foram introduzidas as resistências do fio do circuito primário 1 e secundário 2 e a capacitância C_2 devido o comportamento do indutor L_2 .

Figura 3: Circuito elétrico acoplado que representa a Bobina da Tesla.



Fonte: próprio autor

A introdução da resistência ôhmicas R_1 e R_2 tornam-se necessárias, pois está relacionado à resistividade do material utilizado como condutor. Então, não existe o componente eletrônico, resistor, no circuito. Mas, devido às características do material, que há menos seja supercondutor, apresentará uma resistência a passagem da corrente elétrica.

Neste momento é importante escrever a impedância de cada componente do circuito e em seguida analisar o comportamento da tensão V_2 no indutor secundário. De acordo com as relações,

$$Z_C = \chi_C[\cos(\theta) + j \sin(\theta)] \quad e \quad Z_L = \chi_L[\cos(\theta) + j \sin(\theta)] \quad (22)$$

Onde os ângulos de fase θ para os capacitores e indutores são $\theta = -90^\circ$ e $\theta = +90^\circ$. Substituindo seus valores na equação (22), conclui-se:

$$Z_C = -j\chi_C = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_L = j\chi_L = j\omega L$$

Dessa forma

$$\begin{aligned}
Z_{R_1} &= R_1 & e & & Z_{R_2} &= R_2 \\
Z_{C_1} &= \frac{1}{j\omega C_1} & e & & Z_{C_2} &= \frac{1}{j\omega C_2} \\
Z_{L_1} &= j\omega L_1 & e & & Z_{L_2} &= j\omega L_2
\end{aligned}$$

Também expressando a indutância mútua M em termo da impedância, chamada de impedância mútua Z_M (LORRAIN et al., 2000).

$$Z_M = j\omega M \quad (23)$$

Foi utilizado o argumento que as frequências do circuito primário e secundário são muito próximas $\omega_1 = \omega_2$, tornando o fato de uma só frequência ω para o circuito elétrico da Bobina de Tesla (Figura 2).

O circuito secundário R_2 , C_2 e L_2 , apresenta uma impedância equivalente Z_s igual à:

$$\begin{aligned}
Z_s &= \frac{Z_{L_2 R_2} \cdot Z_{C_2}}{Z_{L_2 R_2} + Z_{C_2}} = \frac{(R + j\omega L_2) \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right)}{R + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{(R + j\omega L_2) \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right)}{(R + j\omega L_2) \left(1 + \frac{1}{(R + j\omega L_2)(j\omega C_2)} \right)} \Rightarrow \\
Z_s &= \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{1 + \frac{1}{(R + j\omega L_2)(j\omega C_2)}} \quad (24)
\end{aligned}$$

Para valores muito grande de ω , o denominador da equação (24) é próximo de um:

$$Z_s = \frac{1}{j\omega C_2} \quad (25)$$

Então o indutor L_2 torna-se capacitivo. Porém, o valor de $Z_s = j\omega L_2$ é concebido para um dado domínio de ω (KERCHNER e CORCORAN, 1962).

Aplicando a lei de circuitos (tensões) de Kirchoff na figura 3.

$$\begin{aligned}
V_{C_1} + V_{R_1} + V_{L_1} + \epsilon_2 &= V_1 \\
V_{C_2} + V_{R_2} + V_{L_2} + \epsilon_1 &= 0
\end{aligned} \quad (26)$$

Onde

$$\epsilon_1 = j\omega M I_1 \quad e \quad \epsilon_2 = j\omega M I_2 \quad (27)$$

O sinal de M depende da escolha arbitrária do sentido positivo de i_2 no circuito secundário. E se a tensão da fonte V_1 for suposta como tendo forma de onda senoidal e todos os parâmetros de circuito forem constantes, o sistema de equações (26) podem ser escritas em função de valores eficazes”, ou seja, em função da amplitude das correntes I_1 e I_2 (valor máximo da corrente no circuito), que se mantêm constante (KERCHNER e CORCORAN, 1962). Assim as tensões são escritas como

$$\begin{aligned} V_{R_1} &= I_1 R_1 & e & & V_{R_2} &= I_2 R_2 \\ V_{C_1} &= I_1 \chi_{C_1} = I_1 \frac{1}{j\omega C_1} & e & & V_{C_2} &= I_2 \chi_{C_2} = I_2 \frac{1}{j\omega C_2} \\ V_{L_1} &= I_1 \chi_{L_1} = I_1 j\omega L_1 & e & & V_{L_2} &= I_2 \chi_{L_2} = I_2 j\omega L_2 \end{aligned} \quad (28)$$

Substituindo os valores acima no sistema de equações (26),

$$I_1 \frac{1}{j\omega C_1} + I_1 R_1 + I_1 j\omega L_1 + j\omega M I_2 = V_1 \quad (29)$$

$$I_2 \frac{1}{j\omega C_2} + I_2 R_2 + I_2 j\omega L_2 + j\omega M I_1 = 0 \quad (30)$$

Nas equações (29) e (30) colocando I_1 e I_2 em evidência,

$$\left(\frac{1}{j\omega C_1} + R_1 + j\omega L_1 \right) I_1 + j\omega M I_2 = V_1 \quad (31)$$

$$\left(\frac{1}{j\omega C_2} + R_2 + j\omega L_2 \right) I_2 + j\omega M I_1 = 0 \quad (32)$$

Para compreender melhor o procedimento (KERCHNER e CORCORAN, 1962) temos:

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} + R_1 + j\omega L_1 \quad (\text{impedância individual do enrolamento primário})$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2} + R_2 + j\omega L_2 \quad (\text{impedância individual do enrolamento secundário})$$

$$Z_M = 0 + j\omega M \quad (\text{impedância mútua supondo que não haja perda no núcleo})$$

Reescrevendo novamente as equações (28) e (32)

$$Z_1 I_1 + Z_M I_2 = V_1 \quad (33)$$

$$Z_2 I_2 + Z_M I_1 = 0 \quad (34)$$

Substituindo o valor de I_2 da equação (34) na equação (33)

$$Z_1 I_1 + Z_M \cdot \left(-\frac{Z_M I_1}{Z_2} \right) = V_1 \Rightarrow I_1 = \frac{Z_2 \cdot V_1}{Z_1 Z_2 - Z_M^2} \quad (35)$$

Sabendo que $V_2 = Z_2 I_2$ representa a tensão no indutor secundário. Substituindo o valor de I_1 dado pela equação (35), na equação (34), encontra-se

$$V_2 = -\frac{Z_M Z_2 V_1}{Z_1 Z_2 - Z_M^2} \quad (36)$$

Rescrevendo a equação (36) com os parâmetros do circuito primário e secundário (resistência, capacitância e indutância) e utilizando a equação (12) para substituir M .

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_2} + R_2 + j\omega L_2 \right) \cdot j\omega k \sqrt{L_1 L_2} V_1}{\left[\left(\frac{1}{j\omega C_1} + R_1 + j\omega L_1 \right) \left(\frac{1}{j\omega C_2} + R_2 + j\omega L_2 \right) \right] - (j\omega k \sqrt{L_1 L_2})^2} \Rightarrow \\ V_2 &= \frac{V_1 \sqrt{L_1 L_2} \omega^2 \cdot \frac{a}{b}}{L_1 \omega^2} \Rightarrow \\ V_2 &= V_1 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot \frac{a}{b} \end{aligned} \quad (37)$$

Onde os valores de a e b são:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{k}{\omega^2 C_2} - \frac{j k R_2}{\omega} + k L_2 \\ b &= -\frac{1}{\omega^4 C_1 C_2 L_1} + \frac{R_1}{j \omega^3 C_2 L_1} + \frac{1}{\omega^2 C_2} + \frac{R_2}{j \omega^3 C_1 L_1} + \frac{R_1 R_2}{\omega^2 L_1} + \frac{j R_2}{\omega} + \frac{L_2}{\omega^2 C_1 L_1} + \frac{j R_1 L_2}{\omega} - L_2 + k^2 L_2 \end{aligned}$$

Um desempenho ótimo será obtido quando C_1 , L_1 e L_2 forem devidamente ajustados (CHIQUITO e LANCIOTTI, 2000).

3 APLICAÇÕES DA BOBINA DE TESLA

O estudo do funcionamento de uma Bobina de Tesla permitiu discutir os princípios de geração, transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas através da construção de um protótipo e uma antena do tipo dipolo. Portanto, o método analítico realizado demonstrou o comportamento da corrente elétrica no circuito da Bobina de Tesla (CHIQUITO e LANCIOTTI, 2000).

A utilização da Bobina de Tesla como recurso didático no estudo do eletromagnetismo permitiu ao professor ampliar sua discursão e verificação de alguns fenômenos. A construção de um protótipo e em seguida a demonstração em aula para alunos permite uma explicação detalhada dos efeitos provocados pela Bobina de Tesla, como descargas elétricas, ruído e o brilho nas lâmpadas fluorescente (BARRETO, 2014).

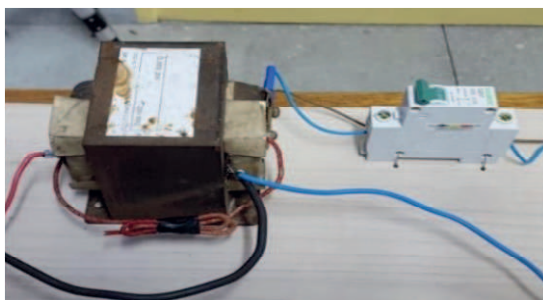
Uma discursão sobre o ensino-aprendizagem da física, tanto no ensino médio como no ensino superior, destacando a formação de professores de física e a importância na educação básica, do uso de experimentos de baixo custo e a introdução de novas tecnologias no ensino de física. Usando uma proposta motivadora para o ensino de eletrostática e eletrodinâmica usado para facilitar a compreensão de fenômenos elétricos, mediante visualização, a fim de reforçar os conceitos que foram teoricamente e motivar os alunos para o estudo posterior dos referidos temas (SILVA, 2012).

4 EXPERIMENTO: CONSTRUÇÃO DA BOBINA DE TESLA

O experimento da Bobina de Tesla pode ser construído de diversas formas, utilizando corrente e tensão contínua ou alternada. No caso do uso de corrente contínua é necessário inserir um circuito eletrônico para fazer variar a corrente elétrica no indutor primário e assim induzir uma corrente no indutor secundário.

Nesse trabalho foi optado por utilizar corrente e tensão alternada. Dessa forma não é necessário o uso de um circuito eletrônico para variar a corrente, a fonte utilizada já faz esse papel. Os componentes do experimento da Bobina de Tesla (capacitor, centelhador e indutor), foram construídos com materiais alternativos (baixo custo), exceto a fonte.

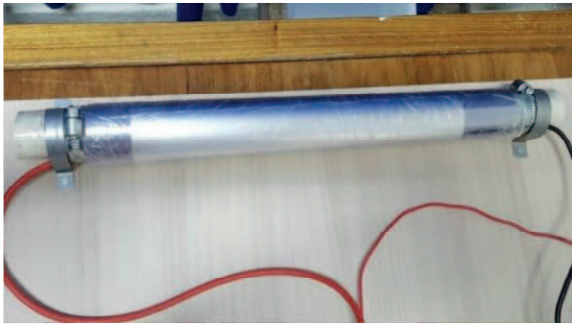
Figura 4: Fonte de Alimentação do Circuito (A); Centelhador (B); Capacitor (C); Indutor Primário e Secundário (D);



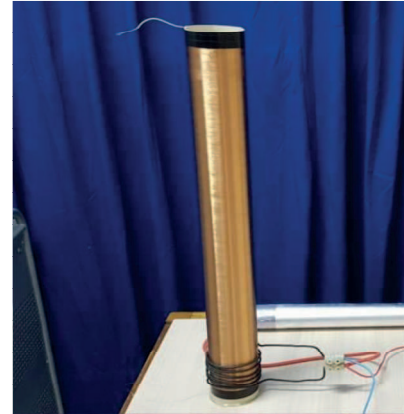
(A)



(B)



(C)



(D)

- **FONTE**

A fonte de alimentação do circuito utilizada para o experimento da Bobina de Tesla é um transformador de forno de micro-ondas, cuja tensão de saída é elevada em dez vezes. Assim, para uma tensão de entrada igual à 220 V, a tensão de saída será igual à 2200 V. A corrente elétrica na saída do transformador foi medida com um multímetro e o seu valor é igual à 2,6 A. A frequência de operação do transformador é igual a frequência da rede elétrica 60 Hz.

- **CENTELHADOR**

O centelhador foi construído com dois parafusos e separado por uma distância de aproximadamente 0,1 cm. A proximidade das duas pontas deve ser considerada, observando o valor da ruptura da rigidez dielétrica do ar 30 KV/cm.

- **CAPACITOR**

Para construir o capacitor primário C_1 , foram utilizado os seguintes materias:

- 1 cano de PVC (utilizado para instalações hidráulicas) com 47 cm de comprimento e 3,7 cm de diâmetro;
- 4 folhas de acetato, com dimensões 40 cm x 43 cm e espessura de 20×10^{-6} m;
- 2 folhas de papel alumínio (uso culinário) com dimensões 30 cm x 38 cm;
- 2 pedaços de fio condutor de cobre.

De acordo com o estudo de capacitores, devem existir dois materiais condutores separados por um material isolante, e assim, poder criar uma diferença de potencial entre os

condutores. Neste caso, o papel alumínio é o condutor que irá acumular uma quantidade de carga elétrica e a folha de acetato é o material isolante que impede o contato entre as folhas de papel alumínio.

Dessa forma, com um pedaço de fita adesiva é fixada a extremidade de uma folha de acetato e sobre ela é colocado uma folha de alumínio, em seguida fixa o fio condutor, que irá transportar as cargas elétricas, para o papel alumínio. Sobre o papel alumínio colocam-se mais duas folhas de acetato, o segundo papel alumínio, e mais um pedaço de fio, com outra folha de acetato. Após enrolar os materiais no cano é utilizada fita adesiva para deixar o capacitor no formato cilíndrico.

Para calcular a capacitância do capacitor construído é utilizada a equação (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

$$C_1 = 2\pi K \varepsilon_0 \frac{L}{\ln \frac{b}{a}} \quad (38)$$

Onde, K é a constante dielétrica do acetato, igual à 3,2. ε_0 é a permissividade do vácuo, igual à $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ e L o comprimento da folha de alumínio, 38 cm . Os valores b e a , são os raios maior ($1,912 \text{ cm}$) e menor ($1,904 \text{ cm}$), que estão separadas as folhas de papel alumínio do centro do cilindro. Substituindo esses valores na equação, encontra-se o valor da capacitância $C_1 = 16,13 \cdot 10^{-9} \text{ F}$. O valor medido para a capacitância utilizando o multímetro $C_{1_{exp}} = 9,92 \cdot 10^{-9} \text{ F}$. A dificuldade em calcular a capacitância é devido ao valor muito próximo dos raios a e b . Por isso, C_1 calculado difere consideravelmente do valor medido⁶.

• INDUTOR PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

Para construir o indutor secundário foi utilizado um cano de PVC, com diâmetro de 7 cm e comprimento 60 cm e fio de cobre esmaltado, com diâmetro de $0,2268 \text{ mm}$, sendo o comprimento do indutor l_2 igual à 57 cm e o número de espiras aproximadamente 2330. O indutor primário é constituído de seis espiras e o diâmetro do fio maior do que o fio do secundário 4 mm , assim seu comprimento l_1 é cerca de $1/19$ de l_2 . Como os indutores L_1 e L_2 estão muito próximos, pode ser considerado $r_1 = r_2$. Substituindo os valores na equação

⁶ Será utilizado todos os valores teóricos para os cálculos em sequência.

(18) encontra-se $L_1 = 5,8 \cdot 10^{-6} H$ (utilizando o osciloscópio e um gerador de função, foi obtido o valor de $L_{1_{exp}} = 5,16 \cdot 10^{-6} H$) e $L_2 = 46,06 \cdot 10^{-3} H$. Utilizando a equação (19) o valor do coeficiente de acoplamento k será igual à 0,23.

A frequência angular do circuito primário ω_1 é calculada utilizando os valores de L_1 e C_1 (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} = 3,26 \times 10^6 \text{ rad/s} \quad (39)$$

A corrente elétrica no indutor secundário i_2 pode ser calculada, levando em conta que toda a energia acumulada no circuito primário $\mathcal{E}_p = \frac{1}{2} L_1 i_1^2$ é transferida para o circuito secundário, assim $\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_s$. Onde $\mathcal{E}_s = \frac{1}{2} L_2 i_2^2$ (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

$$\frac{1}{2} L_1 i_1^2 = \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \Rightarrow i_2 = i_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (40)$$

Para calcular as resistências ôhmicas R_1 e R_2 dos indutores primário e secundário é utilizada a seguinte equação (HALLIDAY e RESNICK, 2009).

$$R = \rho \frac{\mathcal{L}}{\mathcal{A}} \quad (41)$$

Onde ρ é a resistividade, \mathcal{A} a área transversal e \mathcal{L} o comprimento do fio de cobre. O diâmetro do fio dos indutores primários e secundários são 4 mm ($\mathcal{R}_1 = 2 \text{ mm}$) e $0,2268 \text{ mm}$ ($\mathcal{R}_2 = 0,1134 \text{ mm}$) respectivamente, o comprimento do fio é calculado utilizando a equação da circunferência $2\pi r$ (considerando os raios dos indutores iguais) e a resistividade do cobre é tabelada, igual à $1,69 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$. Substituindo os valores na equação (41)

$$R_1 = \rho \frac{\mathcal{L}_1}{\mathcal{A}_1} = 1,69 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \frac{N_1 2\pi r}{\pi \mathcal{R}_1} \quad e \quad R_2 = \rho \frac{\mathcal{L}_2}{\mathcal{A}_2} = 1,69 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \frac{N_2 2\pi r}{\pi \mathcal{R}_2}$$

Considerando $N_1 = 6$ e $N_2 = 2330$, R_1 é igual a $0,0018 \Omega$ e R_2 igual a $214,43 \Omega$ (utilizando o multímetro, o valor medido foi de $R_{2_{exp}} = 225 \Omega$).

A capacitância C_2 criada no indutor secundário depende da geometria do indutor (MEDHURST, 1947).

$$C_2 = H \cdot D \quad (42)$$

Onde H é o diâmetro do indutor secundário e D é uma constante cujo valor depende da razão do diâmetro do fio e a distância de espaçamento entre eles, como também o comprimento do indutor sobre seu diâmetro. O valor da capacitância calculado é $C_2 = 27,72 \times 10^{-9} F$.

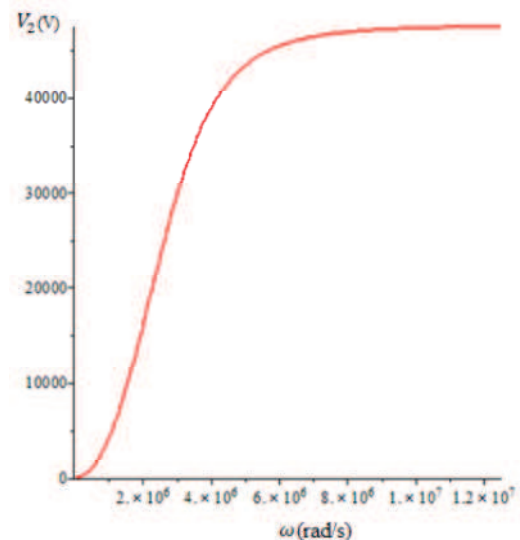
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma análise do comportamento da corrente elétrica i_2 e da tensão V_2 no indutor secundário é realizada através das equações (40) e (37)

$$i_2 = i_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad V_2 = V_1 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot \frac{a}{b}$$

A razão das indutâncias é calculada a partir dos valores $L_1 = 5,8 \times 10^{-6} H$ e $L_2 = 46,06 \times 10^{-3} H$ e assim obter as relações $i_2 = 0,011i_1$ e $V_2 = 89,12V_1 \cdot a/b$. O valor de i_2 é aproximadamente 1% da corrente no indutor primário, mais em compensação, o valor da tensão no indutor secundário aumenta por um fator multiplicativo aproximadamente igual à 90. Porém a razão a/b presente na equação faz esse valor diminuir consideravelmente (figura 5).

Figura 5: Comportamento da tensão V_2 com o aumento da frequência ω do circuito.



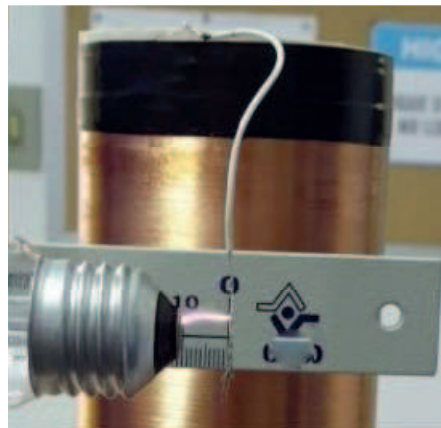
Fonte: próprio autor

O gráfico da figura (5)⁷ apresenta o comportamento da tensão V_2 para $V_1 \approx 2200 V$ e todos os valores calculados de resistência, capacitância, indutância e constante de acoplamento. Observa-se que a tensão aumenta a medida que ω aumenta, sendo que seu valor máximo é atingido $V_2 \approx 47310 V$ quando $\omega \approx 10 \times 10^6 (rad/s)$. Para esse valor de tensão V_2 é possível observar uma centelha de no máximo $1,5 cm$ ao aproximar um material condutor do indutor secundário.

Com o uso de uma lâmpada incandescente e uma régua milimétrica foi possível observar o tamanho da centelha provocado pela diferença de potencial criada entre o indutor secundário e a parte metálica da lâmpada (Figura 6). O tamanho da centelha medida é aproximadamente $10mm (1cm)$.

Sabendo que a tensão de ruptura do ar é de $30K V/cm$, assim é possível afirmar que a tensão de saída no indutor secundário é aproximadamente $30K V$. Dessa forma, analisando o gráfico (Figura 5), é possível afirmar que o circuito oscila com uma frequência angular do próximo de $3 \cdot 10^6 rad/s$.

Figura 6: Centelha provocada pela alta tensão no indutor secundário



Fonte: próprio autor

Através desse resultado, chega-se a conclusão que o circuito oscila com uma frequência próxima a frequência angular do circuito primário $\omega \approx \omega_1$. Esse é o papel do centelhador junto com o capacitor, mesmo que a frequência da fonte seja bem inferior ao do circuito primário, o capacitor ao descarregar transfere toda a energia da fonte para o indutor primário, compensando a diferença entre as frequências da fonte e do circuito.

⁷ O gráfico foi construído com auxílio de um programa computacional

Uma forma de variar a corrente e a tensão no indutor secundário é ajustando o valor da indutância L_1 ⁸, ou seja, o número de espiras do indutor primário. Observando a equação (18)

$$L_1 = \frac{\mu_0 N_1^2 \pi r_1^2}{l_1}$$

Existe várias maneiras de aumentar ou diminuir L_1 . Se aumentar R_1 , o número de espiras N_1 , o comprimento l_1 e o acoplamento entre L_1 e L_2 diminui. Assim, não é uma escolha favorável. No entanto, aumentando N_1 , l_1 também aumenta, pois o indutor torna-se mais longo. A situação mais conveniente seria aumentar N_1 e permanecer com r_1 e l_1 constante. Esse fato é obtido diminuindo o diâmetro do fio do indutor primário. Portanto, aumentando a indutância primária, a razão L_1/L_2 aumenta e conseqüentemente o valor de i_2 torna-se maior e a tensão V_2 diminui. O aumento da tensão V_2 é obtido quando a indutância primária é diminuída. Essa diminuição provoca um aumento na frequência angular do circuito primário.

Através da Tabela 1 verifica-se um resumo de todas as grandezas físicas, que foram calculadas usando o experimento da Bobina de Tesla.

Observa-se na Tabela 1 que existem alguns valores que não foram medidos experimentalmente, evidenciando o seu caráter conceitual (coeficiente de acoplamento e capacitor secundário) e aqueles que possuem valores constantes, como a tensão e a corrente da fonte de alimentação do circuito.

⁸ O indutor secundário possui um número muito grande de espiras ≈ 2330 . É mais conveniente variar o número de espiras de L_1 .

Tabela 1 – Valores das Grandezas Físicas Utilizadas no Experimento da Bobina de Tesla

GRANDEZA FÍSICA	EQUAÇÃO	FÓRMULA	VALOR TEÓRICO	VALOR EXPERIMENTAL
CAPACITÂNCIA PRIMÁRIA	38	$C_1 = 2\pi K \varepsilon_0 \frac{L}{\ln \frac{b}{a}}$	$C_1 = 16,13 \times 10^{-9} F$	$C_{1exp} = 9,92 \times 10^{-9} F$
CAPACITÂNCIA SECUNDÁRIA	42	$C_2 = H \cdot D$	$C_2 = 27,72 \times 10^{-9} F$	_____
RESISTÊNCIA SECUNDÁRIA	41	$R_1 = \rho \frac{L}{\mathcal{A}}$	$R_1 = 214,43 \Omega$	$R_{2exp} = 225 \Omega$
RESISTÊNCIA PRIMÁRIA	41	$R_2 = \rho \frac{L}{\mathcal{A}}$	$R_2 = 0,0018 \Omega$	_____
INDUTÂNCIA PRIMÁRIA	18	$L_1 = \frac{\mu_0 N_1^2 \pi r_1^2}{l_1}$	$L_1 = 5,8 \times 10^{-6} H$	$L_{1exp} = 5,16 \times 10^{-6} H$
INDUTÂNCIA SECUNDÁRIA	18	$L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2 \pi r_2^2}{l_2}$	$L_2 = 46,06 \times 10^{-3} H$	_____
FREQUÊNCIA ANGULAR	39	$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}$	$\omega_1 = 3,26 \times 10^6 rad/s$	$\omega_{1exp} = 3 \times 10^6 rad/s$
TENSÃO NO INDUTOR SECUNDÁRIO	37	$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot \frac{a}{b}$	$V_{2max} = 47310 V$	$V_{2exp} = 30000 V$
COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO	19	$k = \sqrt{\frac{l_1 r_2}{l_2 r_1}}$	$k = 0,23$	_____
CORRENTE ELÉTRICA SECUNDÁRIA	40	$i_2 = i_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$	$i_2 = 0,0286 A$	_____
CORRENTE ELÉTRICA PRIMÁRIA	_____	_____	$i_1 = 2,6 A$	_____
TENSÃO DA FONTE	_____	_____	$V_1 = 2200 V$	_____

Fonte: próprio autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A relevância deste trabalho partiu de uma revisão sobre a vida e obra de Nikola Tesla e uma das suas principais invenções, a Bobina de Tesla. Desta forma, apresentou-se o desenvolvimento científico e tecnológico. Após a construção do experimento, da Bobina de Tesla, foi possível um estudo detalhado dos conceitos envolvidos, ou seja, o comportamento dos componentes do circuito, quando submetidos a corrente e tensão alternada. Vale salientar que essa análise é raramente aplicada no ensino do eletromagnetismo, principalmente para alunos de física, tanto do ensino médio quanto do superior. Além disso, foi possível calcular o quanto a tensão foi elevada no indutor secundário, aplicando a lei de Kirchoff considerando no cálculo alguns parâmetros poucos conhecidos, como a indutância mútua e o coeficiente de acoplamento, indispensáveis no estudo de transferência de energia.

Por fim, este protótipo da Bobina de Tesla feito com materiais de baixo custo funcionou bem, permitindo a visualização de vários efeitos, dentre estes, a medição do tamanho da centelha no indutor secundário, este resultado experimental foi compatível ao resultado teórico. Portanto, os resultados foram satisfatórios e permitiram a compreensão do tema.

CONSTRUCTION OF THE TESLA COIL: A PROPOSAL FOR THE TEACHING OF ELECTROMAGNETISM

ABSTRACT

This experiment proved to be relevant in the development of electromagnetism and technology, this electrical apparatus that proved to be not only an important subsidy from the scientific point of view, but also very interesting to motivate students of Physics. The present work aims to report the main challenges and results observed during and after the construction of a Tesla Coil, the construction was carried out in the Physics laboratory of the State University of Paraíba. Therefore, the purpose of this work was to construct the Tesla coil, which is considered as one of the most traditional physical experiments involving electromagnetic phenomena, demonstrating how the electric currents behave in the presence of magnetic fields, giving rise to the effect called Electromagnetic Induction. The experiment allowed the visualization of several phenomena and the experimental determination of some values. In this way, the result presented was satisfactorily obtained.

Keywords: Physics experiment. Magnetic field. Electromagnetic induction.

REFERÊNCIAS

BOAS, Mary L. **Mathematical Methods in The Physical Sciences**. 3ª ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2005.

BARRETO, J. R. Alves. **Uma Nova Proposta de Recurso Didático: A Bobina de Tesla para uso em Temas do Eletromagnetismo**. Planatina: UnB, 2014.

CHILDRESS, D. Hatcher. **The Fantastic Inventions of Nikola Tesla**. USA: Adventures Unlimited Press, 1993.

CHIQUITO, Adenilson J.; LANCIOTTI, Francesco Jr. Bobina de Tesla: dos Circuitos Ressonantes LC aos Princípios das Telecomunicações. **Revista Brasileira de Física**, São Paulo: UFSC, vol. 22, no. 1, 69-77, Março 2000.

GALIAZZI, M. C. et al. Objetivos das atividades experimentais no ensino médio: a pesquisa coletiva como modo de formação de professores de ciências. **Ciência & Educação**, v.7, n.2, p.249-263, 2001.

HALLIDAY, David; RESNICK, J. Walker. **Fundamentos de Física, vol. 3**. 8ª ed. Tradução: Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

FERREIRA, R. L., **Minhas invenções: A autobiografia de Nikola Tesla**. São Paulo: Unesp, 2012.

KERCHNER, M. R.; CORCORAN, F. G.; **Circuitos de Corrente Alternada**. 4ª ed. Tradução: Reynaldo Resende; Ruy Pinto da Silva Sieczkowski. Porto Alegre: Globo, 1962.

LIMA, A. Alves. **O Ressurgimento do sujeito pela escrita autobiográfica: o caso de Nikola Tesla**. Goiânia: UFG, 2017.

LORRAIN, P.; CORSON, D.; LORRAIN, F. **Campos e Ondas Electromagnéticas**. 3ª ed. Tradução: Carlos Fiolhais; J. L. Malaquias Lima; Orlando Oliveira: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000.

PASSOS, A. M. F.; MOREIRA, M. A.; Avaliação do ensino de laboratório: Uma proposta alternativa, **Revista brasileira de física**, v.12, p. 375, 1982.

RIBEIRO, D. T.; ALMEIDA, A. M.; CARVALHO, P. S. Indução eletromagnética em laboratório. **Revista brasileira de ensino de física**, v.34, n.4, p.4317-4332, 2012.

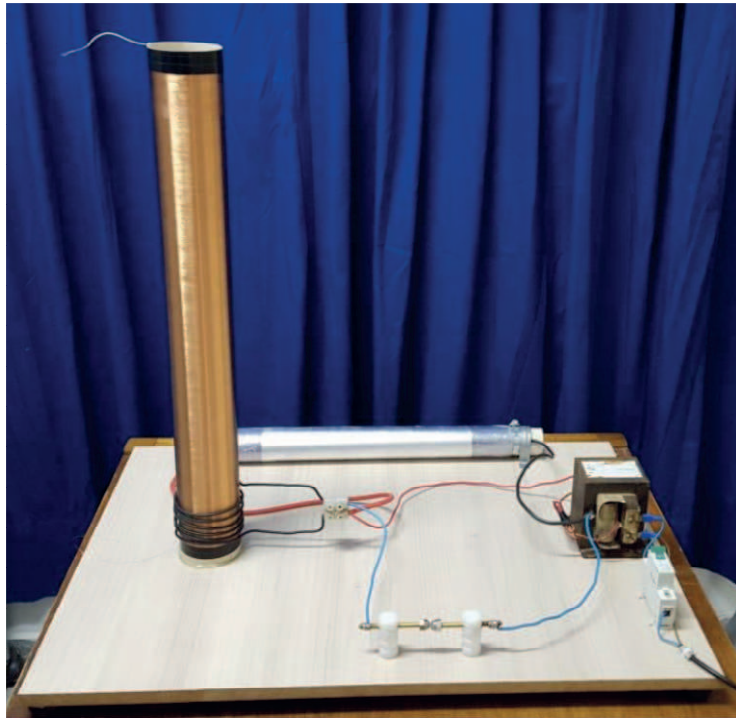
ROBERT, R. Efeito Pelicular. **Revista Brasileira de Física**, Curitiba: UFP, vol. 22, no. 2, 285-289, Junho, 2000.

MEDHURST, R. G.; **H.F. Resistance and Self-Capacitance of Single-layer Solenoids**. Technical report, General Electric Company, February 1947.

SILVA, D. S. Sousa. **A Versatilidade da Bobina de Tesla na Prática Docente do Ensino do Eletromagnetismo**. Fortaleza: UECE, 2012.

WY SOCK, W.C.; CORUM, J. F.; HARDESTY, J. M.; CORUM. K. L.; Who Was The Real Dr. Nikola Tesla?, 2001. Disponível em:
<http://www.teslasociety.com/pdf/who_was_the_real_dr_nikola_tesla.pdf>. Último acesso em: 10 de junho de 2018.

APÊNDICE – EXPERIMENTO DA BOBINA DE TESLA



Fonte: próprio autor

Esta Bobina de Tesla foi construída no laboratório de Física, nas dependências da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, Campus I. Sobre supervisão do Técnico em laboratório de Física Thiago Araújo e Orientação dos Professores Dr. Edvaldo de Oliveira Alves “Mará” (*in memoriam*) e Me. Gilson Aciole.