

Artigo

Dimensionamento e Estudo sobre uma Bobina de Tesla

Iggor Bezerra da Silva ^[1], Cleydson A. de C. Nascimento ^[2], Nikolas I. F. de Oliveira ^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; iggor.silva@ufersa.edu.br

^[2] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará; cleydson.adller@ifce.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; nikolas.oliveira@ufersa.edu.br

Recebido: 21/11/2020;

Aceito: 17/12/2020;

Publicado: 15/02/2021.

Resumo: Esse artigo apresenta um projeto e análise dos parâmetros de construção de uma Bobina de Tesla (BT). A BT oferece uma apresentação de vários fenômenos físicos da eletrostática e eletrodinâmica, como o efeito corona e indutância induzida, isso faz dela um instrumento didático aplicável para acompanhamento de estudos práticos em instituições de ensino. O objetivo deste trabalho é descrever e relacionar as etapas de construção de um projeto de uma BT e fazer uma verificação da confiabilidade do método de cálculo convencional para determinação dos parâmetros da BT. É feita a comparação dos resultados obtido de maneira convencional com o gerado por um *software* computacional, WinTesla. Vale ressaltar que os fatores que são responsáveis pela diferença, entre os resultados dos dois métodos, são as limitações de arredondamentos dos parâmetros que o programa apresenta.

Palavras-chave: Bobina de Tesla; Instrumento didático; WinTesla.

Abstract: This paper presents a project and analysis of the construction parameters of a Tesla Coil (BT). The BT offers a presentation of several physical phenomena of electrostatics and electrodynamics, such as the corona effect and induced inductance, this makes it an applicable teaching tool for monitoring practical studies in educational institutions. The objective of this work is to describe and relate the construction stages of a BT project and to check the reliability of the conventional calculation method for determining BT parameters. The results obtained in a conventional way are compared with those generated by a computer software, WinTesla. It is worth mentioning that the factors that are responsible for the difference in results between the two methods are the limitations and rounding of the parameters that the program presents.

Key-words: Tesla Coil; Teaching tool; WinTesla.

1. INTRODUÇÃO

Nikola Tesla nasceu no dia 10 de julho de 1856 em uma aldeia sérvia, na antiga Áustria, hoje onde se localiza a Croácia e morreu no dia 07 de janeiro de 1943 nos E.U.A. Ele realizou muitas experiências com correntes alternadas com frequências acima dos 100kHz, onde ele procurava gerar e transmitir correntes elétrica a grandes distâncias eliminando as perdas pelo aquecimento do condutor, efeito Joule. Nesse intuito ele foi um dos pioneiros na criação dos alternadores [2].

Das inúmeras patentes de Nikola Tesla, a mais famosa foi o “aparato para transmitir energia elétrica”, um transformador elevador de alta frequência com núcleo de ar, apresentada no ano de 1914 na *Patent & Trademark Office* na União Soviética, na qual atualmente este aparato ficou conhecido como Bobina de Tesla [3].

As pesquisas de Tesla causaram um grande avanço na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, exemplo disso, patentes de transformadores, geradores e alternadores enfatizando a eletricidade como uma fonte de energia indispensável e ferramenta para o avanço da humanidade [2].

A BT é constituída de circuitos internos muito similares aos dispositivos wireless modernos. Ela se comporta como um rádio, transmitindo e recebendo sinais eletromagnéticos, tornando Tesla assim um dos pioneiros na área de telecomunicações e conexões sem fio (*wireless*), muito usada atualmente [3].

Os efeitos produzidos pelos altos níveis de tensão elétrica e altas frequências geradas pela Bobina de Tesla tem uma excelente aplicação didática em aulas de laboratório de Física ou de Engenharia Elétrica. Por meio da bobina desenvolvida seu funcionamento e dimensionamento também podem ser explicados em demonstrações educacionais de ensino, como em feira de ciências. Por meio dela são abrangidos fenômenos físicos como eletrodinâmica, eletroestática e eletromagnetismo [5].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da bobina de Tesla do presente trabalho se inicia com o cálculo manual dos parâmetros, para a obtenção de dados, e posteriormente aplicar esses dados no *software*, com objetivo de comparação das variáveis de saída utilizando as mesmas variáveis de entrada. O WinTesla foi escolhido para comparação de parâmetros finais com o cálculo manual. O *software* em questão apresenta, entretanto, algumas limitações, pois não aceita uma entrada de dados muito precisa, devido a limitação nas casas decimais após a vírgula.

2.1. Projeto de uma bobina de Tesla

Uma Bobina de Tesla pode começar a ser construída de duas formas: ou se projetar primeiro o sistema secundário primeiro e depois o primário, ou se projetar primeiro o primário e depois o secundário. A primeira escolha é feita quando se requer uma tensão de saída determinada ou determinado comprimento de arcos elétricos. A segunda escolha é feita quando não se tem disponível os componentes requeridos para o projeto. No presente trabalho foi adotada a primeira escolha, pois ao determinar a tensão de saída pode ocasionar em dificuldade na obtenção de materiais para a construção, sendo necessário, portanto, com se adequar o material disponível com a tensão de saída. Esse cálculo terá como base o trabalho de SILVA [3] como base nos parâmetros adotados por ele.

2.1.1. Obtenção da capacitância do capacitor do circuito primário

Para este projeto será utilizado um faiscador estático, na qual deverá ser calculada a capacitância do capacitor primário em função da frequência do transformador. Foi utilizado um transformador com tensão de entrada igual a 220V, frequência de 60Hz, tensão de saída 15kV, potência de 450W e corrente 30mA. Sendo assim, primeiramente, é calculada a impedância do transformador conforme Equação 1 [1].

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{15.000V}{0,03A} = 500k\Omega \quad (1)$$

Com a impedância obtida pode-se calcular a capacitância conforme Equação 2.

$$C = \frac{1}{2\pi fZ} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 500.000} = 5,305nF \quad (2)$$

2.1.2. Determinação do comprimento do fio e do número de espiras na bobina

Os parâmetros adotados para a bobina secundária são diâmetro externo de 11cm e altura da bobina de 58,8 cm. Esses parâmetros são baseados em uma razão entre comprimento e diâmetro exterior com proporção de 4,8:1, que corresponde a proporção empírica ideal para o dimensionamento da Bobina de Tesla. Foi adotado um fio de bitola 24 AWG (0,20mm²). O fio 24 AWG tem bitola do fio igual a 0,57054 mm, portanto tem 17,52725 voltas para cada centímetro. Sendo assim, o comprimento é dado pela Equação 3 e o número de espiras é dado pela Equação 4.

$$C = \pi DAH = \pi \cdot 0,11 \cdot 1752,725 \cdot 0,528 = 319,3553 \text{ m} \quad (3)$$

$$N = AH = 1752,725 \cdot 0,528 = 924 \text{ espiras} \quad (4)$$

Na Equação 3 e Equação 4 se têm que:

- C = Comprimento do fio da bobina secundária (m);
- D = Diâmetro externo da bobina secundária (m);

- A = Número de voltas por metro (espira/m);
- H = Altura da bobina secundária (m);
- N = Número de espiras.

2.1.3. Cálculo da indutância da bobina secundária e a auto capacitância do indutor

A Equação 5 mostra o cálculo da indutância.

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} = \frac{(924 \cdot 2,165354)^2}{9 \cdot 2,165354 + 10 \cdot 20,7874} = 17606,92521\mu H \quad (5)$$

Onde se tem que:

- L_S = Indutância da bobina secundária (μH);
- N = Número de espiras;
- R = Raio da bobina secundária dada em polegadas (pol);
- H = Altura da bobina secundária dada em polegadas (pol).

Diante disso, a Equação 6 determina a auto capacitância da bobina secundária.

$$C_{ac} = 0,29H + 0,41R + 1,94 \sqrt{\frac{R^2}{H}} = 8,27194pF \quad (6)$$

2.1.4. Cálculo da frequência de ressonância do circuito

O cálculo da frequência de ressonância para um quarto do comprimento de onda pode ser dado pela Equação 7.

$$f_0 = \frac{186000 \cdot 5280}{4C} = \frac{18600 \cdot 5280}{4 \cdot 319,3553 \cdot 3,278} = 234391Hz \quad (7)$$

Onde:

- C = Comprimento do fio (pé);
- f_0 = frequência (Hz).

Com o valor obtido da frequência de ressonância para um quarto de comprimento de onda pode se obter a capacitância requerida na carga de topo, conforme mostra as Equação 8 e Equação 9.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}} = 234391 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,01760692521 \cdot C_S}} \quad (8)$$

$$C_S = 26,18634484 \cdot 10^{-12}F = 26,18634484pF \quad (9)$$

Diante disso, para se obter a capacitância final da carga de topo é necessário subtrair a auto capacitância da Equação 6 da capacitância do secundário da Equação 8, conforme pode ser visto pela Equação 10.

$$C_{SF} = C_S - C_{ac} = 26,18634484pF - 8,27194pF = 17,91440484pF \quad (10)$$

Onde:

- C_{SF} = Capacitância final da carga de topo (F);
- C_S = Capacitância do secundário (F);
- C_{ac} = Auto-capacitância da bobina secundária

Por meio da capacitância final da carga de topo se tem as dimensões de um capacitor toroidal para 17,92pF de capacitância. Sendo seu diâmetro externo $d_1 = 406mm$ e o diâmetro interno $d_2 = 127mm$. Diante disso, a *R4EM*, v. 3, n. 1, p. 95-102, 2021.

capacitância toroidal em função dos diâmetros externos e internos é dada pela Equação 11.

$$C_{(d_1,d_2)} = \frac{2,8 \left(1,2781 - \frac{d_2}{d_1}\right) \sqrt{\frac{\pi}{4} (d_1 - d_2) d_2}}{25,4} \quad (11)$$

Por meio da Figura 1, é possível observar as dimensões do toróide conforme os diâmetros obtidos.

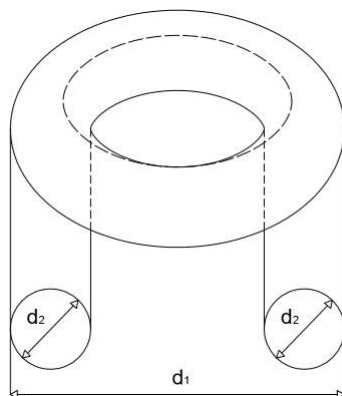


FIGURA 1. Dimensões do toróide. (Autoria Própria).

2.1.5. Cálculo da indutância da bobina primária

O cálculo da indutância da bobina primária é dado pela Equação 12.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = 234391 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_p \cdot 0,005305 \cdot 10^{-6}}} \quad (12)$$

$$L_p = 86,91065265 \mu H$$

Diante disso se tem as seguintes especificações da bobina primária: diâmetro de tubo de cobre com 6,33mm; número de espiras igual a 16; distância entre espiras de 8mm; distância entre o primário e o secundário de 25mm; diâmetro interno da bobina primária de 16mm; diâmetro total de 60mm; indutância máxima na 15ª espira de 79,5 μH e tomada entre a 14ª e 15ª espira para obter indutância de 72,42 μH .

2.1.6. Cálculo da tensão elétrica de saída da BT

De acordo com os parâmetros calculados, pode-se então obter o valor de tensão elétrica gerada pela BT. A tensão de saída do secundário é calculada através da Equação (13), onde está em função da tensão do indutor primário, indutância do primário e indutância secundária, na qual já foram calculados.

$$V_S = V_P \sqrt{\frac{L_S}{L_P}} = 15000 V \sqrt{\frac{17606,92521 \mu H}{86,91065 \mu H}} = 213499,3284 V \quad (13)$$

Portanto a tensão de saída da BT projetada é de aproximadamente 213,5kV.

3. RESULTADOS

Os parâmetros de saída calculados de modo convencional foram comparados com os calculados pelo software WinTesla, utilizando a inserção dos mesmos parâmetros de entrada para ambos os métodos.

3.1. Parâmetros da bobina secundária

A Figura 2 apresenta os resultados obtidos no WinTesla dos parâmetros de saída, para bobina secundária.

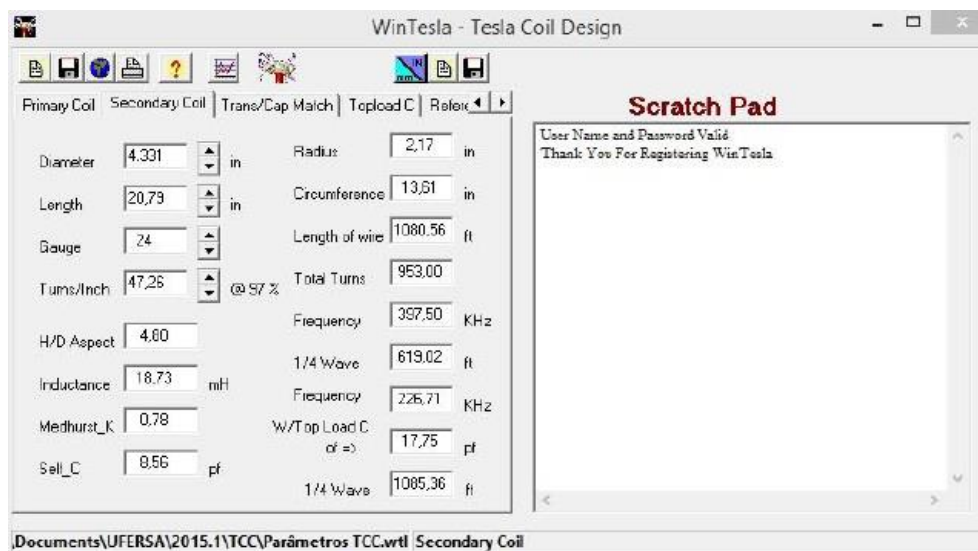


FIGURA 2. Parâmetros da bobina secundária. (Autoria Própria).

Diante disso se tem os parâmetros de saída do software: voltas por polegada igual a 47,26 espiras por polegada; indutância da bobina secundária igual a 18,73mH; comprimento do fio do indutor secundário igual a 329,44m e números de espiras igual a 953. Comparando com os valores calculados, se observa valores bem próximos: voltas por polegada igual a 44,51 espiras/polegada; indutância da bobina secundária igual a 17,60mH; comprimento do fio do indutor secundário igual a 319,35m.

3.2. Carga de topo toróide

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos no WinTesla dos parâmetros de saída, para a carga da bobina secundária.

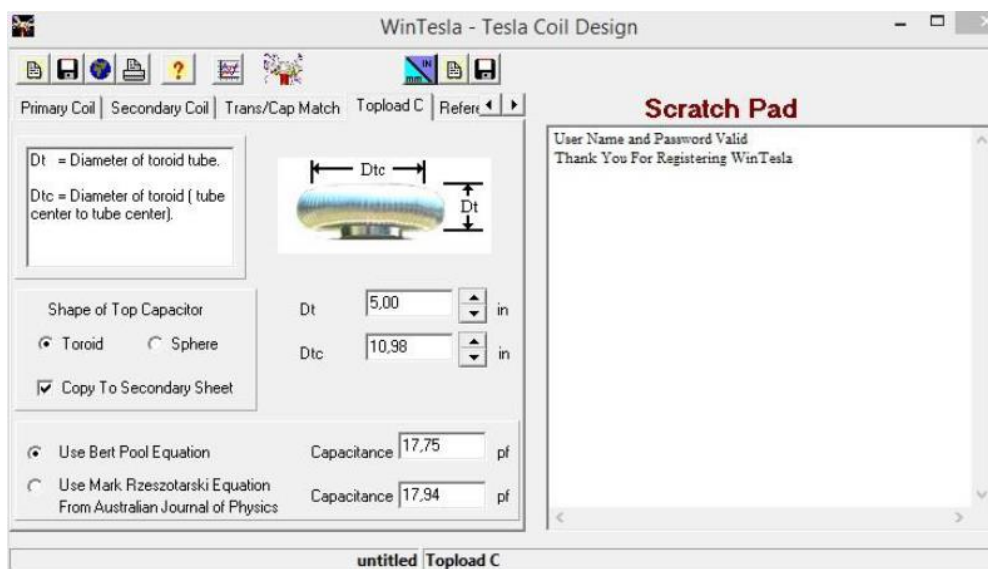


FIGURA 3. Parâmetros da carga da bobina secundária. (Autoria Própria).

Para os parâmetros de entrada: diâmetro externo do toróide igual a 406mm e diâmetro interno do toróide igual a 127 mm, foi obtido o parâmetro de saída do software de capacitância secundária igual a 17,75pF. Comparando com o parâmetro de saída da carga de topo da bobina secundária obtido de forma convencional se tem que a capacitância secundária é igual a 17,91pF. Os resultados em ambos os métodos se mostram bem próximos.

3.3. Bobina primária

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos no WinTesla dos parâmetros de saída, para a bobina primária.

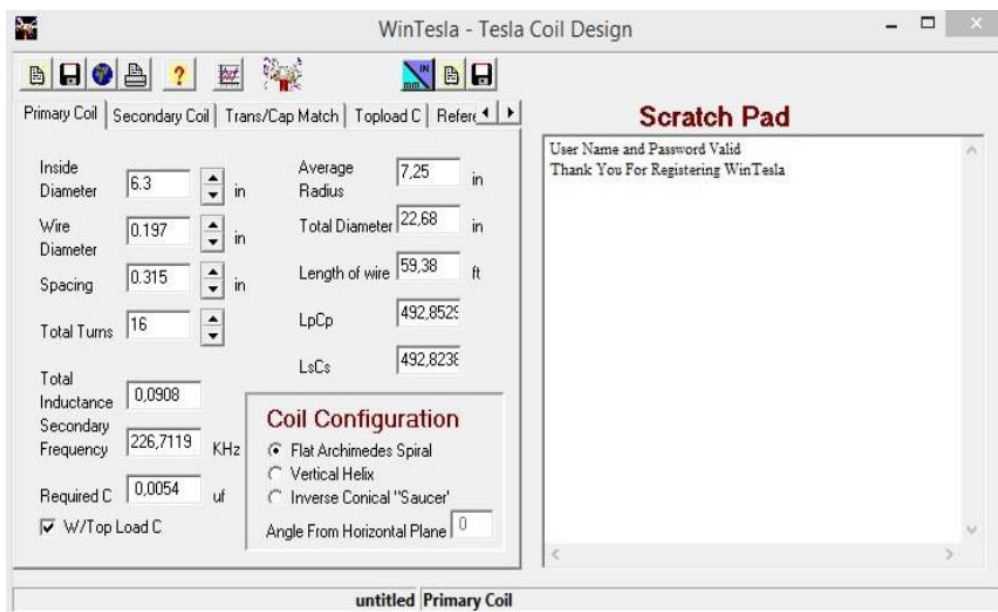


FIGURA 4. Parâmetros da bobina primária. (Autoria Própria).

Para os parâmetros de entrada: diâmetro interno da bobina primária igual a 160mm; diâmetro do fio igual a 5 mm; espaço entre as espiras igual a 8mm e número de espiras igual 16 espiras, Foram obtidos os parâmetros de saída do software: capacitância primária igual 0,0054 μ F; frequência de ressonância igual a 226,719kHz; indutância primária igual a 0,0908mH e diâmetro externo da bobina primária igual 57,6072cm. Sendo assim, comparando com os parâmetros de saída da bobina primária obtidos de forma convencional se tem que a capacitância primária é igual a 0,005305 μ F; a frequência de ressonância é igual a 234,391kHz; a indutância primária é igual 0,08691mH e o diâmetro externo da bobina primária é igual a 60cm. Os resultados se mantiveram próximos, não são exatamente iguais, pois o *software* não aceita uma entrada de dados muito precisa, com limitações nas casas decimais após a vírgula.

3.4. Bobina primária

A Figura 5 ilustra os parâmetros de entrada do transformador primário que devem ser inseridos para a finalização do cálculo da BT utilizando o WinTesla

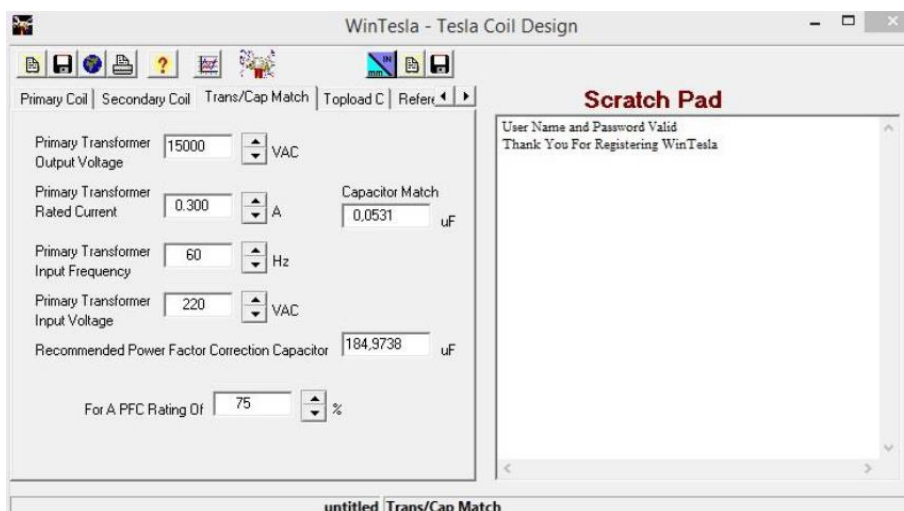


FIGURA 5. Parâmetros do transformador primário. (Autoria Própria).

3.5. Análise dos resultados

Os resultados obtidos foram satisfatórios, levando em conta que o *software* WinTesla não tem uma boa aproximação de valores por só admitir até duas casas decimais após a vírgula. Os dados finais apresentaram semelhança, onde já era esperado não ser exatamente igual, pode-se ver que nenhum dado deu diferença considerável. Através da Tabela (1), pode-se observar que os resultados e a comparação de ambos os métodos.

TABELA 1. Comparação dos resultados. (Autoria Própria).

| Parâmetros | Método Convencional | Método Computacional | Erro Percentual |
|--|---------------------|----------------------|-----------------|
| Volts da bobina secundária (esp/pol) | 44,5192 | 47,2600 | 5,80 |
| Indutância da bobina secundária (mH) | 17,6069 | 18,7300 | 6,00 |
| Comprimento do fio do indutor secundário (m) | 319,3553 | 329,4411 | 3,06 |
| Número de espiras da bobina secundária | 924,0000 | 953,0000 | 3,04 |
| Capacitância secundária (pF) | 17,9144 | 17,7500 | 0,92 |
| Capacitância primária (µF) | 0,0053 | 0,0054 | 1,76 |
| Frequência de ressonância (kHz) | 234,3910 | 226,7190 | 3,27 |
| Indutância primária (mH) | 0,0869 | 0,0908 | 4,28 |
| Diâmetro interno da bobina primária (cm) | 60,0000 | 57,6072 | 3,99 |

Os valores do número de espiras secundário, comprimento do fio do indutor secundário, diâmetro externo da bobina primária e de volts por polegada da bobina secundária, calculados pelo *software* são valores obtidos por ele de maneira aproximada. Foi necessária, então, a apresentação e comparação desses valores do método computacional, onde isso é mais um dos fatores que faz com que apareça um erro entre os valores dos dois métodos comparados.

Os principais parâmetros que são analisados para um projeto de uma BT são, as indutâncias e capacitâncias das bobinas primárias e secundárias. Esses parâmetros são primordiais, que para obtenção deles, são utilizados o número de espiras do indutor, comprimento do indutor e a frequência de ressonância. Portanto esses parâmetros são o maior foco da análise dos resultados.

Como é visto na Tabela (1), a diferença dos resultados, ou erros percentuais, são inferiores a 6%, é um erro não muito significativo. Porém os erros percentuais foram superiores a 0.92%, não se obteve nenhum valor igual comparado por ambos os métodos. Essa margem de erro é admissível, já que existem vários fatores que contribuem para a divergências entre resultados, como, por exemplo, a limitação do programa no acréscimo de casas decimais.

A BT é um transformador de núcleo de ar, ela se comporta como um transformador elevador, mas diferentemente do transformador convencional com entreferro, seu ganho de tensão não depende unicamente das tensões elétricas das bobinas e seus números de espiras. A tensão elétrica de saída da BT projetada foi aproximadamente 213,5kV, tomando como base o cálculo descrito neste trabalho. Tomando a BT como um transformador com núcleo de ferro, pode-se calcular a tensão elétrica de saída através da Equação (14), e analisar a evidente diferença entre as tensões de saída.

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \therefore V_S = V_P \frac{N_S}{N_P} \quad (14)$$

$$V_S = V_P \frac{N_S}{N_P} = 1500 \cdot \frac{924}{16} = 866250 \text{ V}$$

Essa tensão de saída para um transformador com núcleo de ferro não leva em consideração fatores importantes que influenciam na perda e interação do sistema como espaçamento entre espiras, formato da bobina, espaçamento entre as bobinas. Onde todos esses interferem na indutância do conjunto, como por exemplo o espaçamento entre as espiras da bobina primária do projeto que é bastante elevado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A BT é um equipamento que apesar de ter sua estrutura simples e não ser muito conhecido, ofereceu à ciência um considerado salto no ramo de estudo da telecomunicação, além de ser um exemplo prático para os

fenômenos eletromagnéticos como as faíscas geradas pela tal, geralmente com potencial elétrico de mais de 100kV, conhecidas como efeito corona.

Neste trabalho foi possível ver que para o projeto determinado conseguiu-se tensões elétricas de quase 1 milhão de volts com uma BT de médio porte, onde na prática seria suficiente para evidenciar os efeitos eletroestáticos. Os dados utilizados para o desenvolvimento desse projeto foram comparados com os dados gerados computacionalmente, onde apresentaram resultados próximos, validando assim o método de cálculo convencional para desenvolver projetos.

A teoria descrita neste trabalho permite que sejam feitos mais estudos sobre a BT e sua aplicabilidade e criar, a partir deste, estudos mais aprofundados sobre transferência de energia. O princípio de transferência de energia da BT, o *wireless*, foi de fundamental importância para a o avanço na telecomunicação com o rádio e ainda está sendo, hoje o com *wifi*. A transferência de energia elétrica via *wireless* é datada de mais de 100 anos passados, onde Nikola Tesla já conseguia acender lâmpadas fluorescentes através da indutância eletrodinâmica. Hoje já estão sendo feitos estudos e aplicações sobre a utilização da energia elétrica sem fio nas residências, o que enfatiza cada vez mais a importância da pesquisa e aplicação da utilização da indução elétrica no cotidiano.

REFERÊNCIAS

- [1] BOYLESTAD, Robert L. Análise de Circuitos. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2004.
- [2] CHIQUITO, Adenilson J.; LANCIOTTI JUNIOR, Francesco. Bobina de Tesla: dos Circuitos Ressonantes LC aos princípios das Telecomunicações. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1999.
- [3] GEREKOS, Christopher. The Tesla Coil. Bruxelles: Université Libre de Bruxelles. 2012.
- [4] SILVA, Domingos Sávio de Souza e. A versatilidade da Bobina de Tesla na prática docente do ensino do eletromagnetismo. 2012. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Física, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2012.
- [5] SUOMALAINEN, Harri. Tesla coil theory and applications. New York: Haba, 1993.