

Diseño y Construcción de una Bobina Tesla

RESUMEN

El presente trabajo describe la teoría de funcionamiento y el proceso de diseño y construcción de una bobina Tesla, construida con el propósito de servir de apoyo docente para los cursos de electromagnetismo y Alta Tensión. A través del simulador Pspice se obtuvieron las variables eléctricas de la bobina Tesla y por medio de un programa de elementos finitos se identificó la densidad de flujo magnético alrededor de la misma. Se plantea la posibilidad de realizar pruebas de aislamiento con este dispositivo al igual que demostraciones.

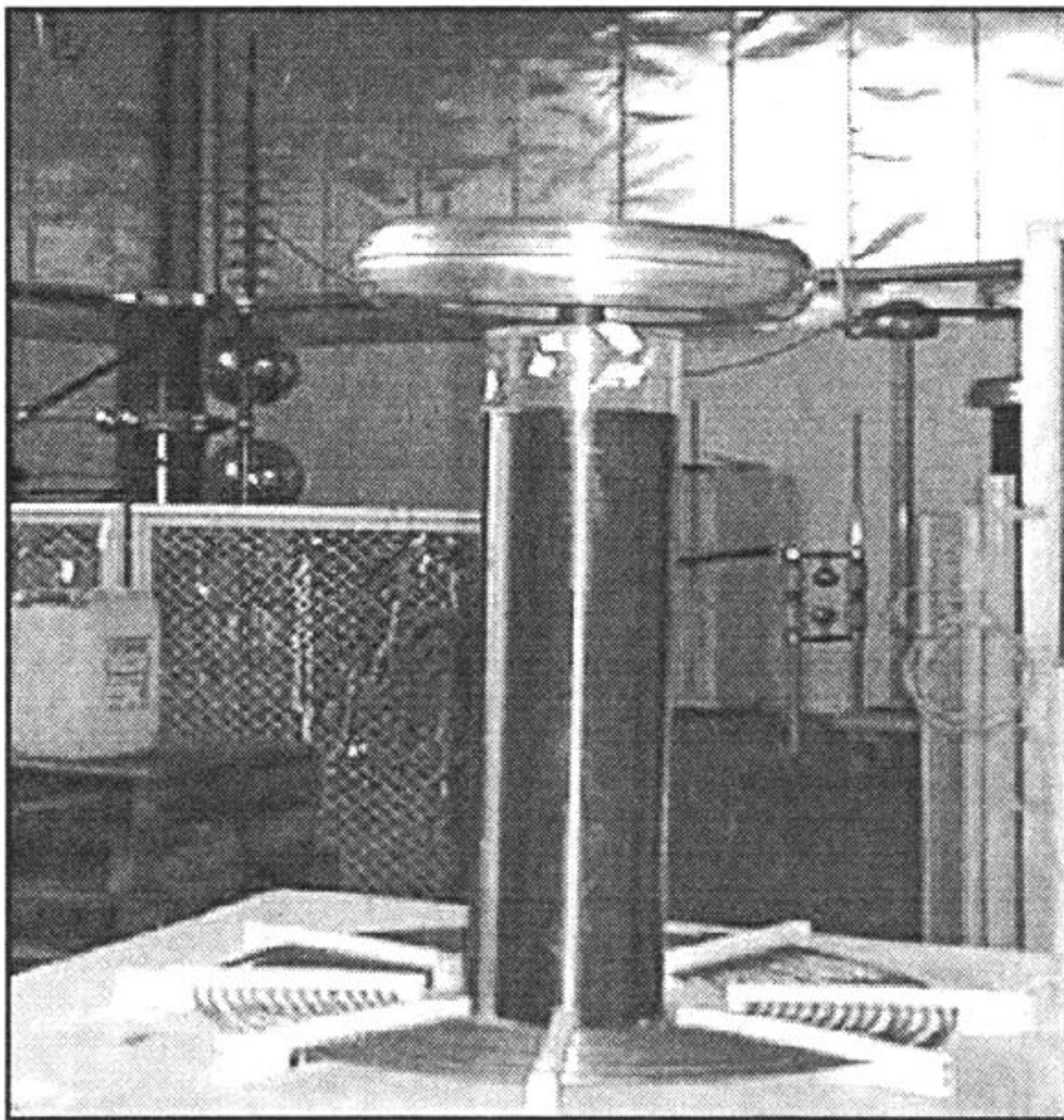
PALABRAS CLAVES

Resonancia, Alta frecuencia, Tesla, generador, bobina.

ABSTRACT

This paper describes the theory of operation, design and construction process of a Tesla coil. as a tuition support to teach high voltage and electromagnetism. Through a Pspice simulator program, electric variables of the Tesla coil were determined and by means of finite-element Program, the magnetic flow density around the coil was identified. The possibility of carrying out insulation tests with that device is encouraged.

21
.....



□ **Héctor Cadavid, Ph.D**
Profesor titular
Universidad del Valle.
Colombia.

□ **Oscar Roman Tudela, Esp.**
Profesor titular
Universidad del Valle.
Colombia.

□ **Guillermo Aponte M., MSc.**
Profesor titular
Universidad del Valle.
Colombia.

□ **Francisco Javier García, Ing.**
Ingeniero pruebas Laboratorio
de Patronamiento de Equipo.
Colombia.

*Grupo de Investigación en Alta Tensión
GRALTA*

<http://www.gralta.edu.co>

* La Revista recibió este artículo en Diciembre de 2.001

KEYWORDS

Resonance, high frequency, Tesla, generator, coil.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de disponer de elementos para ilustrar a los estudiantes de ingeniería sobre algunos fenómenos como: ionización de gases, conducción eléctrica en el aire se plantea la construcción de un dispositivo como lo es la bobina Tesla que funciona bajo el principio de doble resonancia en el cual su bobina primaria y secundaria conforman un transformador con núcleo de aire.

Fue patentada y construída por Nikola Tesla en el año de 1891 mientras estudiaba la posibilidad de la transmisión de energía sin conductores.

Este generador de alto voltaje a alta frecuencia puede desarrollar voltajes superiores a 100 kV con formas de onda como oscilaciones amortiguadas. Puede ser un dispositivo suplementario al generador de Marx en laboratorios de Alta Tensión con el objetivo de hacer demostraciones y además pruebas de aislamiento con formas de onda no estandarizadas.

2. FUNCIONAMIENTO DE LA BOBINA TESLA

En la figura 2 se observa cómo la energía que proviene del transformador elevador es utilizada para cargar el condensador de alto voltaje, el alto voltaje al cual se ven sometidos los electrodos del "gap" hace que se produzca en el aire a su alrededor una ionización generando un efecto de avalancha que hace que el núcleo de aire sea un buen conductor. De esta manera, la energía almacenada en el condensador se descarga en la bobina primaria en forma de una oscilación de alta frecuencia, la cual es exactamente la frecuencia de resonancia del circuito secundario con lo que se generará un voltaje muy elevado en la descarga terminal.

El proceso de transferencia de energía de un circuito a otro continuará presentando oscilaciones que aumentan y disminuyen en el tiempo en el cual se producen pérdidas de energía en el núcleo de aire y por radiación y formación de arcos en la descarga terminal, lo cual genera una disminución en el nivel de energía del sistema acoplado Tesla.

En la figura 1 se muestra la oscilación de corriente en la bobina primaria y el voltaje en el secundario para varios ciclos con lo que se muestra

que el voltaje de salida es una oscilación de alta frecuencia cuya amplitud es modulada por otra de baja frecuencia.

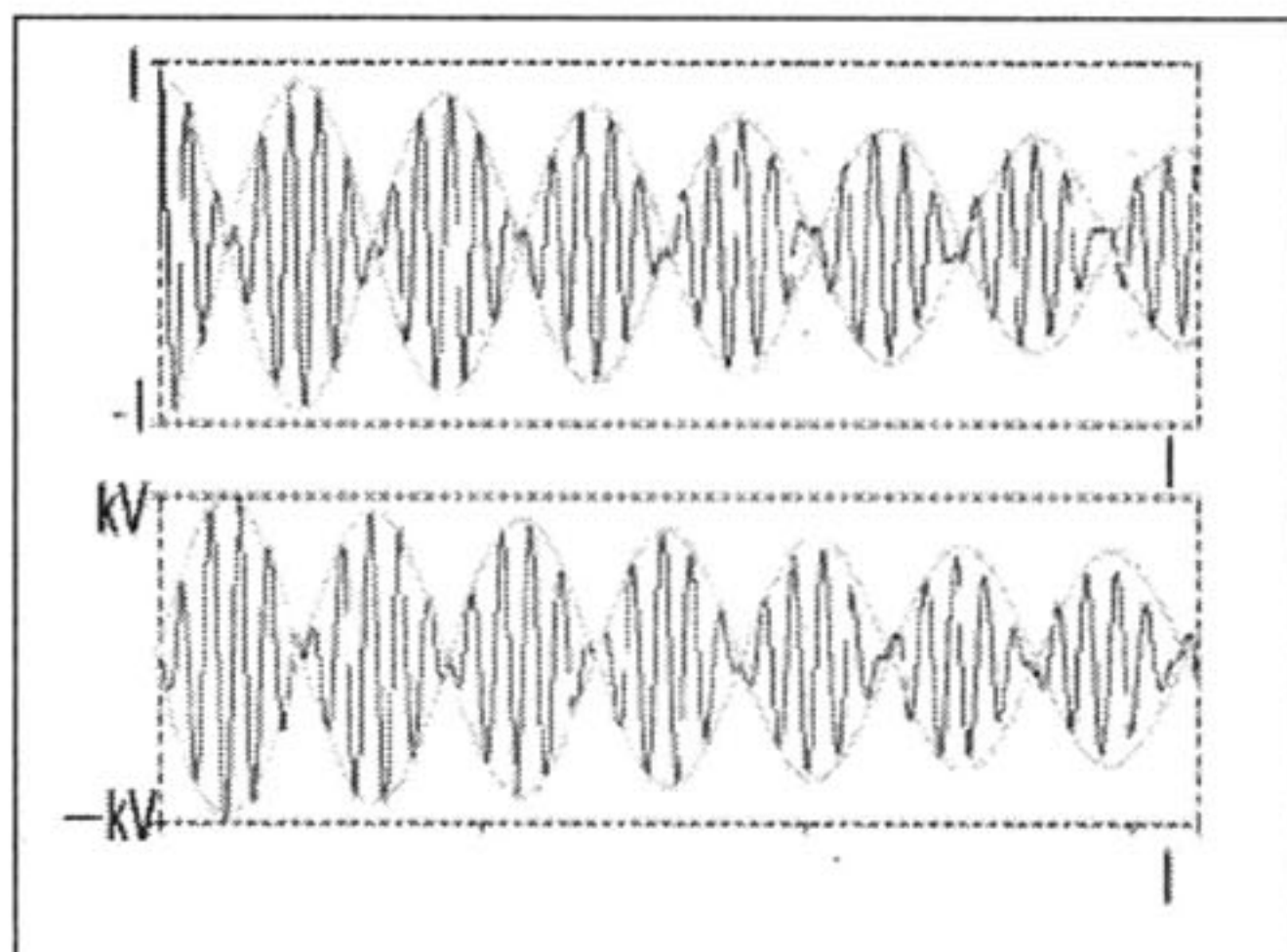


Figura 1. Forma de onda de corriente primaria y voltaje secundario

3. DISEÑO DE LA BOBINA TESLA

En la figura 2 se muestra el diagrama de una bobina Tesla.

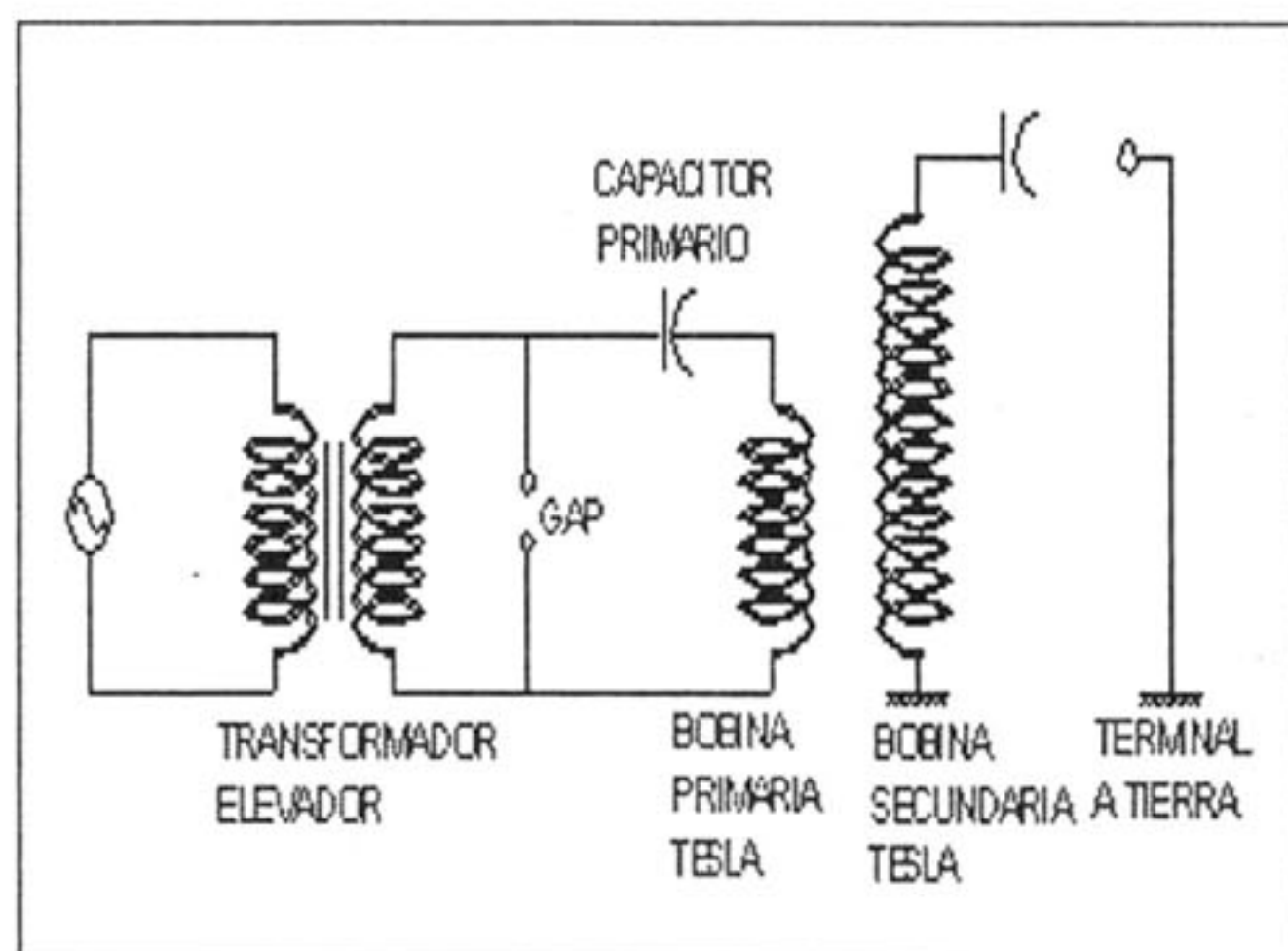


Figura 2. Bobina Tesla

El diseño de una bobina Tesla se hace considerando un transformador primario (con núcleo de acero) y a partir de éste se seleccionan los parámetros de los demás elementos que componen una bobina Tesla. Se comienza con la selección de un transformador de 120V a 15 kV a 60 mA, con una impedancia nominal de $z = 250 \text{ kW}$. Este tipo de transformador puede ser el mismo que es utilizado en avisos luminosos de neón, el cual es de fácil adquisición en el mercado.

3.1 Cálculo del capacitor primario

De acuerdo con la característica de carga del transformador, la capacitancia requerida es:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

despejando se obtiene

$$C = \frac{1}{Z \times 2\pi f} = \frac{1}{250 \times 10^3 \times 2\pi \times 60} = 0,0106 \mu F$$

El tipo de capacitor a construir es el tipo de placas paralelas cuya capacitancia es

$$C = 8.854 \times 10^{-12} \times K \times \frac{A}{d} (n-1) \quad (2)$$

El dieléctrico ideal para un condensador de descarga que posee un alto esfuerzo dieléctrico y bajas pérdidas resulta ser el polietileno de baja densidad. Considerando un espesor $d = 1,2192 \text{ mm}$ y teniendo que la constante dieléctrica $K=2$, se seleccionan las placas de aluminio de 0,0135 pulgadas de espesor con un área de $0,18 \text{ m} \times 0,13 \text{ m} = 0,0234 \text{ m}^2$; se tiene un total de placas n de:

$$(n-1) = \frac{C \times d}{8.854 \times 10^{-12} \times k \times A} = 31,18 \text{ placas} \quad (3)$$

De esta forma se obtiene que para alcanzar la capacitancia requerida se necesitan 32 placas.

3.2 Cálculo de la bobina primaria

La bobina que se utiliza es la denominada bobina en espiral liso, la cual permite un funcionamiento eficiente, es decir, una alta densidad de campo electromagnético con un buen enlace de líneas magnéticas entre la bobina primaria y secundaria.

La inductancia aproximada para este tipo de bobina es

$$L_1 = \frac{R^2 \times N^2}{8R + 11C} \quad (4)$$

Las dimensiones relacionadas con esta bobina se muestran en la figura 3.

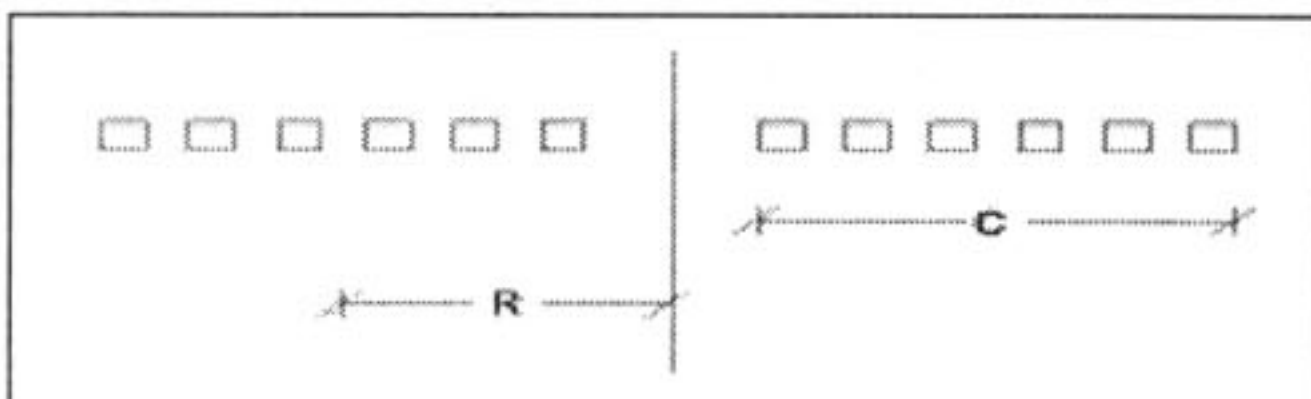


Figura 3. Magnitudes asociadas a la bobina Espiral

Utilizando un conductor de diámetro de 6,543 mm con una separación entre vuelta y vuelta igual al diámetro del conductor para 14 vueltas se obtiene $R = 8,68$ pulgadas y $C = 7,21$ pulgadas.

La inductancia de la bobina será:

$$L_1 = \frac{8,68^2 \times 14^2}{8 \times 8,68 + 11 \times 7,21} = 99,27 \mu H \quad (5)$$

La frecuencia de resonancia del capacitor con esta bobina es

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{99,27 \times 10^{-6} \times 0,0106 \times 10^{-6}}} = 155,07 \text{ kHz}$$

3.3 Diseño de la bobina secundaria

El objetivo aquí es que la bobina secundaria debe resonar a la misma frecuencia de la bobina primaria. El tipo de bobina utilizada para este propósito es una bobina helicoidal cuya inductancia puede encontrarse por:

$$L_2 = \frac{R^2 \times N^2}{9R + 10H} \quad (6)$$

Donde R representa el radio de la bobina y H la altura, la relación entre esos parámetros (H/D) varía de 3:1 hasta 6:1, para un diámetro de 7 pulgadas la relación es de 3,5:1 por lo que la altura H es de 24,5 pulgadas.

La bobina se construye con un conductor No 22 de 0,0253 pulgadas de diámetro con el que se obtiene un total de 907 espiras de acuerdo con la altura proporcionada, la inductancia será:

$$L_2 = \frac{3,5^2 \times 907^2}{9 \times 3,5 + 10 \times 24,5} = 36,44 \text{ mH} \quad (7)$$

3.4 Descarga terminal

La descarga terminal es un capacitor virtual cuyo dieléctrico es el aire y cuya segunda placa es la tierra.

La capacitancia total que debe existir en el circuito secundario para producir resonancia a la frecuencia del circuito primario es:

$$C_2 = \frac{1}{(2\pi)^2 \times f_1^2 \times L_2} = 28,90 \text{ pF} \quad (8)$$

Debido a que la bobina secundaria presenta capacitancias a tierra y entre espiras que son pequeñas a frecuencia industrial (bajas frecuencias), a altas frecuencias resultan ser significantes, por lo que es necesario determinar la capacitancia producida por la bobina secundaria que es la de un solenoide cilíndrico y está dada como:

$$C_{L2} = 0,29 H + 0,41 R + 1,94 \sqrt{\frac{R^3}{H}} = 11,10 \text{ pF} \quad (9)$$

Aunque aquí no se tienen en cuenta los valores de los que depende la capacitancia como la constante dieléctrica del alambre esmaltado, espesor del alambre o número de vueltas, la fórmula antes aplicada resulta ser una muy buena aproximación.

Se construye entonces una descarga que produzca una capacitancia de

$$C_d = C_2 - C_{L2} = 28,90 - 11,10 = 17,8 \text{ pF}$$

La capacitancia de la descarga está dada como:

$$C_d = 1,4 \times \left[1,2781 - \frac{d_2}{d_1} \right] \times \sqrt{\pi \times d_1 (d_1 - d_2)} \quad (10)$$

La geometría y dimensiones de la descarga se muestran en la figura 4.

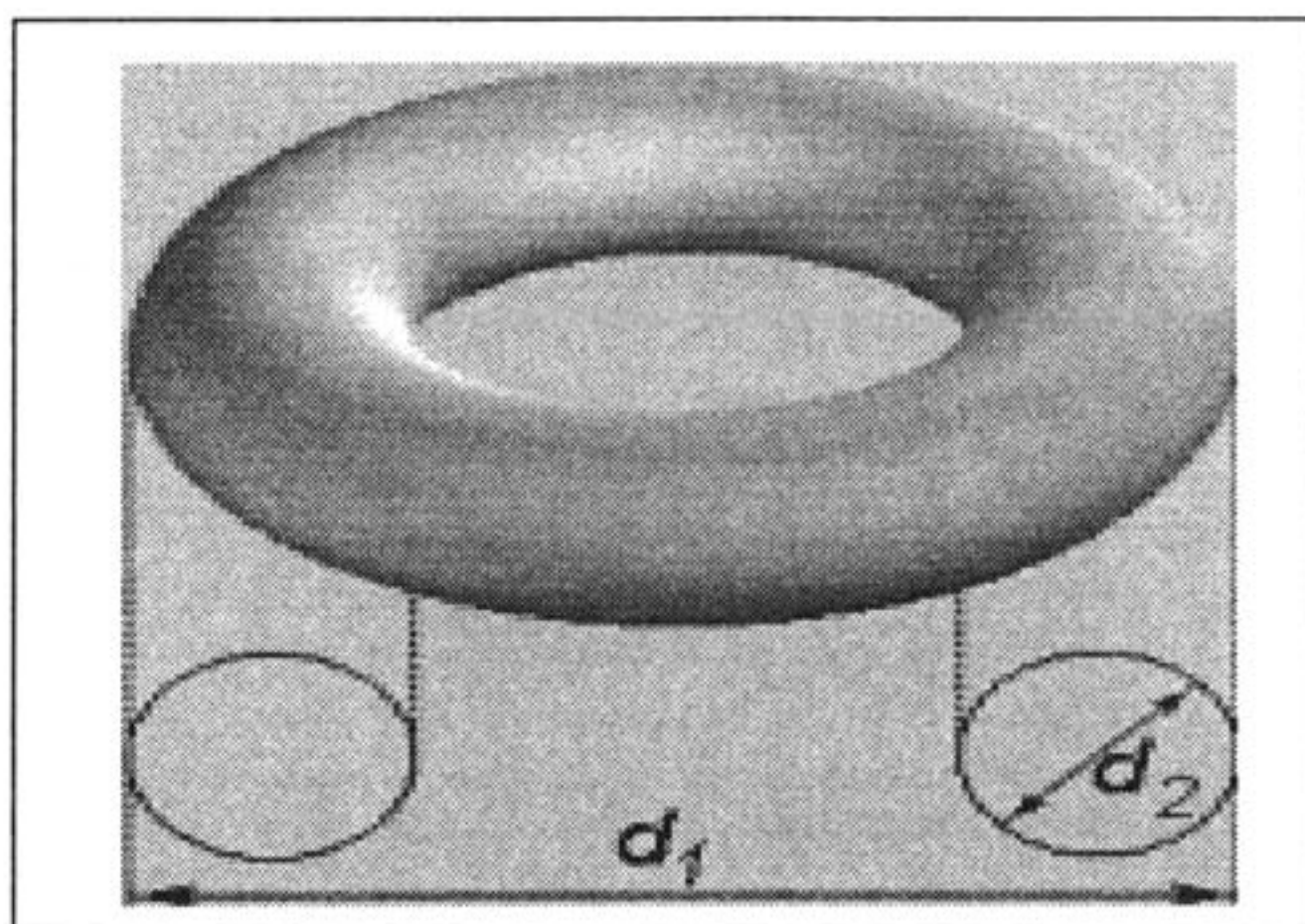


Figura 4. Magnitudes asociadas a la descarga Terminal

Los valores de d_1 y d_2 que satisfacen la ecuación son $d_1 = 16$ pulgadas y $d_2 = 4$ con lo cual se obtiene,

$$C_d = 1,4 \times \left[1,2781 - \frac{16}{4} \right] \times \sqrt{\pi \times 4(16 - 4)} = 17,68 \text{ pF} \quad (11)$$

3.5 Ganancia de voltaje

La bobina Tesla alcanza una gran ganancia de voltaje diferente a la forma como la realiza un transformador con núcleo de acero en el cual la ganancia depende de la relación de vueltas entre el primario y el secundario. Aquí la ganancia de voltaje radica en el hecho de que la energía es almacenada en el condensador primario que tiene una gran capacitancia en comparación con el secundario.

La energía almacenada el condensador primario es:

$$E_c = \frac{1}{2} C V^2 \quad (12)$$

Para el diseño propuesto se tiene:

$$E_c = \frac{1}{2} \times 10,61 \times 10^{-9} \times 15000^2 = 1,1936 \text{ Joules}$$

Si se asume que no existen pérdidas en la transferencia se tiene:

$$E_{cp} = E_{cs} = \frac{1}{2} C_p V_p^2 = \frac{1}{2} C_s V_s^2 \quad (13)$$

y se cumple que:

$$V_s = \sqrt{\frac{2 \times E_{cp}}{C_s}}$$

Reemplazando $E_{cp} = 1,1936 \text{ Joules}$ y $C_s = 28,90 \text{ pF}$ se tiene

$$V_s = 287,405 \text{ kV}$$

La ganancia de voltaje teóricamente se puede encontrar como:

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{C_p}{C_s}} \quad (14)$$

Hasta el momento no se han considerado las pérdidas que se involucran en el proceso de transferencia de energía; para considerarlo se introduce una constante ρ que varía entre 0 y 1 y representa la eficiencia con la que se transfiere esta energía; de esta manera, la ganancia de voltaje estaría dada por

$$\frac{V_s}{V_p} = \rho \times \sqrt{\frac{C_p}{C_s}} \quad (15)$$

4. SIMULACIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO

El modelo de simulación fue básicamente el de la figura 2, el cual es un modelo de parámetros concentrados con los valores encontrados a través del diseño. La simulación fue realizada con el programa pspice. Los resultados de la corriente oscilatoria en el circuito secundario se muestran en la figura 5.

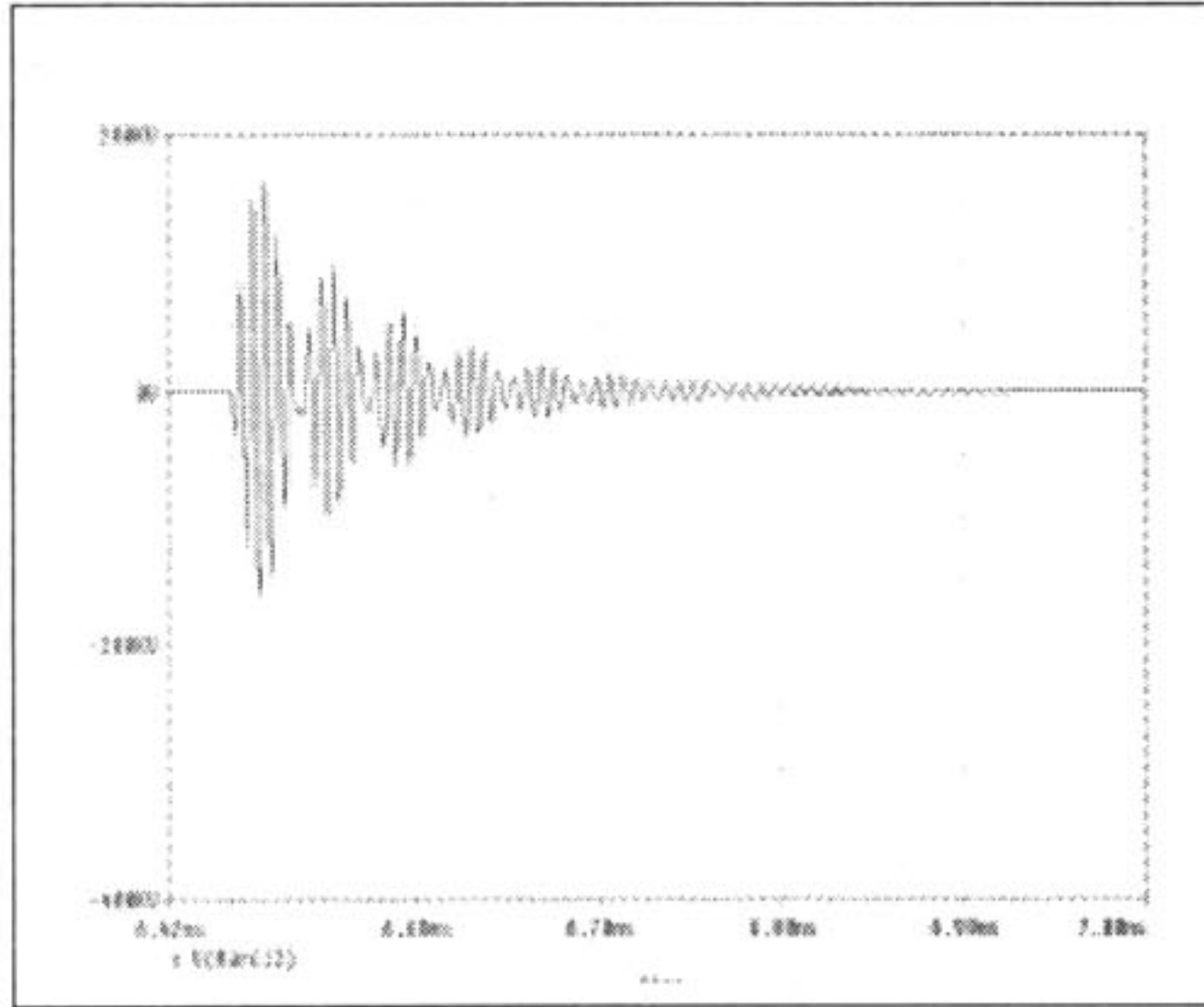


Figura 5. Corriente oscilatoria en el circuito primario de la bobina Tesla

El voltaje de salida para un acoplamiento de $k = 0,19$, se muestra en la figura 6; obtuvo un voltaje pico de 160 kV.

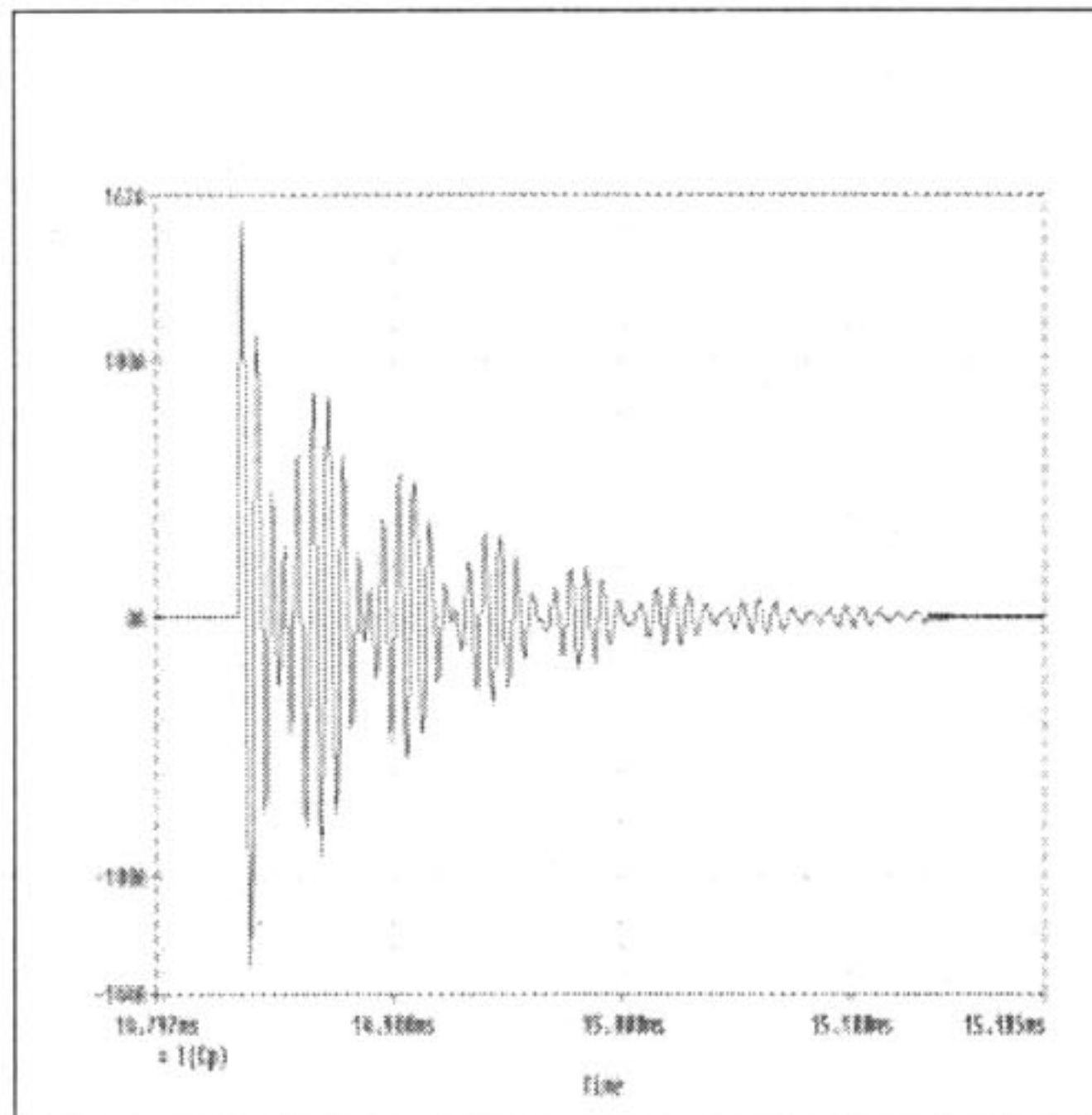


Figura 6. Voltaje de salida en el circuito secundario de la bobina Tesla

De igual manera por medio del programa Elcut se identifica la densidad de flujo magnético (figura 7).

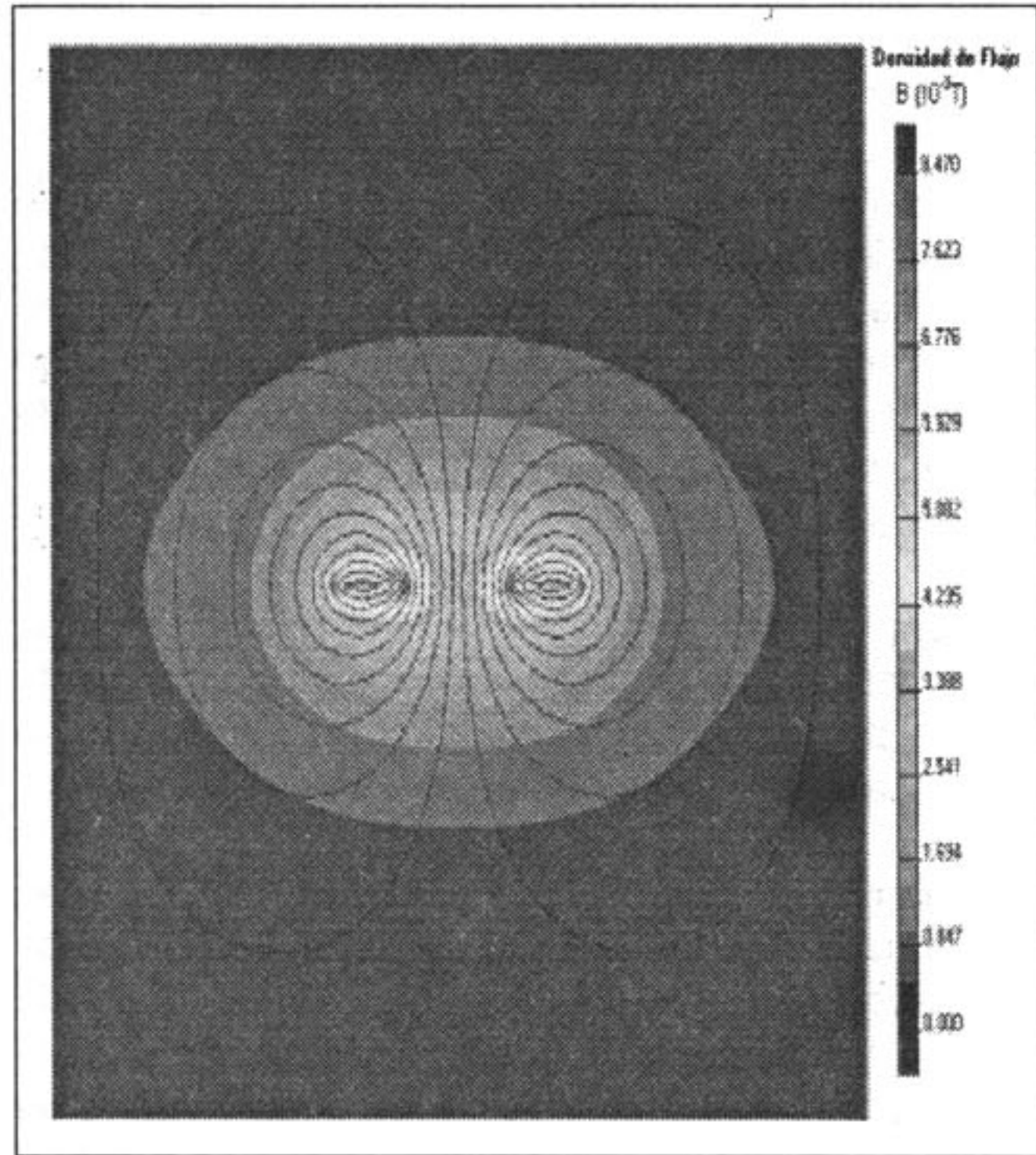


Figura 7. Flujo magnético alrededor de la bobina Tesla

Para un perfil paralelo a la corriente se obtuvo un valor máximo de 84760 mG y un valor mínimo a 1 m de 2160 mG.

5. APLICACIONES Y DEMOSTRACIONES

El circuito de la bobina Tesla diseñado para operar como un doble circuito resonante Tesla puede ser utilizado para generar alternativamente pruebas de aislamiento con la desventaja que, cuando se experimenta con diferentes objetos, el cambio de capacitancia afecta la frecuencia de oscilación del devanado secundario por lo que el circuito original debe ser re-sintonizado para mantener la operación de resonancia. Debido a que la forma de voltaje que se obtiene del secundario Tesla es similar a la onda que presentan algunos transitorios del sistema de potencia, como son las operaciones de «swicheo», resulta de interés someter diferentes elementos que componen el sistema de potencia a este tipo de forma de onda. Además pueden realizarse demostraciones a estudiantes interesados en conocer fenómenos que se presentan frecuentemente en el campo de las altas tensiones como es el efecto corona, descargas a través de diferentes configuraciones de electrodos.

6. CONCLUSIONES

- Para la construcción de capacitores de descargas tipo Tesla, el mejor dieléctrico resulta ser el polietileno de baja densidad, el cual posee un bajo factor de pérdidas y resulta ser muy económico.
- En el prototipo construido se realizó un gap de tipo estático, el cual está formado por pequeños «gaps» en serie. La implementación de un «gap» de tipo rotatorio tendrá una ventaja con respecto al de tipo estático ya que se podrá ejercer cierto grado de control en la frecuencia de descarga del capacitor primario.
- Para bobinas Tesla convencionales se ha logrado identificar que el máximo factor de acoplamiento posible es de $K = 0,2$ con lo cual no se producen descargas entre la bobina primaria y secundaria.
- Cuando se haga cualquier tipo de demostraciones con la bobina Tesla se deben tener en cuenta los riesgos en que se incurre como la posibilidad de producir incendios, fuertes campos de inducción y radiación, producción de ozono e interferencia de radiofrecuencia entre otras.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1.] B.T.PHUNG, T.R. BLACKHUM. Tesla transformer and application in insulator testing. En: 7th international symposium on high voltage engineering, University of New South Wales, Australia, agosto 26-30 1991.
- [2.] FINKELSEN DAVID, GOLDBERG PHILIP. High voltage impulse system. En: The Review of scientific. Volumen 37, número 2, febrero 1966.
- [3.] GARCIA R, Francisco. Diseño y construcción de una bobina Tesla. Tesis de Grado. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Marzo de 2001.
- [4.] J.G. CRAGGS, J.M. MEEK. High voltage laboratory technique. Butterworths scientific publications, Londres, 1954.
- [5.] MILJEVIC VUJO ET AL. A three -phase Tesla coil. En: quinta conferencia internacional. (1966: Belgrado). Conclusiones de la quinta conferencia internacional del instituto Nikola Tesla. Belgrado 1996.
- [6.] RADOJEVIC VOJISLAV, DAVIDOVIC DRAGOMIR. Calculations of cylindrical coil an Tesla coil. En: quinta conferencia internacional. (1966: Belgrado). Conclu-

siones de la quinta conferencia internacional del instituto Nikola Tesla. Belgrado 1996.

[7.] Terman FREDERICK EMMONS. Radio engineers handbook. McGraw-Hill book company, New York y Londres 1943, capítulo 1

AUTORES



Hector Cadavid Ramirez: Ingeniero Electromecánico, Ph.D. en Ingeniería Eléctrica del Instituto Superior Energético de Moscú, 1996, Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, en la y Decano de la Facultad de Ingeniería .
hcadavid@gralta.edu.co.

Oscar Román Tudela: Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, especializado en Máquinas Eléctricas de la Universidad Politécnica Federal de Lausanne (Suiza). Profesor, hace 21 años del área de máquinas eléctricas en la Universidad del Valle.



Guillermo Aponte Mayor : Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, 1978, M.Sc del Instituto de Ciencia y Tecnología Universidad de Manchester UMIST Inglaterra, 1985, Especialista en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle, 2000 , Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle.
gaponte@gralta.edu.co.

Francisco Javier Garcia: Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle 2001. Ingeniero de pruebas del Laboratorio de Patronamiento de Equipo Eléctrico GRALTA.

