



Construcción de una bobina de Tesla de estado sólido

Construction of a solid-state Tesla coil

Orendain Castro Sergio¹, Hernández Maldonado Alberto¹, Murillo Bracamontes Eduardo²

¹Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California. Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México.

²Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ensenada Baja California, México

Autor de correspondencia: Alberto Hernández Maldonado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California. Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. E- mail: hernandez.alberto@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0002-9768-4060

Recibido: 02 de Julio del 2017 **Aceptado:** 07 de Noviembre del 2018 **Publicado:** 30 de Enero del 2019

Resumen. - Se realiza un estudio tanto teórico como experimental de los circuitos resonantes aplicados a la transmisión y recepción de energía eléctrica inalámbrica. Se construye una bobina de Tesla de estado sólido para lo cual, se calcula la frecuencia de resonancia y el voltaje máximo que se genera al tener una carga en la punta de la bobina secundaria. Mediante un receptor de ondas electromagnéticas diseñado para resonar a la misma frecuencia de la bobina de Tesla, se mide el voltaje emitido por el secundario. Mediante un microcontrolador PSoC, se despliega en una pantalla LCD para medir el alcance, la frecuencia, la potencia y el voltaje efectivo del secundario.

Palabras clave: Frecuencias resonantes; Bobina de Tesla.

Abstract. - A theoretical and experimental study of the resonant circuits applied to the transmission and reception of wireless electrical energy is carried out. A solid-state Tesla coil is constructed, for which the resonance frequency and the maximum voltage generated by having a load at the top of the secondary coil are calculated. By means of an electromagnetic wave receiver designed to resonate at the same frequency of the Tesla coil, the voltage emitted by the secondary is measured. Using a PSoC microcontroller, it is displayed on an LCD screen to measure the range, frequency, power and effective voltage of the secondary.

Keywords: Resonant frequency; Tesla coil.



1. Introducción

La transferencia de energía mediante inducción magnética a través de ondas de radio fue un problema que se planteó Nikola Tesla (1856-1943) a principio del siglo pasado [1]. Él abordó dicho problema mediante un sistema de distribución de electricidad a largas distancias, logrando éxitos parciales.

Recientemente, investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) retomaron el problema. El principio de operación de esta tecnología se fundamenta en técnicas de inducción magnética mejoradas. En sus experimentos lograron transferir electricidad por vía inalámbrica y encender una bombilla de 60 W, ubicada a 2 m de distancia y con una eficiencia del 40% [2].

En el presente trabajo se analizan teórica y experimentalmente circuitos resonantes aplicados a la transmisión y recepción de energía eléctrica inalámbrica. Se construye una bobina de Tesla de estado sólido y se calcula la frecuencia de resonancia y el voltaje máximo en la punta de la bobina secundaria. Diseñamos un receptor de ondas electromagnéticas para medir el voltaje y alcance emitido por dicha bobina secundaria.

2. Fundamentos de circuitos resonantes

En el presente apartado se presentan los conceptos fundamentales y ecuaciones básicas que servirán de apoyo para entender que son y en qué consisten los circuitos resonantes.

2.1. La fórmula de Wheeler

La fórmula de Wheeler permite el cálculo de la inductancia en bobinas con núcleo de aire [3]. Para calcular la inductancia de una bobina habiendo realizado las mediciones experimentales de dicho elemento, se utiliza la ec. (1).

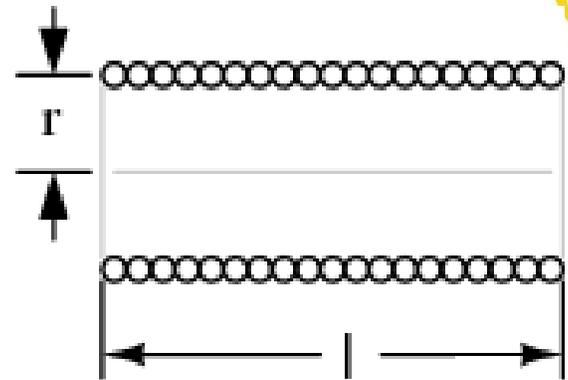


Figura 1. Modelo físico de una bobina.

$$L = \frac{0.394 r^2 N^2}{9 r + 10 l} \quad (1)$$

2.2. Reactancia capacitiva

La reactancia capacitiva es la resistencia que ofrece un capacitor al paso de corriente alterna. La expresión que define el comportamiento de la reactancia capacitiva es la siguiente [4].

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (2)$$

2.3. Reactancia inductiva

Se denomina reactancia inductiva a la resistencia que opone un inductor al paso de la corriente alterna, dicha reactancia se representa por X_L , como lo muestra la siguiente expresión. [4].

$$X_L = \omega L \quad (3)$$

2.4. La frecuencia de resonancia

La impedancia es una medida de oposición que presenta un circuito a la corriente alterna. La ecuación que define la impedancia Z , se muestra a continuación,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (4)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en la ec. (4), obtenemos el comportamiento de la impedancia Z para diferentes frecuencias de la



fem aplicada.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (5)$$

La impedancia varía con la frecuencia ω , y su valor mínimo se obtiene cuando las reactivas X_L y X_C son iguales, como se puede ver en la ec. (6), resultando

$$Z = R \quad (6)$$

En la ec. (5) se tiene una diferencia de reactivas inductiva y capacitiva en función de la frecuencia. De dicha diferencia resulta,

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (7)$$

De donde resulta,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8)$$

Donde ω_0 corresponde a la llamada frecuencia de resonancia. Definiendo $\omega_0 = F_0$, tenemos la frecuencia de resonancia en Hertz.

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

3. Bobina de Tesla de estado sólido

En esta sección se presentan los resultados teóricos, las simulaciones e imágenes fotográficas tomadas al momento de realizar la bobina de Tesla.

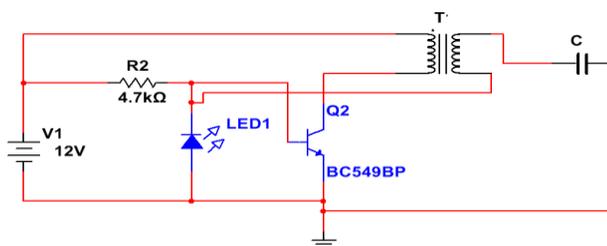


Figura 2. Diagrama de la bobina de Tesla de estado sólido.

El funcionamiento del circuito de la fig. (2), se basa en que el transistor Q2 actúa como un interruptor, el cual hará que actúe como un generador de funciones de alta frecuencia,

convirtiendo a la bobina ideal T en un circuito RLC, la cual se va a sintonizar a una frecuencia de resonancia que será la del transistor.

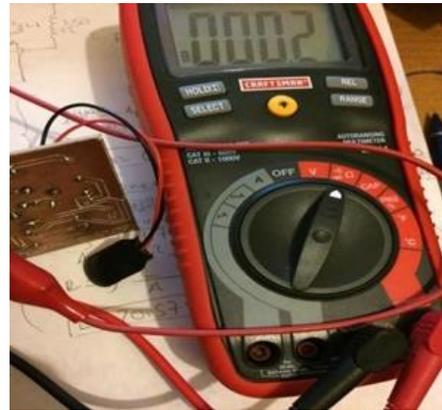


Figura 3. Medición de la resistencia de la bobina primaria

Una vez conociendo el valor de la resistencia, el cual corresponde a 0.2Ω , y sabiendo que el alambre es de estaño, se puede calcular la resistividad. La ecuación que define la resistividad de un conductor es,

$$l = \frac{RA}{\rho} = \frac{0.2\Omega (3.2 \times 10^{-7} m^2)}{11.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m} = 0.556 m$$

$$h_1 = d_{AA} N$$

3.1. Cálculos de la bobina primaria

A continuación, se muestran los valores correspondientes a los materiales utilizados para la elaboración de la bobina primaria.

$$\begin{aligned} \text{Palambre de estaño} &= 11.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \\ D_{\text{alambre}} &= 0.6438 \text{ mm} \\ d_{AA} &= 0.132 \text{ cm.} \end{aligned}$$

De donde resulta que el área del alambre es,

$$A_1 = \pi (0.3219 \text{ mm})^2 = 0.32 \text{ mm}^2.$$

Con el apoyo del multímetro, podemos conocer el valor de la resistencia del embobinado, (ver fig. (3)). Para calcular la altura h_1 de la bobina primaria, es necesario multiplicar el diámetro del alambre con aislante, por el número de



vueltas, el cual, en este caso, corresponde a 5 vueltas,

$$h_1 = 0.132 \text{ cm (5)} = 0.66 \text{ cm}$$

Para calcular la inductancia de la bobina, se debe conocer el radio r del núcleo, dando como resultado 1.27 cm. Teniendo N , r y h_1 , se puede calcular la inductancia utilizando la fórmula de Wheeler, (ver ec. (1).

$$L_1 = 0.88 \mu\text{H}$$

Para comprobar dicho valor de la inductancia, se procedió a medir la bobina primaria con el LCR.



Figura 4. Medición de la inductancia de la bobina primaria.

Posteriormente, se procedió a medir la capacitancia del circuito RLC interno de la bobina, dando un resultado de 2.73 nF, como se muestra en la fig. (5).



Figura 5. Medición de la capacitancia parasita.

Si se tiene la inductancia y la capacitancia del circuito RLC interno de la bobina, se puede calcular la frecuencia F_0 de resonancia de la bobina primaria. Esta bobina sufre una resonancia por sí misma, esto es, la bobina misma tiene implícitamente una capacitancia cuando se somete a una alta frecuencia. A continuación, se efectúa el cálculo de la frecuencia de dicha resonancia.

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.88 \mu\text{H})(2.73 \text{ nF})}} = 3.247 \text{ MHz}$$

3.2 Cálculos de la bobina secundaria

La bobina secundaria tiene un radio de 0.1275 mm, con el cual podemos calcular el área del alambre de dicha bobina.

$$A = \pi(0.1275 \text{ mm})^2 = 0.510 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

La resistencia de dicho alambre se obtiene usando el dispositivo LCR, como se muestra en la fig. (6)



Figura 6. Medición de la resistencia de la bobina secundaria.

Como se puede observar en la fig. (6), la resistencia de la bobina es de 6.0506 Ω . Con este y los demás datos se encuentra que la longitud del alambre es,



$$l = \frac{RA}{\rho} = \frac{6.0506\Omega(0.510 \times 10^{-7} m^2)}{1.71 \times 10^{-8} \Omega \cdot m} = 18.04 m$$

La altura de la bobina secundaria fue medida usando un vernier. Dicha altura es: $h_2 = 5.8$ cm. Por otro lado, el radio del embobinado correspondiente a 212 vueltas es: $r = 1.27$ cm. Con lo anterior podemos calcular la inductancia L_2 de la bobina secundaria, utilizando la fórmula de Wheeler, ver ec. (1).

$$L_2 = 411.36 \mu H$$

Para comprobar este valor de inductancia, utilizamos el dispositivo LCR, como se muestra en la fig. (7).



Figura 7. Inductancia de la bobina secundaria.

Para calcular la capacitancia parasita de la bobina secundaria C_2 , despejamos C de la ec. (9), y sustituimos datos.

$$C_2 = \frac{1}{4\pi^2(3.247 MHz)^2(411.36 \mu H)} = 5.8405 pF$$

3.3. Cálculos de la energía potencial y el voltaje

La bobina secundaria presenta una capacitancia a tierra, además de la capacitancia que hay entre las espiras que la conforman. Para determinar la capacitancia producida por la

bobina secundaria, usamos el modelo de un solenoide cilíndrico, la denominada fórmula de Medhurst, la cual nos da la capacitancia por unidad de longitud C_{L2} [5]:

$$C_{L2} = \left(0.29 h_2 + 0.41 r + 1.94 \sqrt{\frac{r^3}{h_2}} \right) pF/in \quad (10)$$

Donde $r = 1.27$ cm corresponde al radio del núcleo, y $h_2 = 5.8$ cm a la altura de la bobina secundaria,

$$C_{L2} = 1.32 pF$$

La capacitancia real C_R de la bobina secundaria, sin colocarle ninguna carga en su punta que esta al aire, es la siguiente:

$$C_R = C_2 - C_{L2} = 5.8405 pF - 1.32 pF = 4.52 pF$$

Las capacitancias se restan de debido a la aplicación de la ley de Kirchhoff de voltajes, ya que éstas almacenan voltaje, y están conectadas en serie. Al momento de poner una carga en la punta de la bobina secundaria, habrá una descarga, por lo que la capacitancia va a disminuir, y el voltaje va a aumentar, como lo muestra la ec. (11).

La capacitancia por unidad de longitud C_D , al colocar una carga en la punta de la bobina secundaria, es [6]

$$C_D = 1.4 \left(1.2781 - \frac{d_2}{d_1} \right) \sqrt{\pi d_2 (d_1 - d_2)} pF/in \quad (11)$$

En donde d_2 es el diámetro del alambre de la bobina secundaria, y d_1 es el diámetro del núcleo del embobinado, como se muestra en la fig. (3.7).

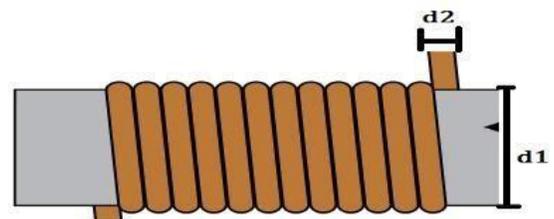


Figura 8. Esquema del diámetro del alambre y núcleo.



Anteriormente se realizaron las mediciones y cálculos correspondientes a d_1 y d_2 . Para calcular C_D utilizamos la ec. (11).

$$C_D = 0.31 \text{ pF}$$

Para conocer la energía almacenada en la bobina secundaria, se debe conocer el voltaje de entrada a la bobina primaria, dicho voltaje es el del transistor. La medición correspondiente al voltaje del transistor se muestra en la fig. (8).

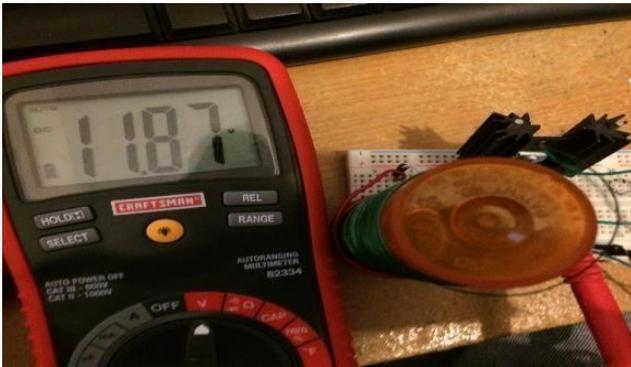


Figura 9. Medición del voltaje del transistor

Para calcular la energía almacenada en el capacitor primario, se utiliza la ecuación que define la energía con respecto al voltaje.

$$E_c = \frac{1}{2} C_1 V_c^2 = \frac{1}{2} (2.716 \times 10^{-9} \text{ F}) (11.87 \text{ V})^2 = 1.91 \times 10^{-7} \text{ J}$$

Si se asume que no hay pérdida de energía en la

transferencia de la misma, entre la bobina primaria y secundaria, entonces se tiene que,

$$E_{CP} = E_{CS}$$

Para calcular el voltaje V_{oc} en la punta de la bobina secundaria cuando se coloca una carga, utilizamos la siguiente ecuación.

$$E_{CS} = \frac{1}{2} C_D V_{oc}^2$$

$$V_{oc} = \sqrt{\frac{2E_{CS}}{C_D}} = \sqrt{\frac{2(1.91 \times 10^{-7} \text{ J})}{0.31 \text{ pF}}} = 1110.7 \text{ V}$$

La capacitancia de la bobina secundaria disminuye hasta un valor de 0.31 pF, conforme se aproxima la carga.

Para calcular el voltaje de la bobina secundaria sin carga, utilizamos la siguiente ecuación

$$V_{OR} = \sqrt{\frac{2E_{CS}}{C_R}} = \sqrt{\frac{2(1.91 \times 10^{-7} \text{ J})}{4.52 \text{ pF}}} = 290.7 \text{ V}$$

3.4 Frecuencia de resonancia como función del voltaje.

En esta sección se presentarán las simulaciones realizadas, para comprobar nuestros resultados teóricos. Para la bobina secundaria de la bobina de Tesla, aplicando una carga, se tiene lo siguiente: (ver fig.3.9).

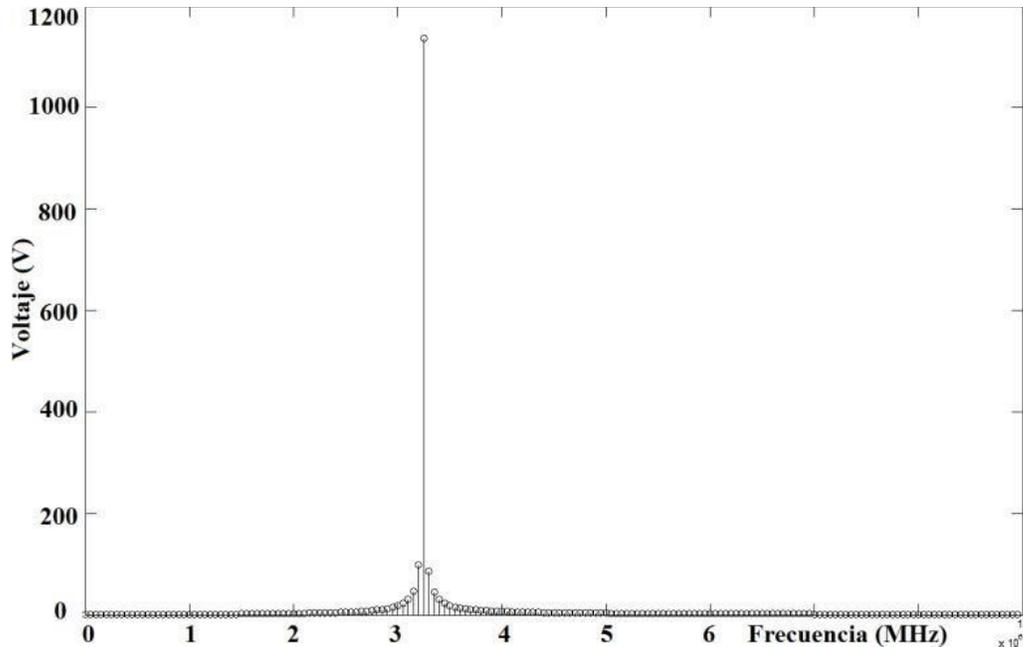


Figura 10. V_{OC} con respecto a F_0 , en donde V_{OC} corresponde a un valor aproximado de 1110 V y F_0 a un valor de 3.24 MHz respectivamente.

Para la bobina secundaria de la bobina de Tesla, sin aplicar una carga tenemos,

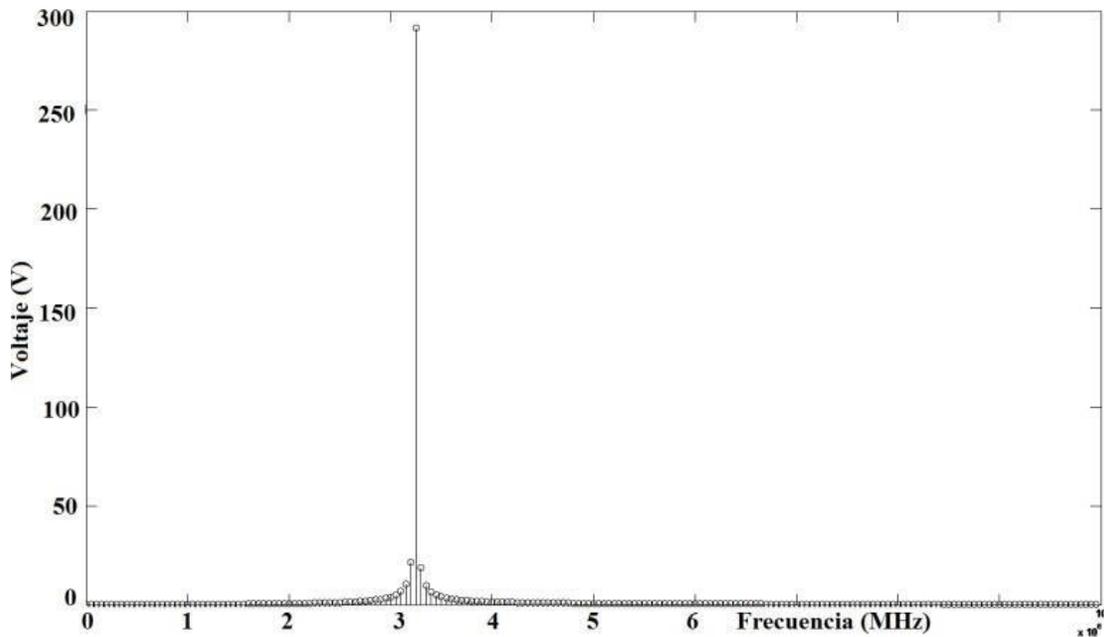


Figura 11. V_{OR} con respecto a F_0 , en donde V_{OR} corresponde a un valor aproximado de 290 V y F_0 a un valor de 3.24 MHz respectivamente.

4. Receptor de ondas electromagnéticas

En esta sección se presentará un receptor de ondas electromagnéticas (OEM), diseñado para

medir la frecuencia de resonancia, el voltaje, y la potencia de la bobina de tesla. La importancia de dicho receptor, es que puede medir la distancia del transmisor y el voltaje



efectivo de dicha señal, cosa que es imposible hacer con un analizador de espectros.

4.1 Comparación de los valores medidos mediante un analizador de espectros y el receptor de ondas electromagnéticas.

A continuación, se muestra la medición de la frecuencia y la potencia de la bobina de Tesla, utilizando el analizador de espectros.

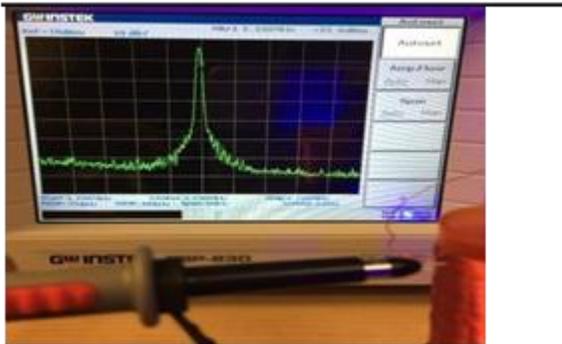


Figura 12. Medición con el analizador de espectros.

Como se observa en la fig. (12), la medición de la frecuencia de resonancia es de 3.238 MHz, con una Atenuación de la amplitud de -22.6 dbm (decibeles metro). Concordando aproximadamente con los datos desplegados de la pantalla LCD en el receptor, como se muestra en la fig. (13).

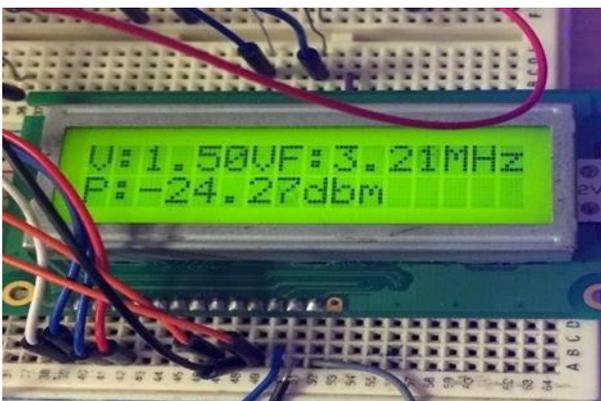


Figura 13. Medición de los valores de la frecuencia y potencia de la bobina de Tesla usando el detector de OEM.

4.2. Relación entre el voltaje y su alcance en la bobina de Tesla.

Mediante el analizador de espectros se comprueba que los resultados teóricos de la frecuencia de resonancia y la potencia de la bobina de Tesla concuerdan con las mediciones experimentales. Con la finalidad de conocer el voltaje efectivo, la frecuencia y la potencia de la bobina de Tesla se instaló un microcontrolador en el receptor para visualizar dichos parámetros en una pantalla LCD.

5. Conclusiones

Se elaboraron los cálculos analíticos necesarios para su construcción y diseño de una bobina de Tesla de estado sólido. Para su elaboración se utilizó la configuración de emisor común con un transistor para que actuara como generador de funciones. Debido a que el funcionamiento de la bobina de Tesla se basa en el análisis intrínseco de bobinas y capacitores, fue necesario realizar una medición de la capacitancia parasita, formada entre las espiras de la bobina secundaria. Dicha capacitancia fue medida en altas frecuencias.



Referencias

- [1] Pozar D. “*Microwave Engineering*”, John Wiley & Sons, Inc., E.U.A. 2005. <https://www.wiley.com/en-gb/Microwave+Engineering%2C+4th+Edition-p-9780470631553>
- [2] Raza M. and Haque M. “The Witricity: Revolution in power transmission technology.” *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 4, 2013. <https://www.ijser.org/researchpaper/The-Witricity-Revolution-in-Power-Transmission-Technology.pdf>
- [3] Wheeler H. "Formulas for the skin effect", *Proceedings of the I. R. E.* pp. 412-424, 1942. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1942.232015>
- [4] Ohanian H. and Market J. “*Física para ingeniería y ciencias*”, McGraw-Hill, México, 2009. <https://www.mheducation.com.mx/fisica-para-ingenieria-y-ciencias-9789701067444-latam>
- [5] Knight D. “*The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods*”, 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1472.0887>
- [6] Rana M. and Pandit A. “Design and Construction of a Tesla Transformer by using Microwave Oven Transfer for Experimentation: applicable theory, models and calculation methods”, 2014. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/18230>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)