

# Calibración de una bobina de tesla utilizando bajo voltaje

**Horacio D. Salomone<sup>1</sup>, Ernesto E. Cyrulies<sup>2</sup>, Néstor A. Olivieri<sup>1</sup>, Salvador A. Sartarelli<sup>2</sup>**

1-Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento.

2-Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento.

e-mail: [hsalomon@campus.ungs.edu.ar](mailto:hsalomon@campus.ungs.edu.ar)



## RESUMEN

Se presenta el diseño y construcción de una bobina de Tesla. En este trabajo se evaluaron diferentes métodos; tanto para medir parámetros relevantes tales como la capacidad distribuida, así como un procedimiento que permita sintonizar el circuito primario del transformador Tesla con el secundario utilizando bajas tensiones, minimizando de esta manera los riesgos en la operación de optimizar el rendimiento. Esto último favorece la aplicación de este procedimiento en el ámbito educativo en cursos universitarios de electricidad y magnetismo. Por otra parte, se muestran mediciones de las curvas de resonancia de los circuitos primario y secundario, además se analizan los factores de mérito, así como el factor de acoplamiento de las inductancias correspondientes.

## ABSTRACT

This work shows the design and construction of a Tesla coil. Also, two methods to measure relevant parameters were applied. Both such as distributed capacity and a procedure that allows tuning the primary circuit of the Tesla transformer with the secondary using low voltages, thus minimizing the risk in the operation of optimizing performance. Those favor's the application of this procedure in the educational field in university courses of electricity and magnetism. The resonance curves of the primary and secondary circuits are shown, besides the merit factor as well as the coupling factor of the corresponding inductances are analyzed.

**Palabras clave:** Bobina de Tesla, Resonancia, Baja Tensión

## INTRODUCCIÓN

Una bobina de Tesla es un dispositivo para generar tensiones muy elevadas que permiten producir descargas eléctricas en el aire. A lo largo del tiempo desde su invención por parte de Nicola Tesla a finales del siglo XIX, se han desarrollado diferentes modelos: desde pequeños montajes didácticos hasta enormes ejemplares capaces de generar varios centenares de miles de voltios. Su utilización puede destinarse a laboratorios de alta tensión, enseñanza, demostraciones y hasta espectáculos, Skeldon et al [1].

Una disposición clásica está compuesta por una bobina primaria de pocas espiras en la cual por algún medio, mecánico o electrónico, se produce una corriente oscilante de gran amplitud. La variación del flujo magnético del devanado primario induce en la bobina del secundario una fuerza electromotriz de gran amplitud. La bobina que constituye el secundario posee, en relación al primario, una gran cantidad de espiras. En el devanado secundario se conecta un electrodo toroidal, a modo de capacitor, que permite sintonizar ambos devanados a una frecuencia conveniente.

En un diseño de cierta envergadura, se estará operando con valores elevados de corriente y voltaje en el circuito primario y en el secundario respectivamente; así, su manipulación conlleva riesgo en la etapa de diseño y pruebas. Esto puede resultar especialmente peligroso si el desarrollo se inscribe en el ámbito educativo, aun tratándose de una materia de formación universitaria. En este contexto se abordó el diseño, se construyó y se realizaron todas las pruebas del dispositivo, en el marco de Proyectos de Laboratorio que forma parte del Profesorado Universitario de Educación Superior en Física de la Universidad Nacional de General Sarmiento.

La investigación, el desarrollo y la construcción son piezas claves para el proceso de aprendizaje de los estudiantes, permitiéndoles la capacidad de lograr que la teoría pueda ser aplicada de una u otra forma en un sentido práctico, ya sea orientado a la tecnología o bien a la ciencia básica, que tienen como finalidad el conocimiento el cual también puede incluir la educación, como observan Mendoza et al [2]. Se considera que un proyecto de esta índole puede ser potencialmente didáctico en materias del trayecto formativo de la carrera de Ingeniería Eléctrica o afines.

## CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Una bobina de Tesla consiste de un transformador primario que carga un capacitor, la diferencia de potencial establecida en el capacitor se conecta a un conmutador (mecánico o electrónico), también

llamado explosor, que alterna un circuito de carga del condensador con un circuito de descarga del mismo. La corriente descargada por el capacitor pasa a través de la bobina primaria, de muy pocas vueltas y establece una corriente oscilante en un proceso repetitivo. Por lo tanto, tenemos un circuito primario de radiofrecuencia y un circuito secundario que se caracteriza por la inductancia de la bobina secundaria (de elevado número de vueltas), la pequeña capacidad distribuida en ella, y un capacitor toroidal que permite fijar convenientemente el valor de la capacitancia del secundario. El diseño adecuado de una bobina de Tesla, en la que hay una transferencia óptima de energía entre los circuitos primario y secundario, se logra sintonizando ambos circuitos. La condición de resonancia es en la cual la transferencia de energía será máxima. El circuito secundario produce ondas electromagnéticas de frecuencia relativamente alta y voltajes muy elevados. Dichas ondas se propagan en el medio ionizado estableciendo una corriente de conducción.

En resumen, este dispositivo consiste en un transformador sintonizado, conmutado o de inversión, en el que se optimiza la transferencia de potencia dada una pulsación (precisamente la de sintonía).

En la Figura 1,  $G$  es un generador de funciones (en nuestro caso con 10 Volts de salida y una potencia cercana a 30 Watts),  $Z_g$  representa la impedancia interna resultante del generador,  $Z_{E1}$  y  $Z_{E2}$  son las impedancias del explosor,  $C_p$  es el capacitor que se descarga sobre el circuito primario,  $R_p$  y  $R_s$  son la resistencia del primario y secundario respectivamente,  $L_p$  y  $L_s$  son las inductancias del primario y secundario respectivamente.  $N_p$  y  $N_s$  son el número de espiras del primario y secundario respectivamente,  $C_d$  es la capacidad distribuida del arrollamiento secundario. Finalmente,  $C_T$  representa la capacidad del capacitor toroidal y simula la impedancia de carga, que en este caso es debida a la ruptura de la rigidez dieléctrica del aire.

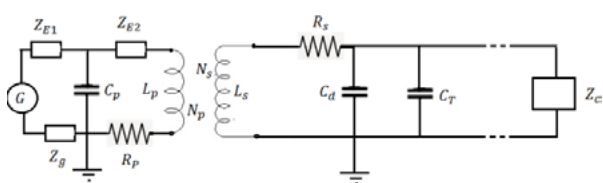


FIGURA 1: Detalle esquemático del montaje de la bobina para realizar mediciones a baja tensión.

En funcionamiento las impedancias  $Z_{E1}$  y  $Z_{E2}$  cambian de cero a prácticamente infinito de ma-

nera tal que cuando  $Z_{E1}$  vale cero,  $Z_{E2}$  se hace infinitamente grande y viceversa. Estas impedancias no son necesariamente lineales, sino que son más bien varistancias que conmutan, pasando de alta impedancia a baja impedancia en un tiempo que depende de la velocidad de giro del explosor. Para simplificar razonablemente los cálculos supondremos que su impedancia pasa de cero a infinito y viceversa en un tiempo de conmutación nulo, esto es representado en la Figura 2.

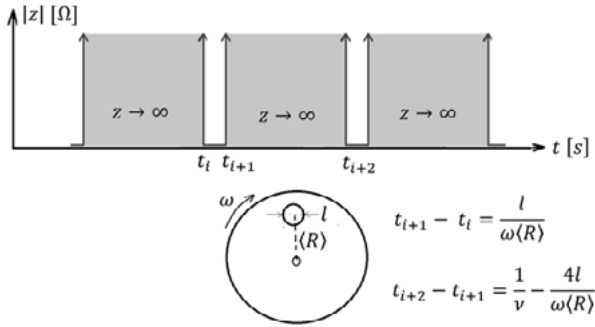


FIGURA 2: Representación de la variación de la impedancia del explosor en el tiempo.

El sistema puede analizarse también, en forma aproximada, como si se tratase de un transformador ideal en función de las impedancias reflejadas al primario y al secundario. Así por ejemplo “visto” desde  $C_p$  y con  $Z_{E1}=\infty$ , se presenta el circuito equivalente de la Figura 3 cuando el explosor conecta al capacitor  $C_p$  con la bobina primaria, (desconectando a su vez la fuente  $G$ ). Es pertinente aclarar que este equivalente es aproximado (pues supone condición de transformador ideal).

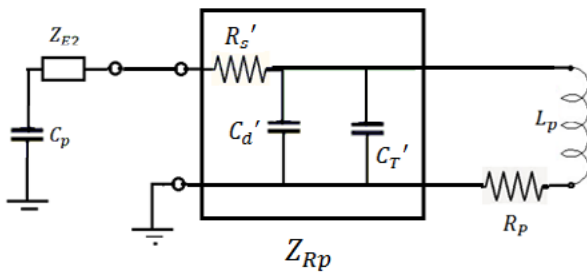


FIGURA 3: Equivalente Thevenin (para la frecuencia de trabajo) visto desde el capacitor  $C_p$ .

En este caso podemos estimar fácilmente la impedancia reflejada al primario ( $Z_{Rp}$ ) considerando que no hay pérdidas por ruptura de rigidez dieléctrica. Los capacitores  $C_d'$  y  $C_T'$  son las impedancias capacitivas reflejadas del circuito secundario y el capacitor toroidal, respectivamente. La capacidad total reflejada vale aproximadamente:

$$C_{RT} = \left( \frac{N_s}{N_p} \right)^2 (C_d + C_T) \quad (1)$$

Esto nos permite conocer en forma aproximada cuánto afecta el circuito del secundario, en la frecuencia de resonancia calculada considerando solo los componentes físicos del primario.

#### Ganancia de tensión

Suponiendo condiciones ideales de transferencia de energía desde el circuito primario al secundario y teniendo en cuenta que la energía acumulada en un capacitor se puede escribir como:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

Donde  $U$  representa la diferencia de potencial entre los extremos del capacitor, la “ganancia de tensión” del sistema puede alcanzar el valor:

$$G = \frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{C_p}{C_d + C_T}} \quad (3)$$

#### Impedancia de la bobina primaria

##### Capacidad distribuida

La bobina primaria posee una capacidad distribuida extremadamente baja, que puede estimarse mediante el cálculo de la capacidad de un cilindro, suponiendo que la espira es un conductor cilíndrico infinitamente extenso puede calcularse la capacidad por unidad de longitud. Dicho cálculo es muy común en libros de texto de Electricidad y Magnetismo, como por ejemplo el de Roederer [3]:

$$\frac{C}{h} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (4)$$

En la ecuación (4),  $C$  representa la capacidad del capacitor cilíndrico,  $h$  su longitud,  $\epsilon_0$  la permitividad del dieléctrico,  $R_1$  y  $R_2$  los radios de las armaduras.

El cálculo puede aproximarse considerando que

la bobina al ser de muy pocas vueltas y la distancia entre espiras muy grande, es similar a un capacitor cilíndrico con dieléctrico de aire y radio externo infinito. Cuando  $R_2$  tiende a infinito, nos queda la capacidad de un cilindro por unidad de longitud, inmerso en aire. Esta estimación da un valor bastante inferior a 1pf y puede ser despreciada frente al valor de  $C_p$ .

### Auto inductancia

La auto inductancia se estimó de dos formas, mediante cálculo directo y por la medida de la impedancia. Para el primer caso es posible realizar su estimación mediante cálculo computacional y además existen fórmulas empíricas conocidas como por ejemplo la propuesta por Wheeler en el año 1928 [4]

$$L = \frac{0.8a^2n^2}{6a+9b+10c} \mu H \quad (5)$$

En la expresión (5)  $a$  representa el radio medio de la bobina,  $n$  el número de vueltas o espiras,  $b$  su longitud y  $c$  el espesor de capas del alambre. Para medir la impedancia, se armó el circuito de la Figura 4. Para minimizar errores se eligió como valor de  $R$  aquel para el cual  $V_{sal} = V_R$ , de esta forma la reactancia capacitiva es igual al valor de  $R$ . Este procedimiento se hizo para diferentes valores de frecuencia considerando también que el osciloscopio posee una capacitancia de entrada de 25 pF. Para poder minimizar la influencia de la capacidad de entrada del instrumento se decidió utilizar frecuencias lo más bajas posibles de modo que la reactancia inductiva sea bastante menor a la capacitiva ensayada. Se tomó para simplificar cálculos que la reactancia capacitiva ensayada sea, como mínimo, 10 veces mayor que la inductiva, así podemos despreciar la capacitancia de entrada del osciloscopio. Nosotros utilizamos frecuencias que no superaron los 3 MHz. De esta forma los valores obtenidos para  $L_p$  rondaron los 5,8  $\mu H$ .

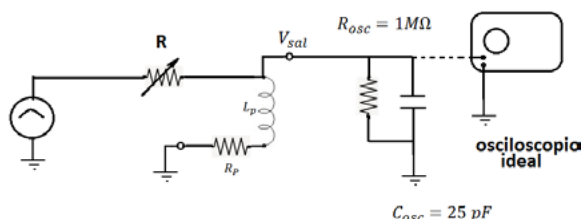


FIGURA 4: Circuito equivalente de la bobina primaria.

### Impedancia de la bobina secundaria

#### Capacidad distribuida

La capacidad distribuida se calcula buscando los parámetros que ajustan mejor a la curva de resonancia a través de la medida de la impedancia y el valor obtenido se corrobora también a través de la medida de la frecuencia de auto-resonancia. En la Figura 5 se muestra el circuito equivalente de la bobina secundaria y también el equivalente del circuito de entrada del osciloscopio. La impedancia  $Z_g$  del generador es completamente despreciable frente al valor de  $R$  lo que “desacopla” el generador del RLC paralelo que constituye el secundario. Este circuito fue utilizado para la medición de la capacidad distribuida del secundario.

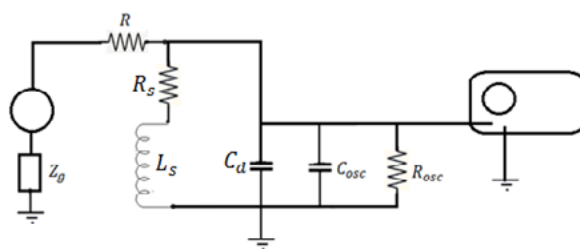


FIGURA 5: Circuito equivalente del secundario (con primario abierto) donde se consideró la impedancia interna del osciloscopio ( $R_{osc}$ ).

### Dispositivo experimental

El transformador primario se conformó con dos transformadores de horno a microondas conectados en serie de 220 – 2000 Volt AC y 1 kWatt cada uno, obteniéndose 4000 Volt, que cargan un juego de capacitores en paralelo (que constituyen el capacitor primario), uno fijo de 115 nF y otro variable que posee un rango de 0 a 150 nF, permitiendo su ajuste. El detalle del capacitor primario puede verse en la Figura 6. Las placas del capacitor están construidas en aluminio y como dieléctrico se utilizó Mylar. El conmutador (explosor) es rotativo y conmuta la carga y descarga del capacitor. Dicho conmutador está compuesto por un rotor y una placa que fueron construidas en poliacetal. Pueden apreciarse fotografías del conmutador en las Figuras 7 y 8. La bobina secundaria se construyó sobre un tubo de PVC de 0,1 m de diámetro y 0,65 m de longitud, con alambre de cobre de 0,5 mm de diámetro y aproximadamente 1100 vueltas. El circuito secundario se forma con la inductancia de la bobina secundaria y la pequeña capacidad distribuida en ella misma y en un toroide de aluminio ubicado en el extremo superior de la bobina que cumple el papel de capacitor. Dicho toroide fue fabricado con caño corrugado de aluminio de 0,1 m de diámetro y un perímetro medio de 1 m. El esquema de conexio-



nado se muestra en la Figura 9 y la fotografía del dispositivo completo puede verse en la Figura 10.



FIGURA 6: Fotografía del capacitor primario.

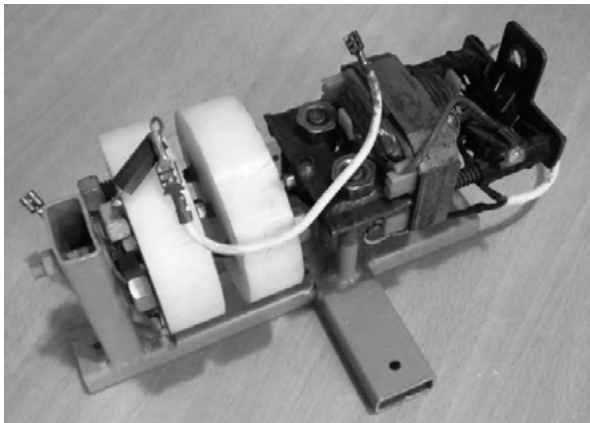


FIGURA 7: Detalle del explosor de velocidad variable. Para su construcción se utilizó un motor eléctrico universal.

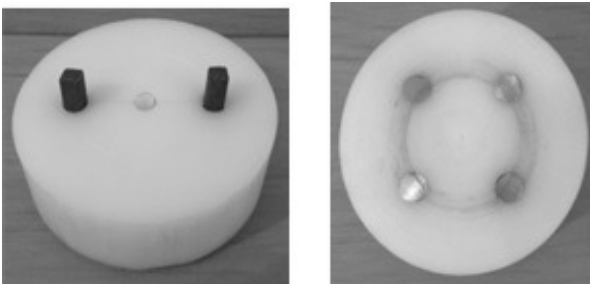


FIGURA 8: Izquierda, fotografía del rotor del explosor. Se aprecian los carbones para contacto con el conmutador. Derecha, imagen de la placa de conmutación del explosor.

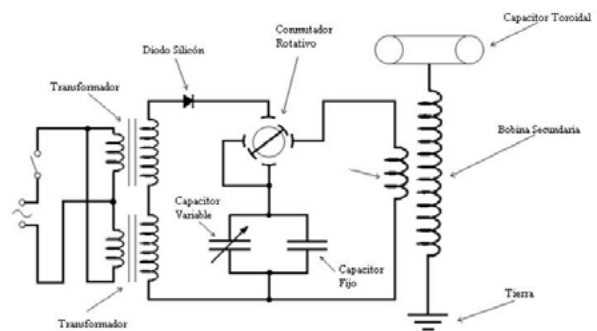


FIGURA 9: Esquema de conexión de los componentes electromecánicos de la bobina de Tesla.

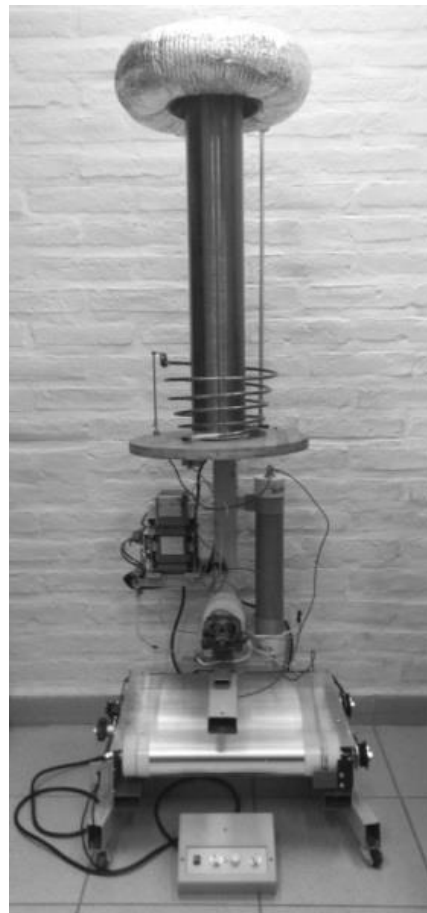


FIGURA 10: Detalle del montaje de la bobina de Tesla.

## RESULTADOS

### Medición de la inductancia de la bobina primaria

Esta inductancia es de valor extremadamente bajo. Para calcularla se armó el circuito de la Figura 11 que consiste en colocar una resistencia de muy bajo valor, del orden de la décima de Ohm en serie con el bobinado primario. El filtro pasa bajos  $R-C_1$  elimina los transitorios generados por el conmutador rotativo cuando a través de él se descarga el capacitor  $C$  sobre este bobinado.

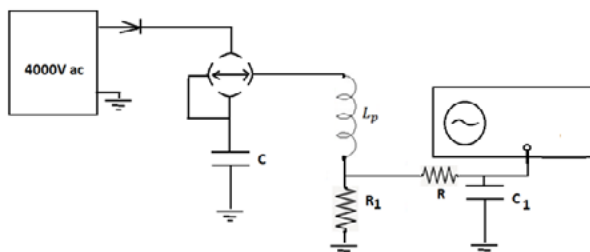


FIGURA 11: Circuito armado para la medición de la inductancia de la bobina primaria.

Se mide entonces el período de la frecuencia de autoresonancia de C con  $L_p$  y en función de eso se obtiene el valor de inductancia que ronda los 5,8  $\mu\text{H}$ .

#### Medición de la inductancia de la bobina secundaria

En la Figura 5 se observa el dispositivo utilizado para medir la inductancia del secundario. Para cierto rango de frecuencias el capacitor  $C_d$  puede despreciarse y  $R_s$  puede considerarse nula. Luego llamando  $V_s$  al voltaje sobre R y  $V_E$  al voltaje producido por el generador de funciones se tiene que:

$$V_s = \frac{V_E R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L_s^2}} \quad (6)$$

Con lo cual en un gráfico  $\left(\frac{V_E}{V_s} R\right)^2$  en función de la pendiente es precisamente  $L_s^2$ . El valor obtenido para esta inductancia fue de 16 mH.

#### Cálculo de la capacidad distribuida de la bobina secundaria por auto resonancia

Se aplica mediante un generador de funciones una onda cuadrada de 5 kHz lo que permite una buena visualización y se observa la señal de salida consecuencia de la auto resonancia del secundario. A través de la medida del periodo T se calcula la frecuencia de resonancia y desde allí la capacidad distribuida. Observando la señal del osciloscopio se obtuvo  $T=5 \mu\text{s}$  lo que corresponde a 200 kHz y por ende una capacidad distribuida que vale:

$$C_d = 12 \text{ pF}$$

Para obtener  $C_d$  se tuvo en cuenta que al medir con el osciloscopio, el mismo posee una capacidad de 25 pF que afecta la medición. Este valor se puede comparar con el obtenido mediante expresiones empíricas o a través de cálculo computacional. Una de

las fórmulas empíricas se conoce como la fórmula de Medhurst [5] y se expresa como:

$$C_s = 0,29h + 0,41R + 1,94\sqrt{\frac{R^3}{H}} = 9,4 \text{ pF} \quad (7)$$

En la expresión (7),  $h$  es la altura del solenoide y  $R$  es el radio medio de la bobina, ambos expresados en pulgadas.

#### Curva de resonancia

En la Figura 12 se muestran las curvas de resonancia del circuito secundario con y sin capacitor toroidal. Las curvas se construyeron tomando 43 valores de diferencia de potencial sobre la bobina secundaria, (cada uno asociado a un determinado valor de frecuencia). La curva con un máximo de menor frecuencia es con el capacitor toroidal colocado, la otra es sin dicho capacitor. Por lo comentado luego en las conclusiones, todas estas mediciones se realizan colocando la punta del osciloscopio en "X10".

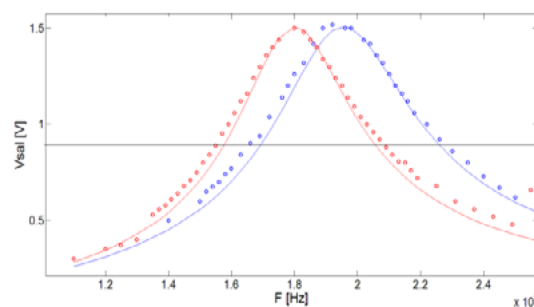


FIGURA 12: Curvas de resonancia medidas para el circuito secundario.

De los valores de frecuencia resonancia obtenidos al ajustar estas curvas, se calculó el valor del capacitor toroidal.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s(C_T + C_d)}} = 196 \text{ kHz} \quad (8)$$

luego:

$$C_T = 7 \text{ pF}$$

Del ancho medio de la curva de resonancia en azul, se calculó el valor del factor de mérito

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = 3,26 \quad (9)$$

### Caracterización del conmutador rotativo

Se montó el circuito de la Figura 13. Se toman fracciones de los potenciales sobre el capacitor "C" y también la corriente que circula por el circuito primario (esta corriente se mide a través de la medición de la diferencia de potencial sobre  $R_1$  que se elige de muy bajo valor (colocamos una resistencia de alambre de 0,1 Ohm) para no elevar demasiado la impedancia del circuito que carga al capacitor C. Los circuitos conformados por  $R_5$  y  $C_1$  y también el conformado por  $R_4$  y  $C_2$  son filtros pasa-bajos que desacoplan las altas frecuencias, pues se intenta observar las características de conmutación y no las oscilaciones de auto-resonancia del sistema. El potencial medido y la corriente de descarga dan cuenta de que el conmutador no funcionó siempre de manera regular. Las posibles causas son: Tanto en la carga del capacitor principal (C) como en su descarga la corriente de pico alcanza un valor muy elevado (centenares de Amperes) lo cual puede producir un desgaste en los electrodos del conmutador. La segunda causa es que el voltaje de alterna no está sincronizado con el movimiento del conmutador, aunque esto último se soluciona fácilmente bajando la velocidad de rotación del conmutador o dotando al mismo de electrodos de mayor superficie.

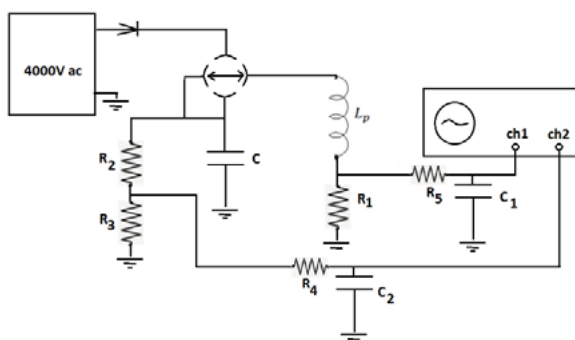


FIGURA 13: Circuito empleado para la caracterización del conmutador rotativo.

### CONCLUSIONES

Para el diseño óptimo de la bobina de Tesla se deben medir ciertas magnitudes eléctricas difíciles de determinar en forma directa con instrumentos de bajo costo, este hecho obliga efectuar mediciones indirectas que conllevan a pensar estrategias para que no compliquen los cálculos. Por ejemplo, para medir la inductancia pura del secundario conviene llegar a una relación de compromiso entre la frecuencia, la resistencia externa y la resistencia propia del alambre del solenoide, para que pueda desprejarse la capacidad distribuida del mismo.

Se logró estimar la frecuencia de resonancia de la bobina secundaria y el capacitor toroidal a través

de la medición de la curva de resonancia del sistema utilizando un generador de funciones y un osciloscopio. La obtención de la curva de resonancia posibilita el diseño de un circuito primario sintonizado para transferir la mayor potencia. La capacitancia del capacitor toroidal, extremadamente baja (y difícil de medir) nos llevó a ensayar métodos para su medida o cálculo, hasta que se encontró que una buena manera es a través de las curvas de resonancia, lo cual obliga al estudiante a obtener dichas curvas para un resonante donde la capacitancia es del orden de la capacitancia de entrada del instrumento de medida (osciloscopio) con todo lo que ello implica.

En cuanto al conmutador rotativo, su diseño y posteriores pruebas dan cuenta que es necesario analizar las características de conmutación cuando las condiciones son extremas. También nos obliga a pensar cómo medir altas corrientes y tensiones pero de manera de no alterar demasiado las características del circuito que está siendo probado (por ejemplo no cambiar demasiado su impedancia).

La frecuencia de resonancia del circuito secundario fue estimada en unos 196 kHz utilizando la medición de la curva de resonancia y considerando las capacitancias del toroide y la del osciloscopio utilizado. Esta estimación fue realizada tomando mediciones de la diferencia de potencial sobre en el extremo del bobinado secundario para ajustar la curva de resonancia, midiendo más de 40 valores de tensión de salida y haciendo un análisis estadístico. Por otra parte, se pudo analizar y comprobar tanto de manera experimental como analítica que colocando la sonda del osciloscopio en "X10" la capacitancia del osciloscopio queda prácticamente "desacoplada" del circuito secundario (esto no ocurre si la sonda se encuentra en "X1" pues la capacitancia de entrada del instrumento de medición es superior a la del circuito secundario).

Conociendo la frecuencia de resonancia del circuito secundario es posible realizar el ajuste de la frecuencia de resonancia del circuito primario mediante el capacitor  $C_p$  variable, de alta tensión que construimos a tal fin. En la construcción de un capacitor variable de alta tensión aparecen una serie de problemas a tener en cuenta: aislación, variación de la capacidad debido a la fuerza que aparece entre las placas que a su vez depende del potencial eléctrico (aparece una diferencia medible de su capacidad en alta tensión en relación a su capacidad en baja tensión).

Teniendo el sistema perfectamente sintonizado, es posible cargar el circuito primario con bajas tensiones y medir la tensión de salida del bobinado secundario. De esta manera y utilizando el capacitor variable es posible realizar la calibración final

del sistema para lograr transferir la máxima potencia al circuito secundario. Utilizar bajas tensiones permite realizar la experiencia de manera segura, en el ámbito del aula o laboratorio con todo tipo de bobinas de Tesla incluso de gran envergadura.

En este trabajo uno de los objetivos es que los estudiantes aprendan conceptos relacionados al electromagnetismo enfrentándose a situaciones problemáticas relacionadas con el diseño de dispositivos eléctricos. La bobina de Tesla resulta muy adecuada a dichos propósitos.

## REFERENCIAS

- [1] Skeldon, K., Grant, A., MacLellan, G., McArthur, C. (2000). *Development of a portable Tesla coil apparatus*. European Journal of Physics, 21, 125-143.
- [2] Mendoza, C., Torres Ercolani S., Provasi, P. (2016). Mini bobina de Tesla para el proceso de enseñanza - aprendizaje y/o la demostración en el aula. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 3, 219-223.
- [3] Roederer, J. (2015). *Electromagnetismo Elemental*; 1a Edición, Eudeba, Buenos Aires
- [4] Wheeler, H. (1928). Simple inductance formulas for radio coils; *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 16.
- [5] Medhurst, R. G. (1947). H.F. Resistance and Self-Capacitance of Single Layer Solenoids. *Wireless Engineer*, 35-43.