

# Diseño y Caracterización de una Bobina de Tesla para Ionizar Plasma

Uriel Muñoz Ramirez<sup>1</sup>, Cristhian Camilo Vásquez Beltran<sup>1</sup>, Víctor Manuel Carrillo Álvarez<sup>2</sup>,  
Williams Steve Hincapié Campos<sup>3</sup>

1. Estudiantes de Ingeniería Mecánica
2. Profesor Asociado 1. Programa Ingeniería Industrial
3. Profesor Titular Programa de Ingeniería Mecánica

**Resumen** - En este artículo investigativo se logró caracterizar una bobina Tesla, un dispositivo que utiliza un circuito RLC con una frecuencia resonante. La caracterización se realizó con cálculos teóricos, experimentos prácticos y simulaciones del circuito. En la etapa práctica, se generó plasma a temperatura ambiente, lo que permitió observar directamente los efectos de la resonancia en el dispositivo. Además, se obtuvieron resultados sobre la frecuencia de resonancia de los circuitos implicados.

Con la información teórica, se realizó una simulación en una plataforma en línea, que permitió visualizar el comportamiento de las frecuencias de resonancia en diferentes condiciones. Esta simulación permitió un análisis comparativo entre los resultados teóricos y prácticos, evaluando la resonancia y caracterización de la bobina en relación con las propiedades de cada componente.

El análisis comparativo reveló coherencia entre los datos teóricos y prácticos, sin embargo, se observó que la inducción no era eficiente por la diferencia entre las frecuencias de resonancia entre los circuitos primario y secundario.

Palabras clave: Circuitos resonantes, frecuencia de resonancia, inducción electromagnética, plasma frío.

**Abstract** - In this research article, a Tesla coil, a device that uses an RLC circuit with a resonant frequency, was characterized. The characterization was performed through theoretical calculations, practical experiments, and circuit simulations. During the practical stage, plasma was generated at room temperature, allowing for the direct observation of the resonance effects in the device. Additionally, results were obtained regarding the resonant frequency of the involved circuits.

With the theoretical information, a simulation was conducted on an online platform, which allowed visualization of the resonant frequency behavior under different conditions. This simulation enabled a comparative analysis between theoretical and practical results, evaluating the resonance and characterization of the coil in relation to the properties of each component.

The comparative analysis revealed coherence between the theoretical and practical data. However, it was observed that the induction was not efficient due to the difference between the resonant frequencies of the primary and secondary circuits.

Keywords: cold plasma, electromagnetic induction, resonant circuits, resonant frequency.

## I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de crecimiento de superficies, como la Deposición Física de Vapor (PVD) y la Deposición Química de Vapor (CVD), pueden activarse mediante la descarga de gases ionizados que contienen moléculas de gas y átomos de metal, generando plasma, el cuarto estado de la materia [1]. Este plasma permite la ionización de

materiales de recubrimiento, facilitando una deposición uniforme y de alta calidad sobre diversas superficies. El uso de plasma frío en estos procesos ofrece ventajas adicionales, como la reducción de la temperatura de procesamiento y la mejora de la adhesión del recubrimiento [2],[3]. Para desarrollar plasma a temperatura ambiente, es necesario contar con un generador de microondas o un campo magnético producido por una bobina de Tesla, que proporciona un método eficiente y controlado para la producción de plasma, potenciando así las aplicaciones en PVD y CVD, y abriendo nuevas fronteras en la ciencia de los materiales [4], [5], [6].

Las bobinas de Tesla utilizan una variedad de componentes que son fundamentales para su funcionamiento, y su eficacia depende de la aplicación prevista. El comportamiento y la eficiencia de la bobina pueden verse afectados por las fuentes de alimentación, generadores de microondas, transformadores y componentes electrónicos adicionales, como condensadores y toroides. La combinación de estos elementos puede aumentar la potencia y la eficiencia del dispositivo, haciéndolo adecuado para aplicaciones industriales que requieren un rendimiento optimizado y altas potencias.

Sin embargo, las bobinas de Tesla diseñadas para fines de simulación de procesos de ionización con bajos potenciales de ionización utilizan componentes más seguros y de menor potencia (0 a 300 GHz), lo que permite a los investigadores construir y estudiar fenómenos electromagnéticos sin los riesgos asociados con los componentes de alta potencia, radio frecuencia (RF) y la radiación de las microondas (MO) [7], [8], [9], [10]. Esto determina el límite en el uso de generadores de MO. Para generar plasma frío estable en condiciones seguras se requiere una radio frecuencia en el rango de los 13.56 MHz [11].

Otros estudios han implementado la construcción de bobinas de Tesla basadas en conceptos teóricos y experimentales, con el objetivo de calcular aspectos eléctricos como la capacitancia en un circuito RLC y comparar datos teóricos con resultados experimentales. Así como otros trabajos han enfocado la construcción de bobinas de Tesla con fines académicos, destacando la facilidad de su construcción y su relevancia histórica, en esta caracterización se verifica la resonancia de una bobina de Tesla construida a partir de esquemas eléctricos encontrados en otras literaturas, teniendo en cuenta la inducción electromagnética, capacitancia y la frecuencia de resonancia generadas en su configuración [12], [13]. En una primera fase, se analizan con conceptos teóricos las variables en la generación de estos fenómenos; luego, se hacen ensayos de laboratorio para verificar la frecuencia de resonancia y evaluar la eficiencia del campo magnético producido por la bobina, finalmente, se llevan a cabo simulaciones para determinar la eficiencia de la bobina de Tesla construida.

## II. METODOLOGÍA

### A. Construcción y Calculo Teórico de la Bobina de Tesla

El diseño de la bobina de Tesla se basa en la creación de un circuito resonante, el cual se divide en dos circuitos resonantes conocidos como primario y secundario. [14]; la frecuencia de resonancia debe ser igual tanto en el circuito primario como en el secundario, similar a un transformador, donde la bobina primaria induce corriente en la bobina secundaria mediante el campo magnético generado por la primera. La fuente de alimentación utilizada en el circuito es una batería (BAT) de 9 voltios de corriente continua. El polo positivo de la fuente se conecta en serie a un interruptor (U) y este a la bobina primaria (L1), construida con 3 vueltas de alambre de calibre AWG 12, cuya salida se conecta al colector del transistor 2N2222. El polo negativo de la batería se conecta al emisor del mismo transistor. El transistor 2N2222 actúa como un conmutador crítico en el circuito, la polaridad NPN del transistor nos permite el control de corriente y no de tensión en su base [15], regulando el flujo de corriente continua entre el colector y el emisor generando una corriente oscilante. La base del transistor se conecta a una resistencia de 22 kilo ohmios, que controla la corriente que pasa a través del transistor mediante la saturación que se genera en él.

Por otra parte, el circuito resonante LC incluye una bobina secundaria (L2) construida con alambre de cobre magnético de calibre AWG 28, enrollado en un tubo de PVC con 244 vueltas y una altura de 8.8 cm. La capacitancia total (CT) en este circuito resonante es la suma de la capacitancia generada en la esfera (Ce) y una capacitancia parásita ( $C_{P2}$ ) que es el resultado de los efectos electrostáticos entre las espiras adyacentes. Un extremo de la bobina secundaria (L2) se conecta al

colector del transistor 2N2222, completando así el circuito.

La corriente oscilante se genera a partir de la autoinducción de la bobina secundaria en dos fases. En la primera fase, la corriente circula por la bobina primaria, generando un campo magnético que induce el flujo de corriente en la secundaria, aumentando el voltaje en la última, mucho mayor que en la primaria. Los electrones comienzan a transitar hacia el extremo de la bobina secundaria conectada a la esfera, tomando los electrones que pasan por la base del transistor. En la segunda fase, al no haber flujo de electrones por la base del transistor, este pasa de saturación a corte, deteniendo el flujo de corriente por la bobina primaria. El campo magnético de la bobina primaria desaparece y la bobina secundaria deja de autoinducirse, interrumpiendo el flujo de corriente. Luego, los electrones comienzan a fluir nuevamente por la base del transistor, permitiendo que se repita el ciclo de saturación del transistor.

Cuando el circuito resonante funciona, genera un alto voltaje autoinducido en las bobinas, lo que se observa al acercar un tubo de gas enrarecido, que emite fotones por la ionización del gas. Aunque en el esquema las bobinas parecen estar junto a la otra (figura 1), físicamente la secundaria está dentro de la primaria, ambas con geometría cilíndrica, la finalidad de esta disposición es optimizar el principio de funcionamiento de un transformador resonante, asegurando una transferencia de voltaje y corriente con mínima pérdida de potencia [16]. La capacitancia total (CT) producida por la secundaria no es parte del esquema eléctrico ya que es consecuencia de la proximidad de las espiras, de la esfera y de la ionización del aire y del tubo de gas.

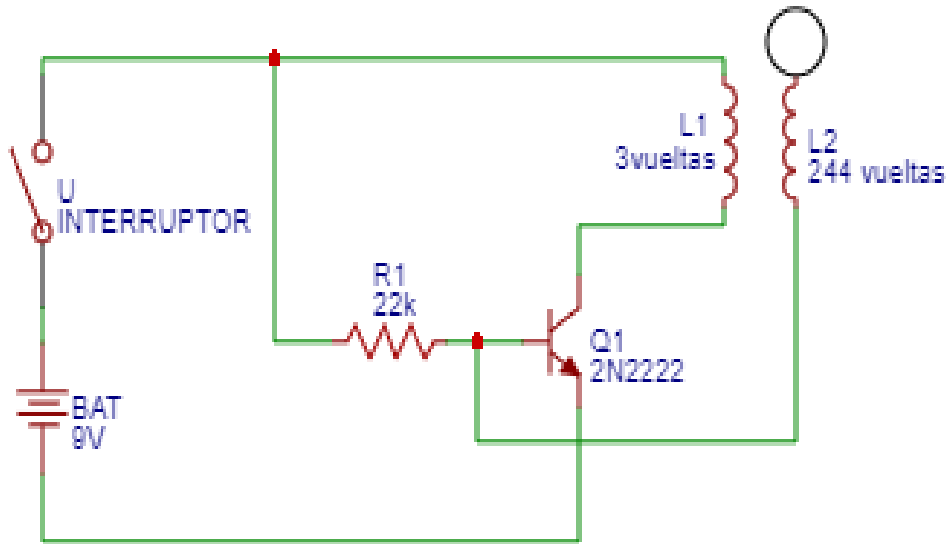


Fig. 1. Esquema eléctrico de la bobina de tesla.

El modelo matemático está bajo los principios de la resonancia y la inductancia en circuitos LC. Un circuito LC consiste en una bobina (inductancia, L) y un condensador (capacitancia, C) conectados para almacenar y transferir energía oscilatoriamente. La frecuencia de resonancia de un circuito LC se calcula mediante la ecuación 1 [17]:

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

En la bobina de Tesla, la energía se transfiere entre el circuito primario y el secundario, ambos sintonizados a la misma frecuencia de resonancia para maximizar la transferencia de energía. Por tal motivo, la reactancia inductiva de la bobina primaria y la reactancia capacitiva de la bobina secundaria deben ser iguales, así como la frecuencia entre

las dos bobinas [13],[18].

La inductancia de una bobina, que depende de sus características geométricas, puede calcularse utilizando diferentes ecuaciones. La ecuación de inductancia de una bobina general expuesta por Hayt [16], tiene como constante el valor de la permeabilidad del espacio libre  $\mu = 4\pi \frac{nH}{cm}$  y el área de la sección transversal (A) de la bobina dada por la ecuación 2:

$$L = \mu \frac{N^2 A}{H} \quad (2)$$

Donde (N) es el número de vueltas y (H) es la altura de la bobina. Por otro lado, la ecuación de Wheeler proporciona una estimación práctica para la inductancia de bobinas cilíndricas, expresada en la

ecuación 3:

$$L = \frac{(NR)^2}{9R + 10H} \quad (3)$$

Donde ( $N$ ) es el número de vueltas y ( $H$ ) es la altura de la embobinado y ( $R$ ) es el radio medio de la espiral de la bobina.

La capacitancia parásita de la bobina, una componente crucial en la resonancia puede estimarse mediante la ecuación de Medhurst, una fórmula empírica que calcula la capacitancia distribuida a lo largo de la bobina. La fórmula de Medhurst [18], ecuación 4 es:

$$C_p = \left(0,100976 \cdot \frac{H}{D} + 0,30963\right) \cdot D \quad (4)$$

Donde ( $H$ ) es la altura y ( $D$ ) el diámetro medio de la bobina. Esta capacitancia parásita se suma a cualquier capacitancia externa para determinar la capacitancia total, para este caso la capacitancia de una esfera determinada bajo la fórmula estándar [19], ecuación 5:

$$C_E = 4\pi\epsilon_0 R \quad (5)$$

Donde  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \frac{F}{m}$  es la permeabilidad del vacío y ( $R$ ) el radio de la esfera.

Existen diversas variaciones de las ecuaciones tanto de Wheeler para

la inductancia como de Medhurst para la capacitancia. Sin embargo, para este estudio, se utilizarán las ecuaciones previamente mencionadas debido a su aplicabilidad.

## B. Medición de Parámetros Eléctricos en el Laboratorio

1) *Ubicación del laboratorio:* Las prácticas de caracterización de la bobina de Tesla se hicieron en el Laboratorio de Electrónica y Electromagnetismo de la Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores, sede Bogotá. Este laboratorio tiene los instrumentos y equipos necesarios para medir frecuencias precisas.

El instrumento de medición utilizado fue el siguiente:

Osciloscopio digital Rigol DS1102E, es un osciloscopio de 100 MHz con 2 canales analógicos y un disparador externo. Tiene una frecuencia de muestreo máxima de 1 GSa/seg

2) *Procedimiento:* La bobina de Tesla inicialmente contaba con un diseño en el cual sus componentes se encontraban soldados unos a otros y este fue modificado para tomar datos de la frecuencia de resonancia en las prácticas de laboratorio de tal manera que se pudieran realizar conexiones de los cables del osciloscopio y no intervinieran otros elementos que impidieran su lectura, la conexión de los componentes se realiza con una protoboard (figura 2), a continuación se muestra la distribución de las conexiones de los componentes:

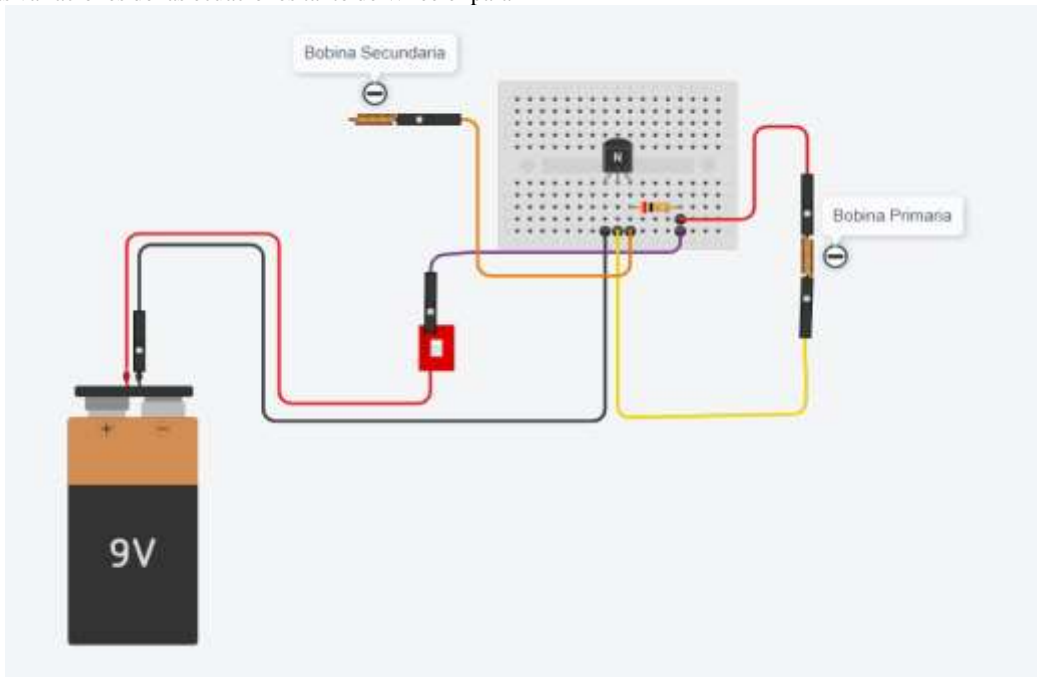


Fig. 2. Esquema de la bobina con protoboard.

El procedimiento metodológico para la toma de medidas fue el siguiente:

- Identificar las partes de la bobina de tesla, como la bobina primaria (L1), la bobina secundaria (L2), transistor, interruptor, fuente de alimentación, resistencia y el toroide.
- Identifique en el osciloscopio, sus partes y configuración para su uso, determinando el valor de la frecuencia captada.
- Proceder al armado de las partes de la bobina teniendo en cuenta el esquema del circuito y la ubicación de los cables con apoyo de la protoboard, la bobina secundaria debe estar dentro de la bobina primaria.
- Con la fuente de voltaje, alimentar la bobina al voltaje requerido, encender y realizar pruebas con un bombillo o tubo de luz,

verificando que emita iluminación en cuando se acerca al toroide o al cuerpo de la bobina secundaria.

- Conectar el osciloscopio en serie con los conectores macho – macho en cada nodo que coincida con el cable rojo y amarillo.
- Durante el funcionamiento de la bobina, verificar la emisión de plasma con un tubo de gas enrarecido y tomar los valores de frecuencia ajustando las escalas del osciloscopio para obtener una medición clara de la frecuencia resonante.

## III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### A. Cálculo de resultados

La resonancia depende de algunos factores, como la inductancia, la

capacitancia y el acoplamiento de las dos bobinas. La inductancia surge a partir de las características geométricas de las bobinas, como lo es el radio de la espiral cilíndrica y el número de vueltas del alambre. La

tabla I presenta los valores necesarios tomados de la bobina primaria y de la bobina secundaria incluyendo el diámetro y el área transversal.

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS DE LAS BOBINAS

Bobina	Radio (R) [cm]	Diámetro (D) [cm]	Área (A) [cm <sup>2</sup> ]	No. Vueltas (N)	Altura (H) [cm]
Primaria	1,420	2,84	6,16	3	3
Secundaria	1,085	2,17	3,69	230	9,2

Se lleva a cabo el cálculo de las bobinas utilizando las ecuaciones 2 y 3. Los resultados de las inductancias calculadas se presentan en la Tabla II.

TABLA II  
INDUCTANCIAS CALCULADAS  
(UNIDADES: HENRIOS)

Bobina	Hayt	Wheeler
Primaria	232,13 x10 <sup>-9</sup>	163,02 x10 <sup>-9</sup>
Secundaria	300,19 x10 <sup>-6</sup>	270,67 x10 <sup>-6</sup>

Los resultados de las inductancias calculadas mediante los métodos de Hayt y Wheeler muestran diferencias significativas, para la bobina primaria, la inductancia calculada por Hayt es 232.13 nH, mientras que Wheeler arroja 163.02 nH. En el caso de la bobina secundaria, Hayt proporciona una inductancia de 300.2 μH, en comparación con los 270.7 μH obtenidos por Wheeler, estas diferencias se deben a las distintas aproximaciones y consideraciones geométricas de cada método.

El cálculo de las capacitancias se realizó sumando la capacitancia de la esfera y la capacitancia parasita, la cual se calcula usando la ecuación 4, donde el valor obtenido de capacitancias parasita es:

$$C_{P2} = 1,60 \text{ pF}$$

La capacitancia de la esfera es calculada con la ecuación 5 donde el radio de la esfera es y el resultado es el siguiente

$$C_E = 2,06 \text{ pF}$$

Tomando la capacitancia total presente en la bobina secundaria es la siguiente:

$$C_{T2} = C_{P2} + C_E = 1,60 \text{ pF} + 2,06 \text{ pF} = 3,66 \text{ pF}$$

En el caso de la capacitancia parasita de la bobina primaria, se tiene en cuenta la capacitancia parasita a partir de la ecuación 4:

$$C_{P1} = 1,17 \text{ pF}$$

Para determinar la frecuencia de resonancia en un circuito LC en serie o paralelo se calcula con la ecuación 1, en la tabla 3 se presenta los valores de las frecuencias de resonancia teóricas calculadas teniendo en cuenta cada valor encontrado de las inductancias y capacitancias.

TABLA III  
FRECUENCIAS DE RESONANCIA CALCULADAS  
(UNIDADES: MEGAHERTZ)

Bobina	Hayt	Wheeler
Primaria	305,4	364,4
Secundaria	4,80	5,06

La frecuencia de resonancia obtenida por el osciloscopio (figura 3) tuvo valores aproximados a 5,55 MHz, este dato corresponde al valor tomado de la bobina secundaria.

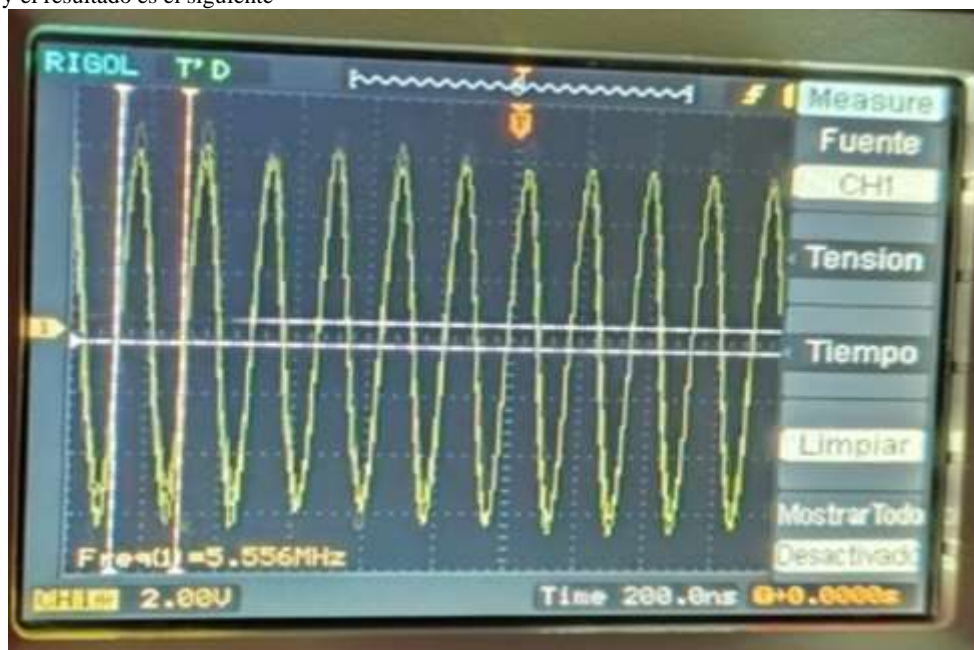


Fig. 3. Frecuencia de resonancia captada por el osciloscopio.



Fig. 4. Obtención de plasma frío a partir de un tubo ionizado

La frecuencia de resonancia logro ionizar el tubo de gas y obtener plasma frío (figura 4).

### B. Simulación de la bobina de tesla

La simulación se realizó en la plataforma disponible en masterplc.com. Primero, se accede al simulador de circuitos en la página web, donde se puede construir el esquema del circuito de la bobina de Tesla, incluyendo los componentes necesarios: la fuente de alimentación, el transistor, la resistencia, las bobinas primaria y secundaria que para este caso se ubican como un elemento transformador, ya que el simulador no puede considerar el campo

magnético y la resonancia entre dos bobinas como elementos separados.

Los valores de estos componentes, previamente obtenidos teóricamente, fueron digitados en el simulador, esto incluyó especificar la inductancia de las bobinas, la capacitancia del condensador y otros parámetros relevantes. Una vez configurado el circuito con los valores teóricos, se procedió a ejecutar la simulación en donde está y los resultados obtenidos se muestran en la figura 5, en el circuito se incluyó medidores de voltaje con el fin de corroborar el correcto funcionamiento y como simulando un osciloscopio con el fin de apreciar las resonancias de entrada y salida.

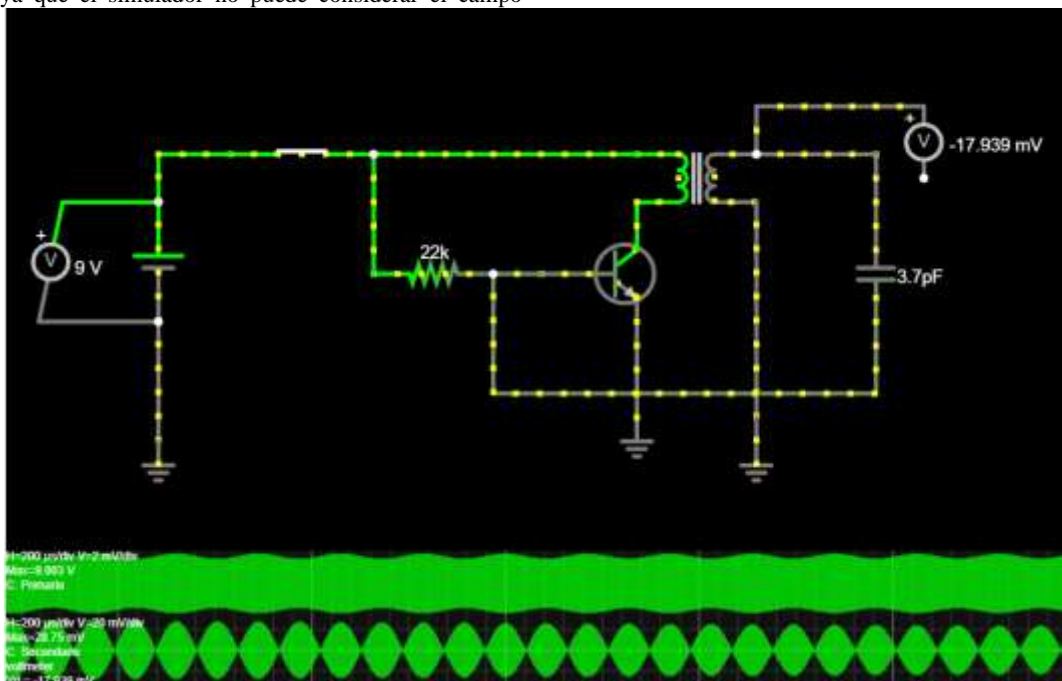


Fig. 5. Simulación del esquema eléctrico de la bobina y resultado de las frecuencias de resonancia.

En la simulación realizada, se observaron formas de onda que corroboran el comportamiento dinámico del circuito y su resonancia. No obstante, el simulador mostró limitaciones para frecuencias en el rango de MHz, pero proporcionó una validación cualitativa del diseño teórico, la simulación indicó frecuencias resonantes acordes con las predicciones teóricas y experimentales.

#### IV. CONCLUSIONES

Las diferencias entre los resultados a partir de las ecuaciones enfocadas en la inductancia tienen una discrepancia significativa teniendo en cuenta la escala, esto hace que resalte la importancia de considerar múltiples aproximaciones al calcular inductancias, ya que cada método ofrece perspectivas distintas sobre la geometría y configuración de las bobinas.

La frecuencia de resonancia medida experimentalmente fue de 5,55 MHz. Comparada con las frecuencias teóricas, la frecuencia experimental se aproxima más a los valores calculados para la bobina secundaria, tanto por Hayt (4.80 MHz) como por Wheeler (5.06 MHz). Sin embargo, la frecuencia experimental es ligeramente superior, lo que puede deberse a factores como imprecisiones en las mediciones, variaciones en la construcción física de la bobina, o la presencia de efectos parasitarios no considerados en los cálculos teóricos.

Pese a las restricciones del simulador en la limitación del manejo de frecuencias de orden de MHz, su uso fue crucial para verificar el funcionamiento teórico del circuito y permite realizar ajustes a parámetros para configuraciones físicas en las bobinas, tratando de asegurar una buena resonancia y con una mejor eficiencia. No obstante, el simulador mostró la forma de onda de los circuitos, proporcionando la descripción cualitativa de las ondas resonantes.

El control de la frecuencia de resonancia y su campo magnético es crítico para mantener un plasma estable y eficiente, lo que impacta directamente en la potencia y eficiencia, de acuerdo con las frecuencias de resonancia alcanzadas en la bobina primaria y secundaria, su diferencia, que es alrededor de los 300 MHz, indican que se debe realizar ajustes en la cantidad de vueltas u otro aspecto geométrico de las bobinas, con el fin de optimizar la resonancia y así tener la capacidad en el sistema para generar y mantener un plasma adecuado.

#### V. REFERENCIAS

- [1] F. Wang and J. Wu, "Fundamentals of plasma physics," in *Modern Ion Plating Technology: Fundamentals and Applications*, 2023. doi: 10.1016/B978-0-323-90833-7.00003-6.
- [2] M. Laroussi, "Cold Plasma in Medicine and Healthcare: The New Frontier in Low Temperature Plasma Applications," 2020. doi: 10.3389/fphy.2020.00074.
- [3] S. Kreuznacht et al., "Comparison of the performance of a microwave plasma torch and a gliding arc plasma for hydrogen production via methane pyrolysis," *Plasma Processes and Polymers*, vol. 20, no. 1, 2023, doi: 10.1002/ppap.202200132.
- [4] J. Gilabert, E. Zumaquero, C. Machí, J. Toledo, and M. P. Gómez-Tena, "Caracterización mecánica y tribológica de recubrimientos diamond-like carbon aplicados por la técnica deposición química de vapor sobre baldosas cerámicas," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 54, no. 5, 2015, doi: 10.1016/j.bsecv.2015.09.002.
- [5] U. Piratoba Morales, Á. Mariño Camargo, and J. J. Olaya Flórez, "MAGNETRÓN DESBALANCEADO: CONFIGURACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO Y SU CORRELACIÓN CON EL CAMPO DE 2 ESPIRAS CONCÉNTRICAS," *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat*, vol. 36, no. 138, 2023, doi: 10.18257/raccefyn.36(138).2012.2430.
- [6] et. al. Nieto, J. E., "Aplicación de recubrimientos multicapa para el mejoramiento de la productividad de las empresas Application of multilayer coatings to improve the companies," *Revista El Informador Técnico del ASTIN SENA*, vol. 74, no. 0, pp. 57–63, 2010, [Online]. Available: [http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf\\_tec/article/view/10%0Ahttp://informadortecnico.senaastin.com/index.php/inf\\_tec/article/view/19](http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/10%0Ahttp://informadortecnico.senaastin.com/index.php/inf_tec/article/view/19)
- [7] A. Hernando Grande, "CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS MEDIOAMBIENTALES," *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, vol. 99, no. 1, 2005.
- [8] D. Radiología and M. Física, "Riesgo laboral y residencial por exposición a campos electromagnéticos Labour and residential risk due to electromagnetic fields exposition Correspondencia: Lourdes de la Peña Fernández," *Mapfre Medicina*, vol. 13, pp. 205–213, 2002.
- [9] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España, "NTP 234: Exposición a radiofrecuencias y microondas (I). Evaluación," *Nota técnica de Prevención del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene*, 1989.
- [10] M. E. F. Aguiar and C. B. Pérez, "Asociación del cáncer con los campos electromagnéticos. Ciudad de La Habana, 1992-1996," *Revista Cubana de Medicina Militar*, vol. 29, no. 1, 2000.
- [11] E. S. Olschewski, "Plasma physics applications in industry," 2010.
- [12] S. Orendain Castro, A. Hernández Maldonado, and E. Murillo Bracamontes, "Construcción de una bobina de Tesla de estado sólido," *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, vol. 2, no. 1, 2019, doi: 10.37636/recit.v2i12634.
- [13] J. Oliveira, D. Silva, and F. Damasio, "Nikola Tesla e a construção de uma mini bobina em sala de aula," *A Física Na Escola*, May 2024, doi: 10.59727/fne.v22i1.31.
- [14] J. Játiva, J. Maldonado, and V. Mena, "Diseño y Construcción de un Transformador Trifásico para Control de Voltaje en el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia," *Revista Politécnica*, vol. 43, no. 1, 2019, doi: 10.33333/rp.vol43n1.939.
- [15] A. Electrónica, "Diferencia Entre Los Transistores NPN y PNP," *Learning About Electronics*. [Online]. Available: <http://www.learningaboutelectronics.com/Articulos/Diferencia-entre-transistores-NPN-y-PNP.php>
- [16] Victor Gonzales Zamora, "TIPOS DE PERDIDAS EN TRANSFORMADORES," *CITE energía*, 2020.
- [17] W. H. Hayt, J. E. Kemmerly, and S. M. Durbin, *Análisis de circuitos en ingeniería*, Octava. 2012.
- [18] A. J. Yarin Achachagua, G. N. Salazar Huamani, and J. Chávez Vivar, "Control de armónicos en transformador eléctrico de potencia de planta de manufactura mediante filtro pasivo incorporado optimizado con algoritmo de forraje bacterial," *TECNIA*, vol. 31, no. 2, 2021, doi: 10.21754/tecnia.v21i2.1031.
- [19] Medhurst. R.G., "H.F. Resistance and self-capacitance of single-layer solenoids," *Wireless Engineer.*, pp. 35–43, Feb.

1947.

- [20] J. Voitkans and A. Voitkans, "Tesla Coil Theoretical Model and its Experimental Verification," *Electrical, Control and Communication Engineering*, vol. 7, no. 1, 2014, doi: 10.1515/ecce-2014-0018.