

REPOTENCIACION DE LA BOBINA DE TESLA DEL LABORATORIO DE
ELECTRICIDAD DE LA UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE
COLOMBIA

FREDY LEONARDO VERDUGO GONZALEZ
RUBEN DARIO ROJAS NIÑO

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
INGENIERIA ELECTROMECHANICA
DUITAMA
2015

REPOTENCIACION DE LA BOBINA DE TESLA DEL LABORATORIO DE
ELECTRICIDAD DE LA UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE
COLOMBIA

FREDY LEONARDO VERDUGO GONZALEZ
RUBEN DARIO ROJAS NIÑO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electromecánico
Proyecto presentado en la modalidad de participación activa en un grupo de
investigación.

Directora:
María Luisa Pinto Salamanca
MSc. Ingeniería Automatización Industrial

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
INGENIERIA ELECTROMECHANICA
DUITAMA
2015

NOTA DE ACEPTACION:

Firma del director

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

“A Dios por todas la bendiciones recibidas, por la motivación y Fortaleza ante las dificultades presentadas, a mi familia que con su apoyo incondicional fortalecieron mi espíritu y estuvieron con migo en el logro del proyecto”.

Fredy Leonardo Verdugo González.

“A Dios por brindarme fortaleza para culminar este proyecto, a familiares y amigos por el apoyo moral, a cada una de las personas que estuvieron involucradas en el proyecto y colocaron su grano de arena para la culminación del proyecto”.

Rubén Darío Rojas Niño.

AGRADECIMIENTOS

El más sincero agradecimiento a la directora de tesis Ing. María Luisa Pinto Salamanca, por su entrega y apoyo incondicional brindado para la realización del proyecto.

Al Ing. Juan Carlos Castro Galeano por su apoyo en aspectos técnicos, al compañero Diego Guarín por la construcción de la puesta a tierra temporal para la bobina de Tesla, a las personas encargadas de laboratorio por su disponibilidad, a compañeros y amigos por su apoyo incondicional.

Al Ing. Fernando Contreras y a la Ing. Mónica Martín jurados del proyecto, por su apoyo técnico, sugerencias y enseñanzas.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	14
1.1 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	17
2. FUNCIONAMIENTO Y MODELO MATEMATICO	18
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	18
2.2 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA	19
2.2.1 Corriente en el circuito primario de la bobina de tesla.....	23
3. DISEÑO DE COMPONENTES	27
3.1 FORMULACION DE COMPONENTES DE LA BOBINA DE TESLA.....	27
3.1.1 Transformador elevador de tensión	27
3.1.2 Bobinas de choque	28
3.1.3 Spark gap	28
3.1.4 Condensador principal.....	29
3.1.5 Bobina secundaria.....	29
3.1.5.1 Numero de espiras teóricas.	30
3.1.5.2 Capacitancia parasita.....	30
3.1.5.3 Longitud total del conductor y resistencia propia.	30
3.1.6 Toroide	31
3.1.7 Bobina primaria.....	32
3.2 DIAGNOSTICO DE LA BOBINA CONSTRUIDA EN EL AÑO 2011.....	33
3.2.1 Medición de bobinas primaria, secundaria y condensador primario ..	33
3.2.2 Diagnóstico de componentes	36
3.3 MEJORAMIENTO DE LA BOBINA DE TESLA	40
3.3.1 Transformador elevador de tensión	40
3.3.2 Diseño de las bobinas de choque.....	41
3.3.3 Diseño del spark gap	42
3.3.3.1 Control análogo:.....	42
3.3.3.2 Control digital.	43

3.3.4	Diseño del condensador principal.....	46
3.3.5	Diseño de la bobina secundaria.....	46
3.3.6	Diseño del toroide.....	47
3.3.7	Diseño de la bobina primaria	47
3.3.8	Diseño del sistema de puesta a tierra.....	51
4.	PRUEBAS Y RESULTADOS DE DESEMPEÑO DE LA BOBINA REPOTENCIADA.....	62
4.1	PRUEBA CON VARIACIÓN DE TENSIÓN DE ENTRADA.....	62
4.2	PRUEBA DE VARIACION DE VELOCIDAD DEL SPARK.....	69
4.3	PRUEBAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SPT.....	71
4.4	ESPECIFICACIONES TECNICAS, MANUAL DE MANTENIMIENTO Y GUIAS DE LABORATORIO	71
4.4.1	Especificaciones técnicas y conexión.....	71
4.4.2	Manual de mantenimiento	72
4.4.3	Guías de laboratorio	72
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
5.1	CONCLUSIONES.....	73
5.2	RECOMENDACIONES	74
	BIBLIOGRAFIA	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito de la bobina de tesla.	19
Figura 2. Circuito para análisis de tensión en el toroide.	20
Figura 3. Forma de onda en el secundario.	23
Figura 4. Curva característica de tensión en el toroide.	23
Figura 5. Tensión en el spark gap y corriente en el circuito primario.	26
Figura 6. Componentes de la bobina de tesla.	27
Figura 7. Representación de un toroide	32
Figura 8. Conexión para medida de inductancia y capacitancia.	33
Figura 9. Rayo obtenido con la tesis de 2011	37
Figura 10. Tensión en el circuito primario con valores medidos.	38
Figura 11. Tensión en el circuito secundario con valores medidos.	38
Figura 12. Frecuencia de resonancia con valores medidos.	39
Figura 13. Bobina de choque	41
Figura 14. Mejora del spark gap.	42
Figura 15. Circuito análogo para control del spark gap	43
Figura 16. Etapas 1 y 2: rectificación y detección de cruce por cero.	44
Figura 17. Formas de onda del circuito digital.	44
Figura 18. Etapa 4.	45
Figura 19. Componentes del circuito digital para variar la velocidad del spark gap.	45
Figura 20. Forma de onda de la carga	45
Figura 21. Bobina secundaria terminada.	47
Figura 22. Bobina primaria.	48
Figura 23. Forma de onda de tensión en el circuito primario de la bobina de tesla con los componentes mejorados.	49
Figura 24. Forma de onda de tensión en el circuito secundario de la bobina de tesla con componentes mejorados.	50
Figura 25. Frecuencia de resonancia con componentes mejorados.	50
Figura 26. Medida de resistividad.	52
Figura 27. tensión de paso tolerable	61
Figura 28. Sistema de puesta a tierra para la bobina de tesla	61
Figura 29. Conexión de instrumentos de medida.	63
Figura 30. Forma de onda del condensador sin arco en el spark gap.	63
Figura 31. Forma de onda de tensión en el condensador con arco.	64
Figura 32. Forma de onda de corriente en el circuito primario con componentes mejorados.	64

Figura 33. Onda de corriente en el toroide con componentes mejorados.	65
Figura 34. Medición frecuencia de resonancia en el toroide.	65
Figura 35. Tensión en el condensador cuando hay arco.....	66
Figura 36. Onda de corriente en el primario cuando hay arco.....	66
Figura 37. Onda de corriente en toroide.....	67
Figura 38. Frecuencia de resonancia.	67
Figura 39. Efecto visual de rayo.	68
Figura 40. Encendido de lámparas con la bobina de tesla.	68
Figura 41. Forma de onda de corriente con velocidad de 107,6 rpm del spark gap.	69
Figura 42. Forma de onda de corriente con velocidad de 192,6 rpm en el spark gap.	70
Figura 43. Forma de onda de corriente con velocidad de 215,1rpm en el spark gap.	70
Figura 44. Forma de onda de corriente en el toroide con el SPT implementado...	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos de desarrollo y aplicaciones de la bobina de Tesla	15
Tabla 2. Listado de componentes	19
Tabla 3. Valores medidos de la bobina secundaria con el principio de resonancia.	35
Tabla 4. Valores medidos para el condensador primario con el principio de resonancia.....	35
Tabla 5. Valores medidos para bobina primaria con el LCR meter 879B	35
Tabla 6. Componentes de la bobina construida en el año 2011.....	36
Tabla 7. Estado de componentes reales bobina construida en 2011.	39
Tabla 8. Pruebas de tensión primer transformador.	41
Tabla 9. Pruebas de tensión segundo transformador.....	41
Tabla 10. Pruebas de tensión tercer transformador.	41
Tabla 11. Características de construcción de la bobina secundaria.....	47
Tabla 12. Resumen de componentes con diseño mejorado.	48
Tabla 13. Toma de resistividad del terreno.	51
Tabla 18. Valores para distribución normal.	52
Tabla 19. Datos de función de probabilidad.	53
Tabla 20. Parámetros constantes para el diseño de la malla.	56
Tabla 21. Parámetros calculados para el diseño propuesto.....	57
Tabla 22. Características del transformador de la universidad.....	59
Tabla 24. Toma de datos variando la tensión de entrada.	63
Tabla 25. Especificaciones técnicas de la bobina de tesla.....	72

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LA BOBINA DE TESLA.

ANEXO B: ESPECIFICACION DE COMPONENTES DE LA BOBINA DE TESLA.

ANEXO C: CONTROL DE VELOCIDAD DEL SPARK GAP DE FORMA DIGITAL.

ANEXO D: CODIGO DE PROGRAMACION PARA CONTROL DE VELOCIDAD DEL SPARK GAP.

ANEXO E: SIMULACION, COSTO Y PLANO DE CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA PARA LA BOBINA DE TESLA.

ANEXO F: MANTENIMIENTO DE LA BOBINA DE TESLA.

ANEXO G: GUIAS DE LABORATORIO.

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de la repotenciación de la bobina de Tesla construida en el año 2011 para el laboratorio de electricidad de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Facultad Seccional Duitama, como apoyo académico e investigativo en el área eléctrica de la Escuela de Ingeniería Electromecánica.

Se aporta el modelamiento matemático del sistema, que permitió contrarrestar los parámetros de diseño utilizados previamente con los valores físicos de los componentes reales utilizados en el año 2011, que ocasionaron fallas en el desempeño de la bobina.

Se establecen la comprobación de los criterios de diseño propuestos por referentes bibliográficos, mediante la simulación y comparación de señales de voltaje de manera gráfica. Para esto, se analizó cada componente, buscando las características de resonancia deseada, construyendo nuevamente la bobina primaria, la bobina secundaria, las bobinas de choque, el sistema de conexión del spark gap y el diseño de la puesta a tierra.

Se entrega un equipo que incluye guías de práctica de laboratorio que complementaran áreas para la comprobación de efectos electromagnéticos y de resonancia en circuitos y máquinas eléctricas; rutas de carga y descarga de condensadores de potencia en circuitos conmutados; así como el control mediante electrónica de potencia para variación de velocidad del contacto tipo spark gap.

1. INTRODUCCION

La bobina de Tesla está compuesta por una serie de circuitos eléctricos resonantes acoplados. Lleva el nombre del científico que los desarrolló, Nikola Tesla en el año de 1891, con objetivo de estudiar la transmisión de energía eléctrica sin el uso de conductores y con esto, circuitos eléctricos capaces de conseguir altas diferencias de potencial, a altas frecuencias y bajas corrientes.

Aunque existen variaciones del diseño del circuito para la bobina de Tesla, en general una bobina de Tesla está constituida por dos circuitos acoplados que forman un transformador permitiendo con su implementación, el estudio de principios como la generación de ondas electromagnéticas, grandes diferencias de potencial, inducción mutua, efectos resonantes, entre otros. Aportando además la presencia de un efecto de ionización de aire apreciando visualmente un rayo cuya longitud depende de los parámetros de diseño. En la tabla 1 se resumen las principales aplicaciones de la bobina de tesla desarrolladas con fines académicos e investigativos.

A nivel local para la Universidad Pedagógica y Tecnológica De Colombia, en el año 2011, investigadores del grupo GRIDSE construyeron una bobina de Tesla de aplicación didáctica en el área eléctrica diseñada con una potencia esperada de 1680W, distancia de ruptura de 40cm, transformador elevador de 120/15000 V¹ A pesar de todas las bondades obtenidas con el desarrollo de ese proyecto que permitió una aproximación práctica a la construcción de circuitos eléctricos de alta tensión, la longitud del rayo de descarga propuesto en el diseño no se cumplió, generando de forma práctica una longitud menor de 10cm.

Según los parámetros de diseño, para dicho proyecto se indicó la inclusión de componentes como un condensador de descarga de 0.0287 μF , una bobina primaria de 185 μH , una inductancia secundaria de 28mH y un toroide de aluminio fundido con una capacitancia de 21,4pF. Pero no se realizaron pruebas de comprobación de parámetros de los componentes construidos, por lo que no se tenía certeza de su valor real. Adicionalmente, se incluyó un contacto tipo spark gap rotativo de velocidad angular fija, pero no se realizaron pruebas controladas de verificación ni prácticas de laboratorio que incluyeran la adquisición de datos para procesamiento de información.

¹ AMAYA QUITIÁN, Maira Fernanda. Diseño y construcción de una bobina de tesla, para el laboratorio de electricidad de ingeniería electromecánica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia sede Duitama. Duitama. 2011. p 19

Tabla 1. Proyectos de desarrollo y aplicaciones de la bobina de Tesla

Proyecto – Aplicación	Objeto - Aportes	Enlace
Diseño y construcción de una Bobina Tesla de 15kV	Aporte para el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica, fue interesante ya que se hizo un análisis de cada componente de la bobina de tesla, basado en simulaciones.	http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6308
diseño de un prototipo de bobina Tesla con tensión de operación pico de 280kv	Universidad Distrital Francisco José de Caldas [Facultad Tecnológica], se incluye la referencia ya que las simulaciones presentadas en el documento validaron el modelo matemático	http://www.iiis.org/cds2010/cd2010csc/cisci_2010
Tesla el mago olvidado”	La bobina de Tesla como una herramienta en la enseñanza de la electricidad y el magnetismo.	http://mwm.cimav.edu.mx/wp-content/uploads/2015/04/Tesis-Sanchez-Valdez-Pavel.pdf
tinytesla musical Tesla coil kit	Construcción de una bobina de Tesla musical comercial, es interesante ya que con ese proyecto se logró orientar la bobina de Tesla hacia la industria musical, para obtener sonidos musicales con la bobina se variaron los valores de frecuencia de resonancia en el rango de notas musicales específicas. Vale la pena mencionarla ya que se demuestra una aplicación peculiar del equipo.	http://www.makershed.com/products/tinytesla-musical-tesla-coil-kit
Construcción de una bobina de Tesla de 15kV	Se presenta con fines académicos para mostrar efecto de doble resonancia. Es interesante en cuanto a la seguridad de manipulación de instrumentos de medida, el uso elementos de protección personal como guantes y botas dieléctricas para evitar riesgo de electrocución o daño de equipos debido a las altas tensiones del circuito secundario del equipo.	https://www.youtube.com/watch?v=h5zR_OICkdw
Construcción de una bobina de	Es interesante ya que se encontró en un video donde explicaban paso a paso la construcción de una bobina de Tesla, esto facilito	

<p>Tesla de 6000 voltios en el circuito primario.</p>	<p>entender el funcionamiento, además el autor hizo énfasis en el sistema de puesta a tierra, este parámetro es importante para la seguridad de las personas que manipulan el equipo.</p>	<p>www.youtube.com/watch?v=UN1HGq5VX74</p>
<p>Construcción de una bobina de Tesla a escala</p>	<p>Se encontró en un video. Hizo interesante su análisis ya que aportó de una manera muy gráfica como construir una bobina de tesla con elementos sencillos de conseguir, la bobina construida fue de baja potencia (150W), sonde apenas se alcanzó a apreciar un rayo de 1mm de longitud, pero fue suficiente para demostrar el principio de funcionamiento.</p>	<p>www.youtube.com/watch?v=PyMK_UGIGlw</p>
<p>Filtro para bobina de Tesla</p>	<p>El aporte de ese documento fue brindar parámetro de diseño de un filtro que evita sobretensiones y sobre corrientes en la bobina de tesla, para ello se usó un filtro pasa bajas, lo interesante del documento fue la alternativa de protección para el transformador cuando el spark gap cierra el circuito primario.</p>	<p>http://www.hvtesla.com/terry.html</p>
<p>Sondas para medir alta tensión</p>	<p>El aporte encontrado en el documento fue una orientación a cómo hacer mediciones de alta tensión. Para ello se usó el concepto de divisor de tensión, lo interesante fue que brindo una posibilidad de hacer el diseño de una punta de alta tensión a bajo costo.</p>	<p>www.profesormolina.com.ar/circuitos/circuitos</p>
<p>Construcción de una bobina de Tesla de 15kV</p>	<p>Valió la pena incluir esta referencia ya que se estudió en detalle cada componente de la bobina de tesla, lo interesante del documento fue que ofreció un criterio de selección del transformador elevador de tensión.</p>	<p>http://teslalugo.blogspot.com/search/label/bobina</p>
	<p>El aporte de este documento fue académico, cuyo fin fue visualizar el efecto de rayos de alta tensión generados en el toroide. Lo que hizo</p>	

Diseño de una bobina de Tesla de 7,5 kV.	interesante el documento fue como se presentó una forma de medir la tensión en el toroide, además el autor presento una alternativa de medición de tensión en el circuito primario, la cual fue conectar un transformador por el lado de alta y hacer mediciones en el lado de baja con el osciloscopio.	http://www.taringa.net/comunidades/ciencia-con-paciencia/6635122/1-Construccion-de-una-bobina-Tesla.html
--	--	---

Este documento presenta los resultados de la repotenciación de la bobina de tesla del laboratorio de electricidad de la UPTC seccional Duitama, a partir de la definición de variables y equipos necesarios para que la bobina de Tesla construida sirva como herramienta de apoyo académico e investigativo en el área de electricidad, sistemas de potencia y alta tensión en la Escuela de Ingeniería Electromecánica.

1.1 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En el capítulo 2 se indica el principio de funcionamiento y el modelamiento matemático de la bobina que soporta el diseño de los componentes del equipo, de esta manera brinda confiabilidad de la información consultada en otros documentos y del tratamiento matemático del circuito de la bobina de Tesla, adicionalmente se da un criterio del dimensionamiento de componentes como alimentación del equipo.

En el capítulo 3, se indica la comprobación de parámetros de construcción de los elementos que hacen parte del circuito, mediante el diagnóstico del estado actual y los requerimientos de adquisición de datos y adición de control para la bobina de Tesla. Se presentan los resultados de diseño y construcción de mejoras significativas para la repotenciación de la bobina, mediante cálculos matemáticos, y el uso de software para analizarla.

En el capítulo 4, se indican los resultados de las pruebas realizadas con la bobina mejorada, incluyendo los componentes eléctricos diseñados, y el sistema adquisición de datos y control para el funcionamiento bajo condiciones de pruebas específicas, se indican las guías de práctica que permiten afianzar los conocimientos del área eléctrica, e información de apoyo para el manejo de la bobina: manuales de usuario, planos, especificaciones técnicas.

2. FUNCIONAMIENTO Y MODELO MATEMATICO

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Una bobina de Tesla funciona conectando el secundario de un transformador de alta tensión con un condensador, una resistencia limitadora, unas bobinas de choque, un interruptor o spark gap y una bobina primaria, constituyendo lo que se denomina circuito primario (ver figura 1). Mientras el spark gap este abierto, el condensador principal se carga y contrariamente si el spark gap está cerrado, el condensador se descarga a través de la bobina primaria.

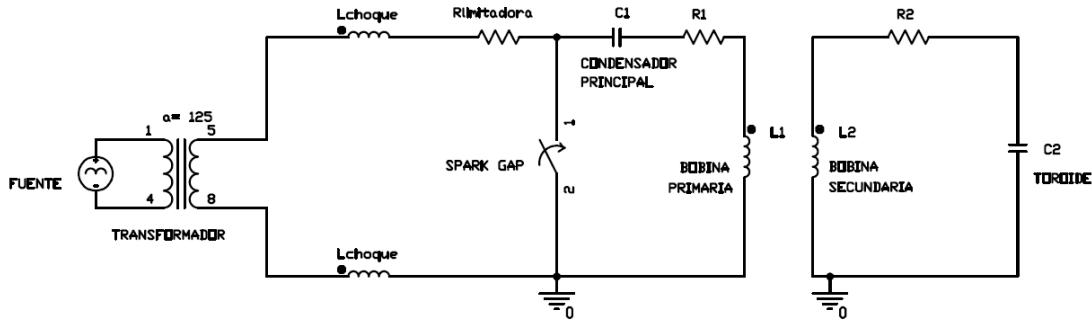
El interruptor spark gap se puede construir mediante un principio de contacto rotativo, que funciona con una base circular que cuenta con electrodos distribuidos en 360°, acoplada a un motor eléctrico que la hace girar; y un electrodo fijo que puede crear un arco eléctrico con los electrodos rotativos, a una frecuencia controlada por la cantidad de electrodos de la base circular y la velocidad del motor. Permitiendo que se cierre el circuito, se de una ruta de descarga para el condensador principal de la bobina y se produzcan pulsos de alta frecuencia².

El circuito secundario consta de una bobina y un condensador de descarga generalmente en forma de toroide. Físicamente los circuitos primario y secundario no están conectados eléctricamente por lo que su acople se debe a una inductancia mutua que se presentan entre la bobina primaria y la secundaria. Cuando se cierra el circuito primario, se tiene una corriente de alta frecuencia que genera un campo magnético en el secundario, produciendo que el toroide almacene la energía proveniente del circuito primario, hasta que la tensión es suficientemente alta para ionizar el aire circundante y generando un efecto de descarga tipo rayo si se acerca al toroide un electrodo de tierra. Por lo general se encuentra que la bobina incluye dos circuitos resonantes débilmente acoplados por aire, con un coeficiente de acoplamiento de las bobinas primaria y secundaria que suele estar entre 0.1 y 0.2³.

² CADAVID, Héctor, et al. Diseño y construcción de una bobina de tesla. Energía y Computación. 2001. vol. X, no. 2. 18 Ed. [En línea] Disponible en: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1392/1/Diseno%20y%20construccion%20de%20una%20bobina%20tesla.pdf>.

³ PÉREZ, Eduardo y MIQUÉLEZ, Vicente. Diseño y construcción de una bobina de tesla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Pamplona. 19 de febrero 2010. p 8.

Figura 1. Circuito de la bobina de tesla.



Fuente, autores, Orcad Pspice.

El esquema de conexión de componentes de la bobina de tesla se muestra en el anexo A. El valor de componentes diseñados preliminarmente para el circuito de la figura 1 se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Listado de componentes

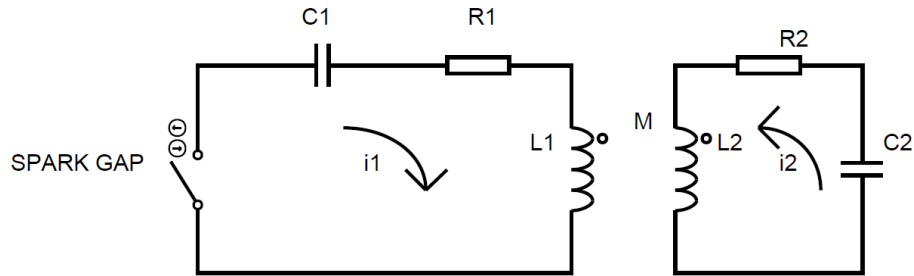
componente	Nombre	Asignación
Fuente	Fuente	De 0 a 120 V ac
Transformador	transformador	De 120 a 6000 V ac
Bobina de choque	L choque	3mH
Resistencia limitadora	R limitadora	37kΩ
Spark gap	Spark gap	1800RPM
Condensador principal	C1	14nF
Resistencia propia de la bobina primaria	R1	10Ω
Bobina primaria	L1	119,4μH
Bobina secundaria	L2	50,65mH
Resistencia propia de la bobina secundaria	R2	40,77Ω
Toroide	C2	21,4pF
Inductancia mutua	M	

2.2 MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

En el modelo matemático presentado a continuación, se analizan los circuitos de la bobina, hasta tener una expresión para la tensión en el toroide en función de la tensión de entrada, como resultado de unificar los modelos planteados por diferentes autores en uno solo. Con las ecuaciones establecidas, se puede definir la corriente de del circuito primario, necesaria para el funcionamiento del equipo, el cual depende del valor de componentes de la bobina de tesla.

El análisis del circuito que conforma la bobina de tesla parte la figura 2. Cuando el electrodo del spark gap cierra el circuito, dejando al condensador en serie con la bobina primaria y su resistencia equivalente. Para este caso, no se tienen en cuenta el efecto de las bobinas de choque ni la resistencia limitadora ya que la resonancia se da cuando el spark gap está cerrado quedando estos fuera del circuito resonante. El circuito secundario está dado por la bobina secundaria, su resistencia equivalente y el toroide⁴.

Figura 2. Circuito para análisis de tensión en el toroide.



Fuente, autores, desarrollado en software Proteus 7.7.

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff, para el circuito primario se tiene:

$$R_1 i_1 + \frac{1}{c_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0 \quad Ec. 1$$

De la misma forma para el circuito secundario.

$$R_2 i_2 + \frac{1}{c_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0 \quad Ec. 2$$

Remplazando la corriente en las ecuaciones 1 y 2 e integrando se tiene:

$$R_1 \frac{dq_1}{dt} + \frac{1}{c_1} q_1 + L_1 \frac{d^2 q_1}{dt^2} + M \frac{d^2 q_2}{dt^2} = 0$$

$$R_2 \frac{dq_2}{dt} + \frac{1}{c_2} q_2 + L_2 \frac{d^2 q_2}{dt^2} + M \frac{d^2 q_1}{dt^2} = 0$$

Se incluye el operador D , se tiene:

$$\left(D^2 + \frac{R_1}{L_1} D + \frac{1}{C_1 L_1} \right) q_1 + \frac{M}{L_1} D^2 q_2 = 0 \quad Ec. 3$$

⁴ PÉREZ. Op. cit., p 10.

$$\left(D^2 + \frac{R_2}{L_2}D + \frac{1}{C_2L_2}\right)q_2 + \frac{M}{L_2}D^2q_1 = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

Mediante el software scientific work place se multiplican las ecuaciones 3 y 4, se igualan a cero, se tiene:

$$(1 - k^2)D^4 + \left(\frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2}\right)D^3 + \left(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \frac{R_1R_2}{L_1L_2}\right)D^2 + \left(\frac{R_1}{L_1}\omega_2^2 + \frac{R_2}{L_2}\omega_1^2\right)D + \omega_1^2\omega_2^2 = 0 \quad \text{Ec.5}$$

Dónde:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}; \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}}; \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2C_2}} \quad \text{Ec. 6}$$

Con k el factor de acople entre las bobinas primaria y secundaria, ω_1 y ω_2 son las frecuencias de resonancia del circuito primario y secundario respectivamente cuando las bobinas están desacopladas, la ecuación de cuarto orden tiene cuatro raíces, las cuales tienen la forma:

$$y_i = e^{D_i t} \quad i = 1,2,3,4.$$

La solución general del sistema se presenta de la siguiente manera:

$$q_1 = \sum_{i=1}^4 A_i e^{D_i t} \quad ; \quad q_2 = \sum_{i=1}^4 B_i e^{D_i t} \quad \text{Ec. 7}$$

Las constantes se hallan con las condiciones iniciales en $t = 0$, es decir: $q_1 = 0$, $q_2 = q_0$, $Dq_1 = Dq_2 = 0$.

q_0 Es la carga inicial del condensador principal de la bobina de Tesla, las tensiones del condensador principal (primario), y del toroide (secundario) son:

$$v_1 = \frac{1}{C_1}q_1 = \frac{1}{C_1}\sum_{i=1}^4 A_i e^{D_i t}; \quad v_2 = \frac{1}{C_2}q_2 = \frac{1}{C_2}\sum_{i=1}^4 B_i e^{D_i t} \quad \text{Ec. 8}$$

Las soluciones para v_1 y v_2 solo se pueden calcular para el caso ideal de que las resistencias equivalentes de los circuitos primario y secundario sean iguales a cero y dado que las raíces de la ecuación de cuarto orden son imaginarias, entonces según García⁵, el voltaje en el secundario se puede dar mediante:

⁵ CEBALLOS GARCÍA, Carlos. Análisis constructivo para restaurar una bobina de tesla y evidenciamiento de un entorno ionizado. Proyecto de grado, Título de Tecnólogo en Electricidad. 2013. Universidad Tecnológica de Pereira. Tesis. [En línea] Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/4099/1/621314G216A.pdf>.

$$v_2 = \frac{2kV_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t\right) \sin\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right) \quad Ec. 9$$

Dónde:

$$T = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} \quad Ec. 10$$

$$\omega_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(1-k^2)}} \quad Ec. 11$$

$$\omega_2 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) + \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(1-k^2)}} \quad Ec. 12$$

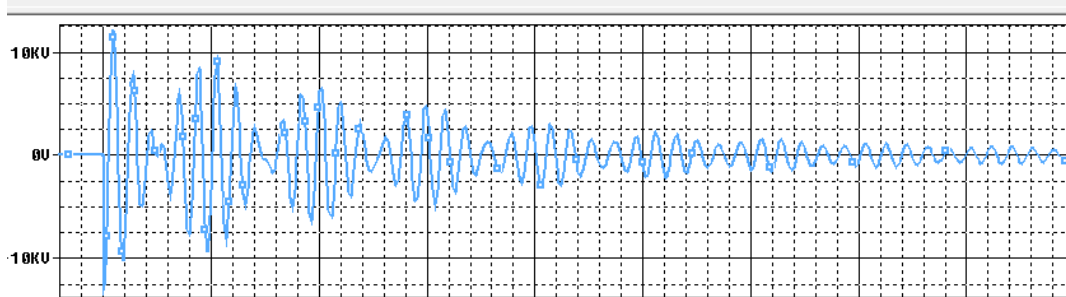
Donde T es el coeficiente de sintonización que es la relación de las frecuencias de resonancia desacopladas al cuadrado y V1 es la tensión inicial a través del condensador principal. ω_1, ω_2 Son las frecuencias de resonancia del primario y el secundario cuando están acoplados.

La ecuación 9 es de suma importancia ya que muestra que la tensión en el secundario es una oscilación de alta frecuencia definida por $\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2} t\right)$ cuya amplitud se modula con una oscilación de baja frecuencia definida por $\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2} t\right)$ ⁶, la figura 3 hace referencia a la forma de onda de tensión que se debe tener en el toroide, de la cual se aprecia que la magnitud de la onda está definida por $\frac{2kV_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$, la frecuencia de la envolvente está dada por el número de descargas del condensador principal, es decir la velocidad en el spark gap y la frecuencia de la onda de tensión en el toroide es la frecuencia de resonancia.

Mediante el software Excel se ingresaron valores a la ecuación 9 para comprobar que la tensión en el circuito secundario se puede expresar en función de los parámetros de los componentes de la bobina de Tesla, lo cual demuestra que el modelo matemático es válido (ver figura 4).

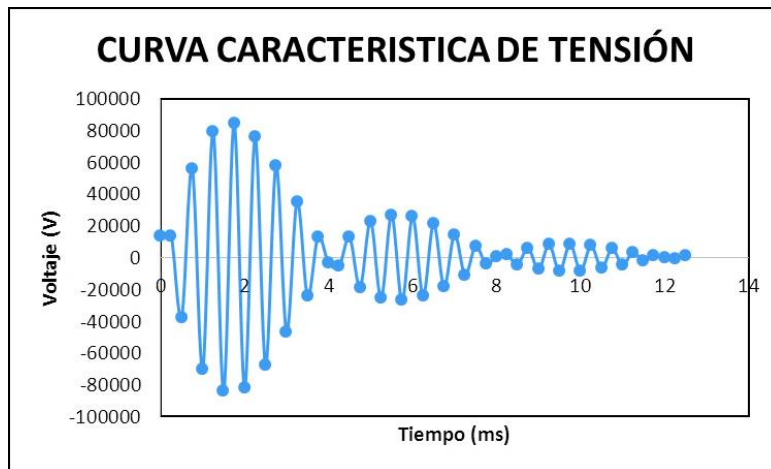
⁶ DENICOLAI, Marco. Tesla Transformer for Experimentation and Research. 30 de Mayo de 2001. P 48 – 51.

Figura 3. Forma de onda en el secundario



Fuente, autores, simulada en software orcad 16.3.

Figura 4. Curva característica de tensión en el toroide.



Fuente, autores, software Excel.

2.2.1 Corriente en el circuito primario de la bobina de tesla.

A continuación se hace un análisis del circuito primario con el fin de saber cuál es la corriente necesaria para el funcionamiento de la bobina de tesla de acuerdo a los componentes indicados desde el circuito de la figura 1. En primera instancia se analiza el circuito cuando los electrodos móviles del spark gap no están en contacto con los electrodos fijos, es decir que el circuito se analiza como un RLC en serie, considerando una fuente alterna $V_m \text{sen}(wt)$, la corriente tiene la forma $i = I_m \text{sen}(wt)$, donde $I_m = V_m/Z$, y Z la impedancia del circuito⁷.

⁷ NILSON, James W. circuitos eléctricos.7 edición. Madrid. Pearson educación, 2005. p 274-398. ISBN. 84-205-4458-2.

La caída de tensión en la resistencia limitadora, en la bobina primaria y en el condensador principal.

$$V_R = Ri = RI_m \text{sen}(wt) \quad \text{Ec. 13}$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt} (I_m \text{sen}(wt)) = L\omega I_m \text{cos}(wt) \quad \text{Ec. 14}$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int I_m \text{sen}(wt) dt \quad \text{Ec. 15}$$

$$V_C = \frac{1}{\omega C} I_m * [-\text{cos}(wt)]$$

La suma de las tensiones en los componentes es la tensión que entrega la fuente es:

$$V_t = RI_m \text{sen}(wt) + I_m \text{cos}(wt) \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) + 2L_{\text{choque}} \omega I_m \text{cos}(wt) \quad \text{Ec. 16}$$

La tensión total entregada por la fuente también se puede dar como una onda senoidal con amplitud A y ángulo de desfase ϕ :

$$V_t = A \text{sen}(wt + \phi) = A \text{sen}(wt) \text{cos}\phi + A \text{cos}(wt) \text{sen}\phi \quad \text{Ec. 17}$$

Por lo tanto:

$$RI_m \text{sen}(wt) = A \text{sen}(wt) \text{cos}\phi \quad \vee \quad RI_m = A \text{cos}\phi$$

$$I_m \text{cos}(wt) \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = A \text{cos}(wt) \text{sen}\phi \quad \vee \quad I_m \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = A \text{sen}\phi \quad \text{Ec. 18}$$

El ángulo de desfase está dado por:

$$\text{cos}\phi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \quad \text{Ec. 19}$$

La amplitud de la onda senoidal es:

$$A = \frac{RI_m}{\text{cos}\phi} = I_m * \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad \text{Ec. 20}$$

Es decir que la tensión que entrega la fuente está dada por:

$$V_t = I_m * \sqrt{R^2 + \left(wL - \frac{1}{wC}\right)^2} * \text{sen} \left[wt + \tan^{-1} \left(\frac{wL - \frac{1}{wC}}{R} \right) \right] \quad \text{Ec. 21}$$

Hay tres casos que se pueden dar el circuito, que son:

Si $wL > \frac{1}{wC}$, el ángulo de fase es positivo y la corriente está atrasada con respecto a la tensión, por lo que sería un circuito inductivo.

Si $wL < \frac{1}{wC}$, el ángulo de fase es negativo y la corriente esta adelantada con respecto a la tensión por lo tanto es un circuito capacitivo.

Si $wL = \frac{1}{wC}$, entonces el ángulo de fase es nulo, es decir que la corriente y la tensión están en fase, en este caso se tiene una condición llamada resonancia serie, que es el caso de la bobina de Tesla.

Cuando no hacen contacto los electrodos fijos con los móviles, la tensión en el spark gap es la suma de la tensión presente en la bobina primaria y el condensador principal:

$$V_{\text{spark gap}} = \frac{1}{C} \int I_m \text{sen}(wt) dt + L \frac{d}{dt} (I_m \text{sen}(wt)) = I_m \cos \left(wL - \frac{1}{wC} \right) \quad \text{Ec. 22}$$

La tensión se hace cero cuando los electrodos fijos y móviles están en contacto $V_C + V_L = 0$. Es decir que la tensión que hay en el condensador primario se descarga en la bobina primaria, y se tiene una condición de resonancia⁸.

$$wL = -\frac{1}{wC} \quad \text{Ec. 23}$$

Ya que se desea hallar la corriente necesaria para el circuito cuando el spark gap está abierto, para ello se encuentra la impedancia del circuito:

$$X_{L\text{choque}} = j2\pi * 60 * 3 * 10^{-3} = j1,131\Omega \quad \text{Ec. 24}$$

$$X_C = -j \frac{1}{2\pi * 60 * 13 * 10^{-9}} = -j189,47k\Omega \quad \text{Ec. 25}$$

$$X_{L\text{primaria}} = j2\pi * 60 * 119,4 * 10^{-3} = j0,0450\Omega \quad \text{Ec. 26}$$

$$R = 37 k\Omega$$

⁸ BOYLESTAD, Robert L. Introducción al análisis de circuitos. 10 ed. México. Pearson educación, 2004. p 887-922. 970-26-0448-6.

$$Z = (37k\Omega) + j((2 * 1,131\Omega) + 0,045\Omega) - (189,47k\Omega) Z = 193,048\angle - 78,95 k\Omega \text{ Ec. 27}$$

$$I_m = \frac{6000 V}{193,048k\Omega} = 31mA \quad \text{Ec. 28}$$

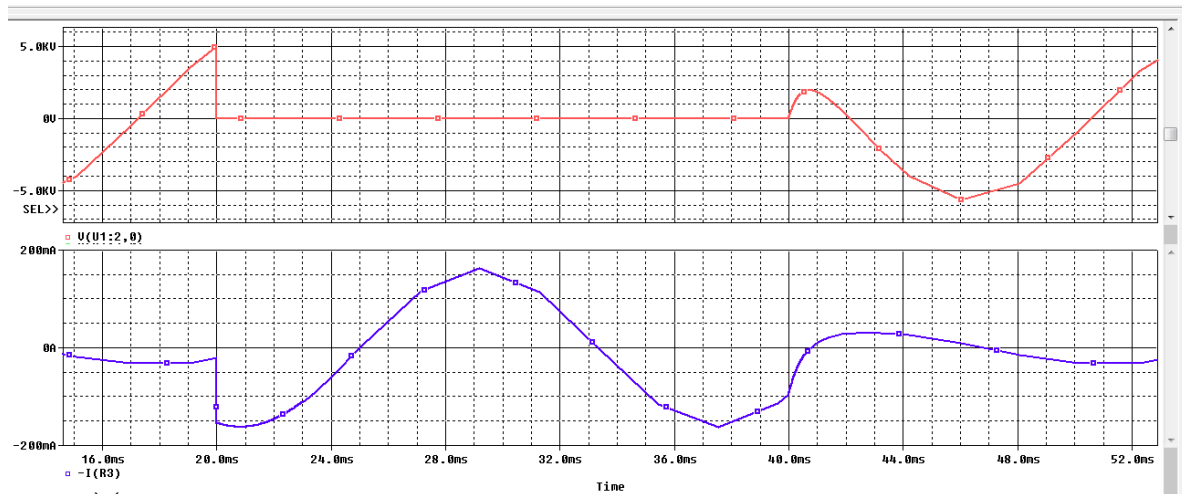
Cuando se cierra el spark gap, la corriente está dada por:

$$I_m = \frac{6000 V}{37k\Omega} = 162mA \quad \text{Ec. 29}$$

La figura 5 hace referencia a la tensión en el spark gap y la corriente que circula por el circuito dependiendo de la posición del mismo spark gap.

Se observa que la tensión en el spark gap es la de fuente menos la caída de tensión en las bobinas de choque y la resistencia limitadora, cuando este se encuentra abierto. Cuando se cierra el circuito primario la tensión en el spark gap se hace cero y se tiene un pico de corriente de 162mA, en caso contrario la corriente es 31mA, de esta manera se comprueba que el análisis matemático proporciona resultados coherentes a los brindados en las simulaciones.

Figura 5. Tensión en el spark gap y corriente en el circuito primario.



Fuente, autores, software orcad 16.3.

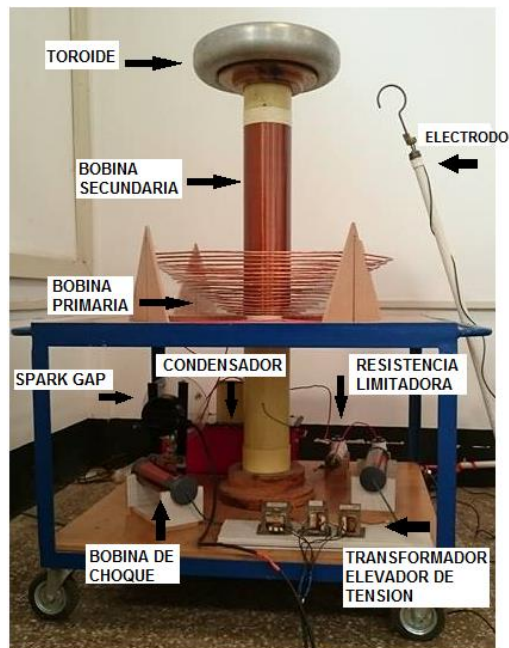
3. DISEÑO DE COMPONENTES

A continuación indica la comprobación de parámetros de construcción de los elementos que hacen parte del circuito; se realiza un diagnóstico del estado actual de la bobina construida y se especifican las mejoras propuestas para la repotenciación de la bobina de Tesla. Las especificaciones de cada componente se muestran en el Anexo B.

3.1 FORMULACION DE COMPONENTES DE LA BOBINA DE TESLA

La figura 6 hace referencia a los componentes de la bobina de Tesla repotenciada.

Figura 6. Componentes de la bobina de Tesla.



Fuente, autores.

3.1.1 Transformador elevador de tensión

El transformador elevador de tensión mostrado en la figura 6, debe suplir la corriente I_m calculada con la ecuación 29 necesaria para el funcionamiento del equipo, debe ser diseñado de tal forma que en el lado de baja tensión soporte el pico de corriente que se tiene debido al spark gap. Generalmente se usan

transformadores de avisos de neón, o se diseña uno que cumpla con los requerimientos de corriente.

3.1.2 Bobinas de choque

Las bobinas de choque tienen la función de limitar los transitorios de corriente que se presentan cuando se cierra el circuito primario, la reactancia inductiva aumenta cuando aumenta la frecuencia. No se encontró un procedimiento para calcular las bobinas de choque, por lo que su construcción se basó en ingresar valores de inductancia en el circuito primario de la bobina de Tesla (software orcad 16.3), hasta que se tuvo una reactancia inductiva de 2,32kΩ, valor que no cambio las propiedades de resonancia en el circuito.

3.1.3 Spark gap

Este dispositivo es el encargado producir los arcos que cierran el circuito primario, generalmente se usa un motor eléctrico con un plato en el eje dispuesto de electrodos espaciados igualmente, cuando los electrodos móviles se enfrentan a los electrodos fijos se da la ruta de descarga del condensador, el espacio entre electrodos móviles permite la carga y descarga del condensador.⁹

$$V_r = \frac{C * RPM}{60} \quad Ec. 30$$

$$C = \pi * D_r \quad Ec. 31$$

Dónde:

V_r: velocidad rotacional del rotor (cm/sg).

C: circunferencia del rotor (cm).

D_r: diámetro del rotor (cm).

D_e: diámetro de los electrodos (cm).

N_e: número de electrodos montados en el rotor.

$$t_{on} = \frac{D_e}{V_r * N_e} \quad Ec. 32$$

$$t_{off} = \frac{(C/N_e)}{V_r} - t_{on} \quad Ec. 33$$

Dónde:

t_{on}: Tiempo en contacto de electrodos fijos y móviles.

t_{off}: Tiempo en que los electrodos fijos y móviles no están en contacto.

⁹ TILBURY, Mitch. The Ultimate Tesla Coil Desing and Construction Guide. McGraw-Hill. New York. 2008. p. 413.

3.1.4 Condensador principal

Para el cálculo de condensador principal, se debe encontrar la impedancia de la fuente, posteriormente se hace igual la impedancia de la fuente a la reactancia del condensador primario, hallándose de esta manera el valor máximo de capacitancia.

$$Z_{fuente} = \frac{V_{fuente}}{I_{fuente}} = X_{condensador} \quad (\Omega) \quad Ec. 34$$

$$C = \frac{1}{2\pi * f_s * X_{condensador}} \quad (nF) \quad Ec. 35$$

3.1.5 Bobina secundaria

Es la encargada de llevar Las altas tensiones al toroide para tener el efecto visual de un rayo, el cual es objetivo del desarrollo del proyecto. Esta bobina suele tener forma de solenoide y la base para su construcción es un tubo de PVC por sus características de rigidez y bajo costo.

La bobina se devana con alambre de cobre que generalmente varía entre 0.5 y 1 mm de diámetro¹⁰, la longitud de la bobina depende de la potencia del sistema, ya que cuando se trabaja con potencias altas existe la posibilidad de que haya un arco entre el toroide de descarga y la bobina primaria, para que haya un buen funcionamiento de la bobina se recomienda que la relación H: D (altura de la bobina con respecto a su diámetro) guarde una relación de 3 a 5, además se sabe que la inductancia de una bobina crece proporcionalmente a la forma geométrica y directamente proporcional al cuadrado del número de espiras, por lo que se deben calcular de manera correcta sus parámetros¹¹.

Para conocer la inductancia del secundario, se usa la fórmula de Wheeler¹² en la cual se diseña la bobina para sistema métrico.

¹⁰ PÉREZ. Op. cit., p 21.

¹¹ S.P, Londoño. En: Diseño de un prototipo de bobina de tesla con tensión de operación pico de 280kV. Universidad Francisco José Caldas, Bogotá - Colombia.

¹² HURTADO ROMERO, Danny Fabián y VILLAMAR ERAS, Fabricio Eduardo. Diseño y construcción de una bobina de tesla de 15 kV en el primario para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica salesiana Sede Cuenca. Cuenca. Abril de 2014. p. 31.

$$L_{sec} = \frac{R^2 * N^2}{2540 * (9R + 10H)} \quad Ec. 36$$

Dónde:

L_{sec} , inductancia del secundario (mH).

R, radio del secundario (cm).

H, altura del secundario (cm).

N, número de vueltas del bobinado.

A continuación se muestran las características del bobinado secundario.

3.1.5.1 Numero de espiras teóricas.

Se halla sabiendo la altura de la bobina secundaria que va a ser implementada, además del calibre del conductor a usar.

$$N_p = \frac{\text{altura del bobinado}}{\text{calibre del conductor}} \quad Ec. 37$$

3.1.5.2 Capacitancia parasita.

Es importante conocer este parámetro ya que afecta la capacitancia total del circuito secundario, con las ecuaciones de Medhurst¹³ se hace el cálculo de dicho parámetro.

$$C_{parasita} = K * D \quad Ec. 38$$

$$K = 0.100976 \frac{H}{D} + 0.30963 \quad Ec. 39$$

Dónde:

C parasita: capacitancia parasita del secundario (pF).

D: diámetro del secundario (cm).

K: constante para relacionar altura y diámetro de la bobina secundaria.

H: altura del secundario (cm).

3.1.5.3 Longitud total del conductor y resistencia propia.

Es importante conocer este parámetro, ya que indica la cantidad necesaria de conductor para hacer el bobinado secundario, esto implica conocer el costo.

$$\text{Longitud} = 2\pi * R * N \quad (m) \quad Ec. 40$$

Dónde:

R: radio del secundario (m).

¹³ PÉREZ. Op. cit., p 20

N: número de vueltas encontradas teóricamente.

Una vez calculada la bobina secundaria se sabe que esta tendrá una resistencia propia, y es importante conocerla ya que cualquier parámetro influye en el funcionamiento de la bobina de Tesla¹⁴.

$$R_{secundaria} = \rho * \frac{longitud}{\pi \left(\frac{diametro\ del\ alambre}{2} \right)^2} \quad Ec. 41$$

3.1.6 Toroide

Este elemento de la bobina de Tesla es el punto donde se genera el rayo, generalmente es una esfera o un disco de aluminio, el cual tiene una capacitancia. El toroide tiene un gran beneficio, disminuye la intensidad del campo eléctrico que está en la bobina secundaria, estos campos pueden producir arcos en la parte superior de la bobina, por lo que la implementación de un toroide reduce este efecto, de esta manera solo se tiene un punto donde se localice la chispa. El toroide debe tener el mínimo número de irregularidades y poca aspereza para que se tenga un buen efecto, no obstante esto es difícil de lograr por lo que generalmente se compra o se construye con algunas irregularidades.

Con la capacitancia del toroide y la capacitancia parasita de la bobina secundaria, se encuentra la resultante capacitiva del circuito secundario, (ver figura 7):

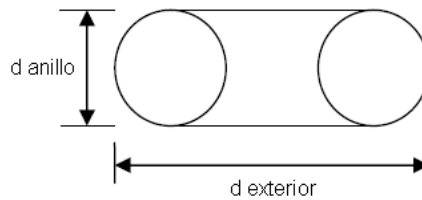
$$C_{toroide} = 2.8 * \left(1.2781 - \frac{d_{anillo}}{d_{exterior}} \right) * \left(\sqrt{0.1217 * d_{anillo} * (d_{exterior} - d_{anillo})} \right) \quad (pF) \quad Ec. 42$$

Una vez hallada la capacitancia del toroide se puede hallar la frecuencia de resonancia del secundario, que para cálculos teóricos debe ser la misma frecuencia de resonancia del primario.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{secundaria} * (C_{parasita} + C_{toroide})}} \quad Ec. 43$$

¹⁴ C., Boonseng y P., Apiratikul. A Low Cost Approach to Desing the Tesla Transformer for Testing and Insulating Materials. Departamento de Ingeniería Eléctrica. p. 2 – 24. 2001.

Figura 7. Representación de un toroide



Fuente, autores

3.1.7 Bobina primaria

La bobina primaria es un enrollamiento que tiene un bajo valor de inductancia, cuya forma varía de acuerdo a la necesidad de la bobina y al espacio disponible. Los tres diseños que se suelen usar para la construcción son espiral plana, espiral cónica invertida, solenoide recto.

La función del circuito primario es transmitir la energía al circuito secundario ya que físicamente no se tiene una conexión eléctrica entre los dos circuitos. La bobina primaria suele estar construida de manera que se pueda cambiar su valor de inductancia para poder cuadrar los valores de la frecuencia de resonancia en el circuito primario y secundario.

Una vez hallada la capacitancia primaria, se puede hallar el valor de la inductancia primaria, al igualar la frecuencia de resonancia del primario con la del secundario.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{primaria} * C_{primaria}}} \quad (\text{Hz}) \quad \text{Ec. 44}$$

$$L_{primaria} = \frac{1}{C_{primaria} * (2\pi * f_r)^2} \quad (\mu\text{H}) \quad \text{Ec. 45}$$

La posibilidad de hacer una bobina primaria en forma de cono invertido mejora el factor de acople entre bobinas.¹⁵

$$L_{primaria} = N^2 d \frac{1}{40,8 + 112 \frac{w}{d}} \quad \text{Ec. 46}$$

¹⁵ PEREZ. Op., cit. p. 31- 35.

Dónde:

L_1 : Inductancia primaria μH .

N : numero de espiras.

d : Diámetro medio de la espira cm.

w : Ancho de las espiras de un lado cm.

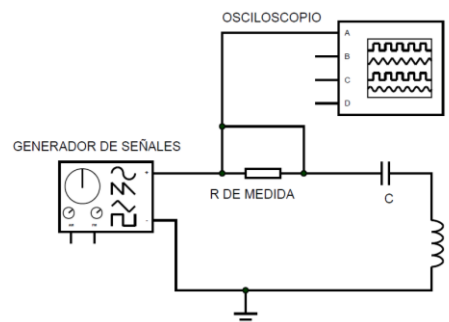
3.2 DIAGNOSTICO DE LA BOBINA CONSTRUIDA EN EL AÑO 2011

Una vez se tiene la formulación matemática y las ecuaciones pertinentes para un buen diseño de la bobina de Tesla, se procedió a hacer un diagnóstico de cada componente del equipo, esto se hizo mediante la información suministrada en la tesis del año 2011¹⁶, adicionalmente se midieron cada uno de los componentes de la bobina en el laboratorio de la UPTC seccionales Duitama y Sogamoso. A continuación se hace una descripción de los métodos usados para obtener el valor de los componentes.

3.2.1 Medición de bobinas primaria, secundaria y condensador primario

El montaje hizo necesario el uso de un generador de señales, un condensador de valor conocido si lo que se deseaba medir era inductancia, o una inductancia conocida si lo que se deseaba medir era capacitancia, en ambos casos una resistencia de medida cuyo valor también era conocido, la medición se basó en el concepto de que a la frecuencia de resonancia la reactancia del condensador y de la bobina tienen el mismo valor en magnitud pero con signo contrario (principio de resonancia), es decir que la suma es cero, por ende solo se ve el efecto resistivo.(ver figura 8).

Figura 8. Conexión para medida de inductancia y capacitancia



Fuente, autores, Proteus 7.7.

¹⁶ QUITIAN. Op. cit. p. 1- 97.

Con el osciloscopio se midió la forma de onda de tensión en la resistencia de medida y se hicieron variaciones en el generador de señales, cuando se alcanzó la frecuencia de resonancia la tensión en la resistencia se hizo máxima, por lo que la impedancia del circuito es:¹⁷

$$Z = R_m + ZL_1 + ZC_1 = R_m + \left(-\frac{1}{j\omega C} + R_{C1}\right) + (j\omega L + R_{L1}) \quad Ec. 47$$

En resonancia $-\frac{1}{j\omega C} + j\omega L = 0$, entonces, $Z = R_m + R_{C1} + R_{L1}$

Una vez hallada la frecuencia de resonancia se pudo hallar el valor deseado de inductancia o capacitancia.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad Ec. 48$$

$$L = \frac{1}{(2\pi * f_0)^2 * C} \quad o \quad C = \frac{1}{(2\pi * f_0)^2 * L} \quad Ec. 49$$

Para hallar la frecuencia de resonancia de los circuitos primario y secundario bastó el montaje mostrado en la figura 8, esta vez con los valores correspondientes a los circuitos propios de la bobina de tesla.

Teniendo la frecuencia de resonancia en ambos circuitos, se quiso medir la capacitancia parásita de la bobina secundaria, para ello se usó el principio de auto resonancia. Para esta medición se montó el circuito mostrado en la figura 8, con la variación que no se colocó condensador, y dado que en este punto ya se conocía la frecuencia de resonancia y el valor de la inductancia, se procedió a hallar la capacitancia parásita.

$$C_{par} = \frac{1}{(2\pi * f_0)^2 * L_2} \quad Ec. 50$$

Dónde:

C_{par} : Capacitancia parásita en el secundario pF.

f_0 : Frecuencia de resonancia en el secundario kHz.

L_2 : Inductancia secundaria mH.

Las tablas 3 y 4 hacen referencia a los valores obtenidos de forma práctica para las bobinas, secundaria y el condensador principal respectivamente, haciendo uso

¹⁷ PEREZ. Op., cit. 35- 42.

del método explicado, la resistencia de medida en teoría es de 500 ohmios, esta se midió con un multímetro FLUKE 189, dio un valor de 480 ohmios, en la bobina primaria no fue posible aplicar el método ya que la inductancia es tan baja que no se encontró un valor exacto de la frecuencia de resonancia, por esta razón se hizo la medida con el equipo LCR meter BK precisión 879B disponible en la UPTC seccional Duitama, adicionalmente se midió el condensador principal con el fin de tener garantías de la medición, la tabla 5 hace referencia a los datos tomados para la bobina primaria y el condensador principal mediante el equipo LCR meter.

Tabla 3. Valores medidos de la bobina secundaria con el principio de resonancia.

R prueba [Ω]	Fo [Hz]	C prueba [F]	L medida [H]
489	50	4,08E-04	0,02483
489	156	4,00E-05	0,02602
489	176	3,00E-05	0,027257
489	2080	2,20E-07	0,026613
		promedio	0,026184

Tabla 4. Valores medidos para el condensador primario con el principio de resonancia.

R [Ω] prueba	Fo [Hz]	L [H]	C [nF]
489	11100	0,015	13,68
489	9010	0,024	13,00
489	6960	0,035	14,94
489	104000	1,65E-04	14,19
		promedio	13,95

Tabla 5. Valores medidos para bobina primaria con el LCR meter 879B

FRECUENCIA	L primaria	C principal
100 Hz	85μH	15,6nF
120Hz	85μH	14,9nF
1kHz	84,4μH	14,6nF
10kHz	83,21μH	14,6nF

La medida se hizo hasta 10kHz ya que este es el límite del instrumento de medida. El valor de cada componente se resume en la tabla 6.¹⁸

Tabla 6. Componentes de la bobina construida en el año 2011.

Componentes bobina construida en el año 2011			
ELEMENTO	Valor escrito en la tesis anterior	valor calculado	valor real
Numero de espiras teóricas (L2)	1100	1100	1094
Inductancia Secundaria (L2) (mH)	28,01	28,021	26,18
Capacidad Parasita de L2 (pF)	15,77	16,57	15,23
Longitud total del Conductor (m)	582	582	577
R de la Bobina secundaria (Ω)	78,28	78	77,74
Capacidad del Toroide (pF)	21,4	21,4	21,4
F de Resonancia del Primario (Hz)	90030	154281	145897
F de Resonancia del Secundario (Hz)	90030	154281	165570
Impedancia de la Fuente (Ω)	115384,62	115384,62	-
Capacidad Primaria (nF)	21	22,9	14,6
Inductancia Primaria (L1) (μ H)	149,5	46,28	84,4
Numero de Espiras teóricas (L1)	13	6	9

3.2.2 Diagnóstico de componentes

Se encontró que la bobina secundaria no cumplía con la relación establecida **H/D**, esta relación debe cumplirse ya que si se tiene una relación menor hay la posibilidad de arcos entre bobinas primaria y secundaria, contrariamente si la relación es mayor implica un sobre dimensionamiento de la bobina, por ende gasto innecesario de conductor, el valor encontrado fue 6,7, adicionalmente se encontraron tres golpes en el bobinado, mediante el multímetro fluke 189 se comprobó que en la posición de los golpes las espiras del bobinado estaban cortocircuitadas. Se encontró que la bobina primaria tenía un valor de 85 μ H, valor que no era acorde para que hubiera resonancia, ya que la frecuencia en el secundario era 165,57kHz, y en el primario 145,897kHz, el valor de la inductancia primaria era fijo y para poder igualar las frecuencias de resonancia de los circuitos primario y secundario de la bobina de Tesla era necesario aumentar el valor de inductancia primaria, el mal estado en que se encontró la bobina primaria no hizo

¹⁸ CASTRO GALEANO, Juan Carlos; PINTO SALAMANCA, María Luisa y AMAYA QUITIÁN, Maira Fernanda. En: Diseño y construcción de una Bobina de Tesla de 1680 W, para la enseñanza de conceptos Básicos en sistemas eléctricos de potencia. Julio - Diciembre, 2014. Rev. Investig. Desarro. Innov. vol. 5, no. 1, p. 66 – 74. ISSN: 2027-8306.

posible la primera medición del valor de inductancia con el instrumento de medida LCR meter, por lo que para hacer la medición de la bobina primaria hubo la necesidad de darle continuidad, esto se hizo con cinta de cobre. Al no haber resonancia el efecto del rayo fue menor de 8 cm y se esperaba un rayo de 40 cm (ver figura 9).

El transformador elevador de tensión con especificaciones 120/15000V, 130mA en el lado de alta presentó calentamiento en sus devanados, de ahí surgió el supuesto de fallas en aislamiento, es decir corto circuito entre espiras de un bobinado, por tal razón se propuso una inspección para conocer el estado real del transformador.

Para las pruebas realizadas con la bobina en el año 2011, no se contó con un sistema de puesta a tierra, por tal razón se ponían en riesgo tanto personas como equipos eléctricos.

Figura 9. Rayo obtenido con la tesis de 2011

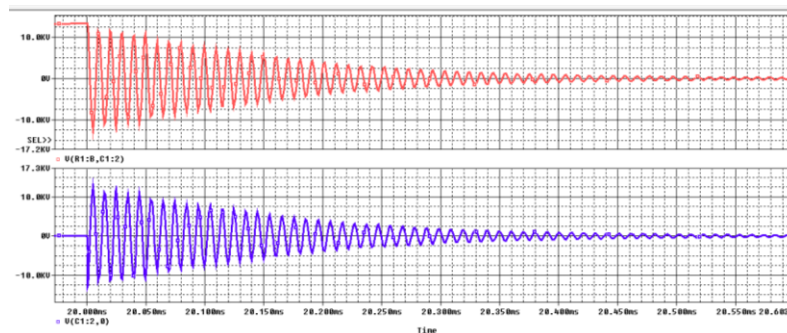


Fuente, Maira Fernanda Amaya Quitian.

Se encontró, que el spark gap, no tenía una alineación de los electrodos, además tenía cascabeleo en el eje. Problemas que ocasionaban que los electrodos entraran en contacto, la gravedad del problema radicaba en que el choque constante de los electrodos además de causar deterioro, aumentaba el riesgo de que uno o más electrodos salieran de su posición y a la velocidad angular del motor de 2200 RPM causar un accidente a las personas que transitaban cerca al equipo. El motor que se usaba para hacer el spark gap era un motor de máquina de coser alimentado con una tensión de 120 vac, el problema del motor además del ruido producido era que no se contaba con un circuito de control de variación de velocidad para observar la influencia en el funcionamiento de la bobina de Tesla.

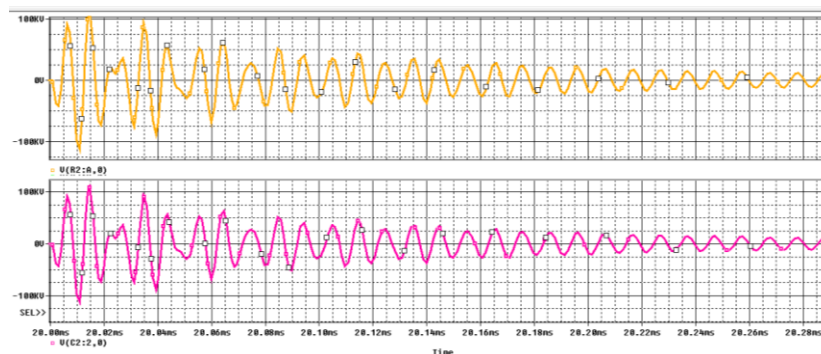
Se tomaron los valores medidos de los componentes del equipo y se llevaron al simulador Orcad 16.3, con el fin de mostrar la forma de onda de tensión cuando el spark gap cierra el circuito primario de la bobina de Tesla. La figura 10 hace referencia a la curva de tensión en el circuito primario, se tuvo un valor pico de 12000 V, cuyo objetivo es mostrar que la forma de onda de tensión con los componentes diseñados en el trabajo de 2011 no permitieron el efecto de una onda de alta frecuencia modulada por una onda de baja frecuencia. La figura 11 hace referencia a la forma de onda de tensión en el circuito secundario, con los componentes diseñados en el trabajo de 2011 se tuvo un valor máximo de 82kV, en la figura 11 se quiere mostrar que en el circuito secundario de la bobina de tesla no se tuvo resonancia, ya que la forma de onda de tensión debería ser la misma que la del primario pero desfasada debido al factor de acople entre bobinas primaria y secundaria. En la figura 12 se muestra que la frecuencia de resonancia no es la misma que se puso en el trabajo de 2011 de 90kHz, pero si es 154kHz valor que también se calculó mediante la ecuación 44.

Figura 10. Tensión en el circuito primario con valores medidos.



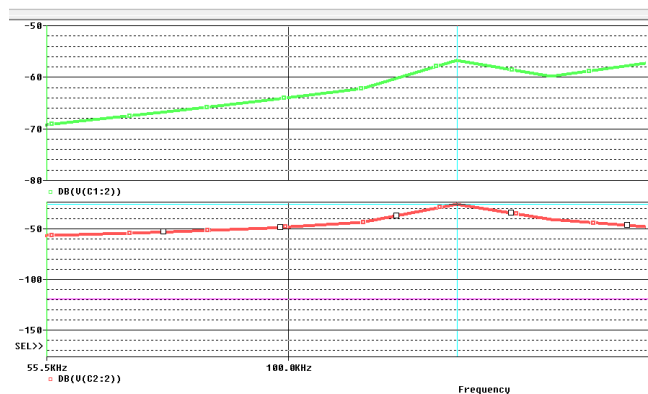
Fuente, autores, software orcad 16.3.

Figura 11. Tensión en el circuito secundario con valores medidos.



Fuente, autores, software orcad 16.3.

Figura 12. Frecuencia de resonancia con valores medidos.



Fuente, autores, software orcad 16.3.

La tabla 7 hace referencia al resumen de los componentes encontrados, y su estado real.

Tabla 7. Estado de componentes reales bobina construida en 2011.

Componente	Descripción	Estado real
Transformador	Elevar la tensión que viene de red que se quiere en el circuito primario de la bobina de Tesla.	Se encontró calentamiento en sus devanados, por lo que se plantea una inspección. Se tenía una relación de transformación de 125, es decir 120/ 15000 V, la corriente en el secundario era de 130mA.
Resistencia limitadora	Limitar la corriente que ingresa al transformador cuando el spark gap cierra el circuito primario	Se encontró un valor de 2,24kΩ, no se encontraron averías, la construcción era una mezcla de agua estéril y sal en un tubo de PVC, por lo que es ajustable al variar el nivel de sal en agua.
Spark gap	Cierra el circuito primario para que el condensador principal se descargue en la bobina primaria y se tenga la condición de resonancia.	Se encontró cascabeleo en el eje, falta de alineación de los electrodos, se usó un motor de cosedora de 2200 rpm con elevado nivel de ruido y falta de control de velocidad.
Condensador principal	Se encarga de almacenar y liberar la energía proporcionada por el transformador para generar los pulsos de alta frecuencia.	Condensador de placas paralelas sumergido en aceite dieléctrico con capacitancia de 14nF, no se encontraron especificaciones técnicas como tensión y temperatura máxima de operación. No se encontraron averías.
Bobina primaria	Es la ruta de descarga del condensador principal, e induce alta tensión en la bobina	Debido al deterioro no se tenía continuidad en el conductor, se logró medir y se tuvo un valor fijo

	secundaria.	de 85 μ H, que no permitía sintonizar el circuito primario a la frecuencia de resonancia del secundario.
Bobina secundaria	Llevar alta tensión al toroide (condensador de descarga)	La relación H/D no era la adecuada, por lo que su tamaño fue sobredimensionado, se pudo medir un valor de 27,3mH, tenía golpes por lo que se encontraron espiras cortocircuitadas.
Toroide	Almacena y libera la energía proveniente de la bobina secundaria, es el punto donde se originan las descargas de alta tensión.	Se encontró un valor de 21,4pF, no se encontraron averías.
Sistema de puesta a tierra	Evitar riesgo eléctrico a personas y equipos durante el funcionamiento de la bobina.	No se encontró ningún sistema para operar la bobina en forma segura.

3.3 MEJORAMIENTO DE LA BOBINA DE TESLA

3.3.1 Transformador elevador de tensión

Dado que no fue posible hacer uso del transformador diseñado para la bobina el cual cumple con los requisitos de corriente necesarios en el circuito, se plantea la conexión en cascada de tres transformadores para microondas, cuyas especificaciones son 120/2000 voltios, corriente de 200mA en el lado de alta tensión. Para comprobar el funcionamiento de los transformadores se alimentaron mediante un Variac monofásico con especificaciones de 0 a 120V (SISTELECTRO), por el lado de baja y con el multímetro FKUKE 189 se midió tensión en el lado de alta (ver tablas 8, 9, 10).

La conexión de los transformadores proporcionó una relación de transformación de 54, no obstante la corriente que se tuvo en el lado de baja de los transformadores era de 10,8 A como máximo, para no llevar los transformadores a este valor de corriente se dispuso de un fusible de 10A a la entrada de los transformadores. La conexión de más transformadores causa daño en los aislamientos ya que estos transformadores están diseñados para soportar 2000 V.

Tabla 8. Pruebas de tensión primer transformador.

$V_{primario}$ [V]	$V_{secundario}$ [V]	Relacion de transformacion
2,67	46,6	17,47
5,81	102,4	17,62
8,55	152,5	17,83
10,7	191	17,84

Tabla 9. Pruebas de tensión segundo transformador.

$V_{primario}$ [V]	$V_{secundario}$ [V]	Relacion de transformacion
1,56	26,7	17,11
3,35	58,2	17,37
6,58	115	17,42
9,33	165,7	17,7

Tabla 10. Pruebas de tensión tercer transformador.

$V_{primario}$ [V]	$V_{secundario}$ [V]	Relacion de transformacion
3,28	59,5	18,14
5	91	18,2
7,72	141,7	18,3
10	183,3	18,3

3.3.2 Diseño de las bobinas de choque

La construcción se basa en 372 espiras de alambre 24 AWG en un tubo de tres pulgadas de diámetro, para una longitud de 20 cm de bobinado, una vez enrollado el alambre, se cubre con royal pox que mejora el aislamiento y protege del ambiente (ver figura 13). La inductancia medida con el LCR meter fue 3,4 mH, valor que se obtuvo mediante el software orcad 16.3, que no causo cambios en la forma de onda de la frecuencia de resonancia.

Figura 13. Bobina de choque

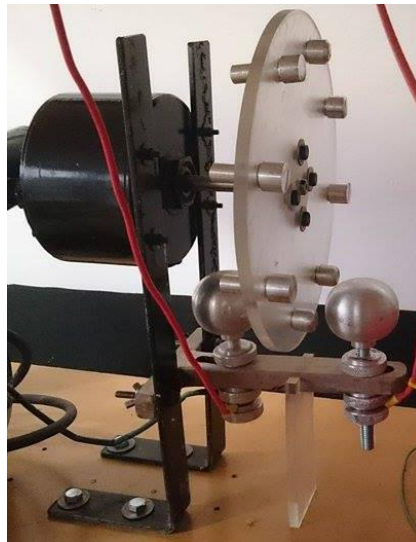


Fuente, autores.

3.3.3 Diseño del spark gap

Para el diseño del spark gap implementado que se muestra en la figura 14, se usó un motor monofásico de 120 vac, 1800 RPM, el cual tiene 8 electrodos móviles espaciados a 45 grados y alineados de manera uniforme. El espaciamiento de los electrodos y la velocidad del motor dieron el tiempo suficiente para la carga y descarga del condensador principal, esto mediante la ecuación 32.

Figura 14. Mejora del spark gap



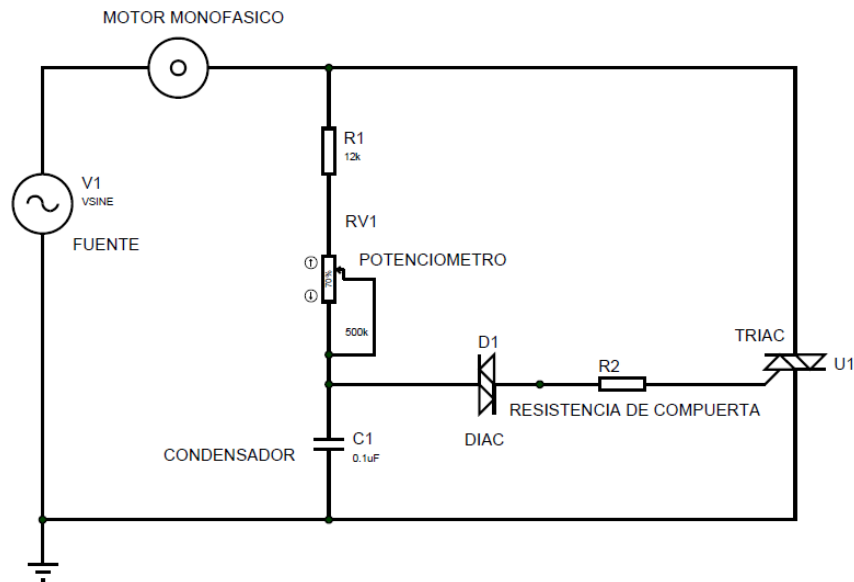
Fuente, autores.

Para la variación de la velocidad del motor del spark gap, se diseñaron dos circuitos mediante dos estrategias de control análogo y digital.

3.3.3.1 Control análogo:

Implementado mediante un circuito de control de disparo de un triac de la figura 15. A partir de la variación de un potenciómetro (resistencia variable) de 500k Ω , se controla el nivel de corriente que se quiere en la entrada del triac BT137, el condensador garantiza un tiempo mínimo de aplicación de una señal de voltaje con magnitud mínima dada por el diac, aplicando un pulso de corriente de disparo para la compuerta del triac. Este elemento semiconductor de potencia soporta hasta 7A entre los dos terminales que quedaran en serie con el motor del spark gap. Al variar la posición del potenciómetro se varía el ángulo de disparo del triac, cambiando la tensión eficaz del motor, produciendo una variación de la velocidad.

Figura 15. Circuito análogo para control del spark gap



Fuente, autores. Circuito simulado en el software Proteus v. 7.7

3.3.3.2 Control digital.

Implementado a través de una estrategia de comparación básica con microcontrolador que permite integrar una interfaz de usuario con la cual un usuario puede ingresar un porcentaje de variación de velocidad mediante teclado.

El circuito de control digital se muestra en la figura 16 y consta de una primera etapa de rectificación de onda completa mediante el uso de un transformador reductor que viene conectado a la red en el primario y se tiene una salida de 31 voltios entre terminales del secundario, esto con el fin de no causar averías en los componentes del circuito de control. Los dos diodos 1N4007 realizan una rectificación de voltaje, que se mide en una resistencia de 1k Ω . La salida del rectificador se envía al terminal negativo de un amplificador operacional LF353 configurado como comparador de voltaje, logrando la detección de cruce por cero de la señal de la red y de esta forma se obtiene una señal cuadrada sincronizada con la red. Esta se introduce a un pin de interrupción de un contador de ocho bits en el microcontrolador ATmega2560 incluido en la tarjeta Arduino MEGA 2560.

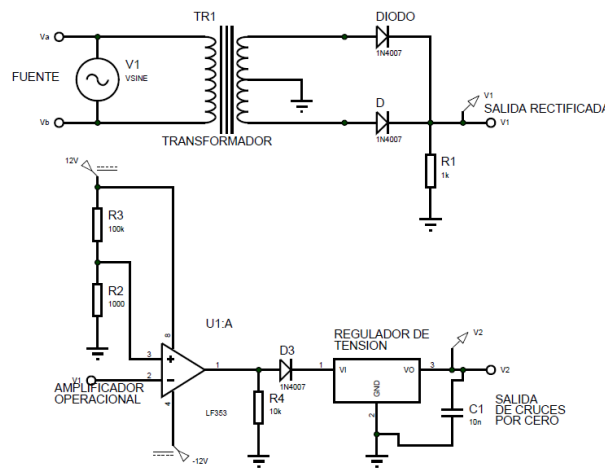
En el microcontrolador se programa una comparación entre la referencia de velocidad y el valor del contador que se va incrementado hasta que se obtiene una nueva detección de cruce por cero, lo cual de forma práctica permite obtener una

modulación de ancho de pulso PWM que retarda la aplicación efectiva del pulso de corriente para la activación del triac, mediante una amplificación de corriente y un opto-acople MOC 3021 (ver figura 18). La señal de detección de cruce por cero para que sea aplicada como pin de entrada al microcontrolador, debe estar entre 3,5V y 5V por lo que al circuito se le adiciona una etapa final de rectificación y regulación. En el anexo C se presenta el circuito completo del control digital, en el anexo D se indica el código de programación del microcontrolador.

Las formas de onda reales de la señal del cruce por cero, rectificación y PWM se indican en la figura 17.

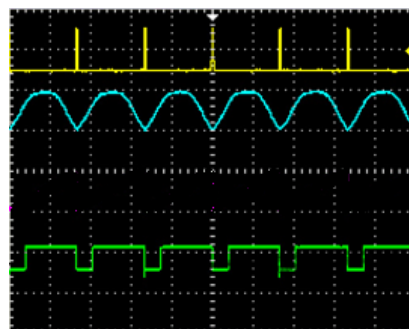
La figura 20 hace referencia a la forma de onda de tensión en el motor, donde al variar el ancho de pulso se da un disparo en la compuerta del triac permitiendo el ingreso de tensión al motor de forma controlada.

Figura 16. Etapas 1 y 2: rectificación y detección de cruce por cero.



Fuente, autores.

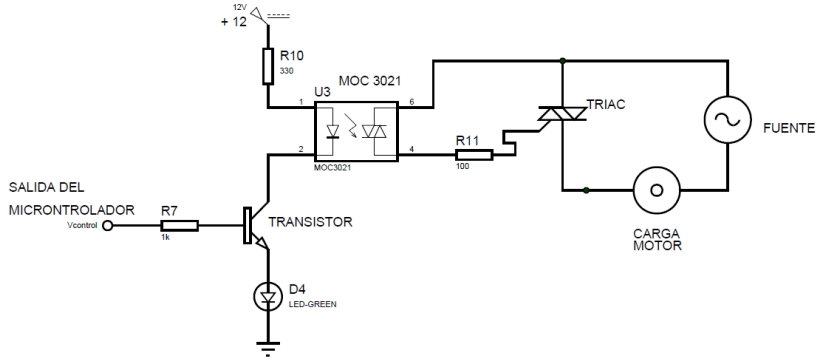
Figura 17. Formas de onda del circuito digital



Fuente, autores.

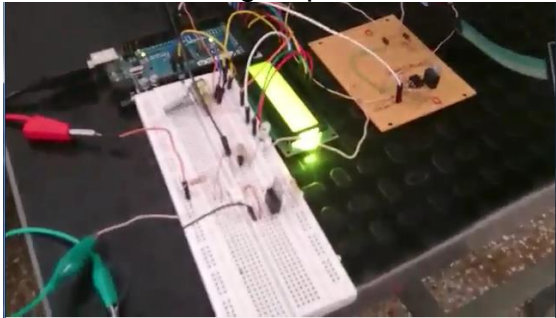
Para la interfaz de usuario se usó una pantalla de 2x16 bits, un teclado alfanumérico de 4x4, se montó el circuito mostrado en la figura 19 que además muestra todos los componentes del variador de velocidad digital.

Figura 18. Etapa 4.



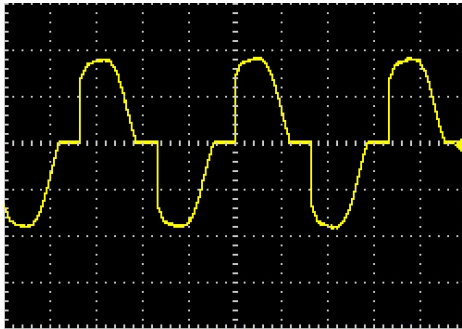
Fuente, autores, Proteus 7.7.

Figura 19. Componentes del circuito digital para variar la velocidad del spark gap.



Fuente, autores.

Figura 20. Forma de onda de la carga



Fuente, autores.

3.3.4 Diseño del condensador principal

Para el diseño de este componente se necesita conocer la impedancia de la fuente, la cual fue calculada de manera que se hiciera uso del transformador diseñado para esa bobina.

$$Z_{fuente} = \frac{15000 V}{130 mA} = 115,38 K\Omega \quad Ec 51$$

Se hizo uso de la ecuación 35 para hallar el condensador principal, el valor obtenido fue 23 nF

El valor medido de capacitancia fue 14 nF, por lo que la bobina primaria se dimensiona con la capacitancia real, ya que se desea resonancia en el circuito primario.

3.3.5 Diseño de la bobina secundaria

Para cumplir con la relación de altura con respecto al diámetro, se selecciona un alambre 24 AWG. Para el diámetro de la bobina se eligió un tubo de 6 pulgadas de diámetro ya que la mesa donde se ubican los componentes de la bobina de Tesla tiene un agujero de 6 pulgadas para alojar la bobina secundaria.

Se eligió una altura del bobinado de 65 cm con el fin de obtener una relación **H/D** de 3,865, la relación aporta en el dimensionamiento del bobina, la construcción se hizo con apoyo de Industrias Explorer¹⁹, para ello se necesitó papel Nomex que es un papel dieléctrico que sirve como aislamiento del tubo, una vez se tiene el tubo forrado del papel, se procedió a bobinar, el número de espiras se calculó con la ecuación 38, teniéndose un valor de 1146.

Una vez hecho bobinado, se cubrió con un barniz aislante llamado *Royal Pox* que además de mejorar el aislamiento entre espiras, protege el bobinado de la intemperie, (ver figura 21). La tabla 11 hace referencia a los parámetros propios de la bobina secundaria, las ecuaciones que permitieron el cálculo, valor calculado y valor medido con el instrumento de medida LCR meter 879B.

¹⁹ INDUSTRIAS EXPLORER DUITAMA, en línea. Disponible en: <http://www.industriaseplorerer.com/>

Tabla 11. Características de construcción de la bobina secundaria.

Parámetro	Designación	Ecuación de calculo	Valor calculado	Valor medido
Inductancia	L_{sec}	36	50,4mH	51,83mH
Capacitancia parasita	$C_{parasita}$	38	11,77pF	12,5pF
Resistencia propia de la bobina	$R_{secundaria}$	41	40,77 Ω	50 Ω
Longitud de conductor	$longitud$	40	605,58m	607m

Figura 21. Bobina secundaria terminada.



Fuente, autores.

3.3.6 Diseño del toroide

Este componente, se dejó con las mismas características del proyecto 2011²⁰, Su valor medido fue de 21,4 pF.

El valor de capacitancia del toroide se calculó mediante la ecuación 42, valor que influye en la frecuencia de resonancia, la frecuencia de resonancia se calculó mediante la ecuación 43 teniéndose un valor de 123,097 kHz.

3.3.7 Diseño de la bobina primaria

Mediante la ecuación 45 se calculó la inductancia primaria, el valor fue 119,4 μ H, este valor de inductancia garantizo resonancia entre el circuito primario y secundario de la bobina de Tesla.

La geometría de la bobina primaria está dada por la ecuación 46, donde se obtuvo un valor de 15 espiras, la configuración en cono invertido permite mejor acople entre bobinas primaria y secundaria. (Ver figura 22).

²⁰ QUITIAN. Op. cit. p. 1-97

Figura 22. Bobina primaria.



Fuente, autores.

Una vez diseñados y construidos los componentes, se verificaron los parámetros de diseño con los valores medidos en el laboratorio, según se resumen en la tabla 12.

Tabla 12. Resumen de componentes con diseño mejorado.

CARACTERISTICAS DE MEJORAMIENTO		
ELEMENTO	VALOR CALCULADO	VALOR REAL
Numero de espiras teóricas (L2)	1146	1146
Inductancia Secundaria (L2) (mH)	50,36	51,65
Capacidad Parasita de L2 (pF)	11,77	32,12
Longitud total del Conductor (m)	605,38	606
Resistencia de la Bobina secundaria (Ω)	40,77	41,33
Capacidad del Toroide (pF)	21,4	21,4
F de Resonancia del Primario (Hz)	123097	124000
F de Resonancia del Secundario (Hz)	123097	123000
Impedancia de la Fuente (Ω)	500000	500000
Capacidad Primaria (nF)	14	14,6
Inductancia Primaria (L1) (μ H)	119,4	119
Numero de Espiras teóricas (L1)	14,785	15

Para validar el diseño de los componentes en la repotenciación de la bobina se usó el software orcad 16.3.²¹ Cuando se cierra el spark gap se tiene el efecto de resonancia, la figura 23 hace referencia a la forma de onda de tensión en el

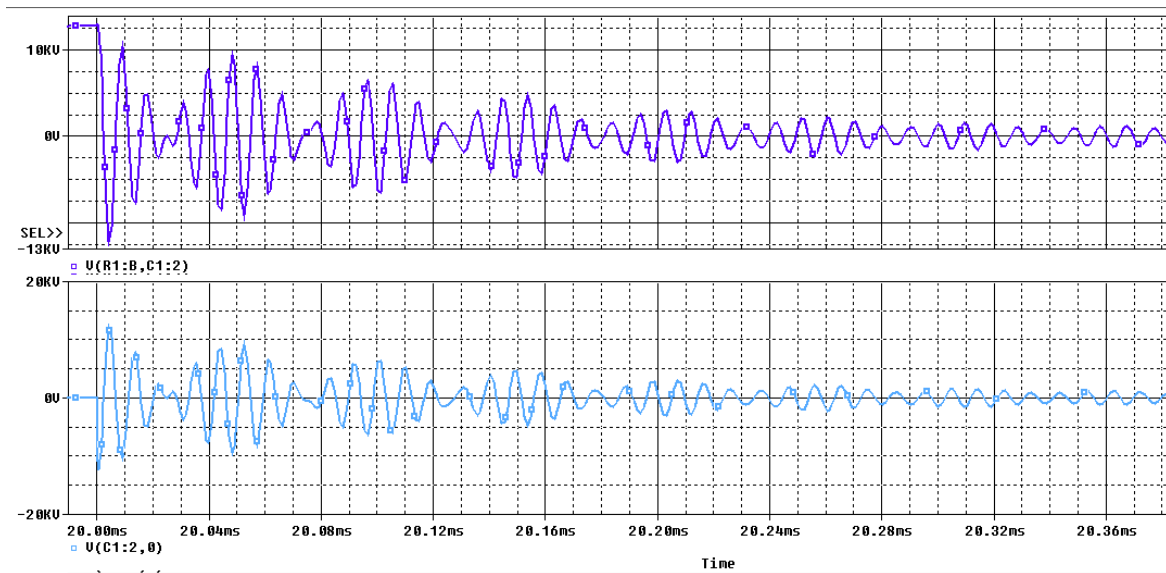
²¹ CALVO ROLLE, José Luis. Edición y Simulación de Circuitos con ORCAD. México D.F. Alfaomega, 2004. 405 p. ISBN 84-7897-586-1.

circuito primario, circuito que se alimentó con 6000Vac, el objetivo de la figura es mostrar que con la mejora de componentes, la forma de onda de tensión es una onda de alta frecuencia modulada por una onda de baja frecuencia.

La figura 24 representa la forma de onda de tensión en el circuito secundario, donde se obtuvo un valor máximo de 85kV, la forma de onda de tensión en el circuito secundario es la misma que la del primario ya que están en resonancia, existe un desfase el cual se debe al factor de acople entre bobinas primaria y secundaria.

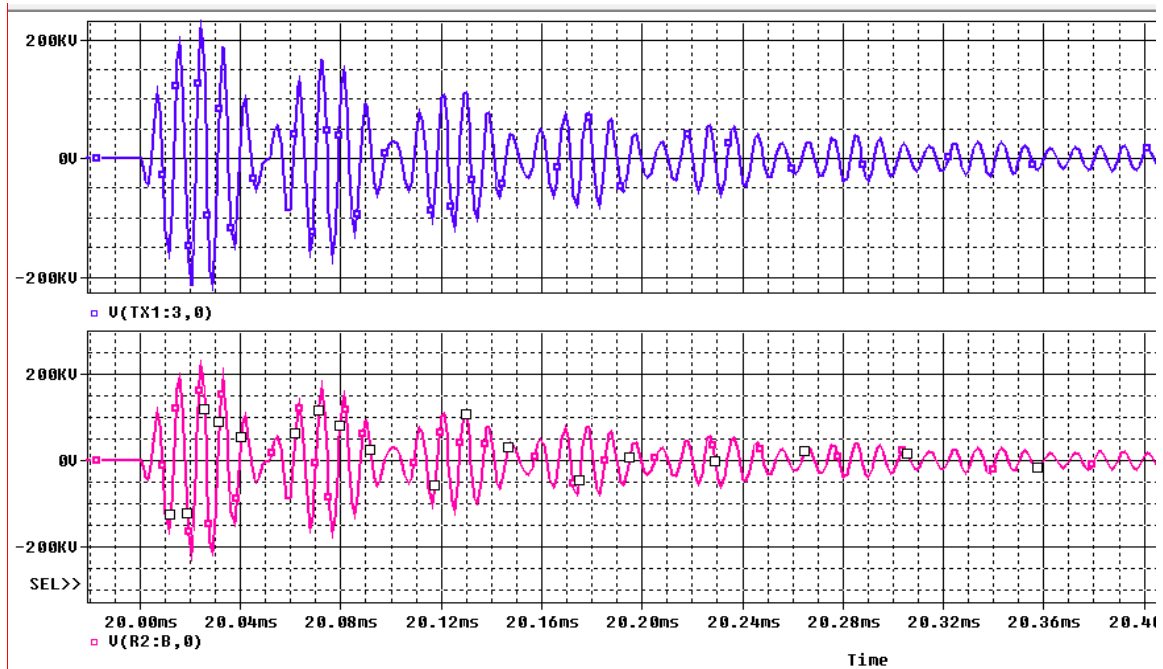
En la figura 25 se muestra que la frecuencia de resonancia es 123kHz, valor que fue calculado mediante la ecuación 43, el objetivo de la figura 25 fue mostrar que la frecuencia calculada y simulada tienen el mismo valor, por ende el uso de la ecuación 43 es correcto.

Figura 23. Forma de onda de tensión en el circuito primario de la bobina de Tesla con los componentes mejorados



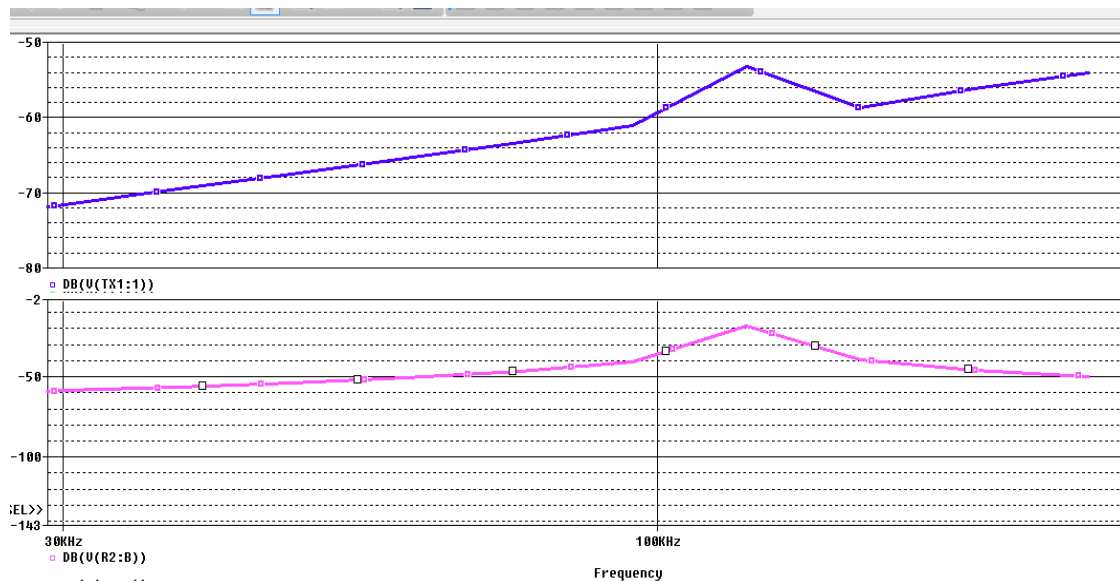
Fuente, autores, software orcad 16.3.

Figura 24. Forma de onda de tensión en el circuito secundario de la bobina de Tesla con componentes mejorados.



Fuente, autores, software orcad 16.3.

Figura 25. Frecuencia de resonancia con componentes mejorados.



Fuente, autores, software orcad 16.3.

3.3.8 Diseño del sistema de puesta a tierra

Para dar solución a este parámetro tan importante se hizo la siguiente propuesta siguiendo los parámetros establecidos en la norma IEEE 80²² para sistemas de puesta a tierra y el RETIE²³, la metodología del diseño se muestra a continuación:

Para el inicio del diseño fue necesario revisar la corriente de falla, la resistividad del terreno y el tiempo de despeje de la falla. La corriente de falla suministrada por el operador de red fue 1,63 kA para el nodo 3308, circuito 14713, es decir en el barraje ubicado en la entrada de la UPTC seccional Duitama. El tiempo de despeje de la falla se considera como 0,5s.

A continuación se hizo la medida de resistividad del terreno usando el analizador de redes ZG47 disponible en el laboratorio de la UPTC Duitama, cuya fecha de calibración fue 20 de junio de 2013. La tabla 13 hace referencia a la toma de datos realizada en el terreno y el promedio de los datos.

Tabla 13. Toma de resistividad del terreno.

Resistividad del terreno ρ [ohm*m]				
separación de electrodos [m]	primer prueba	segunda prueba	tercer prueba	promedio
1	124,3	121,4	118	121,23
2	99,8	100,9	95,7	98,8
3	85,4	85,8	85,6	85,6
4	74,3	73,8	70,7	72,93
5	70,4	73,1	69,5	71

Para la medición del terreno se usó el montaje mostrado en la figura 26, el cual se conoce como el método tetraelectrodico de Wenner²⁴. Se hizo uso de este método ya que es fácil de implementar además se obtienen muy buenos resultados ya que este método obtiene la resistividad de capas profundas sin tener que enterrar los electrodos a dichas profundidades, este método consiste en cuatro electrodos enterrados en línea recta a una profundidad b y separados una distancia d , una corriente se inyecta a los electrodos externos y se tiene una tensión en los

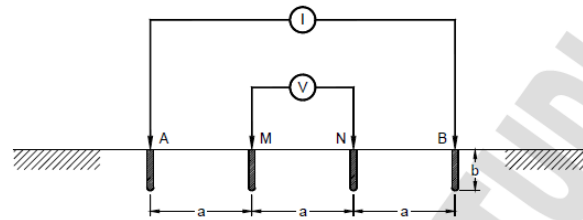
²² IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, IEEE Std 80 - 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. 4 de Agosto del 2000.

²³ SEGURIDAD ELECTRICA SAS. Reglamento técnico de instalaciones eléctricas [RETIE] compilado y actualizado. Bogotá D.C. 31 de Julio de 2014. P 68 -78.

²⁴ PINTO, patricia. Medición y modelamiento del suelo. 20 de Septiembre de 2012. [En línea] disponible en: <http://resistividaddepuestatierraen.blogspot.com/>.

electrodos internos, que es medida por el instrumento. El valor medido corresponde a un círculo de radio d , es decir que la separación de los electrodos se interpreta como la profundidad aproximada a la cual se lee la resistividad del terreno.

Figura 26. Medida de resistividad



Fuente, <http://resistividaddepuestatierraen.blogspot.com/>²⁵

Con el promedio de los datos se hizo un análisis de distribución normal estándar donde se halló la probabilidad de ocurrencia de un evento, debido a la heterogeneidad del suelo, se ordenaron de forma ascendente y se procedió así:

$$\ln(\rho) = X \quad \text{Ec. 52}$$

La tabla 18 hace referencia a los datos necesarios para determinar la media aritmética y la desviación estándar que son datos necesarios para la distribución normal acumulada,

Tabla 14. Valores para distribución normal.

ρ	$\ln(\rho)=X$	X^2
71	4,2626	18,170
72,93	4,28950	18,399
85,6	4,44968	19,799
98,8	4,5930	21,096
121,23	4,79768	23,017
Suma 449,56	22,3926	100,481
\bar{X}	4,47854	

A continuación se halló la desviación estándar, se obtuvo un valor de 0,2287 El bajo valor de la desviación indica uniformidad en el terreno. La función de probabilidad está dada por:

²⁵ PINTO, op. cit, p

$$\rho = F\left(\frac{\ln(\rho) - \bar{X}}{s}\right) ; \rho = F(z) \quad Ec. 53$$

$$z = \frac{\ln(\rho) - \bar{X}}{s} \quad Ec. 54$$

A continuación se halla la resistividad del terreno para cada valor con el fin de tener el valor de z que se lleva a la tablas de distribución normal acumulada, donde se requiere por lo menos el 70% de la probabilidad de ocurrencia de evento, la tabla 19 hace referencia al valor de z y al valor tomado de las tablas de distribución que permiten tener el porcentaje de ocurrencia del evento²⁶.

Tabla 15. Datos de función de probabilidad.

	P=F(z)	%
-0,96982	0,166	16,6
-0,84931	0,1977	19,77
-0,12960	0,4482	44,82
0,51475	0,6985	69,85
1,433991	0,9236	92,36

La resistividad del terreno viene dada por:

$$\rho = (s * z) + X \quad Ec. 55$$

De la tabla 19 se elige el valor 0,9236 que indica que si se hace una medición hay la probabilidad del 92,36 % de que el valor del logaritmo natural de resistividad sea 4,684, por ende la resistividad del suelo fue 108,21 Ωm

Teniendo estos tres parámetros se hizo el diseño según la metodología IEEE80 el cual se muestra a continuación:

En primer lugar se evaluaron las tensiones de paso y de contacto máximas tolerables para personas 70 kg:

$$V_{pasotolerable\ 70kg} = \frac{0.157 * (1000 + 6C_s * \rho_s)}{\sqrt{t_c}} \quad [V] \quad Ec. 56$$

$$V_{contactotolerable\ 70kg} = \frac{0.157 * (1000 + 1.5C_s * \rho_s)}{\sqrt{t_c}} \quad [V] \quad Ec. 57$$

²⁶ RAMIREZ. Carlos Felipe. Subestaciones de alta y extra alta tensión. Segunda edición. Mejía Villegas S.A. Colombia. 1991. p. 543- 593 ISBN 958-33-5295-0.

$$C_s = 1 - \frac{0.09 * (1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2 * h_s - 0.09} \quad \text{Ec. 58}$$

Siendo:

C_s , coeficiente en función del terreno y la capa superficial

t_c , tiempo de despeje de la falla

El siguiente paso consistió en determinar la configuración inicial de la malla.

$$L_T = L_c + N * L_v \quad \text{Ec. 59}$$

Dónde:

$$L_c = \left(\frac{L_1}{D} + 1\right) * L_2 + \left(\frac{L_2}{D} + 1\right) * L_1 \quad [m]; \quad A = L_1 * L_2 \quad [m^2]; \quad L_p = \frac{L_1 * L_2}{2} \quad [m] \quad \text{Ec. 60}$$

Siendo:

L_T , longitud total del conductor.

L_c , longitud del conductor horizontal.

L_1 , largo de la malla en metros.

L_2 , ancho de la malla en metros.

D , espaciamiento entre conductores.

A , área de la malla en m^2 .

L_p , perímetro en metros.

L_v , longitud de un electrodo tipo varilla.

Una vez calculados estos parámetros se procedió a hallar la resistencia de puesta a tierra R_g

$$R_g = \rho * \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h * \sqrt{20/A}} \right) \right] \quad [\Omega] \quad \text{Ec. 61}$$

Una vez hallada la resistencia de puesta a tierra se procede a hallar el máximo potencial a tierra GPR.

$$GPR = I_G * R_g \quad ; \quad I_G = D_f * I_0 \quad \text{Ec. 62}$$

Siendo:

I_0 , corriente de falla monofásica

D_f , factor de decrecimiento tomado de la tabla 12.5 del libro de subestaciones de alta y extra alta tensión.

Si el GPR es mayor que la tensión de contacto tolerable, deben calcularse las tensiones de paso y de malla en caso de falla.

$$V_{Malla} = \frac{\rho * I_G * K_m * K_i}{L_c + N * L_V \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_v}{\sqrt{L_1 + L_2}} \right) \right]} \quad [V] \quad Ec. 63$$

Donde.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left(\frac{D^2}{16h * d} + \frac{(D + 2h)^2}{8h * d} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left(\frac{8}{(2n - 1) * \pi} \right) \right\} \quad Ec. 64$$

$K_{ii} = 1$ En caso de mallas con electrodos a lo largo del perímetro, en las esquinas o dentro del perímetro de la malla.

$$K_h = \sqrt{1 + h} \quad Ec. 65$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad Ec. 66$$

Siendo $n = n_a * n_b * n_c$

Dónde:

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p}; \quad n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 * \sqrt{A}}}; \quad n_c = \left(\frac{L_1 * L_2}{A} \right)^{(0.7A/L_1 * L_2)} \quad Ec. 67$$

ρ , resistividad del terreno.

N , numero de electrodos.

K_m , factor de espaciamento para la tensión de malla

K_i , factor por corrección de geometría de la malla.

K_{ii} , factor de corrección por ubicación de electrodos tipo varilla.

h , profundidad del enterramiento de los conductores.

d , diámetro del conductor seleccionado.

K_h , factor de corrección por la profundidad de enterramiento de la malla

n , factor de geometría

Si la tensión de la malla es mayor que la tensión de contacto tolerable se debe cambiar la configuración de la malla, en caso contrario se debe calcular la tensión de paso en caso de falla.

$$V_{Paso} = \frac{\rho * I_G * K_S * K_i}{0.75L_c + 0.85N * L_v} \quad [V] \quad Ec. 68$$

Donde,

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad Ec. 69$$

K_S , factor de espaciamento para las tensiones de paso.

Si la tensión de paso es mayor que la tensión de paso tolerable se cambiar la configuración de la malla, en caso contrario el diseño ha terminado, por último El conductor a tierra para media tensión, alta tensión y extra alta tensión, debe ser seleccionado de la norma ANSI/IEEE 80.²⁷

$$A_c = \frac{I * K_f * \sqrt{t_c}}{1.974} \quad [mm^2] \quad Ec. 70$$

Siendo,

I , área de la sección del conductor

K_f , constante para diferentes materiales, tabla 15.3 del RETIE.

La tabla 20 hace referencia a los valores que son constantes en el desarrollo del diseño de la malla, mientras que la tabla 21 hace referencia a los valores obtenidos de las ecuaciones 56 a 70.

Tabla 16. Parámetros constantes para el diseño de la malla.

	PARAMETROS	VALOR	UNIDADES
Resistividad del suelo	r	108,21	ohm-m
Resistividad de la Gravilla	rs	2500	ohm-m
Tiempo de despeje de falla	tc	0,5	sg
Espesor de la capa superficial	hs	0,5	m
Profundidad de los conductores	h	1	m

²⁷ IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, IEEE Std 80 - 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. 4 de Agosto del 2000.

Tensión de paso tolerable 50kg	V_{paso}	2430,39	V
Tensión de paso tolerable 70kg	V_{paso}	3289,4	V
Tensión de contacto tolerable 50kg	$V_{contacto}$	730,54	V
Tensión de contacto tolerable 70 kg	$V_{contacto}$	988,87	V
Coefficiente en función del terreno	C_s	0,921	-

Tabla 17. Parámetros calculados para el diseño propuesto.

Diseño 1	Parámetro	Valor	Unidad
Largo de la malla	L1	10	m
Ancho de la malla	L2	5	m
Espaciamiento entre conductores	D	2,5	m
Numero de electrodos tipo varilla	N	4	-
Longitud del electrodo tipo varilla	Lv	2,4	m
Longitud del conductor horizontal	Lc	55	m
Área disponible para construcción	A	50	m ²
Para mallas rectangulares	Lp	25	m
Longitud total del conductor	LT	64,6	m
Factor de decrecimiento	Df	1,026	A
Resistencia de puesta a tierra cal.	Rg	7,1931	ohm
Corriente de falla monofásica	Io	1630	A
Corriente de diseño	IG	1672,4	A
Máximo potencial de tierra	GPR	12030	V
Diámetro del conductor seleccionado	d	0,0065	m
Factor de corrección por ubicación electrodo	Kii	1	-
Factor de corrección ubicación del electrodo	Kii	0,36	-
Factor de corrección por la profundidad	kh	1,4142	-
Factor de espaciamento para la tensión	km	0,8387	-
Factor de corrección por geometría de la malla	Ki	1,2562	-
Tensión de malla en caso de falla	Vmalla	2471,9	V
Tensión de paso en caso de falla	Vpaso	1603,3	V
Factor de espaciamento para tensiones de falla	Ks	0,3485	-
Constante de materiales a temperaturas	Kf	7,06	-
Sección transversal del conductor a utilizar	Ac	15,17	mm ²

Debido al espacio disponible para la dimensión de la malla, esta no cumple la condición de que la tensión de malla sea menor que la tensión de contacto tolerable, por lo que en esta instancia nos remitimos al RETIE especialmente en el capítulo 15, artículo 4, que enuncia lo siguiente:

Cuando existan altos valores de resistividad del terreno, elevadas corrientes de falla a tierra o prolongados tiempos de despeje de las mismas, se deben tomar las siguientes medidas para no exponer a las personas a tensiones por encima de los umbrales de soportabilidad del ser humano:

- Hacer inaccesibles zonas donde se prevea la superación de los umbrales de soportabilidad para seres humanos.
- Instalar pisos o pavimentos de gran aislamiento.
- Aislar todos los dispositivos que puedan ser sujetados por una persona.
- Establecer conexiones equipotenciales en las zonas críticas.
- Aislar el conductor del electrodo de puesta a tierra a su entrada en el terreno.
- Disponer de señalización en las zonas críticas donde puedan trabajar profesionales competentes, siempre que cuenten con las instrucciones sobre el tipo de riesgo y estén dotados de los elementos de protección personal con aislamiento adecuado.²⁸

La malla se plantea con la corriente de falla suministrada por el operador de red, no obstante se desea que la malla sea segura por lo que se hace un análisis de cortocircuito en el secundario del transformador, de esta manera sobredimensionar los conductores en caso de falla, los métodos usados para hallar la corriente de cortocircuito se explican a continuación.

El operador de red proporciona la corriente de falla trifásica que se usa para hallar la potencia de cortocircuito, es decir:

$$S_{cc} = \sqrt{3} * I_{cc} * V_{red} = 62,1875 \text{ MVA} \quad Ec. 71$$

La tabla 22 hace referencia a los datos de la placa característica del transformador.

El Anexo E hace referencia al documento obtenido al simular la malla en el software aspix, planos del diseño de la malla de puesta a tierra y costos de implementación.

²⁸ SEGURIDAD ELECTRICA SAS. Reglamento técnico de instalaciones eléctricas [RETIE] compilado y actualizado. Bogotá D.C. 31 de Julio de 2014. P 68 -78.

Tabla 18. Características del transformador de la universidad.

Parámetro	Valor	Unidades
Tensión del primario V_{in}	13,2	kV
Tensión del secundario V_{out}	214	V
Potencia asignada S_n	150	kVA
Caída de tensión porcentual en condiciones de corto U_{cc}	4	-

Se usó el método de las impedancias para calcular la corriente de corto circuito

La impedancia de red se da a continuación:

$$Z_a = \frac{13200^2}{62187500} = 2,80 \Omega \quad Ec. 72$$

Para transformadores con tensión hasta de 20 kV la relación $R_a/Z_a = 0,2$, entonces $R_a = 0,2 * 2,80 = 0,56\Omega$, La reactancia de la red fue $X_a = 2,74 \Omega$.

A continuación se hallaron los parámetros del transformador.

$$\left(\frac{V_{sec}}{V_{prim}}\right)^2 = a^2 = \left(\frac{214}{13200}\right)^2 = \frac{R_T}{R_a} = 0,26 * 10^{-3} \quad Ec. 73$$

Se halló la resistencia en el transformador de la siguiente manera:

$$R_T = 0,26 * 10^{-3} * 0,56 = 0,146 m\Omega \quad Ec. 74$$

La reactancia en el transformador es:

$$X_T = 0,26 * 10^{-3} * 2,74 = 0,712 m\Omega \quad Ec. 75$$

La impedancia del transformador es:

$$Z_T = \sqrt{0,146^2 + 0,712^2} = 0,7268 m\Omega \quad Ec. 76$$

Conociendo la impedancia de cortocircuito que es de 4%, se tiene que la impedancia en el secundario del transformador está dada por:

$$Z_2 = \frac{4 * 214^2}{100 * 150000} = 12,21 m\Omega \quad Ec. 77$$

Las pérdidas en el transformador se dan por:

$$W_{cu} = 0,02 * 150000 = 3000 W \quad Ec. 78$$

La resistencia en el secundario del transformador está dada por:

$$R_2 = \frac{3000 * 214^2}{150000^2} = 6,11 \text{ m}\Omega \quad \text{Ec. 79}$$

La reactancia del transformador es:

$$X_2 = \sqrt{12,21^2 - 6,11^2} = 10,57 \text{ m}\Omega \quad \text{Ec. 80}$$

La impedancia después del transformador está dada por:

$$Z_{total} = \sqrt{(0,146 + 6,11)^2 + (0,712 + 10,57)^2} = 12,90 \text{ m}\Omega \quad \text{Ec. 81}$$

La corriente de corto circuito a la salida del transformador es:

$$I_{cc} = \frac{214}{\sqrt{3} * 12,90 * 10^{-3}} = 9,58 \text{ kA} \quad \text{Ec. 82}$$

Para hallar la corriente de falla en el barraje de laboratorios se hace el siguiente procedimiento:

Primero se halla la resistencia del cable que es un cable 4/0, es decir:

$$R = \frac{0,0225 * 40}{107,22} = 8,39 \text{ m}\Omega \quad \text{Ec. 83}$$

La reactancia del cable es 0,08 para cable monopolar:

$$X_{cable} = 0,08 * 40 = 3,2 \text{ m}\Omega \quad \text{Ec. 84}$$

La impedancia total hasta el barraje es:

$$Z_{total \text{ barraje}} = \sqrt{(0,146 + 6,11 + 8,39)^2 + (0,712 + 10,57 + 3,2)^2} = 20,60 \text{ m}\Omega \quad \text{Ec. 85}$$

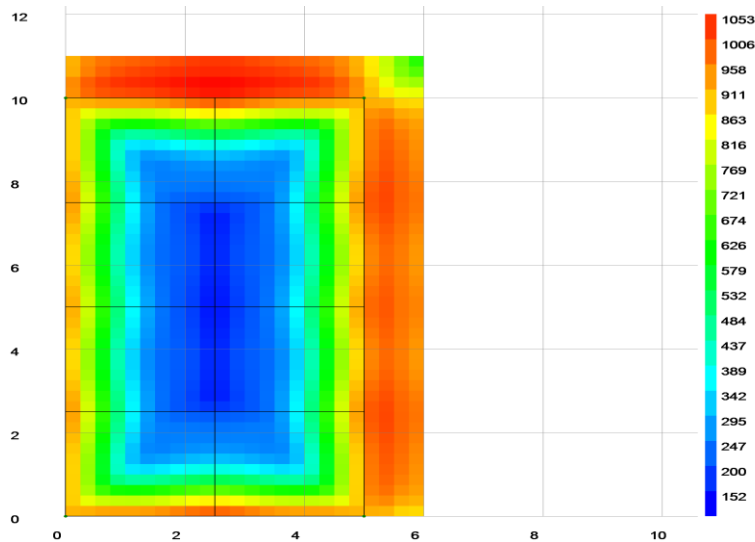
$$I_{cc} = \frac{214}{\sqrt{3} * 20,60 * 10^{-3}} = 6 \text{ kA} \quad \text{Ec. 86}$$

Para que la malla pueda disipar esta corriente se seleccionó un cable calibre 4AWG, cuya sección transversal es $21,15 \text{ mm}^2$. No obstante en el RETIE en el numeral 15.3.1 se menciona que la vida útil de un sistema de puesta a tierra es de 15 años, para ello se selecciona un conductor 2/0 AWG que cumple con este requerimiento.

Mediante el software aspix se tiene la simulación de la tensión de paso de la malla diseñada (ver figura 27), donde en el centro de la malla se tiene un color morado

con valor de 152 V que es un valor inferior a la tensión de paso tolerable de 3289,4 V. A medida que se aleja del centro de la malla, cambia el color hasta los extremos de la malla donde se tiene un color rojo indicando un valor de 1053V que sigue siendo menor a la tensión de paso tolerable.

Figura 27. tensión de paso tolerable



Fuente, autores, software aspix.

Para el sistema de puesta a tierra de la bobina de Tesla se dispuso de un electrodo de puesta a tierra, cumpliendo con lo establecido en RETIE capítulo 15. No obstante se deja la recomendación de implementar la malla diseñada (ver figura 28).

Figura 28. Sistema de puesta a tierra para la bobina de Tesla



Fuente, autores.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS DE DESEMPEÑO DE LA BOBINA REPOTENCIADA

Las pruebas que se realizaron en el laboratorio de electricidad de la UPTC seccional Duitama fueron:

- Prueba de variación de tensión de entrada a la bobina de Tesla: el objetivo de esta prueba fue determinar a qué valor de tensión en la entrada de la bobina de tesla se comenzaba a tener un rayo en el toroide, determinar las curvas de tensión y corriente en el circuito primario, determinar la forma de onda de corriente en el circuito secundario, mostrar que la forma de onda en los circuitos primario y secundario dependen de la frecuencia de resonancia y que el aumento en la tensión de entrada solo varia la magnitud de la onda pero no su forma. Las curvas se tomaron con un osciloscopio ATTEM ADS 1102CA2.
- Prueba de variación de velocidad del spark gap: el objetivo de esta prueba fue mostrar que el número de descargas en el toroide es el mismo número de veces que los electrodos fijos y móviles del spark gap están en contacto, es decir que la frecuencia del spark gap es la misma frecuencia de los rayos de descarga, además demostrar que la longitud no depende de la velocidad del spark gap sino de la frecuencia de resonancia.
- Prueba de la bobina de Tesla con la puesta a tierra implementada: el objetivo de esta prueba fue demostrar que el sistema de puesta a tierra funciona y que garantiza la seguridad de las personas y equipos durante la operación del equipo.

4.1 PRUEBA CON VARIACIÓN DE TENSIÓN DE ENTRADA.

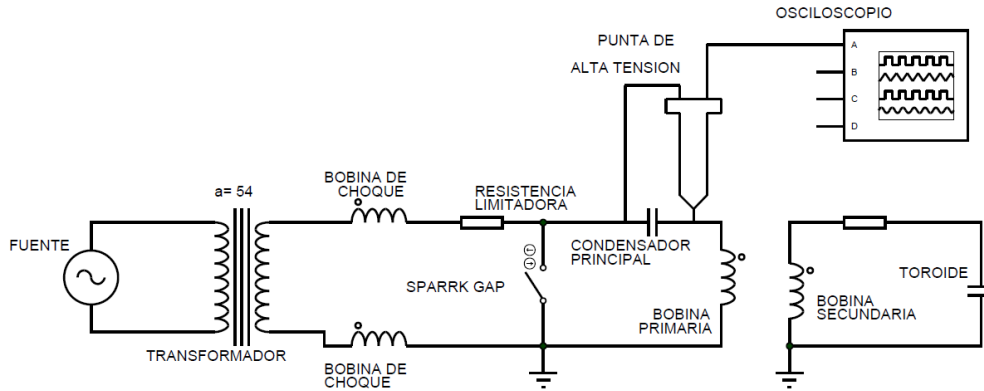
Se conectó la bobina acorde a la figura 29, se varió la tensión de entrada con un Variac. A tensiones altas en el circuito primario de la bobina de Tesla se presentó un arco que permitió tener frecuencia de resonancia y frecuencia de conmutación del spark gap (ver tabla 24.), es decir pulsos de alta frecuencia, contrariamente a tensiones bajas no se presentó arco por lo que la forma de onda en el condensador principal fue la de red, (ver figura 30).

Con 10 y 20V en el Variac no se presentaron arcos en el spark gap. El valor de tensión en el condensador medido con la punta de alta, cuya referencia fue 80k-40 (relación de tensión de 1000v, mediciones hasta 28kVac y 40kVdc), fue 600mV y 1,08V respectivamente, es decir 600 y 1080V.

Tabla 19. Toma de datos variando la tensión de entrada.

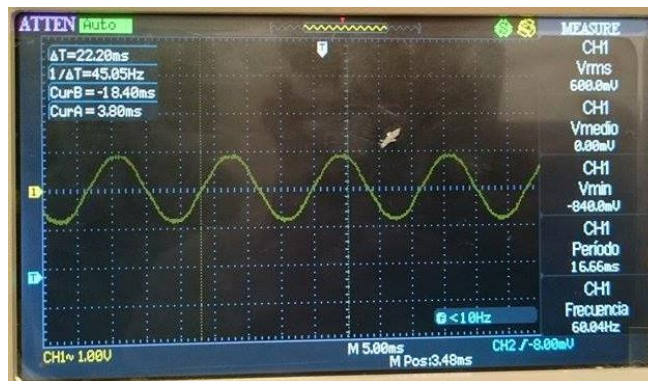
$V_{\text{variacion}}$ [V]	$V_{\text{entrada bobina}}$ [V]	$f_{\text{resonancia}}$ [kHz]	$f_{\text{conmutacion}}$ [Hz]
10	540	-	-
20	1080	-	-
30	1620	122	833
40	2160	123,2	833,5

Figura 29. Conexión de instrumentos de medida.



Fuente, autores, software proteus 7.7.

Figura 30. Forma de onda del condensador sin arco en el spark gap.

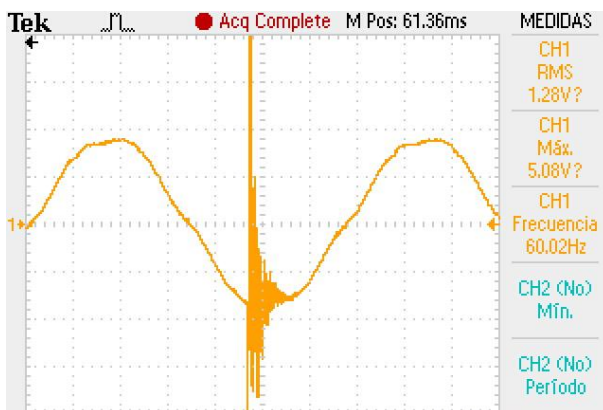


Fuente, autores.

A tensión de 30V en el Variac, comenzó a hacerse la conmutación que permitió la carga y descarga del condensador, por lo que se conectaron los equipos de medida para obtener las curvas de tensión y corriente que validan el modelamiento matemático y simulaciones. En resonancia, la forma de onda de tensión y corriente son iguales, pero con magnitud diferente. Para obtener la forma de onda de corriente en el toroide fue necesario conectar la pinza en el cable del electrodo que se acerca al toroide ya que la tensión soportada por la pinza era de

600V, y la tensión en el secundario era de 200kV, la frecuencia de resonancia se halló mediante los cursores del osciloscopio, obteniéndose un valor de 123kHz, la tensión eficaz medida fue 1280V. (Ver figura 31).

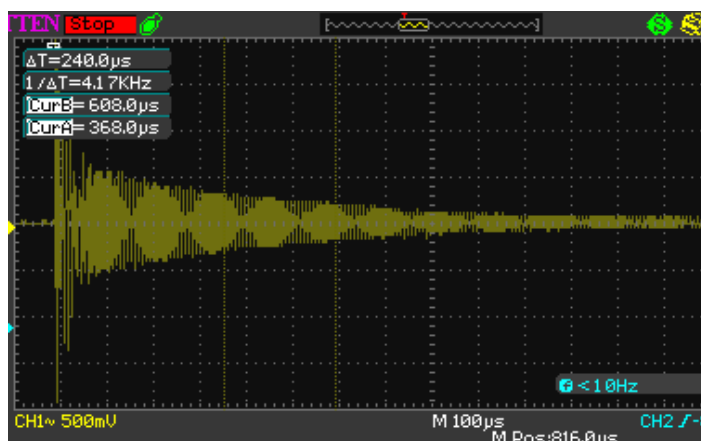
Figura 31. Forma de onda de tensión en el condensador con arco.



Fuente, autores.

Con la figura 32 se quiere mostrar que la forma de onda de corriente en el circuito primario es una onda de alta frecuencia modulada por una onda de baja frecuencia, el valor de corriente en el circuito primario fue 13.8A, la frecuencia de resonancia fue 125kHz, la frecuencia de la envolvente de conmutación fue 833 Hz, valor constante para todas las pruebas ya que la velocidad del spark gap fue constante, donde el tiempo de contacto de electrodos fijos y móviles del spark gap fue de 1,2ms.

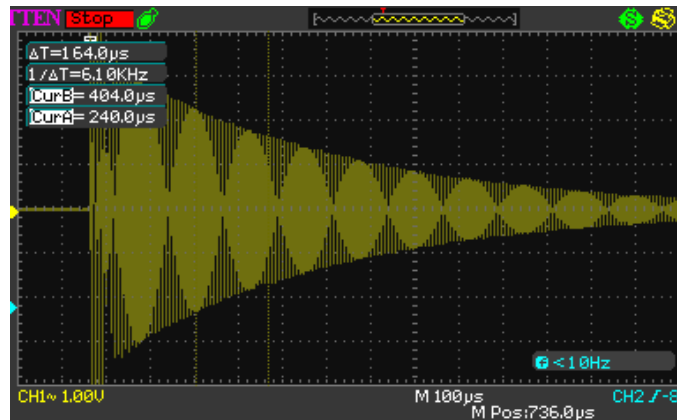
Figura 32. Forma de onda de corriente en el circuito primario con componentes mejorados.



Fuente, autores.

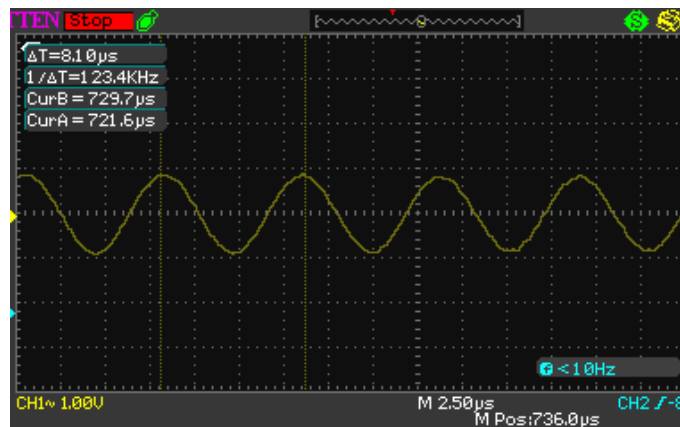
La figura 33 tiene la finalidad de mostrar que la forma de onda de corriente en el circuito secundario tiene la misma forma del circuito primario, la diferencia radica en la magnitud, se encontró un valor máximo de 500mA. Mediante los cursores del osciloscopio se quiso mostrar que el valor de la frecuencia de resonancia es acorde al valor calculado con la ecuacion 44, el valor medido fue 123,4kHz.(ver figura 34)

Figura 33. Onda de corriente en el toroide con componentes mejorados.



Fuente, autores.

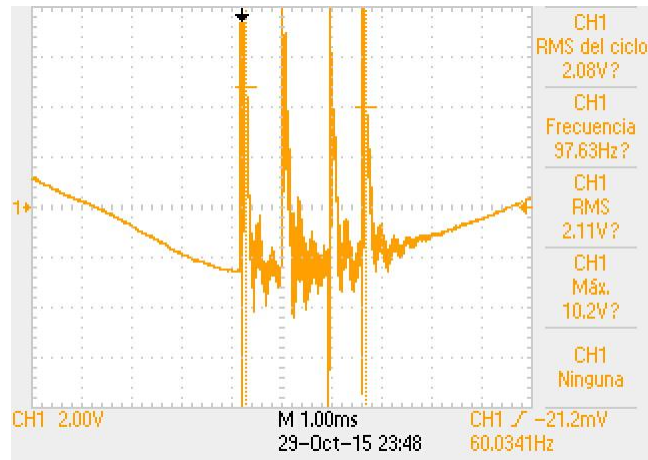
Figura 34. Medición frecuencia de resonancia en el toroide.



Fuente, autores.

Las medidas a 40V en el Variac comprueban que la frecuencia de resonancia es la misma (123kHz) a diferentes niveles de tensión. El valor eficaz de tensión medido en el condensador fue 2080V, la frecuencia de la envolvente fue 833 Hz, (ver figura 35). La medición tuvo límite en este punto ya que se pueden causar daños a los equipos de medida y personas que realizan la medición debido a elevadas tensiones y corrientes presentes en la bobina de Tesla.

Figura 35. Tensión en el condensador cuando hay arco.



Fuente, autores.

Con la figura 36 se quiere mostrar que la forma de onda de corriente en el circuito primario no cambia con el aumento de tensión, la diferencia radica en la magnitud, donde se encontró un valor de 18,7A, no obstante la frecuencia de resonancia tiene el mismo valor de 124kHz.

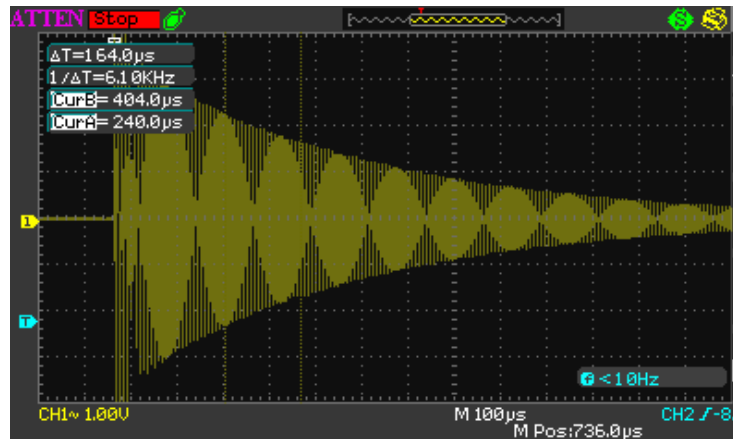
Figura 36. Onda de corriente en el primario cuando hay arco.



Fuente, autores.

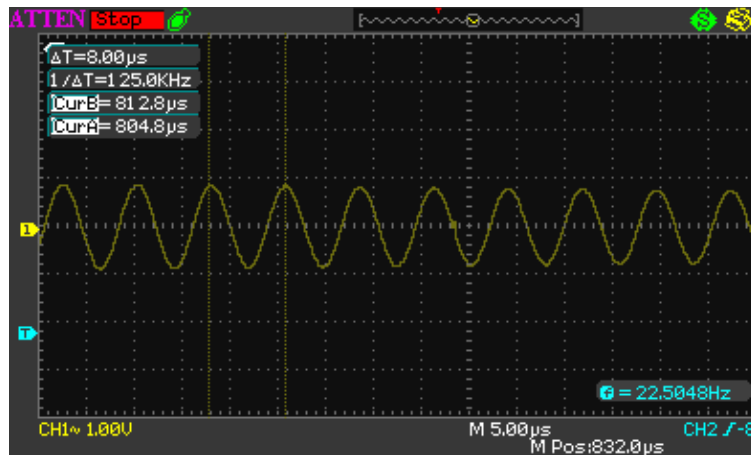
La figura 37 quiere mostrar que la forma de onda de corriente en el circuito secundario es la misma que la del primario, pero con magnitud diferente, esto a diferentes niveles de tensión. Se tuvo un valor de corriente de 750mA, y mediante los cursores del osciloscopio se midió la frecuencia de resonancia en el toroide, la curva 38 quiere mostrar que en el toroide la frecuencia es 125kHz, valor que corresponde a la frecuencia del primario.

Figura 37. Onda de corriente en toroide.



Fuente, autores.

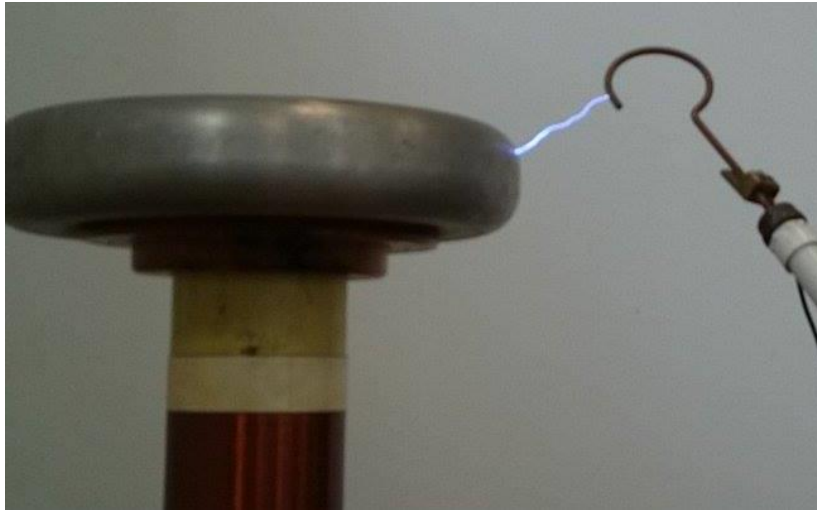
Figura 38. Frecuencia de resonancia.



Fuente, autores.

Mediante el cambio de componentes calculados en el capítulo 3 y las formas de onda tomadas queda concluida la repotenciación de la bobina de Tesla, el efecto de rayo y el campo magnético hace que se puedan encender bombillas (ver figura 39 y 40). Los resultados de las curvas tomadas en el laboratorio de electricidad de la UPTC seccional Duitama fueron los esperados ya que hicieron validos el modelo matemático y simulaciones del circuito de la bobina de Tesla.

Figura 39. Efecto visual de rayo.



Fuente, autores.

Figura 40. Encendido de lámparas con la bobina de tesla.

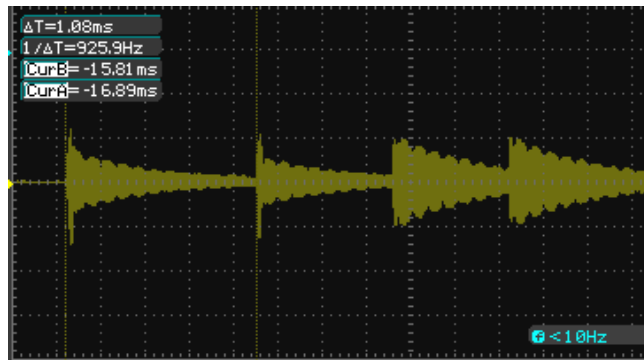


Fuente, autores.

4.2 PRUEBA DE VARIACION DE VELOCIDAD DEL SPARK

La primera prueba se hizo con velocidad de 107,6rpm en el motor, valor que fue medido con instrumento ERASMUS ERC-100, disponible en la UPTC seccional Duitama, la tensión de entrada al circuito primario para esta prueba se dejó en un valor constante de 30V en el Variac. El tiempo en que los electrodos fijos y móviles están en contacto se calculó mediante la ecuación 32 cuyo valor fue 1,12ms, la inversa de ese tiempo es la frecuencia de los pulsos del spark gap dando un valor de 888Hz, el valor medido de frecuencia de los pulsos en el toroide se hizo con el osciloscopio dando un valor de 925Hz, la forma de onda de corriente no se ve afectada por la velocidad del spark gap. La frecuencia del spark gap y el toroide son cercanos, se ve una diferencia ya que en la ecuación 32 se tiene un valor ideal, mientras que el uso de osciloscopio implica comportamiento real y cierto grado de error en las mediciones (ver figura 41).

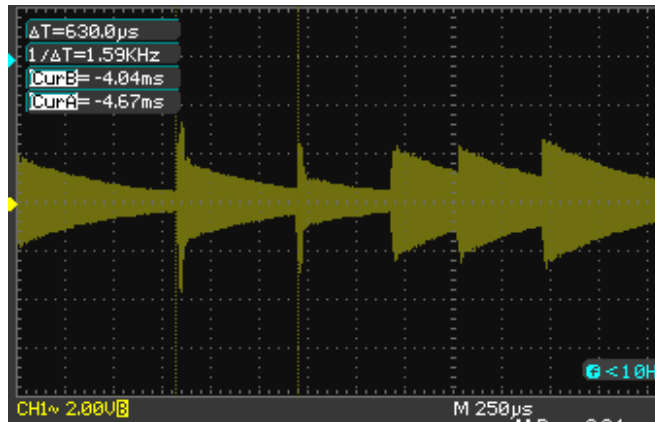
Figura 41. Forma de onda de corriente con velocidad de 107,6 rpm del spark gap.



Fuente, autores.

La segunda medición se hizo con una velocidad de 192,6 rpm, frecuencia de los pulsos con esta velocidad se calculó con la inversa de la ecuación 32. El tiempo de los pulsos del spark gap fue 629,3 μ s dando un valor ideal de 1,58kHz, valor que fue medido con los cursores de tiempo del osciloscopio dando un valor real de 1,59kHz, la onda de corriente en el toroide se mantuvo constante tanto en forma como en magnitud, la cual fue 500mA (ver figura 42).

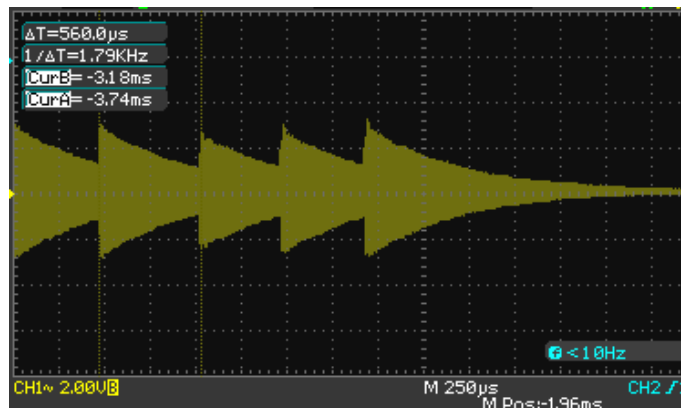
Figura 42. Forma de onda de corriente con velocidad de 192,6 rpm en el spark gap.



Fuente, autores.

La tercera medición se hizo a una velocidad de 215,1 rpm. Donde el tiempo en contacto de los electrodos fue 563,47μs, por ende la frecuencia ideal de los pulsos del spark gap fue 1,77kHz, valor que fue medido con el osciloscopio en el toroide, dando un valor real de 1,79kHz, la forma de onda de corriente se mantuvo constante, la magnitud de la corriente fue 500mA. (Ver figura 43).

Figura 43. Forma de onda de corriente con velocidad de 215,1rpm en el spark gap.



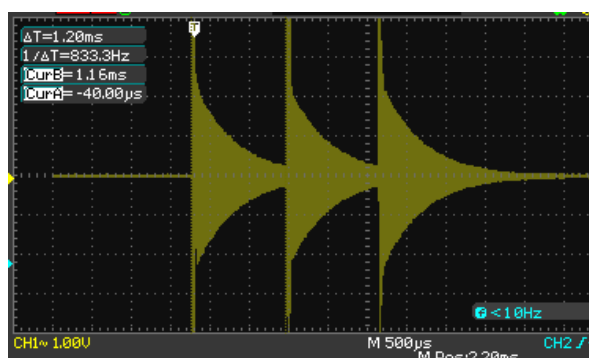
Fuente, autores.

Se tuvo limite en este valor de velocidad ya no fue posible tomar curvas en el osciloscopio, debido a la rapidez de conmutación. Los resultados fueron los esperados ya que la frecuencia de pulsos en el spark gap tuvo el mismo valor que la frecuencia medida en el toroide, por ende la resonancia en la bobina de Tesla.

4.3 PRUEBAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SPT

Se conectó el sistema de puesta a tierra de la bobina de Tesla (ver figura 28), mediante los instrumentos de medida mostrados en la figura 29 se tomó la forma de onda de corriente en el toroide de la bobina de Tesla, esto con el fin de mostrar que con la implementación del electrodo de puesta a tierra la forma de onda de corriente de la bobina de tesla no se ve afectada. La medición se efectuó a una tensión de 40V en el Variac para no causar daños en los instrumentos de medida, la corriente medida fue 750mA (ver figura 44).

Figura 44. Forma de onda de corriente en el toroide con el SPT implementado.



Fuente, autores.

4.4 ESPECIFICACIONES TECNICAS, MANUAL DE MANTENIMIENTO Y GUIAS DE LABORATORIO

4.4.1 Especificaciones técnicas y conexión

La bobina de Tesla se conecta a la red mediante un Variac, esto con el fin de graduar la tensión de entrada. Seguido se conecta un transformador elevador de tensión a 15000 voltios en su devanado de alta, se dispone de unas bobinas de choque en serie con cada terminal del transformador que no afectan el funcionamiento de la bobina de tesla, su función es reducir los armónicos de corriente que se generan en el circuito primario y que pueden perjudicar el transformador, a continuación se conecta el spark gap en paralelo a las bobinas de choque, seguido a esto se coloca el condensador principal y la bobina primaria, una vez conectado el circuito primario se conecta el circuito secundario que consta de la bobina secundaria y el toroide, en el Anexo B se muestra el plano de los componentes de la bobina de Tesla, la tabla 25 hace referencia a las especificaciones técnicas de la bobina de tesla repotenciada.

Tabla 20. Especificaciones técnicas de la bobina de tesla.

Componente	Valor	Unidades
Bobina primaria	119,4	μH
Bobina secundaria	50,65	mH
Toroide	21,14	pF
Spark gap		RPM
Corriente en el primario	30	mA
Tensión en el primario	15	kV
Frecuencia de resonancia	123	KHz
Bobinas de choque	3	mH
Relación de transformación	125	-
Condensador principal	14	nF
Tensión en el secundario	342	kV
Potencia de la bobina tesla	450	W

4.4.2 Manual de mantenimiento

Es fundamental dar mantenimiento al equipo ya que se evita el rápido deterioro de los componentes, todas las partes que componen la bobina de Tesla influyen en su funcionamiento, por tal razón deben estar en correcto funcionamiento según el diseño, a continuación se explica cómo realizar mantenimiento a la bobina de Tesla (Ver Anexo F)

4.4.3 Guías de laboratorio

Para la bobina de Tesla del laboratorio de electricidad de la UPTC seccional Duitama se proponen dos guías de laboratorio, la primera titulada variación de tensión de entrada de la bobina de Tesla, la segunda titulada variación de velocidad del spark gap de la bobina de Tesla (ver anexo G)

Con la bobina de Tesla se pueden hacer prácticas de laboratorio como:

- Variación de tensión de entrada de la bobina de Tesla.
- Variación de velocidad del spark gap.
- Prácticas de aislamiento eléctrico de materiales.

La bobina de Tesla tiene aplicaciones como:

- Pruebas de aislamiento de materiales eléctricos.
- Transmisión de energía inalámbrica.
- Mediciones de alta tensión.
- Estudio de radio frecuencia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Mediante los parámetros de diseño para una bobina de tesla mostrados en el numeral 3.1. se logró mostrar que el trabajo presentado en 2011 no cumplía con resonancia entre circuitos primario y secundario. Componentes como la bobina secundaria fue sobredimensionado en tamaño debido a que no se cumplió con la relación H/D. El spark gap utilizado presentaba choque de electrodos fijos y móviles, lo que causaba riesgo de accidentes.
- Mediante la conexión de instrumentos mostrados en la figura 29 se logró mostrar que las formas de onda de corriente y tensión son acordes al modelo matemático presentado en el capítulo 2, y las simulaciones mostradas en el mejoramiento del equipo.
- Mediante la variación de tensión de entrada a la bobina de tesla se demostró que a mayor nivel de tensión aumentaba la longitud del rayo en el toroide, sin embargo el aumento de tensión no cambio las formas de onda de tensión y corriente, es decir la resonancia. Con la variación de velocidad del spark gap se logró demostrar la frecuencia de conmutación del spark gap es la misma que la frecuencia de las descargas en el toroide, adicionalmente se demostró que la longitud del rayo no depende de la velocidad del spark gap sino de igualar la frecuencia de resonancia en los circuitos primario y secundario de la bobina de tesla y la tensión de entrada.
- Se hizo necesario calcular la corriente que circula por el circuito primario cuando el spark gap está cerrado, ya que en este instante es donde se tiene el valor más alto de corriente, esto perjudica los devanados del transformador. La fuente de alimentación debe proporcionar la corriente que demanda el circuito, en caso contrario no se tiene funcionamiento del equipo, al no poder usar el transformador diseñado para la bobina de tesla se hace necesario aumentar la resistencia limitadora, lo cual evita deterioro por sobre corrientes en los transformadores dispuestos de manera parcial.
- Mediante el software orcad se pueden comprobar que los componentes diseñados en el capítulo 3 cumplen la condición de resonancia, teniéndose las mejores condiciones posibles de funcionamiento del equipo.
- Las curvas obtenidas con el osciloscopio validan el diseño de componentes y las simulaciones realizadas. es de vital importancia no hacer medidas a una tensión superior de 40 V de entrada ya que es peligroso para las personas y equipos de medición.

5.2 RECOMENDACIONES

- Traer el transformador que fue diseñado para bobina de tesla, el arreglo de los transformadores en cascada es únicamente una solución parcial, ya que al hacer uso de transformadores de microondas se debe elevar la resistencia limitadora, esto implica una caída de tensión en la resistencia, por lo que la tensión de alimentación se ve reducida. El aumento de la resistencia se debe a que en el lado de baja los transformadores de microondas no soportan más de 10,8 A, por contrario el transformador diseñado para esa bobina soporta 16,25 A en el lado de baja tensión.
- NO realizar pruebas con la bobina de tesla sin contar con los elementos de protección personal (botas dieléctricas, guantes dieléctricos, tapones auditivos)
- Las pruebas deben estar supervisadas por un docente capacitado en el manejo de la bobina de tesla, nunca manejar el equipo sin conocer el principio de funcionamiento y peligros relacionados con las altas tensiones producidas en el circuito secundario.
- Siempre que se vaya a conectar la bobina de tesla se debe revisar la conexión del sistema de puesta a tierra, ya que este parámetro reduce el riesgo de accidentes en caso de falla.
- Siempre que se desee aislar un componente de la bobina de tesla para su mantenimiento o cambio, se debe asegurar que el equipo se encuentre desenergizado y totalmente descargado en el caso del condensador, ya que las tensiones en el circuito primario son peligrosas para el ser humano.
- Debe existir un mantenimiento continuo que permita el buen funcionamiento de la bobina de tesla, además de garantizar que los componentes conserven las propiedades del diseño, esto aumenta la vida útil del equipo.
- Se debe tener cuidado con el manejo de los equipos de laboratorio como el osciloscopio, ya que se está trabajando con tensiones elevadas y puede causar daños.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AMAYA QUITIÁN, Maira Fernanda. Diseño y construcción de una bobina de tesla, para el laboratorio de electricidad de ingeniería electromecánica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia sede Duitama. Duitama. 2011. p 19.
- [2] CADAVID, Héctor, et al. Diseño y construcción de una bobina de tesla. Energía y Computación. 2001. vol. X, no. 2. 18 Ed. [En línea] Disponible en: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1392/1/Diseno%20y%20construccion%20de%20una%20bobina%20tesla.pdf>.
- [3] PÉREZ, Eduardo y MIQUÉLEZ, Vicente. Diseño y construcción de una bobina de tesla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Pamplona. 19 de febrero 2010. p 8.
- [5] CEBALLOS GARCÍA, Carlos. Análisis constructivo para restaurar una bobina de tesla y evidenciamiento de un entorno ionizado. Proyecto de grado, Título de Tecnólogo en Electricidad. 2013. Universidad Tecnológica de Pereira. Tesis. [En línea] Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/4099/1/621314G216A.pdf>.
- [6] DENICOLAI, Marco. Tesla Transformer for Experimentation and Research. 30 de Mayo de 2001., p 48-51.
- [7] NILSON, James W. circuitos eléctricos.7 edición. Madrid. Pearson educación, 2005. p 274-398. ISBN. 84-205-4458-2.
- [8] BOYLESTAD, Robert L. Introducción al análisis de circuitos. 10 ed. México. Pearson educación, 2004. p 887-922. ISBN 970-26-0448-6.
- [9] TILBURY, Mitch. The Ultimate Tesla Coil Desing and Construction Guide. McGraw-Hill. New York. 2008. p. 413.
- [11] S.P, Londoño. En: Diseño de un prototipo de bobina de tesla con tensión de operación pico de 280kV. Universidad Francisco José Caldas, Bogotá - Colombia.
- [12] HURTADO ROMERO, Danny Fabián y VILLAMAR ERAS, Fabricio Eduardo. Diseño y construcción de una bobina de tesla de 15 kV en el primario para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica salesiana Sede Cuenca. Cuenca. Abril de 2014. 31 p.

[14] C., Boonseng y P., Apiratikul. A Low Cost Approach to Desing the Tesla Transformer for Testing and Insulating Materials. Departamento de Ingeniería Eléctrica. p. 2 – 24. 2001.

[18] CASTRO GALEANO, Juan Carlos; PINTO SALAMANCA, María Luisa y AMAYA QUITIÁN, Maira Fernanda. En: Diseño y construcción de una Bobina de Tesla de 1680 W, para la enseñanza de conceptos Básicos en sistemas eléctricos de potencia. Julio - Diciembre, 2014. Rev. Investig. Desarro. Innov. Vol. 5, no. 1, p. 66 – 74. ISSN: 2027-8306.

[19] INDUSTRIAS EXPLORER DUITAMA, en línea. Disponible en: <http://www.industriaseplorer.com/>

[21] CALVO ROLLE, José Luis. Edición y Simulación de Circuitos con ORCAD. México D.F. Alfaomega, 2004. 405 p. ISBN 84-7897-586-1.

[22] IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, IEEE Std 80 - 2000. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA. 4 de Agosto del 2000.

[23] SEGURIDAD ELECTRICA SAS. Reglamento técnico de instalaciones eléctricas [RETIE] compilado y actualizado. Bogotá D.C. 31 de Julio de 2014. P 68 -78.

[24] PINTO, patricia. Medición y modelamiento del suelo. 20 de Septiembre de 2012. [En línea] disponible en: <http://resistividaddepuestatierraen.blogspot.com/>

[26] RAMIREZ, Carlos Felipe. Subestaciones de alta y extra alta tensión. Segunda edición. Mejía Villegas S.A. Colombia. 1991. p. 543- 593 ISBN 958-33-5295-0.