



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

## **FACULTAD DE EDUCACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

Tema:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA PARA  
LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO  
VOLTAJE.”**

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en la  
Especialidad Mantenimiento Eléctrico.

**AUTORES:**

Bolaños Arias Francisco Ismael

Rivera Chiriboga Diego Roberto

**DIRECTOR:**

Ing. Pablo Méndez

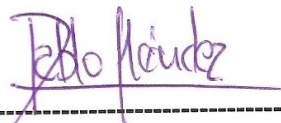
Ibarra, 2013

## ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

Ing. PABLO DANILO MÉNDEZ

### CERTIFICA

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por los señores estudiantes, **BOLAÑOS ARIAS FRANCISCO ISMAEL** y **RIVERA CHIRIBOGA DIEGO ROBERTO** que han cumplido con las normas y las leyes de la Universidad Técnica del Norte, Facultad de Educación Ciencia y Tecnología, Escuela de Educación Técnica en la elaboración del presente trabajo de Grado pudiendo estos realizar la defensa de la misma para la obtención del título de Ingenieros en Mantenimiento Eléctrico.



---

Ing. PABLO DANILO MÉNDEZ

Ibarra, septiembre 2013

# DEDICATORIA

## **A Dios:**

Por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

## **A mis padres:**

Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo, así como a mi hijo por ser la motivación diaria en mi vida.

**Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.**

## **A mis maestros:**

Por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis; al Ing. Pablo Méndez por su apoyo ofrecido en este trabajo; al Ing. Mauricio Vásquez, Ing. Ramiro Flores e Ing. Hernán Pérez por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional.

***Francisco Ismael Bolaños Arias***

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mi angelito, mi pequeño hijo que con su ternura y cariño demuestra que no es necesario hablar para expresar los sentimientos y el amor que me llenan, y me guían para no darme por vencido y seguir avanzando en busca de mejores mañanas.

A mi familia la cual supo entregarme todo su amor, cariño y paciencia para lograr alcanzar la deseada meta.

***Rivera Chiriboga Diego Roberto***

## **AGRADECIMIENTO**

La presente tesis es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente participaron varias personas, leyendo, opinando, corrigiendo, brindando ánimos y acompañándome en los momentos de crisis y en los de felicidad.

Doy gracias a Dios por su fortaleza que me ha prodigado cada día, igualmente a la Facultad de Educación Ciencia y tecnología de la Universidad Técnica del Norte, a las autoridades, a todos los docentes de los diferentes módulos, y un especial agradecimiento al Ing. Pablo Méndez Director de Tesis por su ayuda incondicional y asesoramiento constante en el desarrollo de la investigación.

En general a todas las personas que colaboraron con la orientación y apoyo sincero.

***Francisco Ismael Bolaños Arias***

## **AGRADECIMIENTO**

En esta oportunidad, hago extensivo mi agradecimiento a quienes de una u otra manera me apoyaron durante el proceso de elaboración del proyecto, en especial a mi esposa que siempre está en esos momentos en los cuales más se necesita.

Además agradezco a mi papá, mi mamá y mis hermanas que motivaron cada paso que daba en mi preparación académica, su incondicional esfuerzo demostraron que todos necesitamos el apoyo de alguien, y por eso agradezco a Dios por haberme brindado a esas persona que forman parte de mi vida.

Finalmente agradezco a mi director de tesis que supo guiarme para alcanzar esta anhelada meta.

***Rivera Chiriboga Diego Roberto***

## ÍNDICE DE CONTENIDO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.....	i
ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xi
ÍNDICE DE CUADROS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvi
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
El Problema de Investigación.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento Del Problema.....	2
1.3. Formulación Del Problema.....	3
1.4 Delimitación.....	3
1.4.1 Delimitación Temporal.....	3
1.4.2 Delimitación Espacial.....	3
1.4.3 Delimitación Tecnológica.....	4
1.4.4 Delimitación Teórica.....	4
1.5 OBJETIVOS.....	5
1.5.1 Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	6
1.6 Preguntas de investigación.....	6
1.7. Justificación.....	6

<b>CAPÍTULO II</b> .....	8
Marco Teórico.....	8
2.1 Introducción.....	8
2.2 Fundamentación Tecnológica del Problema.....	9
La necesidad de obtener dispositivos de ilustración para los estudiantes de ingeniería que permitan la visualización de fenómenos.....	9
2.2.1 Bobina Tesla.....	11
2.2.1.1 Descripción y base histórica.....	11
2.2.1.2 Primeras bobinas.....	12
2.2.2 Bobinas Tesla disruptivas.....	13
2.2.2.1 La Bobina de Ruhmkorff.....	13
2.2.3 Proyectos Posteriores de la Bobina Tesla.....	15
2.3 Transmisión de Energía Eléctrica.....	18
2.4 Leyes de funcionamiento de la Bobina Tesla.....	19
2.4.1 Ley de Faraday.....	19
2.4.2 Ley de Lenz.....	20
2.4.3 Ley de Gauss.....	21
2.5 Conceptos básicos.....	22
2.5.1 Transformador.....	22
2.5.2 Condensador.....	23
2.5.2.1 Condensador en serie.....	23
2.5.2.1.1 Capacidad total en serie.....	24
2.5.2.1.2 Tensión de capacitores en serie.....	24
2.5.2.1.3 Carga de capacitores en serie.....	25
2.5.2.2 Condensador en paralelo.....	25
2.5.2.2.1 Capacidad total en paralelo.....	25
2.5.2.2.2 Tensión de capacitores en paralelo.....	26
2.5.3.2 Capacidad parásita.....	27
2.5.3 Inductor.....	27
2.5.3.1 Inductancia.....	27
2.5.4 Resistencia.....	28
2.5.5 Terminal superior o toroide.....	29
2.5.6 Frecuencia de Resonancia.....	32



2.5.7 Bobina Primaria .....	34
2.5.7.1 Alta capacidad de corriente .....	35
2.5.7.2 Efecto de la piel .....	35
2.5.7.3 Inductancia de la bobina primaria.....	36
2.5.8 Explosor.....	37
2.5.8.1 Funcionamiento .....	38
2.5.9 Variador de voltaje (variac).....	40
2.5.11 Relé de estado sólido.....	43
2.6 Equipo NI ELVIS.....	44
2.6.1 Arquitectura NI ELVIS .....	44
2.6.2 Estación de trabajo NI ELVIS.....	45
2.6.3 Componentes de la Suite de Instrumentos Virtuales .....	45
2.7 Seguridad y Precauciones .....	46
2.8 Jaula de Faraday .....	47
2.9 Descargas Aéreas.....	49
2.10 Sistema de puesta a tierra .....	52
2.10.1 Composición de una instalación de puesta a tierra .....	52
2.11 Formas de medición de alto voltaje.....	56
2.11.1 Transformador de Potencial .....	56
2.11.2 Medición de Campo Eléctrico .....	56
2.12 Normas para pruebas de aislamientos de alto voltaje .....	56
2.13 Glosario de términos básicos .....	57
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>60</b>
Metodología de la Investigación .....	60
3.1 <i>Tipo de Investigación</i> .....	60
3.1.1 <i>Investigación Tecnológica</i> .....	60
3.1.2 <i>Investigación Documental</i> .....	61
3.1.3 <i>Investigación Aplicada</i> .....	61
3.1.4 <i>Investigación de Campo</i> .....	61
3.2 Métodos .....	62
3.2.1 <i>Método Inductivo</i> .....	62
3.2.2 <i>Método Deductivo</i> .....	63
3.2.3 <i>Recolección de la Información</i> .....	63

3.2.4 Método Sintético .....	64
3.3 Técnicas e Instrumentos .....	64
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	65
Propuesta: Proceso y Resultados .....	65
4.1 Tema.....	65
4.2 Diagnóstico.....	65
4.3 Desarrollo Temático - Específico del Tema .....	66
4.3.1 Funcionamiento de la Bobina Tesla .....	66
4.3.2.1 Transformador .....	69
4.3.2.2 Bobina Secundaria.....	71
4.3.2.3 Condensador .....	74
4.3.2.5 Bobina Primaria .....	76
4.3.2.7 Bobina de choque .....	78
4.3.2.8 Circuito de Control .....	79
4.4 Instalación de puesta a tierra.....	81
4.5 Punta de Alto Voltaje .....	85
4.6 Manual de operación de la Bobina Tesla .....	88
4.6.1. Objetivos:.....	88
4.6.2. Fundamento Teórico.....	88
4.6.3 Trabajo Preparatorio .....	90
4.6.4 Parte Experimental .....	91
4.6.5 Materiales y Equipos de Laboratorio.....	91
4.6.6 Informe.....	91
4.6.8 Manual de mantenimiento de la Bobina Tesla .....	97
4.6.8.1 Inspección.....	97
4.6.8.2 Limpieza .....	98
4.6.8.3 Ajustes.....	98
Fuente: Autores .....	99
4.7 Resumen del mantenimiento .....	99
4.8 Aplicaciones de la Bobina Tesla .....	99
<b>CAPÍTULO V</b> .....	101
Conclusiones y Recomendaciones .....	101
5.1 Conclusiones.....	101

5.2 Recomendaciones.....	102
5.3 Bibliografía.....	103
5.4 Linkografía.....	105
5.5 Anexos Fotográficos .....	106

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 Ecuación Ley de Faraday.....	30
Ecuación 2.2 Capacidad total en serie.....	30
cuación 2.3 Suma de caídas de tensión. ....	30
Ecuación 2.4 Carga de capacitores en serie. ....	30
Ecuación 2.5 Capacidad total en paralelo.....	31
Ecuación 2.6 Tensión de condensadores en paralelo. ....	31
Ecuación 2.7 Carga de capacitores en paralelo.....	32
Ecuación 2.8 Carga de capacitores. ....	32
Ecuación 2.9 Fórmula de Wheeler.....	33
Ecuación 2.10 Fórmula de la Resistencia de la Bobina. ....	34
Ecuación 2.11 Fórmula de la capacidad del Toroide. ....	37
Ecuación 2.12 Fórmula de la Frecuencia de Resonancia.....	38
Ecuación 2.13 Fórmula de la bobina primaria.....	41
Ecuación 2.14 Fórmula de la inductancia bobina primaria.....	41

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores orientativos de resistividad del terreno.....	54
Cuadro2. Valores medios aproximados de la resistividad del terreno. ....	55
Cuadro3. Fórmula para estudiar la resistencia de la tierra en función de la resistividad del terreno y las características del terreno .....	55
Cuadro4. Tabla de Mantenimiento Programado .....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Disposición de capacitores en serie.....	30
Figura 2. Disposición de capacitores en paralelo.....	32
Figura 3. Toroide.....	36
Figura 4. Bobina Primaria .....	39
Figura 5. Ejes de cálculos del bobinado primario.....	42
Figura 6. Explosor o Spark Gap.....	43
Figura 7. Partes de un variac. ....	45

Figura 8. Opto acoplador .....	46
Figura 9. Relé de estado solido .....	47
Figura 10: Puesta a Tierra. ....	52
Figura 11: Diagrama de una Bobina Tesla .....	66
Figura 12: Forma de onda de corriente primaria y voltaje secundario .....	67
Figura 13. Recorrido del voltaje por el circuito. ....	68
Figura 14. recorrido de la corriente. ....	68
Figura 15: Toroide.....	73
Figura 16: Disposición de espaciamentos para bobinado primario .....	75
Figura 17: Spark gap .....	76
Figura 18: Bobina de choque .....	76
Figura 19. Circuito de control .....	77
Figura 20. Aterramiento de Puesta a Tierra.....	79
Figura 21. Preparación del conductor para la puesta a Tierra. ....	80
Figura 22. Aterramiento de Puesta a Tierra.....	80
Figura 23. Soldadura del conductor y la varilla Coperwell .....	81
Figura 24. Conductor soldado con la varilla Coperwell. ....	81
Figura 25. “Megger” Equipo de Medición de Resistividad de Tierra. ....	82
Figura 26. Medición de Resistividad de Tierra. ....	82
Figura 27. Punta o sonda de prueba.....	83
Figura 28 Seguridad y Precauciones. ....	86
Figura 29: Fusible 600 V – 4 Amps. ....	86
Figura 30: Reproductor Musical con Ecuilizador.....	86
Figura 31: Tablero de Control. ....	87
Figura 32: Potenciómetro Controlador. ....	87
Figura 33: Visualización por medio de Leds. ....	87
Figura 34: Aislamiento colocado en punta de prueba tipo péndulo.....	88
Figura 35: Ruptura del aislamiento por alto voltaje. ....	88
Figura 36: Marcación de Voltaje de Ruptura.....	89



## RESUMEN

El presente proyecto describe de forma teórico-práctica el diseño y construcción de la Bobina Tesla. Se construyó, con el propósito de servir como guía práctica para docentes y estudiantes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico, para exponer temas de generación y control de alto voltaje y los efectos que se producen en torno al proyecto. El objetivo de este proyecto es aplicar las bases teórico-científicas sobre el diseño y construcción de una Bobina Tesla, siguiendo los parámetros de seguridad que se requiere para la elaboración de la bobina y el operario. El equipo cuenta con niveles de seguridad, los cuales son necesarios para poner en funcionamiento la Bobina Tesla. Para este fin se instaló una jaula de Faraday que se encuentra totalmente aterrada y servirá para mitigar las corrientes parásitas que se generen para el funcionamiento de la Bobina Tesla. Estos dispositivos deben ser accionados tomando en cuenta las diferentes formas de protección que debe adoptar el operador y a su vez considerar los riesgos a los cuales se está sometido al trabajar con niveles de voltaje mayores a los residenciales. Para realizar el control de la Bobina Tesla se incorporó un circuito electrónico que modula el arco eléctrico generado a través de pulsos. Se plantea la posibilidad de realizar pruebas de resistencia de materiales dieléctricos con el uso de este dispositivo. Para la medición de alto voltaje se anexó una punta de medición que consta de un juego de resistencias en serie – paralelo que se conecta a un multímetro, esta punta genera un divisor de voltaje que otorga un valor aproximado del voltaje generado. El operador debe estar debidamente equipado antes de realizar las pruebas de alto voltaje y se debe realizar las pruebas entre dos personas y la supervisión de un docente, todo esto con el fin de salvaguardar la vida del operador y los equipos existentes en el laboratorio.

## SUMMARY

The current thesis Project describes the theoretic- practical function about design and building of the Tesla Coil. It was built with the purpose to serve as a practical guide booklet, for teachers as for students within the career of Electric maintenance engineering; in order to expose electricity generation topics and high voltage control and the produced effects around this project. The goal of this project is to apply the theoretic-scientific basis about the design and construction of the Tesla Coil, following required security standards to build this Tesla Coil for both the coil and the operator. This apparatus account with security levels, which are required to operate the Tesla Coil. For this purpose was installed a Faraday cage that is totally terrified and will serve to mitigate the eddy currents that are generated for the operation of the Tesla Coil. These devices must be driven by taking into account the different forms of protection that you must take the operator and it's time to consider the risks to which is subjected to the work with voltage levels higher than the residential. To perform the control of the Tesla coil was incorporated into an electronic circuit that modulates the electric arc generated through pulses. This raises the possibility of testing for resistance of dielectric materials with the use of this device. For the measurement of high voltage is annex a tip of measurement which consists of a set of resistors in series-parallel that connects to a multimeter, this tip generates a voltage divider that gives an approximate value of the voltage generated. The operator must be properly equipped before performing tests of high voltage and should perform tests between two people and the supervision of a teacher, all of this in order to safeguard the life of the operator and the existing equipment in the laboratory.

## INTRODUCCIÓN

La Bobina Tesla es un generador electromagnético que produce altas tensiones a elevadas frecuencias, con efectos observables como coronas, efluvios y arcos eléctricos. Su nombre se lo debe a Nikola Tesla, quien desarrollo este equipo a principios del siglo XX, con el cual pensaba transmitir la energía eléctrica sin necesidad de conductores.

El trabajo que se presenta pretende ser una contribución a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico, para afianzar los conocimientos teóricos impartidos en las aulas de clases, mediante la ejecución de prácticas relacionadas con las materias.

La Bobina Tesla causa gran impresión por su espectacularidad y provoca interés por conocer su funcionamiento.

Esta investigación ha sido concebida buscando la integración de varios diseños fundamentales los cuales permiten el funcionamiento óptimo de la Bobina Tesla, además se debe calcular los valores adecuados de las diferentes partes de la bobina para poder apreciar en toda su magnitud el desprendimiento del arco eléctrico.

Para precautelar al equipo y a el operador de considero la integración de un jaula conocida como jaula de Faraday, la cual descarga ha tierra las corrientes parásitas y salvaguarda la integridad del operario y del entorno, se tiene que tener presente que al trabajar con alto voltaje y alta frecuencia se debe tomar todas las precauciones disponibles para no correr ningún riesgo.



# “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE.”

El presente proyecto de investigación contiene cinco capítulos:

**CAPÍTULO I.-** Se determina la problemática de forma clara y concreta, mediante el desarrollo de la investigación, exponiendo los objetivos que se pretende conseguir, para posteriormente justificar el trabajo de investigación.

**CAPÍTULO II.-** Se presenta los principios fundamentales teóricos, como son la leyes en las cuales se basa el proyecto, las partes que constituyen la Bobina Tesla, el principio de funcionamiento, las formulas y ecuaciones necesarias para desarrollar el equipo.

**CAPÍTULO III.-** Se describe la metodología de investigación utilizada para el desarrollo del equipo, así como también los métodos y técnicas que se aplican en su ejecución.

**CAPÍTULO IV.-** Contiene el desarrollo de la propuesta, con la utilización del diseño óptimo para obtener el resultado esperado.

**CAPÍTULO V.-** Contiene las conclusiones y recomendaciones que se encontraron durante el desarrollo de la Bobina Tesla.



## **CAPÍTULO I**

### **El Problema de Investigación**

#### **1.1 Antecedentes**

La carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Universidad Técnica del Norte, es una de las especializaciones nuevas que está formando profesionales en el área eléctrica, por tal razón ha sido necesario la implementación de equipos, prototipos y módulos que permitan realizar prácticas en un laboratorio acorde al pensum académico.

En la actualidad la energía eléctrica se ha convertido en un medio necesario para la vida cotidiana, el incremento del parque industrial obliga a trabajar con voltajes superiores a los residenciales, por lo que es necesario conocer la tolerancia máxima del aislamiento de los equipos de protección.

Con la construcción de la Bobina Tesla se puede generar y ejercer control en alto voltaje, lo cual servirá a futuro para prácticas en el laboratorio de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

La Bobina Tesla comprende un conjunto de bobinados eléctricamente cargados a través de un transformador, mismo que permite

elevant el voltaje y variar la frecuencia nominal de la red, acorde a los cálculos pertinentes.

Cabe recalcar que al trabajar con una bobina de este tipo, los riesgos eléctricos a los que se está expuesto son altos, por lo cual se tomarán las medidas de seguridad necesarias, a fin de evitar problemas futuros como daños en equipos eléctricos y electrónicos próximos a la Bobina Tesla, y el denominado efecto skin propio de trabajos con altos voltajes y altas frecuencias.

Para evitar este tipo de daños se construyó una Jaula de Faraday, la cual mitiga los deterioros que se podrían dar en los equipos electrónicos. De esta manera se garantiza la calidad del trabajo y se beneficia a los estudiantes de la facultad.

## **1.2 Planteamiento Del Problema**

El presente proyecto es un aporte al laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la FECYT, lo cual permite la realización de prácticas en voltajes superiores al suministro residencial.

En varias materias que se imparten, es indispensable la ejecución de prácticas en alto voltaje, lo que permite absorber la parte teórica y disminuir la brecha entre experiencia y la práctica.

El diseño de una Bobina Tesla permite observar y controlar la variación de voltajes y frecuencias a valores superiores a los nominales.

El sistema de protección y seguridad está respaldado por una Jaula de Faraday, la cual protege la integridad del operador, a su vez sirve como mitigador de fugas de corrientes y frecuencias parásitas que genera esta bobina.

### **1.3. Formulación Del Problema**

¿Cuál es el diseño apropiado de una Bobina Tesla que permita generar y controlar altos voltajes?

### **1.4 Delimitación**

#### **1.4.1 Delimitación Temporal**

La construcción de la bobina tuvo una duración de un año y ocho meses, tiempo en el cual se desarrolló la Bobina de Tesla, y a la vez el sustento teórico, el que servirá como guía de usuario para los docentes y estudiantes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

#### **1.4.2 Delimitación Espacial**

Este proyecto se llevó a cabo en la provincia de Imbabura, ciudad de Ibarra, Campus de la Universidad Técnica del Norte, carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la Escuela de Educación

Técnica, se planteó la creación de una Bobina Tesla para prácticas de generación y control de alto voltaje.

### **1.4.3 Delimitación Tecnológica**

Diseño y construcción de la bobina primaria y secundaria, estas bobinas son las encargadas de generar el voltaje necesario a la salida de la bobina, los cuales dependen directamente del número de espiras, el calibre del conductor, el diámetro del enrollamiento, la capacidad del condensador, la separación del explosor y la tolerancia al estrés al cual están sometidos.

El condensador de alto voltaje soporta el estrés del transformador de entrada, el cual entrega a su salida 15kV, por lo tanto se realizó el diseño tomando en consideración todos los aspectos negativos que ocasiona que el condensador sufra daños provocados por el funcionamiento de la bobina. El diseño y construcción de un circuito electrónico que permite controlar el arco eléctrico.

### **1.4.4 Delimitación Teórica**

Se realizó el estudio de operación de un transformador ante la presencia de una corriente que circula por un conductor, dependencia de la relación de espiras con el voltaje de entrada y de salida, los parámetros a tomar en cuenta son las medidas de la capacitancia e inductancia de cada parte que se compone la bobina, ya que dichos valores son indispensables para obtener el punto de resonancia del equipo, así mismo son importantes para el cálculo de la capacidad del

condensador. Los valores de la inductancia y capacitancia son obtenidos mediante cálculos que serán detallados más adelante.

Es importante el funcionamiento de las partes electrónicas que se usaron, y cuál es el trabajo puntual que cada parte realizó; así mismo, los valores máximos a los cuales trabaja, el tiempo que soportan trabajando y la carga que pueden controlar.

Otro punto indispensable es la seguridad de las personas que van a trabajar con esta bobina y las personas que están directa o indirectamente relacionadas con la manipulación del mismo, por eso se debe tomar todas las precauciones que sean necesarias y los estudios de efectos y consecuencias que podrían implicar al ser sometidos a trabajos con altos voltajes y altas frecuencias.

Que normas se deben tomar en cuenta para no sufrir ninguna alteración en el organismo, qué medidas se debe adoptar, relacionado directamente con la prevención de posibles accidentes.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo General**

Diseñar y construir una Bobina Tesla de alto voltaje para la Escuela de Educación Técnica de la FECYT – UTN.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

1. Establecer las bases teórico-científicas que permitan estructurar el Marco Teórico con el cual se sustenta el proyecto.
2. Desarrollar un diseño óptimo que permita observar el funcionamiento adecuado de la Bobina Tesla.
3. Implementar la Bobina Tesla y realizar pruebas en el laboratorio de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

### **1.6 Preguntas de investigación**

- ✓ ¿Cuáles son las bases teóricas necesarias para construir las diferentes partes de la Bobina Tesla?
- ✓ ¿Cuáles son los daños más frecuentes en la Bobina Tesla?
- ✓ ¿Qué mediciones de se pueden realizar con la Bobina Tesla?

### **1.7. Justificación**

El proyecto se desarrolló por el requerimiento de los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico de la FECYT, debido a la necesidad de poner en práctica los conocimientos sobre alto voltaje y variaciones de frecuencia.

La carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico es nueva por lo que es necesario realizar prácticas de variaciones de alto voltaje y frecuencia, por esta razón este proyecto implementó como base para la ejecución de pruebas, contando con las seguridades respectivas y en medio de un entorno seguro para el operador.



El desarrollo de una Bobina Tesla permite ampliar conocimientos a los estudiantes de la carrera, que tiene la necesidad de realizar prácticas de control y generación de alto voltaje, ya que en la Universidad no se cuenta con ningún laboratorio de esta índole. La construcción de esta bobina se la realizó asumiendo el reto que implica conseguir algunos elementos de la bobina, que son necesarios para su funcionamiento.

A nivel tecnológico este proyecto se encuentra como un equipo ya conocido, se basa en un transformador el cual incrementa el voltaje de entrada a valores que superan los 15.000 voltios, por lo que es necesaria una protección adecuada para evitar posibles daños.

Es necesario un espacio físico seguro para la construcción de la Bobina Tesla, porque produce un campo magnético lo suficientemente fuerte para inducir una corriente que podría circular por el organismo ocasionando quemaduras graves e incluso la muerte.

Para evitar posibles inconvenientes se construyó una Jaula de Faraday, esta jaula sirve para disipar el campo magnético residual que se crea alrededor del equipo.

Se debe enfatizar que este proyecto consta de un modulador que permitirá controlar el incremento de valores, a más de esto el operador debe estar equipado con ropa adecuada, botas con protección dieléctrica y correctamente aislado a tierra.

## **CAPÍTULO II**

### **Marco Teórico**

#### **2.1 Introducción**

La Bobina Tesla es un transformador resonante, que intensifica el voltaje basándose en los planteamientos de Nikola Tesla, el cual se aplica en circuitos de corriente alterna, formando circuitos RLC con un coeficiente de acoplamiento bajo para la emisión visual de streamers, a frecuencias semejantes en intervalos de onda y con pérdidas considerables de intensidad.

Los principios de funcionamiento de los circuitos resonantes RLC en serie-paralelo, cuya característica es la frecuencia que impulsa al circuito primario, trae como resultado niveles óptimos de corriente eficaz, debido a la relación de la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva del circuito.

Además la particularidad de poder ajustar el circuito secundario, el que está compuesto de un inductor y un capacitor, lo cual permite tener una frecuencia de oscilación natural; en el circuito primario se debe armonizar la frecuencia en base a los cálculos previamente establecidos, tomando en cuenta las características del transformador de entrada y el condensador a utilizar.

En esta bobina se enfoca el método de mejorar los niveles de potencia y transformación de energía, con la finalidad de obtener diferencias de potencial en el final del circuito secundario sumamente alto, lo que se obtendrán a través de la percepción visual de descargas eléctricas de alto voltaje en forma de rayos.

Este proyecto tiene como base el uso de un transformador de 120 voltios a 15kV, con lo cual desprende un arco eléctrico visible que ioniza el aire a su alrededor, en busca de su descarga a tierra.

Para elevar los niveles de voltaje requeridos, se usa una bobina primaria que induce un campo electromagnético hacia la bobina secundaria, permitiendo circular una corriente a través del bobinado; el resto de los componentes del proyecto obtienen la ruptura del aire, descargando el arco eléctrico en forma de rayo, el condensador almacena en lapsos cortos de tiempo el voltaje que se está generando desde el transformador; que al completar su carga la libera hacia el resto del circuito, para ello se utilizó un condensador en base a los cálculos matemáticos, soportando voltajes superiores a los 15kV.

Así también los demás componentes de este proyecto deben ser probados varias veces con el fin de verificar su resistencia al estrés eléctrico al cual serán sometidos, ya que no todos los materiales soportan este nivel de voltaje.

## **2.2 Fundamentación Tecnológica del Problema**

La necesidad de obtener dispositivos de ilustración para los estudiantes de ingeniería que permitan la visualización de fenómenos

como ionización de gases, ruptura eléctrica en el aire, etc., proyecta la construcción de una Bobina Tesla, que funciona bajo los principios de resonancia, actuando como un transformador de aire entre la bobina primaria y secundaria.

La Bobina Tesla fue inventada y patentada por Nikola Tesla en 1887, mientras realizaba investigaciones sobre transmisión de energía eléctrica sin el uso de conductores eléctricos.

Los transformadores de alto voltaje y alta frecuencia superiores a los 100kV, pueden desarrollar formas de onda con oscilaciones amortiguadas; es decir el pulso de salida que genera va cambiando acorde al tiempo.

El sustento teórico que permite el funcionamiento de una Bobina Tesla, esta dictaminado por los cálculos matemáticos y el modelo a construirse, siendo de vital importancia los datos de voltaje, intensidad y carga en el transformador, así como el diseño y disposición del bobinado primario.

Es necesario ampliar más la base de conocimientos sobre el funcionamiento de los circuitos aire-acoplados, considerando que evita la pérdida de energía por transformación, que decaen al tratar de obtener el máximo de ganancia en la tensión de salida, por lo que es necesario el mejoramiento del diseño para optimizar el funcionamiento y respaldar la teoría.

Se debe recalcar que no se puede tener un modelo matemático exacto de los cálculos a utilizar y los resultados serán aproximados debido a que cada componente es diferente y el comportamiento de los materiales actúa indistintamente al modelo final de la Bobina Tesla, no todos los materiales cumplen con las expectativas que se deben aplicar en la bobina.

El estudio y dominio de fenómenos teóricos y conceptuales que desarrollan estas bobinas, principian desde la transmisión de señales y entrega de energía eléctrica transferida a través del electromagnetismo, leyes de inducción de Faraday, resonancias en circuitos de corriente alterna, conducta de circuitos inductores y capacitivos por corriente alterna, resistencia de materiales dieléctricos, comportamiento de circuitos y equipos electrónicos ante la influencia de campos electromagnetismos de gran magnitud y las aplicaciones propias de la Jaula de Faraday como protección de sistemas eléctricos y protección del operador.

## **2.2.1 Bobina Tesla**

### **2.2.1.1 Descripción y base histórica**

Nikola Tesla, nació el 10 de julio de 1856 Smiljan, Austria (Actualmente Croacia), inventor y científico, falleció el 7 de enero de 1943 en New York.

Tesla fue un físico, matemático, ingeniero eléctrico y uno de los más celebres inventores que revolucionaron en su época, su aporte científico permitió desarrollar bases teórico – científicas para la generación de corriente alterna; además de la mejora de teorías y una variedad de inventos en su carrera.

Las Bobinas Tesla están diseñadas a partir de un conjunto de circuitos eléctricos resonantes que se acoplan, Nikola Tesla realizó varios experimentos con distintos tipos de bobinas y disposiciones, por ende resulta complicado hablar de un solo tipo de construcción o diseño.

Sin embargo, se considera a la Bobina Tesla como un generador electromagnético, que es capaz de producir tensiones elevadas y alterar las frecuencias nominales, permitiendo obtener un efecto visible y sorprendente de los arcos eléctricos generados al final del diseño.

La Bobina Tesla eleva las tensiones e incrementa considerablemente las frecuencias de la corriente alterna que se encuentran transitando en el circuito, alcanzando límites dentro del orden electromagnético, las que permiten observar las descargas electromagnéticas de alto voltaje que inciden en los materiales dieléctricos que rodean al toroide al final del bobinado secundario, este efecto hace que el toroide se convierta en un conductor eléctrico y a su entorno genera una corona de ozono puro.

#### **2.2.1.2 Primeras bobinas**

Los primeros modelos de bobina, con los que Tesla realizó sus experimentos fueron en un vaso acumulador de cristal que medía entre 15cm y 20cm, donde se colocaba un arrollado de 60 a 80 espiras con conductor No. 18.

En el exterior de este arrollado se colocaba una bobina primaria de 8 a 10 espiras con un conductor No. 6AWG, una vez culminado esto se

procedía a colocar dentro de un vaso lleno de aceite de linaza o aceite mineral.

## **2.2.2 Bobinas Tesla disruptivas**

### **2.2.2.1 La Bobina de Ruhmkorff**

Este tipo de bobina es alimentada a través de una fuente principal de energía a su bobina primaria, se conecta en serie a un juego de condensadores por sus dos extremos; cuenta con un explosor al igual que la Bobina Tesla, el cual está en paralelo a la bobina antes de los condensadores.

Sus dos puntas de descarga son dos bolas metálicas de 3cm aproximadamente, aunque Tesla se basó en distintos materiales para generar estas descargas.

Estos condensadores tenían varios diseños específicos, siendo muy pequeños pero con un gran aislamiento, que consistían en conjuntos de placas móviles sumergidas en aceite.

Al disminuir el tamaño de las placas, permitían aumentar el rango de frecuencia, en los primeros diseños de bobinas las placas también eran útiles para mitigar la auto inductancia que se genera en la bobina secundaria, permitiendo dar una mayor capacidad a la misma.

Adicional a esto se situaban placas de mica en el explosor, de esta manera se generaba un pequeño paso de aire a través del mismo, esto permite que se mitigue el arco eléctrico en esta parte del circuito, dejando que la descarga sea más escabrosa.

Los condensadores se conectan en el circuito primario en serie con la bobina, que permiten la disrupción del aire en el explosor, cada primario consta de 20 espiras de conductor cubierto de caucho No. 16 B&S, que están arrollados por separado en tubos de caucho con un grosor no mayor a 3mm.

El bobinado secundario tiene 300 espiras de cable cubierto de seda No. 30B&S, el cual se arrolla en un tubo de caucho y se encaja los extremos en un tubo de cristal o caucho. El bobinado primario debe ser lo suficientemente largo para que sus terminales queden holgados al colocar la bobina secundaria entre las dos.

El bobinado primario debe cubrir al menos 5cm el entorno del secundario, se debe colocar una división de caucho entre las bobinas. Las terminaciones de la bobina primaria que no se han conectado con los condensadores se las unirá al explosor.

Tesla afirmó que su primer diseño de bobina disruptiva fue creado con el fin de transformar y sustituir energía eléctrica, de una manera adaptada a la ejecución de varios fenómenos eléctricos que necesitaban mayores diferenciales de potencial y variaciones de frecuencia.



### **2.2.3 Proyectos Posteriores de la Bobina Tesla**

Varios prototipos de bobinas fueron diseñadas y patentadas, usando como base la Bobina Tesla, estas eran mucho mayores y operaban a niveles más altos de potencia.

Tesla patentó su primera bobina en “Apparatus for Transmitting Electrical Energy”, llamando “transformador resonante auto regenerativo con núcleo de aire que genera alto voltaje a alta frecuencia”, posteriormente este nombre se reduciría al término Bobina Tesla.

Cabe recalcar, que varios de estos prototipos posteriores eran alimentados con un transformador de alto voltaje, se colocan bancos de condensadores de cristal tipo botella, inmersos en aceite natural para mitigar las pérdidas por descargas de corona a altos voltajes, varios de estos diseños tienen explosores rotativos.

El diseño de la Bobina Tesla permite obtener una gran ganancia de voltaje, esto se lo consigue al acoplar dos circuitos resonantes LC usando transformadores de núcleo de aire.

La ganancia de voltaje de una Bobina Tesla, está dada a razón del número de espiras en los arrollamientos tanto del primario como del secundario, es decir, que es proporcional a la raíz cuadrada de las inductancias secundaria y primaria.

Todos los prototipos siguientes son diseños realizados por aficionados, que tienen la particularidad de ser transformadores

resonantes compuestos por un núcleo de aire que genera altas frecuencias y altos voltajes, estas bobinas alcanzan su máxima ganancia al transferir energía del circuito resonante o circuito primario hacia el circuito secundario en un determinado tiempo de ciclos.

Es necesario denotar que las Bobinas Teslas actuales son diseñadas para obtener un efecto visual de los arcos eléctricos que produce su descarga, mientras que el diseño original tenía la finalidad de transmitir energía eléctrica sin la necesidad de un conductor eléctrico, por tal razón utilizaba enormes superficies con grandes radios de curvatura para evitar descargas de corona y pérdidas a causa de los streamers.

La intensidad o incremento del voltaje es siempre proporcional a la descarga desplazada, que es resultante de la capacitancia del circuito, el voltaje y la frecuencia de las corrientes aplicadas.

Tesla también usó varios de sus diseños con el fin de experimentar otro tipo de fenómenos en diversos experimentos, tales como la fluorescencia, electroterapias, rayos x, corrientes telúricas junto a descargas atmosféricas.

Diseños posteriores de bobinas constan de un circuito primario que tiene en serie su condensador, el explosor y la bobina primaria (circuito LC – inductancia-condensador), y el circuito resonante y está en serie la bobina secundaria y el toroide.

Según los planos de Tesla, el circuito secundario LC estaba compuesto de una bobina secundaria cargada, la cual se coloca en serie

con una bobina helicoidal de grandes dimensiones, esta bobina helicoidal estaba conectada al toroide.

El circuito primario LC se ajusta de tal manera que debe resonar a la misma frecuencia que el circuito secundario, las bobinas primaria y secundaria se acoplan magnéticamente creando un transformador con núcleo de aire resonante. No obstante, a diferencia de cualquier transformador que se acopla hasta en 97% sus campos magnéticos, el núcleo de aire permite un acople de apenas el 10-20% de su campo magnético resultante.

Algunas versiones de la Bobina Tesla distribuyen el campo eléctrico sobre distancias largas, evitando el estrés eléctrico y así poder operar en el aire con libertad.

La terminal de la bobina secundaria es una estructura de metal en forma de toroide, cubierta de una placa metálica circular, esto permite tener una superficie conductora muy grande.

Tesla usó un toroide más grande dentro de una cúpula, este terminal tiene poca capacitancia al ser cargado con mayor voltaje, aquí es donde principalmente se acumulará toda la carga eléctrica.

Este diseño soporta altos voltajes sin generar grandes coronas o chispas, en el proceso de experimentación, Tesla desarrolló distintos tipos de terminales resonadores para sus bobinas, la mayoría de las bobinas actuales usan diseños de toroides más simplificados de metal fundido o

aluminio flexible, se controla el campo eléctrico que radica en la parte superior de la bobina secundaria, permitiendo lanzar las chispas fuera de los bobinados primario y secundario.

El primario y secundario deben estar coordinados a la misma frecuencia o aproximada para que las transferencias de energía entre los circuitos resonantes sean eficaces. En el diseño original Tesla usó un alternador de alta frecuencia o un condensador de descarga para excitar la bobina primaria.

### **2.3 Transmisión de Energía Eléctrica**

La Bobina Tesla de diseño actual opera con niveles de potencia altos, por lo tanto debe ser ajustada cuidadosamente no solo por eficiencia sino por seguridad. El ajuste inapropiado en las terminales como puede generar una chispa de descarga, lo cual puede destruir el cable de la bobina, soportes, e incluso la circuitería electrónica.

Tesla experimentó con varias configuraciones de circuitos, el bobinador primario, el explosor y el condensador ubicados en serie en cada circuito el transformador de entrada AC carga el condensador con el voltaje suficiente a su límite máximo y luego produce la ruptura a través del explosor. El Spark gap se dispara permitiendo al condensador descargarse y cargarse una vez más con el voltaje del transformador. Cuando el Spark gap se dispara, el comportamiento eléctrico en cada configuración de circuitos es semejante, Tesla demostró en sus experimentos que en ninguna configuración tiene una mayor ventaja sobre cualquiera de los otros.

El spark gap sirve como una especie de interruptor, el cual evita que las oscilaciones de alta frecuencia retornen al transformador; en algunas configuraciones de circuitos las oscilaciones de alta frecuencia y amplitud son aplicadas a la bobina del transformador, esto induce descargas de corona internas que debilitan y destruyen fortuitamente los aislamientos de los acoples.

Varios diseños de Bobina Tesla utilizan este tipo de circuito común al cual añaden filtros para bajos (circuitos de resistencias y condensadores) entre el transformador y el spark gap. Esto es importante, en especial cuando se utiliza en transformadores para lámparas de neón o transformadores con oscilaciones de alto voltaje frágiles.

Sin importar la configuración que se utiliza, el transformador de alto voltaje debe tener un auto limitante a la corriente de salida por medio de inductancias de fuga interna. Un transformador de alto voltaje con baja inductancia de fuga debe utilizar un limitador externo llamado ballast para limitar su corriente secundaria.

## **2.4 Leyes de funcionamiento de la Bobina Tesla.**

### **2.4.1 Ley de Faraday**

Wildi Theodore. (2007). *Máquinas Eléctricas y Sistemas de P Potencia, Sexta Edición.* (Pág. 29, 30.), enuncia:

En 1831, mientras realizaba sus experimentos, Michael Faraday hizo uno de los descubrimientos más importantes en electromagnetismo. Ahora conocida como ley de Faraday de inducción electromagnética,

reveló una relación fundamental entre el voltaje y el flujo en un circuito. La ley de Faraday establece que:

- Si el flujo que vincula un lazo o vuelta varía como una función de tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.
- El valor del voltaje inducido es proporcional a la velocidad del cambio de flujo.

Por definición, y de acuerdo con el sistema SI de unidades, cuando el flujo dentro de un lazo varía a razón de 1 weber por segundo, se induce un voltaje de 1V entre sus terminales. Por ello, si el flujo varía dentro de una bobina de N vueltas, el voltaje inducido esta dado por:

$$E = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

**Ecuación 2.1 Ecuación Ley de Faraday**

Donde:

E = voltaje inducido (V)

N= número de vueltas en la bobina

$\Delta\Phi$  = cambio de flujo dentro de la bobina (Wb)

$\Delta t$  = intervalo de tiempo durante el cual cambia el flujo (s)

La ley de Faraday de inducción electromagnética abrió la puerta a un sinnúmero de aplicaciones prácticas y estableció la base de operación de transformadores, generadores y motores de corriente alterna.

### **2.4.2 Ley de Lenz**

Antonio Hermosa Donate. (1999). Principios de electricidad y electrónica II. (Pág. 79.), enuncia:

Los efectos sobre inducción electromagnética obedecen a la denominada ley de Lenz, que dice:

“La fuerza electromotriz inducida se opone siempre a la causa que lo origina”

Como se sabe, el movimiento de acercamiento de un imán a una bobina hace que induzca una f.e.m. en la bobina, que puede dar lugar a una corriente si se cierra el circuito. Por otra parte se sabe que cuando por una bobina circula corriente se genera un campo magnético.

Si acercamos un imán a una bobina (con una carga en sus terminales para que pueda circular corriente), en esta se induce una corriente cuyo sentido de circulación hará que aparezca un campo magnético cuya polaridad se opondrá al acercamiento del imán, aparece una fuerza de repulsión (oposición a la causa). En cambio, en el movimiento de separación, la corriente inducida en la bobina es de sentido contrario al anterior y se produce una fuerza de atracción; se opone a que se separe el imán (oposición a la causa).

### **2.4.3 Ley de Gauss**

Javier Arellano Gutiérrez. (2009). Física para ciencia e ingeniería. (Pág. 673.) Séptima edición, enuncia:

Se puede considerar un procedimiento alternativo para calcular campos eléctricos. La ley de Gauss parte de que la fuerza electrostática que existe entre cargas exhibe un comportamiento cuadrático inverso. A

pesar de que se trata de una consecuencia de la ley de Coulomb, la ley de Gauss es más útil para calcular los campos eléctricos de distribución de cargas muy simétricas y permite hacer razonamientos cualitativos al tratar con problemas complicados.

La ley de Gauss es una ley general del campo eléctrico que se cumple en cualquier circunstancia, pero resulta de especial interés en algunos casos en los que la simetría del problema permite la resolución del mismo de modo especialmente simple.

## **2.5 Conceptos básicos**

### **2.5.1 Transformador**

Pedro Avelino Pérez. (2001). *Transformadores de Distribución (Teoría, Cálculo, Construcción y Pruebas)*, Segunda Edición. Editorial Reverté S.A. (Pág. 21.), enuncia:

“El transformador eléctrico es un aparato eléctrico que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica de uno o más circuitos, a uno o más circuitos de la misma frecuencia, usualmente aumentando o disminuyendo los valores de tensión eléctrica.

Un transformador puede recibir energía y devolverla a una tensión más elevada, en cuyo caso se le denomina transformador elevador, o puede devolverla en una tensión más baja, en cuyo caso es un transformador reductor. En el caso en el que la energía suministrada tenga la misma tensión que la recibida en el transformador, se dice



entonces, que este tiene una relación de transformación igual a la unidad.”

Se constituye de una bobina primaria para el ingreso de la energía eléctrica y de una bobina secundaria de donde se obtiene el voltaje de salida transformado, estas bobinas están devanadas sobre un núcleo de hierro dulce cerrado, y cada una de ellas están aisladas eléctricamente entre sí, la Bobina Tesla no tiene núcleo metálico.

## **2.5.2 Condensador**

El condensador es un dispositivo pasivo que se utiliza en la electricidad y en la electrónica, este dispositivo permite almacenar energía eléctrica sustentando un cierto campo eléctrico.

Está formado por dos superficies conductoras en forma de láminas o de placas, en situación de influencia total, es decir que sus líneas de campo eléctrico parten de una hacia otra.

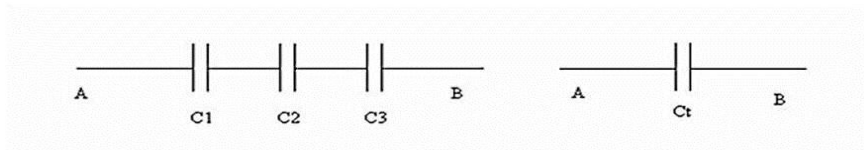
Se encuentran separadas por un material dieléctrico o por el vacío, estas placas están sometidas a diferencias de potencial, así adquieren una carga eléctrica pasiva en una capa y una carga eléctrica negativa en la otra, siendo la variación de la carga total nula.

### **2.5.2.1 Condensador en serie**

Los condensadores pueden acoplarse en serie y/o paralelo, de esta manera se obtiene una capacidad equivalente para el conjunto de capacitores, que se pueden calcular con expresiones simples.

Además se puede conocer las caídas de potencial que se generan y la carga almacenada en cada uno de los capacitores.

Para el acoplamiento en serie de los condensadores, se conecta en una misma secuencia uno tras otro los condensadores, lo que permite obtener una capacidad total entre el primer condensador y el último de la secuencia.



**Figura 1. Disposición de capacitores en serie**

#### **2.5.2.1.1 Capacidad total en serie**

La capacidad total en serie se calcula sumando las inversas de cada una de las capacidades y calculando la inversa del resultado.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_3}$$

**Ecuación 2.2 Capacidad total en serie**

#### **2.5.2.1.2 Tensión de capacitores en serie**

La suma de las caídas de tensión de cada capacitor da como resultado la tensión total aplicada entre los bornes A y B.

$$V_t = V_1 + V_2 + V_3$$

**Ecuación 2.3 Suma de caídas de tensión**

### 2.5.2.1.3 Carga de capacitores en serie

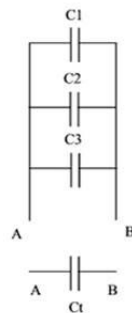
La carga de cada uno de los capacitores de una rama en serie es igual a la de los demás y es igual a la carga equivalente acumulada en toda la rama (entre A y B).

$$q_t = q_1 = q_2 = q_3$$

**Ecuación 2.4 Carga de capacitores en serie**

### 2.5.2.2 Condensador en paralelo

El acoplamiento en paralelo de los capacitores se realiza conectándolos a todos a los mismos dos bornes.



**Figura 2. Disposición de capacitores en paralelo**

#### 2.5.2.2.1 Capacidad total en paralelo

La capacidad total en paralelo se calcula sumando las capacidades de cada uno de los capacitores.

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3$$

**Ecuación 2.5 Capacidad total en paralelo.**

### **2.5.2.2.2 Tensión de capacitores en paralelo**

Al estar acoplados todos los capacitores por un mismo conductor, se encuentran todos a la misma diferencia de potencial, por lo tanto la tensión de cada uno es igual a la de otro e igual a la total.

$$V_t = V_1 = V_2 = V_3$$

**Ecuación 2.6 Tensión de condensadores en paralelo**

### **2.5.2.2.3 Carga de capacitores en paralelo**

La carga total es igual a suma de las cargas almacenadas en cada capacitor.

$$q_t = q_1 + q_2 + q_3$$

**Ecuación 2.7 Carga de capacitores en paralelo**

Y cada carga puede calcularse como  $q = CV$  de cada capacitor, pero en este caso  $V$  es la misma para todos, con lo que:

$$q_1 = C_1 * V_1$$

$$q_2 = C_2 * V_2$$

$$q_3 = C_3 * V_3$$

**Ecuación 2.8 Carga de capacitores**

De esta manera, al ser  $V$  la misma, puede verse que las cargas que almacena cada capacitor para una determinada tensión aplicada no son iguales si las capacidades son distintas.

### **2.5.3.2 Capacidad parásita**

La capacidad parásita es de carga positiva y depende del condensador usado, sea este cilíndrico, esférico o de placas paralelas. También depende el material dieléctrico que se encuentra entre las dos superficies que conforman el condensador. Entre más alta es la constante dieléctrica que conforma el condensador, mayor es la capacidad.

### **2.5.3 Inductor**

Los inductores, también conocidos como bobinas, son elementos pasivos y lineales que pueden almacenar y liberar energía eléctrica en base a fenómenos relacionados con los campos magnéticos.

La función de los inductores es bloquear las señales de corriente alterna de alta frecuencia en circuitos de radio, lo que dio origen con este término a que se haga referencia que los inductores se emplean en aplicaciones donde su valor es mínimo y admite grandes tolerancias.

En resumen, un inductor es un arrollamiento de conductor delgado, cuya inductancia es directamente proporcional al número de espiras y diámetro, así como a la permeabilidad del interior del arrollamiento; y es inversamente proporcional a la longitud de la bobina.

#### **2.5.3.1 Inductancia**

Entre más alta sea la bobina existirá mayor separación entre el bobinado primario y el toroide, con lo cual se puede utilizar.

Se debe guardar una proporción altura-diámetro entre 3 y 5 unidades.

La fórmula de Wheeler permite realizar el cálculo de la inductancia.

$$L_s = \frac{R^2 N^2}{2540(9R + 10H)}$$

**Ecuación 2.9 Fórmula de Wheeler**

Dónde:

*L<sub>s</sub>*: Inductancia del secundario (μH)

*R*: Radio del secundario (cm)

*H*: Altura del secundario (cm)

*N*: Número de vueltas

#### **2.5.4 Resistencia**

El termino conductancia describe el grado de eficiencia con el que un material permite el flujo de corriente a través del mismo. Entre más alta sea la conductancia del material o un metal, mayor será el flujo de corriente que lo atraviese. De igual manera entre más baja sea la conductancia del material o de un metal, menor será el flujo de corriente que lo atraviese.

Entonces los materiales que presenten baja conductancia, es decir, se oponen al paso del flujo de corriente, presentan mayor resistencia eléctrica.

La resistencia eléctrica, en sí, es la oposición al paso de la corriente eléctrica en un circuito cerrado, cualquier carga eléctrica

conectada a este circuito presentara una resistencia o será un obstáculo para que la corriente circule.

Para el cálculo de la resistencia de la bobina se utiliza la siguiente fórmula:

$$R = I \frac{\rho}{A}$$

**Ecuación 2.10 Fórmula de la Resistencia de la Bobina**

$l$ : es la longitud del conductor en metros

$\rho$ : es la resistividad eléctrica (también conocida como la resistencia eléctrica específica) de un conductor.

$A$ : es el área transversal, medida en milímetros cuadrados.

$\pi$ : es la constante matemática.

$d$ : es el diámetro nominal del alambre en milímetros

### 2.5.5 Terminal superior o toroide

**Figura 3. Toroide**



**Fuente: Autores**

El toroide de metal en un sistema de Bobina Tesla se encuentra en la parte superior de la bobina secundaria y es el punto último de los que la electricidad se desprende en el aire.

Esta forma es a menudo constituida con ductos de ventilación doblado en un círculo. Un toroide con un tamaño y posición adecuados brinda varias funciones útiles:

- El toroide añade capacidad al final de la bobina secundaria, sin un toroide la frecuencia de resonancia es muy elevada, y sensible a las perturbaciones.
- Cuando un toroide se añade a la parte superior de la bobina secundaria, su capacidad se suma.
- El toroide proporciona protección electrostática.

El toroide está conectado a la parte superior de la bobina secundaria, y su presencia reduce la presión del campo eléctrico en el devanado superior. El toroide ofrece un punto preciso de carga, para la propagación de descargas.

La bobina secundaria, no representa una fuente instantánea de la corriente de cualquier arco emitido desde la parte superior, incluso la propia capacidad de bobina secundaria se distribuye, por lo que sólo una cantidad limitada de esta energía almacenada está disponible para alimentar los arcos eléctricos o descargas.



Un toroide de mayor dimensión proporciona almacenamiento de energía en la parte superior de la bobina secundaria, los arcos a tierra son visiblemente más intensos cuando un toroide de gran tamaño se utiliza para proporcionar más descargas eléctricas.

El toroide forma una superficie lisa para retrasar el inicio de la descomposición del aire. Sin un toroide, el aire que rodea la parte superior de la bobina secundaria se ubica en una tensión bastante baja debido a su radio de curvatura aguda, esto daría lugar a descargas eléctricas cortas.

Cuando un toroide está instalado, el radio de curvatura de alto voltaje permite que el terminal alcance su máximo potencial antes de que el aire circundante se rompa, lo que asegura la máxima carga en el toroide antes de que el arco comience a propagarse desde su superficie.

La eficacia de un toroide depende del sistema en el que se opera, por lo general, los toroides pequeños con superficies rugosas producen muchos arcos cortos, por otra parte los toroides grandes y que poseen un acabado muy suave demuestran un mejor desempeño mediante la formación de un solo arco más largo.

El tamaño total del toroide determina la capacidad de la terminal, cuanto mayor sea el toroide la capacidad será mayor, lo que le permite almacenar más energía. Sin embargo, el pico de tensión disminuye a medida que el toroide se hace más grande.

El grosor del toroide determina el radio de curvatura, es la dimensión que influye en la tensión a la que el toroide se desprenda. Un toroide grueso requieren de una alta tensión para romper el aire, mientras que un toroide delgado va a estallar a una tensión mucho menor. Tres toroides colocados uno encima de otro añaden capacidad considerable a la bobina secundaria y la caída de su frecuencia de resonancia a un valor bajo, lo que permite maximizar la potencia entregada a la bobina primaria.

La capacidad del toroide se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_{top} = 2,8 \cdot \left(1,2781 - \frac{d_2}{d_1}\right) \cdot \sqrt{0,1217 \cdot d_2} \cdot (d_1 - d_2)$$

**Ecuación 2.11 Fórmula de la capacidad del Toroide**

Dónde:

$C_{top}$ : Capacidad del Toroide (pF)

$d_1$ : Diámetro exterior (cm)

$d_2$ : Diámetro de la sección transversal (cm)

### **2.5.6 Frecuencia de Resonancia**

La frecuencia de resonancia es la frecuencia típica de los cuerpos o sistemas que han llegado a su punto máximo de oscilación. La resonancia es un estado en el que la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva de un circuito se equilibran y son iguales.

Cada cuerpo o sistema posee una o más frecuencias características, cuando estos sistemas reciben un impulso o excitación a una de sus frecuencias, la vibración aumenta a su máximo. La vibración se produce porque las frecuencias que componen el sistema entran en resonancia.

En los sistemas eléctricos, la frecuencia de resonancia alcanza su punto máximo cuando existe transferencia de excitación o cuando este sistema se desestabiliza, por ejemplo, cuando se sintoniza una emisora en una radio, se está alterando la frecuencia natural y entra en resonancia con la frecuencia de emisión de otra radio frecuencia, así esta última frecuencia se amplifica y estabiliza el sistema.

La frecuencia de resonancia del secundario totalmente ensamblado se calcula con la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lx C}} =$$

**Ecuación 2.12 Fórmula de la Frecuencia de Resonancia**

Dónde:

fr: frecuencia de resonancia

L: inductancia medida

C: capacitancia

### 2.5.7 Bobina Primaria

Figura 4. Bobina Primaria



Fuente: Autores

La bobina primaria y el condensador forman el circuito principal, este circuito resonante en paralelo es responsable de la generación de las oscilaciones de radiofrecuencia en el sistema de Bobina de Tesla.

La bobina primaria es una espiral inclinada de  $1 / 4$  "(6.4mm) de tubería de cobre suave; el número de espiras eficaz, el espacio y la geometría son dependientes en el diseño de todo el sistema.

En particular, la frecuencia de resonancia y carga del circuito principal se ven influidos por la construcción de la bobina primaria.

Hay varios aspectos de la consideración de la bobina principal evaluados en la etapa de diseño.

### **2.5.7.1 Alta capacidad de corriente**

Las corrientes de pico en el circuito primario son altas, cuando se dispara el condensador se descarga en la bobina primaria. En una Bobina Tesla pequeña la corriente primaria máxima puede ser alrededor de 100 A, y en un gran sistema de la corriente de pico puede ser de varios miles de amperios, la corriente de pico real depende de la tensión primaria y la impedancia del circuito primario.

La Bobina Tesla es construida con un buen conductor eléctrico de baja resistividad, eso permite mantener una baja resistencia y reduce al mínimo las pérdidas ocasionadas por corrientes parasitas.

### **2.5.7.2 Efecto de la piel**

El efecto película o efecto piel es un efecto eléctrico un tanto llamativo, suele darse únicamente en corriente alterna y consiste en que la densidad de corriente se da por el exterior de un conductor eléctrico de alto voltaje.

El efecto pelicular es se lo aprecia en conductores de secciones grandes, en especial si estos conductores son macizos, aumentan el efecto en aquellos conductores con cubiertas metálicas o si se encuentran arrollados en un núcleo ferromagnético.

El efecto piel se da en la transmisión de corriente alterna, entre más elevado es el voltaje más visible es el efecto al atravesar el

conductor, la corriente al no atravesar el área de sección transversal del conductor lo hace por su periferia generando pérdidas; en conductores de alta tensión el conductor tiende a agujerarse ya que el centro no conduce corriente o su conducción es demasiado baja o casi despreciable.

Para evitar estos fallos se utiliza conductores tipo ACSR con alma de acero, el alma de acero no sirve para transmitir sino que mejora las propiedades mecánicas del conductor al que está vinculado.

Este efecto tiene más perjuicios cuando se trabaja con corrientes de alta frecuencia en comparación con los de baja frecuencia, debido a que el efecto pelicular tiende a inhibir la corriente que fluye por medio de cualquier conductor. El efecto pelicular se aplica en conductores eléctricos metálicos, la profundidad de penetración a través de la piel y el musculo producido por las altas frecuencias de una Bobina Tesla en promedio es de 100 casos o más.

El cuerpo humano no suele suministrar señales de shock como lo hace un circuito electrónico, las personas que no tiene conocimiento apropiado del uso de Bobinas Tesla son los que más riesgo corren cuando intentan tocar los streamers que se generan, es difícil que sientan los choques eléctricos y se vean los efectos inmediatamente, lo que se convierte en un riesgo latente.

### **2.5.7.3 Inductancia de la bobina primaria**

Para los cálculos se considera el valor de la bobina primaria igualando la frecuencia de resonancia del primario y del secundario, esta condición es la que permite el adecuado funcionamiento de la bobina.

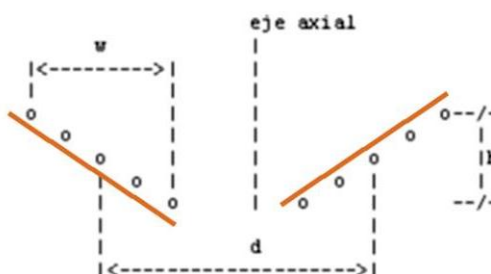
$$f_p = f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

**Ecuación 2.13 Fórmula de la bobina primaria**

$$L_1 = n^2 \cdot d \cdot \frac{1}{40,8 + 112 \frac{w}{d}}$$

**Ecuación 2.14 Fórmula de la inductancia bobina primaria**

**Figura 5. Ejes de cálculos del bobinado primario**



**Fuente: Autores**

Dónde:

$L_1$ : Inductancia de la espiral ( $\mu\text{H}$ )

$n$ : Número de vueltas

$d$ : Diámetro medio de la espiral (cm)

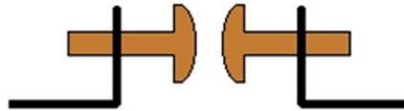
$w$ : Anchura de las espiras de un lado (cm)

### 2.5.8 Explosor

El explosor estático son dos electrodos con un espaciado milimétrico de aire, su función es actuar como un interruptor para las descargas del condensador de la bobina primaria, existen diversos tipos de explosores pero el explosor estático asegura un funcionamiento y calidad de servicio entre la conexión a la bobina primaria.

En la figura 6, se muestran el espaciamiento de aire que debe existir entre los dos electrodos, existen diversas configuraciones de explosores.

**Figura 6. Explosor o Spark Gap**



**Fuente: Autores**

### **2.5.8.1 Funcionamiento**

Cuando el voltaje entre los electrodos del explosor es lo suficientemente alto, vacío se ioniza en el aire y un efecto de avalancha se lleva a cabo. El aire dentro de la brecha se calienta a una temperatura muy alta y se convierte en un buen conductor de electricidad.

Se crea un gran flujo de corriente a través del aire ionizado el cual se mantiene caliente y permite el canal de conducción. Eventualmente, la corriente que fluye caerá lo suficiente para que el aire ingrese y el explosor se enfríe y deje de conducir.

El proceso de avalancha por el cual el explosor comienza a realizar lo que se conoce como disparos y la tensión necesaria para iniciar este proceso se le llama tensión de ruptura. (El voltaje de ruptura es proporcional a la distancia entre los electrodos.) Durante la conducción del arco entre los electrodos no es un conductor perfecto y posee una resistencia al flujo de la corriente que lo atraviesa. La distancia aproximada de separación se determina por la permeabilidad del aire y la



resistencia que este muestre al paso del voltaje, el valor en el cual el aire pierde sus propiedades y se vuelve conductor es de 3000V/mm.

La potencia disipada por la resistencia al arco se conoce como pérdida de la conducción y es la pérdida de poder en forma de calor que mantiene el arco caliente y conductor. La corriente necesaria para mantener el arco conductor es a menudo llamada la corriente de mantenimiento. Cuando el arco se enfría y deja de conducir se le conoce como extinción.

Al considerar cómo una chispa estática opera en un sistema de bobina de Tesla, los hechos más importantes son:

- Es transformado por la tensión lo suficientemente alta, que se mantiene debido al flujo de la corriente primaria.
- Se apaga cuando la corriente cae demasiado baja.

A diferencia de los explosores rotativos, los electrodos de un gap estático siempre están alineados. Ya que la diferencia de tensión estática provoca que se dispare en cualquier momento cuando la tensión sube por encima de la tensión de ruptura. Esta propiedad es buena por dos razones:

- Previene que la tensión primaria suba demasiado. El explosor estático limita efectivamente la tensión primaria por el disparo cuando su voltaje de ruptura se sobrepasa.

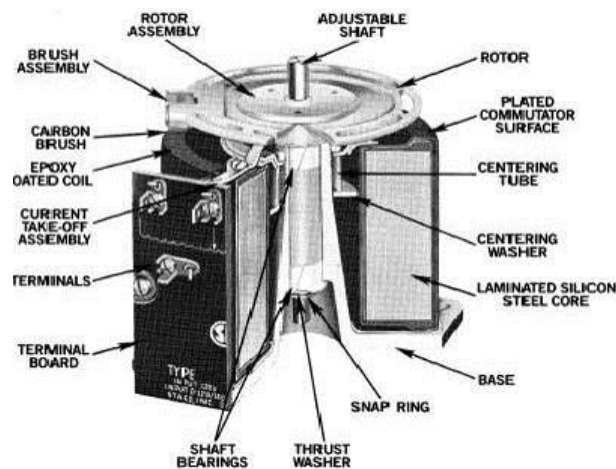
- Si el gap estático se establece correctamente, poca energía se desperdicia ya que la chispa sólo se activa cuando el condensador del tanque esté completamente cargado.

Una consecuencia de la tensión de disparo constante es que da lugar a tiempos irregulares de los disparos en los sistemas de CA suministrado. Las descargas gap estáticas tienden a acumularse en grupos alrededor de los picos de la corriente de alimentación, esto se debe a la recarga del condensador.

En la práctica la descarga de un sistema de CA en un gap estático es casi siempre irregular, y es muy difícil de configurar el sistema para disparar con regularidad durante varios ciclos, pero se puede hacer. En términos de rendimiento este disparo irregular no parece impedir el crecimiento de chispa a pesar de que da lugar a un factor de potencia pobre del sistema en su conjunto.

### 2.5.9 Variador de voltaje (variac)

Figura 7. Partes de un variac



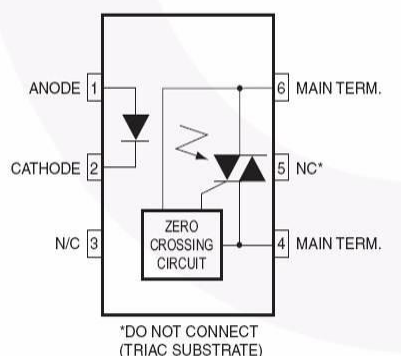
Fuente: [electronicapascual.com](http://electronicapascual.com)

El variac es un elemento útil en una Bobina Tesla, ya que permite variar la tensión de alimentación manualmente, de tal manera que se controla los niveles de energía e incrementar levemente en busca de comportamientos anormales.

Por la estructura y diseño de su núcleo de hierro y bobinados, los variacs suelen tolerar sobrecargas moderadas, incluso de dos veces la corriente nominal en cortos lapsos de tiempo sin presentar problemas, siempre y cuando el dispositivo se enfríe por completo antes de volver a operarlo.

### 2.5.10 Opto acoplador

Figura 8. Opto acoplador



Fuente: Datasheet

Peter Batian. (1996). *Electrotécnica (Cursos Formativos)*. Ediciones Akal, S.A. (Pág.183), enuncia:

“Llamados también elementos de acoplamiento optoelectrónicos, permiten transmitir señales entre dos circuitos de corriente separados galvánicamente entre sí. Entre los dos circuitos de corriente puede haber una gran diferencia de potencial de varios miles de voltios.

En el interior de un optoacoplador hay un diodo luminoso que actúa de emisor y, por ejemplo, un fototransistor que actúa de receptor. Para el transmisor se suele utilizar generalmente diodos GaAs (Diodo de Arseniuro de Galio) infrarrojos. Tiene un alto grado de rendimiento y son resistentes al envejecimiento. El transmisor y el receptor se encuentran ópticamente enfrentados. Van cerrados herméticamente a la luz del exterior”

Los opto acopladores convierten señales eléctricas en señales luminosas, las cuales son moduladas y nuevamente convertidas en señales eléctricas. La energía lumínica que incide sobre el foto receptor permite generar una tensión eléctrica a la salida del mismo.

Peter Batian. (1996). *Electrotecnia (Cursos Formativos)*. Ediciones Akal, S.A. (Pág.183), además afirma que:

“La relación de transmisión de corriente, sin embargo, indica la relación entre la corriente de salida del colector y la corriente del diodo. Los opto acopladores que tienen una relación de transmisión de corriente son muy delicados.”

El optoacoplador es la combinación de un diodo foto emisor y un receptor, entre los dos hay un camino en el que se transmite la luz, estos elementos están ubicados dentro de un encapsulado tipo DIP.

Este dispositivo se lo aplica en el diseño de la Bobina Tesla para separar la parte electrónica de la parte de potencia que corresponde al encendido y apagado de la Bobina Tesla.

### 2.5.11 Relé de estado sólido

Figura 9. Relé de estado solido



Fuente: Datasheet

Ramón PallásAreny. (1993). *Adquisición y Distribución de Señales*. MARCOMBO S.A. (Pág.341). Enuncia:

“Un relé de estado sólido (SSR, Solid StateRelay) es un conmutador electrónico basado en semiconductores que ofrece aislamiento eléctrico entre un circuito de control (entrada) y un circuito de carga (Salida) sin elementos móviles ni contactos. Realiza, pues, la misma función que un relé electromecánico, pero al no tener partes móviles su vida es más larga, no produce ruido acústico, ni desgaste. Dado que no hay bobina de control, produce, en principio, menos interferencias electromagnéticas. La potencia necesaria para su activación es también mucho menor, con modelos directamente compatibles con diversas familias lógicas TTL y CMOS.”

Para la Bobina Tesla es de gran ayuda en vista de que, este dispositivo, nos permite conmutar varias veces el apagado y encendido del transformador de entrada permitiendo visualizar el cambio del arco eléctrico por medio del controlador de audio.

## **2.6 Equipo NI ELVIS**

NI ELVIS II es el nuevo entorno de prototipo y diseño basado en LabVIEW, pensado para laboratorios de universidades de ciencias e ingeniería. NI ELVIS consta de 12 instrumentos virtuales basados en LabVIEW, un dispositivo de adquisición de por bus USB de alta velocidad y una estación de trabajo para banco de pruebas con una tarjeta de conexiones para prototipos (proto board).

Esta combinación proporciona el conjunto completo de instrumentos, listos para usar, que se puede encontrar en cualquier laboratorio docente. Como que está basado en LabVIEW y proporciona capacidades completas de adquisición de datos, el sistema es ideal para la realización de prácticas académicas adecuadas para un amplio rango de currículos docentes. Eso no quita que NI ELVIS II, gracias a su gran robustez, pueda servir también como un banco de pruebas multifuncional para uso en laboratorios industriales, donde se realicen pruebas diversas, ya sean de test o de calidad y respuesta del prototipo.

### **2.6.1 Arquitectura NI ELVIS**

NI ELVIS utiliza un software basado en LabVIEW, un sistema de adquisición basado en USB de alta velocidad, y una estación de trabajo personalizable para proporcionar funcionalidad a un amplio conjunto de instrumentos.

## 2.6.2 Estación de trabajo NI ELVIS

La estación de trabajo particular complementa adecuadamente la capacidad del sistema de adquisición USB para formar un sistema de laboratorio completo.

Las características principales de la estación de trabajo NI ELVIS son:

- Protección contra cortocircuitos y alta tensión
- Fuentes de alimentación variable
- Control manual o programático
- Generador de funciones
- Fuentes de +- 15 V y +5 V disponibles
- Entradas BNC para DMM y osciloscopio
- Tarjeta de prototipos (protoboard) desmontable, que se puede particularizar
- Asequible para estudiantes

## 2.6.3 Componentes de la Suite de Instrumentos Virtuales

La suite dispone de un amplio abanico de instrumentos virtuales. El software de cada instrumento está basado en LabVIEW y es completamente abierto, de forma que puede ser totalmente particularizado según las necesidades del usuario.

- Osciloscopio (disponible opción de osciloscopio de 100 MS/s con NI ELVIS II+)

- Generador de Funciones
- Multímetro Digital (DMM)
- Generador de Onda Arbitraria (ARB)
- Fuentes de Alimentación
- Analizador de Señal Dinámica (DSA)
- Analizador de Impedancias
- Analizador Bode
- Analizador Corriente/Tensión Dos Hilos
- Analizador Corriente/Tensión Tres Hilos

El equipo mencionado anteriormente no permite conocer los valores reales de las inductancias y capacitancias de las partes que integran la Bobina Tesla.

## **2.7 Seguridad y Precauciones**

El ajuste de frecuencia de resonancia de la bobina primaria debe ser aproximado o relativo al valor de la bobina secundaria, se recomienda utilizar las oscilaciones de baja potencia para iniciar, e ir incrementando la potencia levemente hasta tener control absoluto.

Para ajustar las frecuencias de las dos bobinas, en ocasiones es necesario utilizar una estimulación inicial (break out bump) para obtener las descargas de corona o streamers en el aire. La bobina entonces se ajustara a descargas mayores acorde a la potencia dada, de esta manera las frecuencias entre la bobina primaria y secundaria coincidirán.



Es recomendable el uso de un toroide al final de la bobina secundaria, por razones técnicas resulta más efectivo al momento de descargar los streamers ionizando el aire a su entorno.

Varios de los usos sencillos para la Bobina Tesla por su alta frecuencia y descarga de alto voltaje, permiten realizar pruebas de seguridad de diferentes tecnologías, practicas demostrativas de alto voltaje en clase y para efectos especiales en teatros, cines y conciertos; lo que se vuelve llamativo debido a que los streamers o descargas de alto voltaje se disparan en diferentes direcciones alrededor del toroide.

Por lo tanto es necesario tomar en cuenta las seguridades necesarias del caso, como es el uso de una Jaula de Faraday para evitar colapsos posteriores o incluso la muerte del operario y personas en el entorno.

El equipo con el cual se debe trabajar son botas de protección dieléctrica con punta de acero, ropa de material dieléctrico o tela Jean, tapones auditivos. Es recomendable trabajar entre dos personas como mínimo para realizar pruebas de alto voltaje y la Bobina Tesla debe ser operada solo bajo supervisión de un docente.

## **2.8 Jaula de Faraday**

Una Jaula de Faraday es una caja metálica que protege de los campos eléctricos estáticos, su nombre es en honor al físico Michael Faraday, que construyó una en 1836. Se emplean para proteger de

descargas eléctricas, ya que en su interior el campo eléctrico es nulo o contrario.

Raymond A. Serway, Jerry S. Faughn. (2007). *Física para Bachillerato General. Volumen 2, Sexta Edición. Thomson Editores S.A.* (Pág. 97). Enuncia:

“La Jaula de Faraday se puede considerar como una superficie conductora que rodea un espacio hueco e impide las perturbaciones producidas por campos eléctricos externos.

Faraday demostró experimentalmente la protección que brinda la protección que brinda una cubierta metálica, realizó una prueba sosteniendo en sus manos un electroscopio y se colocó en el interior de una jaula metálica, que su asistente electrizó a gran voltaje, a pesar de que la superficie de la jaula no era continua constituyó un blindaje electrostático muy eficaz de manera que Faraday no detectó deflexión alguna en las laminillas del electroscopio ni tampoco descarga eléctrica alguna.

La Jaula de Faraday representa una condición de seguridad importante para alguien que se encuentra en una tormenta o cuando se necesita trabajar con electricidad de alto voltaje.”

La Jaula de Faraday se basa en el principio de funcionamiento de un conductor en equilibrio electrostático, es decir, cuando se coloca una caja o una jaula metálica en presencia de un campo eléctrico, todas las

cargas positivas se quedan en la red que alimenta el circuito, y los electrones, que usualmente quedan libres, empiezan a moverse.

Al ser la carga del electrón negativa, los electrones se mueven en sentido opuesto al campo eléctrico y a pesar de que la carga total del conductos es cero, uno de los lados de la caja en la que se acumulan los electrones, queda con excesos de carga negativa; entre tanto el otro lado tiende a quedar con un defecto de electrones o con carga positiva.

Este desplazamiento de cargas al interior de la caja crea un campo de sentido contrario al campo externo, dando como resultado un campo eléctrico nulo en el interior”.

## **2.9 Descargas Aéreas**

Al realizar la transferencia de energía entre la bobina secundaria y toroide a través de la ionización del aire, se generan descargas eléctricas sumamente altas, que ocasionan luz, calor y sonido. Estas corrientes de descarga deben tener rápidas oscilaciones de carga entre la terminal superior o toroide y el aire circundante en la misma, esto quiere decir que debe de tener un proceso de carga y descarga de energía semejante a un condensador.

El tipo de corriente que permite aumentar la carga en un condensador se llama corriente de desplazamiento, al generar este tipo de corrientes de desplazamiento se crean pulsos de carga eléctrica que se transfieren de manera inmediata entre el toroide y las regiones de aire

ionizadas, que también se conocen como regiones de carga espacial, que facilitan la descarga de los streamers los cuales suministran el tiempo necesario para la carga y descarga del condensador en el circuito primario.

La transferencia de energía que propiciamos es repetitiva y cíclica, mucha de la energía que se desprende del circuito primario pasa al circuito secundario, entre mayor sea el acoplamiento magnético y los bobinados, menor es el tiempo de transferencia para completar los ciclos.

Acorde como la energía crece en el circuito oscilante del secundario, la carga de voltaje RF crece más rápidamente en el toroide lo que genera una ruptura dieléctrica en el aire, propiciando una descarga de corona visible comúnmente llamada rayo.

Entre más grande es el voltaje de salida del toroide hacia el aire circundante, más rápido y más altos serán los pulsos de corriente de desplazamiento que ionizaran y calientan el aire en su entorno. Así obtendremos la visualización de un haz de luz de plasma caliente, el cual se proyecta al exterior en forma de rayo.

Este rayo es más caliente que la descarga de corona y es más conductor. Tiene propiedades muy parecidas a la de un arco eléctrico, está a la vez se divide en miles de descargas mucho más delgadas y muy parecidas a los cabellos humanos, los cuales se denominaremos streamers.

Los streamers son como una especie de niebla espectral de color azul con fibras muy luminosas, estas son las que transfieren la descarga desde el toroide hacia la región espacial.

Las corrientes de desplazamiento de los streamers son las que mantienen caliente e ionizado la región espacial, lo que la vuelve sumamente peligrosas.

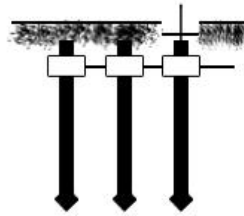
El proceso de transferencia de energía entre el circuito primario y el secundario es a través del explosor o gap, lo cual ocurre repetidamente en un proceso de 50/500 veces por segundo lo que no permite una visualización de las pausas, sino que se observa como un haz de luz constante que siempre permanece caliente ya que no da la oportunidad de enfriarse totalmente en los pulsos de carga.

De esta manera los pulsos sucesivos pueden provocar rastros calientes dejados por el pulso predecesor, este crecimiento consecutivo alarga la descarga de cada pulso de la descarga de energía siguiente.

Esta constante de pulsos permite que las descargas de energía incrementen notablemente, hasta que se equilibre las frecuencias entre las bobinas, permitiendo una descarga cada vez mayor a través del toroide, lo que permite denotar un rayo de luz cada vez más grande.

## 2.10 Sistema de puesta a tierra

Figura 10: Puesta a Tierra.



Fuente: Autores

La Puesta a tierra es una conexión eléctrica directa de todas las partes metálicas de una instalación, sea domiciliaria o industrial a un electrodo de Copperweld enterrado.

Con el aterramiento de electrodos en el suelo, se consigue que el conjunto de instalaciones mitigue las diferencias de potencial peligrosas.

### 2.10.1 Composición de una instalación de puesta a tierra

Para realizar una puesta a tierra se necesita:

- El terreno
- Tomas de tierra
- Conductor de tierra o línea de enlace con el electrodo de puesta a tierra
- Borne principal de tierra
- Conductor de protección
- Conductor de unión equipotencial principal
- Conductor de equipotencial suplementaria
- Masa

- Elemento conductor
- Canalización metálica principal de agua

El electrodo de la puesta a tierra se dimensiona tomando en cuenta el valor de resistencia de tierra, cuidando que no sea superior al valor especificado para la puesta, el valor de la resistencia de tierra debe ser tal que cualquier masa no dé lugar a tensiones de contacto superiores a los siguientes valores:

- 24 V en local o emplazamiento conductor
- 50 V en los demás casos

Para evitar que las tensiones de contacto sean superiores a estos valores en las condiciones de instalación, se debe asegurar la eliminación de la falta mediante dispositivos de corte adecuados a la corriente de servicio.

La resistencia del electrodo dependerá de la dimensión que tiene, de la forma y de la resistividad que presenta el terreno en el que se cimentará, la resistividad tiende a variar frecuentemente de un punto a otro del terreno, y también varía con la profundidad.

En la Cuadro 1 se muestra una guía con los valores de resistividad para cada cierto número de terrenos.

**Cuadro 1. Valores orientativos de resistividad del terreno**

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>RESISTIVIDAD EN OHMIOS - METRO</b>
Pantanosos	Menor de 30
Limo	20 a 100
Humos	10 a 150
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	
Arena silíceas	50 a 500
Suelo pedregoso cubierto de césped	200 a 3000
	300 a 5000
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000

**Fuente: Puesta a tierra de las instalaciones, Unidad Didáctica 10, Pág. 8**

Para obtener una aproximación de la resistencia a tierra, los cálculos pueden efectuarse usando valores medios que encontramos en la Cuadro2.

**Cuadro 2. Valores medios aproximados de la resistividad del terreno**

<b>NATURALEZA DEL TERRENO</b>	<b>VALOR MEDIO DE LA RESISTIVIDAD EN OHMIOS - METRO</b>
Terrenos cultivables y fértiles, terraplenes compactos y húmedos	50
Terrenos cultivables poco fértiles y otros terraplenes	500
Suelos pedregosos desnudos, arenas secas permeables	3000

**Fuente: Puesta a tierra de las instalaciones, Unidad Didáctica 10, Pág. 8**



Los cálculos efectuados con estos valores solo permiten obtener un valor aproximado de la resistencia a tierra del electrodo, la medida de la resistencia del electrodo puede estimar el valor medio local de la resistividad del terreno que se encuentra en la Cuadro 3.

**Cuadro3. Fórmula para estudiar la resistencia de la tierra en función de la resistividad del terreno y las características del terreno**

<b>ELECTRODO</b>	<b>RESISTENCIA DE LA TIERRA EN OHMS</b>
Placa enterrada	$R = 0,8 \frac{\rho}{P}$
Pica vertical	$R = \frac{\rho}{L}$
Conductor enterrado verticalmente	$R = 2 \frac{\rho}{L}$

**Fuente: Puesta a tierra de las instalaciones, Unidad Didáctica 10, Pág. 8**

**Dónde:**

$\rho$ = Resistividad del terreno (Ohmios - metro)

P= Perímetro de la placa (metros)

L= Longitud de la pica o conductor (metros)

Para la protección de la Jaula de Faraday se aplicó una malla de puesta a tierra sencilla, que consiste en tres electrodos o varillas de Copperweld de 1,80 m. Las terminaciones de los electrodos se conectan al conductor desnudo que se culmina en la Jaula de Faraday.

En el aterramiento se incluyó el polvo químico GEM (Ground Enhancement Material), que es un mejorador de tierra mismo que permite

reducir la resistencia, además de una capa de barro negro con agua, sal en grano y una capa de carbón.

## **2.11 Formas de medición de alto voltaje**

### **2.11.1 Transformador de Potencial**

Su principal función es transformar la alta tensión en un valor manejable. El primario del transformador se conecta en paralelo al circuito por controlar y el secundario en paralelo con las bobinas de tensión de los aparatos de medición y protección.

### **2.11.2 Medición de Campo Eléctrico**

Un campo eléctrico es un campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas (la causa del flujo eléctrico) y se mide en Voltios por metro (V/m). El flujo decrece con la distancia a la fuente que provoca el campo. Este campo eléctrico se puede medir con el instrumento « Medidor de campo eléctrico o electromagnético» mismo que permite medir altos voltajes y altas frecuencias sin necesidad de ser conectado.

## **2.12 Normas para pruebas de aislamientos de alto voltaje**

En <https://www.coelce.com.br>, Manual de Especificación Técnica: “aisladores de porcelana, vidrio y poliméricos para redes de media tensión”, (Pág. 5), se enuncia:

“

Para el diseño, fabricación y pruebas, tanto los aisladores como sus componentes deberán cumplir íntegramente con las prescripciones de la última versión de las normas ANSI C29. No obstante, aquellos requerimientos que no sean cubiertos por las normas ANSI C29 podrán ser abordados por normas IEC equivalentes. En particular, para el ensayo de características específicas a materiales poliméricos se permite el uso de las normas IEC 61109 e IEC 61952”.

### 2.13 Glosario de términos básicos

**Ablación.-** Es el deterioro progresivo de una materia como consecuencia del uso o del roce.

**Capacidad eléctrica.-** Propiedad que tienen los capacitores de almacenar cargas eléctricas.

**Capacitor o condensador.-** Componente compuesto por dos placas metálicas que permite el almacenamiento de cargas eléctricas.

**Diodo GaAs.-** Es un diodo de alta frecuencia de un material semiconductor que muestra un dopado tipo N y posee una banda de energía vacía elevada.

**E-gradiente.-** Intensidad de aumento o disminución de una magnitud variable.

**Factor ripple o rizado.-** Es la componente residual que queda después de haber rectificado una señal de corriente continua.

**F.E.M.-** Es toda fuente que permite mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado.

**Frecuencia.-** Es el número de oscilaciones o ciclos que ocurren en un segundo.

**Frecuencia natural.-** La frecuencia a la que un objeto elástico oscila libremente es llamada su frecuencia natural de oscilación.

**Frecuencia de Resonancia.-** Es el instante en el cual dos circuitos RLC oscilan a la misma frecuencia.

**GEM.-** (Ground Enhancement Material), es un mejorador de tierra mismo que permite reducir la resistencia del terreno para puestas a tierra.

**Inductancia eléctrica.-** Propiedad de una bobina que consiste en la formación de un campo magnético y en el almacenamiento de energía electromagnética cuando circula por ella una corriente eléctrica.

**Inductor o bobina.-** Es un componente pasivos que por auto inductancia es capaz de almacenar energía en forma de campo magnético.

**Impedancia.-** La impedancia es la resistencia en ohms de la bobina que convierte la electricidad en pequeñas variaciones de onda. A menor impedancia, mayor sonido, pero con menor calidad, a mayor impedancia hay menor sonido, pero de mayor calidad, esto no es una desventaja solo indica que se requerirá una mayor amplificación.

**Oscilador.-** Es un circuito electrónico capaz de generar corrientes alternas de cualquier frecuencia.

**Oscilación.-** Es la variación, perturbación o fluctuación en determinados lapsos de tiempo que se dan en un sistema o medio.

**Ozono.-** Es una sustancia compuesta por tres átomos de oxígeno (O<sub>3</sub>), se forma al disociarse dos átomos que componen el gas de oxígeno.

**Resonancia.-** Es un fenómeno que se produce en circuitos eléctricos compuestos por elementos reactivos como bobinas y condensadores, al ser recorridos por corrientes alternas de alta frecuencia.

**Radiofrecuencia (RF).-** Se le llama radiofrecuencia a las corrientes alternas con frecuencias mayores de los 50,000 Hz.

**Resistividad.-** La resistividad es la resistencia específica de cada material para oponerse al paso de una corriente eléctrica.

**Self-healing.** - Auto curación.

**Spark-gap.-** También conocido como explosor, el cual funciona como un interruptor de alto voltaje.

**Streamers.-** Se le conoce como serpentina y es un tipo de descarga eléctrica.

## **CAPÍTULO III**

### **Metodología de la Investigación**

#### ***3.1 Tipo de Investigación***

##### ***3.1.1 Investigación Tecnológica***

El presente proyecto es de carácter tecnológico, porque se encuentra relacionado directamente con el control y generación de un campo magnético, por medio de componentes eléctricos y electrónicos en estado activo.

Para lograr que esta bobina sea operativa se debe conocer el funcionamiento básico de los componentes que forman parte de este proyecto, en vista de que cada uno de ellos cumple con una función determinada para que en conjunto logre desprender el arco eléctrico que se debe obtener a la salida.

Como se sabe los componentes utilizados son eléctricos, los cuales de una u otra forma se componen de partes que funcionan gracias a los avances tecnológicos que existen en el medio, aunque la teoría ya es antigua y los principios sean básicos, no impide que sea necesariamente tecnológico la necesidad de ampliar dicha teoría a tal punto de lograr afianzar los principios ya conocidos con la bobina que se está implementando.

### ***3.1.2 Investigación Documental***

Este trabajo fue apoyado por la investigación documental que sirvió como punto de partida para iniciar la teoría sobre una Bobina Tesla, que consiste en generación y control de alto voltaje por ser este proyecto un transformador elevador de tipo resonante.

La información bibliográfica permitió tener acceso a los avances tecnológicos en el campo de la electricidad, dirigidos a temas sobre generación y control de alto voltaje, mediante esta información se redactó el marco teórico.

### ***3.1.3 Investigación Aplicada***

La Investigación fue aplicada en virtud a los conocimientos adquiridos para satisfacer un interés utilitario, que fue planteado para dar inicio al laboratorio de alto voltaje.

Cabe señalar que la investigación aplicada para el presente trabajo se fundamentó en el prototipo existente de una Bobina Tesla, con el fin de utilizarlos en una situación práctica en el laboratorio de alto voltaje.

### ***3.1.4 Investigación de Campo***

La investigación se centra en la Universidad Técnica del Norte, especialidad de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico;

mediante la utilización de equipos eléctricos e instrumentación adecuada para medir este tipo de parámetros.

Las mediciones son efectuadas en el rango de baja tensión suministrado por la red eléctrica residencial y alta tensión generado por el equipo.

Este periodo de prueba es necesario para recolectar los datos suficientes y realizar las tabulaciones respectivas, además de corregir posibles fallos que se presenten a lo largo de estas pruebas.

## **3.2 Métodos**

### ***3.2.1 Método Inductivo***

Este método permitió conocer una serie de hechos y acontecimientos de carácter particular, los mismos que luego de ser estudiados y analizados permitieron extraer conclusiones de carácter general, que sirvieron como sustento de la investigación.

Es decir, comenzar con investigaciones de prototipos diseñados para poder sustentar el trabajo y acoplarlo a diversas necesidades, permitiendo tener el control de la bobina con los valores establecidos en los cálculos.



Al momento de desarrollar la bobina se toma en cuenta el espacio físico en el cual se ubicó y las seguridades correspondientes tanto para el operador de la bobina como para el ambiente en que se encuentra.

### **3.2.2 Método Deductivo**

Este método ayudo con teorías, hechos y verdades previamente establecidas como principios generales para llegar a particularizar los elementos constitutivos de la investigación, tendiente a diseñar y construir la Bobina Tesla.

Revisando información necesaria, se definieron varios parámetros a considerar de acuerdo a la necesidad, entre ellos los errores cometidos en varios proyectos similares, los cuales se pudo corregir en la bobina, permitiendo el funcionamiento adecuado y óptimo de la misma.

Adicional a esto, el respaldo teórico y la recolección de datos de las primeras pruebas realizadas permitió corregir el diseño y funcionalidad de la bobina, lo que garantiza el uso adecuado y brinda las seguridades pertinentes.

### **3.2.3 Recolección de la Información**

Este método es importante para el desarrollo de este trabajo ya que partió de conocimientos adquiridos en el transcurso de la preparación académica y de la información recolectada en el campus de la Universidad, los cuales influyen en el desarrollo de esta propuesta.

El soporte y experiencia de prácticas, giras realizadas en el periodo académico, fue pieza fundamental para el desarrollo de este proyecto, además el apoyo y participación de docentes del área.

Otro aspecto que cabe considerar es la participación de estudiantes que empiezan su vida académica en la especialidad, pudiendo realizar prácticas en alto voltaje.

#### **3.2.4 Método Sintético**

Mediante una correcta aplicación de este método se puede obtener un resultado lógico que unifique los parámetros que se adquiriera en el desarrollo de este proyecto.

Es así que los resultados obtenidos del funcionamiento de la bobina permitieron desarrollar el sustento teórico apto para que los estudiantes puedan realizar las prácticas correspondientes con las seguridades del caso y en el ambiente adecuado.

### **3.3 Técnicas e Instrumentos**

Mediante una charla explicativa se dio a conocer a los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico, sobre el funcionamiento de la Bobina Tesla y las posibles aplicaciones.

## **CAPÍTULO IV**

### **Propuesta: Proceso y Resultados**

#### **4.1 Tema**

“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA BOBINA TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE.”

#### **4.2 Diagnóstico**

La Bobina Tesla que se presenta, está construida con componentes nuevos, además se tuvo que elaborar un condensador por medio de la unión serie - paralelo para que soporte los niveles de voltaje a ser sometido.

La Bobina Tesla fue ubicada dentro de una jaula conocida como Jaula de Faraday, que se construyó exclusivamente para este proyecto, la cual es de fácil reubicación, permitiendo movilizarla y reajustarla acorde al espacio físico en el que se ubicó la Bobina Tesla.

Cuenta con una puesta a tierra que permite la fuga de corrientes parásitas resultantes de los streamers al momento de descarga.

Es necesario considerar que los componentes al ser sometidos al funcionamiento de la bobina tienden a perder sus propiedades y por ende a deteriorarse, pudiendo producir fallas en la etapa de pruebas.

Es recomendable realizar un mantenimiento preventivo antes de utilizarla, debe incluir una limpieza cuidadosa de los dispositivos eléctricos y electrónicos, en cuanto al condensador es necesario descargarlo a tierra completamente para evitar choques eléctricos a causa de diferenciales de potencia residuales que pueden quedar en los mismos.

El correcto desempeño de la bobina, irá acorde al modo de usarla; al ser un equipo de alto voltaje y altas frecuencias es indispensable optar por seguridades extras al momento de encenderla, lo cual permitirá que la misma funcione óptimamente y sin daños al operador o a la infraestructura en la que se encuentra situada.

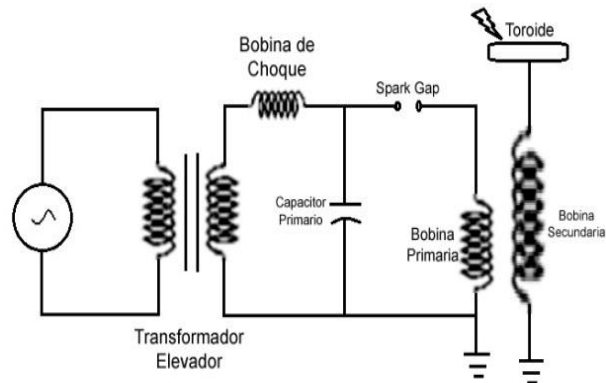
### **4.3 Desarrollo Temático - Específico del Tema**

#### **4.3.1 Funcionamiento de la Bobina Tesla**

Se puede observar como la energía es utilizada para cargar el condensador de alto voltaje en la figura 11, los electrodos del gap o explosor están sometidos a altos voltajes y variaciones de frecuencia permitiendo que el aire a su alrededor se ionice y se produzca el denominado efecto avalancha, convirtiendo al aire en un conductor eléctrico.

La energía que se almacena en el condensador se descarga en forma de oscilación de alta frecuencia a través de la bobina primaria, la cual tiene la frecuencia de resonancia aproximadamente igual a la del circuito secundario, con lo que se genera un voltaje muy elevado en la descarga a través del toroide.

**Figura 11: Diagrama de una Bobina Tesla**

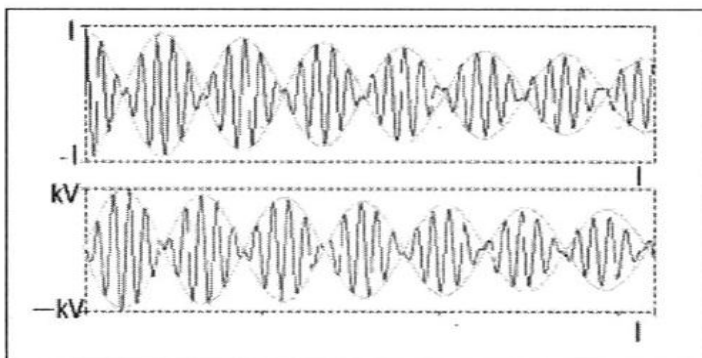


**Fuente: Autores**

Las oscilaciones aumentan cuando la transferencia de energía se propicia de un circuito a otro, lo que permite disminuir el tiempo en el que se produce las pérdidas de energía a través de la brecha de aire y a causa de la radiación por la descarga de arcos eléctricos en el toroide, esto suele producir disminuciones en los niveles óptimos de energía de los circuitos acoplados en la Bobina Tesla.

Las oscilaciones de corriente de la bobina primaria y el voltaje en el secundario se exponen en la figura 12, determinando los ciclos en el que se muestra que el voltaje de salida tienen una oscilación de alta frecuencia la cual es modulada por otra de baja frecuencia.

**Figura 12: Forma de onda de corriente primaria y voltaje secundario**

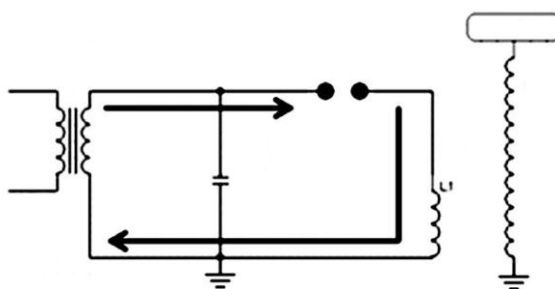


**Fuente: Diseño y Construcción de una Bobina Tesla; energía y computación, volumen X, No. 2, Edición No. 18, 2001; Pág. 2**

El proceso de diseño y construcción siempre está en busca del diseño óptimo para el correcto funcionamiento del circuito primario de la Bobina Tesla, el promedio de la frecuencia calculada a la que debe funcionar es de 44kHz, dicha frecuencia que es capaz de ser escuchada por el oído humano, frecuencias mucho mayores a estas generan sonidos más claros; por lo que es preferible que entre sus bobinados exista al menos una frecuencia de 100 kHz.

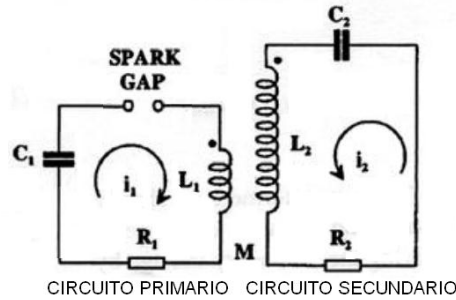
#### **4.3.2 Cálculo – Diseño de los Elementos**

**Figura 13: Recorrido del voltaje por el circuito.**



**Fuente: Autores**

**Figura 14: Recorrido de la corriente.**



Fuente: Autores

#### 4.3.2.1 Transformador

Para iniciar el proceso de construcción de la Bobina Tesla, se debe elegir una fuente de tensión capaz brindar el voltaje necesario a su salida para el buen funcionamiento. En este caso se utiliza un transformador para tubos de neón marca POLY-LOK, con una potencia de 250W, voltaje de entrada a 120v, corriente de 3.8Amp y voltaje de salida a 15kV.

Con los valores de la fuente se calcula la impedancia de la siguiente forma:

$$V = I \cdot R$$

**Ecuación 4.1: Fórmula Voltaje**

$$Z = R + X$$

**Ecuación 4.2: Fórmula Impedancia**

En donde:

Z: Impedancia

R: Resistencia

X: Reactancia

Dónde:

$$X = X_L - X_C$$

**Ecuación 4.3: Fórmula Reactancia**

XL: Reactancia inductiva

XC: Reactancia capacitiva

Se obtuvo los valores de la resistencia e inductancia mediante medición con el equipo conocido como NI ELVIS (plataforma de prototipos y diseño educacional), las medidas tomadas son las siguientes:

$$L = 31.03\text{mH}$$

En el transformador se encuentra carga netamente inductiva la inductancia capacitiva se desprecia, obteniendo:

$$X = X_L$$

$$X_L = 2\pi \cdot fL$$

$$X_L = 2\pi * 60\text{Hz} * 31,03\text{mH} * 10^3$$

$$X_L = 11.70\Omega$$

Reemplazando valores:

$$Z = \frac{V}{I} + X_L$$



$$Z = \frac{120V}{3.8A} + 11.70\Omega j$$

En coordenadas rectangulares  $Z = 31.51\Omega + 11.70\Omega j$

En coordenadas polares:  $Z = 33.67\Omega \angle 20.37^\circ$

#### **4.3.2.2 Bobina Secundaria**

Se utilizó un tubo PVC con un diámetro exterior de 4 pulgadas, se hizo girar en un torno lentamente mientras se realizaba el arrollamiento secundario.

Para la bobina secundaria se utilizó conductor calibre No. 22 esmaltado que tiene un diámetro de 0.6438mm y un área transversal de 0.326mm.

El número final real de espiras al término de la construcción es de 866 con una altura de 0,65m que nos lleva a la relación  $H/D = 65\text{cm} / 0.064\text{cm} = 1015$  vueltas que es semejante al valor real obtenido.

Para el cálculo de la inductancia se utilizó la fórmula de Wheeler:

$$L_s = \frac{R^2 N^2}{2540x(9R + 10H)}$$

**Ecuación 4.4: Fórmula de Wheeler**

Dónde:

$L_s$ : Inductancia del secundario (mH)

$R$ : Radio del secundario (cm)

$H$ : Altura del secundario (cm)

$N$ : Número de vueltas

Reemplazando:

$$D = 4\text{pulg} \left| \frac{2.54\text{cm}}{1\text{pulg}} \right| = 10.16\text{cm}$$

$$R = \frac{D}{2} = \frac{10.16\text{cm}}{2} = 5.08\text{cm}$$

$$L_s = \frac{(5.08)^2 866^2}{2540 \times (9(5.08) + 10(66))}$$

$$L_s = \frac{19353664.52}{2540 \times (45.72 + 660)}$$

$$L_s = \frac{19353664.52}{1792528.8}$$

$$L_s = 10.79 \text{ mH}$$

Para poder obtener el valor real de la inductancia de la bobina secundaria se utilizó el equipo ELVIS, obteniendo:

$$L = 13\text{mH}$$

Lo cual indica que con la fórmula empírica de Wheeler, se obtuvo un valor aproximado al obtenido mediante el equipo.

La cantidad de cable necesario para la bobina secundaria es:

$$l_s = 2\pi RN$$

**Ecuación 4.6: Fórmula de Longitud del conductor.**

$$l_s = 2\pi \times 0.03219 \times 866$$

$$l_s = 163.23m$$

Y por tanto la resistencia de la bobina será:

$$R = \frac{l \cdot \rho}{A}$$

**Ecuación 4.7: Fórmula de Resistencia de la bobina**

*l*: es la longitud del conductor en metros.

*ρ*: es la resistividad eléctrica (también conocida como la resistencia eléctrica específica) de un conductor.

*A*: es el área transversal, medida en milímetros cuadrados.

*π*: es la constante matemática.

*d*: es el diámetro nominal del alambre en milímetros.

$$R_s = 0.17 \frac{163.23}{0.326} = 85\Omega$$

De la misma forma se obtuvo el valor de la resistencia de la bobina secundaria mediante medición con multímetro digital obteniendo un valor de:

$$R = 80\Omega$$

El cual es un valor semejante al obtenido mediante fórmulas.

#### **4.3.2.3 Condensador**

El condensador utilizado para esta bobina se obtuvo mediante la unión serie y paralelo de treinta condensadores de 100nf a 16kV.

Se dispuso los condensadores en tres series de 10 condensadores puestas en paralelo dando un valor de  $C = 29.14nf$ , que es medido mediante un multímetro digital y se verifico mediante el equipo NI ELVIS.

Para determinar la frecuencia de resonancia del circuito primario se utiliza la siguiente fórmula:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lx C}}$$

**Ecuación 4.9: Fórmula de la frecuencia de resonancia**

En donde:

fr: frecuencia de resonancia

L: inductancia medida de la bobina secundaria

C: Capacitancia medida

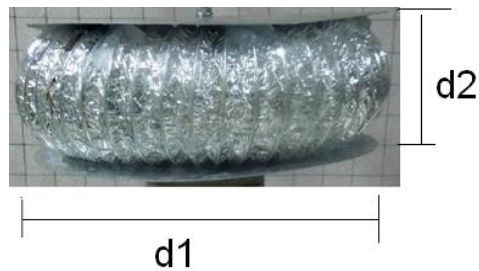
Reemplazando:

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{12.98 \times 10^{-3} \times 29.14 \times 10^{-9}}} =$$

$$fr = 81.83 \text{ KHz}$$

#### 4.3.2.4 Toroide

Figura 15: Toroide



Fuente: Autores

La capacidad se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_{top} = 2,8 * \left(1,2781 - \frac{d_2}{d_1}\right) * \sqrt{0,1217 * d_2 * (d_1 - d_2)}$$

Ecuación 4.8: Fórmula de la capacidad del toroide

Dónde:

$C_{top}$ : Capacidad del Toroide [pF]

$d_1$ : Diámetro exterior [cm]

$d_2$ : Diámetro de la sección transversal [cm]

$$C_{top} = 2.8 \left(1.2781 \frac{13.92 \text{ cm}}{10.16 \text{ cm}}\right) \times \sqrt{0.1217 \times 10.16 \times (13.92 \text{ cm} - 10.16 \text{ cm})} =$$

$$C_{top} = 2.8(1.75) \times \sqrt{4.659} =$$

$$C_{top} = 4.9 \times 2.15 = 10.57 \mu\text{F}$$

#### 4.3.2.5 Bobina Primaria

La forma que se utiliza para la bobina primaria es una espiral cónica invertida, lo cual aumenta el valor de acoplamiento entre en primario y el secundario.

La inductancia de la espiral se calcula:

$$L_1 = n^2 \cdot d \cdot \frac{1}{40,8 + 112 \frac{w}{d}}$$

**Ecuación 4.12: Fórmula de la inductancia de la espiral**

Dónde:

$L_1$ : Inductancia de la espiral ( $\mu\text{H}$ )

$N$ : Número de vueltas

$d$ : Diámetro medio de la espiral (cm)

$w$ : Anchura de las espiras de un lado (cm)

Para evitar el riesgo de arcos eléctricos no deseados, entre la bobina primaria y el toroide, se necesita una separación de 50 cm, ya que el arco eléctrico rompe el aire a 3000V/mm.

Reemplazando:

$$L_1 = 10^2 \times 24.16 \times \frac{1}{40.8 + 112 \frac{13.92}{24.16}}$$

$$L1 = 10^2 \times 24.16 \times \frac{1}{40.8 + 64.52}$$

$$L1 = 10^2 \times 24.16 \times 9.43 \times 10^{-3}$$

$$L1 = 22.93 \mu H$$

Se obtiene el valor de la inductancia de la bobina primaria con el equipo ELVIS, el cual es:

$$L = 0.0307 \text{mH}$$

**Transformando:**

$$L1 = 30.7 \mu H$$

Se verifica que el valor calculado es similar al obtenido con el equipo. Entonces la frecuencia de resonancia del circuito secundario será:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C_{top}}}$$

**Ecuación 4.9: Fórmula de la frecuencia de resonancia.**

En donde:

fr: frecuencia de resonancia

L: inductancia medida

Ctop: capacitancia calculada del toroide.

**Reemplazando:**

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{30.7 \times 10^{-6} \times 10.57 \times 10^{-12}}}$$

$$fr = 88.35KHz$$

#### 4.3.2.6 Explosor

Figura 16: Spark gap



Fuente: Autores

Se debe considerar que la ruptura del aire seco es aproximadamente de 3000V/mm. Por lo cual para que exista el arco con una tensión de 15kV existe una separación de 5mm del spark gap.

#### 4.3.2.7 Bobina de choque

Figura 17: Bobina de choque



Fuente: Autores

Dado que el valor de la bobina de choque no afecta al funcionamiento de la Bobina Tesla y su única misión es limitar la corriente de retorno al transformador durante el cierre del explosor necesitaba una bobina con una inductancia mayor que la inductancia de la bobina primaria.



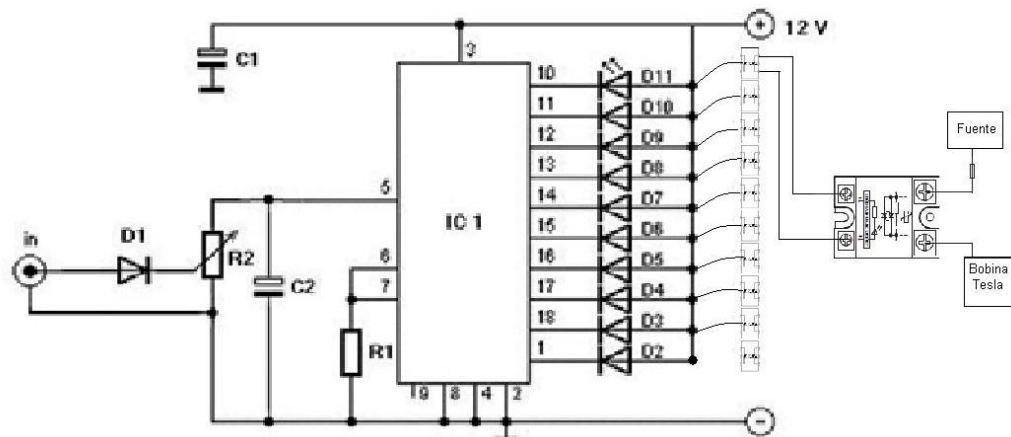
Para la bobina de choque se utilizó un tubo de PVC de 2pulg con 300 espiras de conductor 22AWG, la cual nos brinda la protección adecuada para el propósito antes mencionado.

Mediante el equipo ELVIS se pudo obtener el valor de la inductancia de la bobina de choque el cual es:

$$L = 0.6987 \text{ mH}$$

#### 4.3.2.8 Circuito de Control

Figura 18. Circuito de control



Fuente: Autores

Por medio del circuito de control se logra obtener la señal de la entrada de audio, el circuito integrado LM3914 es un circuito monolítico que censa el nivel de voltaje presente en su entrada, y controla 10 LEDs, proveyendo una escala lineal de 10 pasos. Dispone de un pin para cambiar el modo de funcionamiento, permitiendo elegir si la representación va a ser una barra de luz, o solo un punto. La corriente que circula por los LEDs es regulada y programable, de manera que no se necesitan resistencias individuales para cada uno de ellos. Esta

característica, entre otras, le permite trabajar con menos de 3 voltios de alimentación.

El integrado contiene su propia referencia de tensión, y un divisor de voltaje de 10 etapas, cuyas salidas son las encargadas de manejar los LEDs. La entrada está protegida contra sobre tensiones, por lo que no es necesario dotarlo de protecciones adicionales si no se esperan entradas que superen los 35 voltios.

Una vez obtenida la señal de entrada se hace pasar por un opto acoplador para proteger la parte electrónica de la parte de potencia, este opto acoplador enciende al relé el cual se encarga de prender y apagar la Bobina Tesla.

El relé tiene la función de conmutar la señal entre el circuito de control y la Bobina Tesla. El relé en uso es de estado sólido y se trata de un relé que tiene un circuito tipo híbrido, está conformado por un optoacoplador que permite aislar la entrada, el circuito de disparo que detecta las señales de paso por cero de la corriente de línea y un triac que actúa como interruptor de potencia. El uso del relé es indispensable ya que no presenta pérdidas al usarlo en circuitos de uso continuo y de larga duración, además de que permite conmutar altos amperajes.

El estrés al cual está sometido el transformador de entrada no es de gran magnitud en vista de que este transformador está formado por 6 devanados que por medio de acople mecánico y magnético obtiene a su salida el valor de voltaje deseado. Pero hay que tener en cuenta que al someter a estos cambios de estado se produce aumento en el

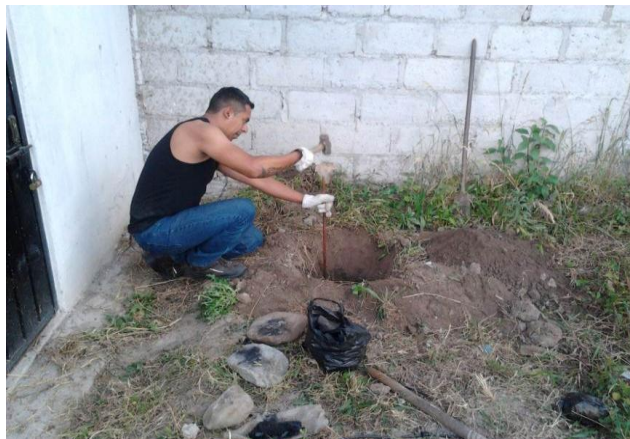
calentamiento de devanado por la histéresis y por lo tanto el aumento de la corriente, que en un determinado tiempo podría quemar el devanado del transformador.

El incorporar un circuito electrónico al diseño de la Bobina Tesla, planteó nuevos retos, que por medio de la investigación se realizó pruebas, una que pretendía controlar la frecuencia del aire circundante de la bobina, para que de esa manera la descarga se produjera con mayor o menor dificultad, pero al no conseguir ese objetivo, se optó por otro modelo que permite el control directo del transformador de entrada observando los cambios en las descargas de la Bobina Tesla.

#### **4.4 Instalación de puesta a tierra**

El sistema de puesta a tierra se la realizó con varillas de Copperweld de 1,8 metros, en medio de un terrero rocoso. Por lo cual se lo adecuó con sal, arcilla, carbón, agua, GEM (Mejorador de Tierra) y para cubrir la mezcla se colocó una capa de aserrín.

**Figura 19. Aterramiento de Puesta a Tierra**



**Fuente: Autores**

Algunos de los principales objetivos de la puesta a tierra es tener un punto de referencia con una resistencia relativamente baja para descargar a tierra los Fenómenos Eléctricos Transitorios o FETs, las corrientes parásitas, producidas por el funcionamiento del equipo y fallas estáticas, el ruido eléctrico y la radio frecuencia.

Para enterrar las varillas, se cavó dos huecos de 1 metro cada uno, en los cuales se colocó la sal, arcilla, carbón, GEM y agua.

**Figura 20. Preparación del conductor para la puesta a Tierra**



**Fuente: Autores**

Se soldó el cable conductor entre el circuito eléctrico de la Bobina Tesla y las varillas de Copperweld con soldadura exotérmica, se realizó la mezcla necesaria para activar el GEM la misma que solidifica en tres días y se cubrió todo con una capa de aserrín y tierra para sellar el conductor y la cabeza de la varilla de Copperweld.

**Figura 21. Aterramiento de Puesta a Tierra**



**Fuente: Autores**

**Figura 22. Soldadura del conductor y la varilla Coperwell**



**Fuente: Autores**

**Figura 23. Conductor soldado con la varilla Coperwell**





**Fuente: Autores**

Al realizar la medición del terreno con el Megger, se obtuvo una medida final de 6 Ohms, resultando una lectura ideal para el tipo de terreno en que se elaboró la puesta a tierra y para el tipo de funcionamiento que tendrá el circuito.

**Figura 24: “Megger” Equipo de Medición de Resistividad de Tierra**



**Fuente: Autores**

Es necesario recalcar, que la puesta a tierra poco a poco se deteriora y se pierde la resistividad del terreno si no se realiza el mantenimiento adecuado.

**Figura 25: Medición de Resistividad de Tierra**

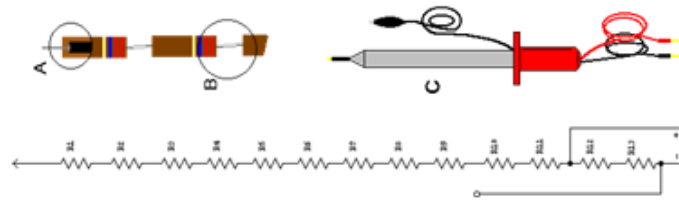


**Fuente: Autores**

De igual manera, un terreno específico con una buena concentración de humedad presenta una variación de resistividad, lo cual lo hace susceptible a cambios estacionales. El objetivo del uso del carbón mezclado con sal y arcilla, es aprovechar la capacidad que este presenta para absorber la humedad existente en el terreno.

#### **4.5 Punta de Alto Voltaje**

Para poder obtener el valor de salida de la Bobina Tesla se elaboró una punta de alto voltaje, la cual es un divisor de voltaje a base de resistencias como se muestra en la figura 26.



**Figura 26. Punta o sonda de prueba**

**Fuente: [www.comunidadelectronicos.com](http://www.comunidadelectronicos.com)**

Básicamente una sonda de alto voltaje, no es más que un circuito divisor resistivo, que permite reducir en un porcentaje determinado la tensión aplicada, para que pueda ser medida por voltímetro, multímetro o tester de uso común.

La punta tiene una relación 300/1 o dicho de otra forma es una punta X300, multiplica la escala del instrumento por 300. Es decir, que: si usando sonda, tenemos una lectura de por ejemplo 45V, estamos midiendo una tensión real de 13500V ( $45 \times 300 = 13500$ ). Cabe recalcar que esta herramienta no es de precisión pero si garantiza una medida acorde a las necesidades del operario.

Está calculada para ser usada con un multímetro o tester digital de 10Mohm de resistencia interna, con el cual se obtendrá la lectura más precisa en todas las escalas. Lógicamente su precisión también depende de la calidad o tolerancia de las resistencias usadas. Es recomendable que la misma no sea superior al 5%.



## **Componentes:**

R1 a R9 - Resistencias de 22 M Ohm 1 o 2W

R10 y R 11 - Resistencias de 10 M Ohm 1W

R12 - Resistencia de 1.2 M Ohm 1W \*

R13 - Resistencia de 1.6 M Ohm 1W \*

Varios: Tuvo plástico, cables, conectores, etc.

\* R12 y R13 pueden reemplazarse por 1 y 1.8 M Ohm respectivamente, lo importante es que ambas sumen 2.8 M Ohm (2.800.000 ohm).

Debido a las tensiones elevadas a las cuales será sometido este dispositivo, se deberá tomar ciertas precauciones tanto en su construcción como es su uso. Los alambres deben ser cortos y las soldaduras no deben presentar picoso puntas, que aumenten el riesgo de formación de arcos al trabajar con tensiones muy elevadas.

Una vez construida la cadena de resistencias es recomendable probarla con voltajes bajos (100 a 1000V). Si funciona bien, entonces se puede proceder sellar o aislar los componentes. Se puede utilizar para esto, una o dos capas de aislador termo fundente o cubrir todo con sellador de silicona. Luego se deben colocar dentro de un tubo plástico y rellenar bien con sellador de silicona. Para reducir el riesgo de arcos al medir tensiones muy altas, es recomendable que la parte expuesta de la punta sea lo más pequeña posible.

## **Modo de Uso:**

Conectar los cables al multímetro, seleccionar la escala apropiada,

conectar el cable de tierra o ground, al chasis o punto adecuado del aparato y por ultimo hacer la medición.

## **4.6 Manual de operación de la Bobina Tesla**

### **4.6.1 Objetivos:**

- Realizar pruebas de aislamientos dieléctricos de alto voltaje con el uso de la Bobina Tesla.
- Observación de fenómenos producidos por arcos eléctricos de alto voltaje.
- Recolección de datos a través de equipos de medición, como son multímetros, N.I. Elvis, osciloscopio.

### **4.6.2 Fundamento Teórico**

La Bobina Tesla es un generador electromagnético capaz de producir altos voltajes con altas frecuencias de resonancia, permitiendo la visualización de coronas y arcos eléctricos.

Adquiere este nombre en honor a su inventor Nikola Tesla, en 1891 desarrolla un generador de alta frecuencia y alta tensión con el objetivo de transmitir energía eléctrica sin la necesidad de conductores eléctricos. Nikola Tesla también desarrollo la corriente trifásica y los motores por inducción.

La Bobina Tesla es llamativa debido a la impresión visual que esta genera, y por el interés que provoca en la investigación de su funcionamiento.

Nikola Tesla pretendía con este invento reducir el costo de la energía eléctrica, al igual que los niveles de contaminación propios de las formas de generación de energía convencionales, ya que en el caso de las hidroeléctricas se destruye buena parte del entorno de los caudales de generación, presenta problemas de sequías e inundaciones en ciertas zonas, mucha de la vegetación se ve altamente afectada y parte de la fauna muere o migra de estas zonas.

Varias de las ventajas del uso de la Bobina Tesla son:

- Reducción del costo de energía.
- No contamina el medio ambiente.
- Varios de los materiales de construcción son fáciles de conseguir.
- Sirve como instrumento para investigación de fenómenos eléctricos.

Y como todo proyecto, este no es la excepción en las desventajas, a pesar de que son mínimas:

- Produce altos voltajes que son extremadamente peligrosos para el operario.
- Los condensadores son difíciles de conseguir.

Para realizar pruebas de resistencia de aislamientos de alto voltaje se debe considerar el voltaje de trabajo, en este caso la Bobina Tesla es

de 300.000 Voltios aproximadamente, lo que lo convierte en un equipo extremadamente peligroso y de alto riesgo eléctrico.

En breve resumen, las botas de protección dieléctrica y ropa adecuada de trabajo son indispensables para poner en marcha la bobina, además del uso de tapones auditivos ya que el ruido generado es bastante alto.

La Bobina Tesla tiene dos breakers de protección, antes de utilizarla se debe verificar que los dos dispositivos estén apagados mientras se coloca los aislamientos a prueba dentro de la Jaula, y asegurar con el candado la Jaula antes de encender la bobina.

Es recomendable trabajar entre dos personas por seguridad y siempre bajo supervisión de un docente.

### **4.6.3 Trabajo Preparatorio**

**4.6.3.1** Consultar referente a frecuencia de resonancia para bobinas en circuitos RLC serie - paralelo y transformadores elevadores de alto voltaje.

**4.6.3.2** Consultar sobre medición de Inductancias y Reactancias en circuitos RLC serie y paralelo.

**4.6.3.3** Consultar el uso del Osciloscopio y Generador de Funciones.

#### 4.6.4 Parte Experimental

- Adquirir los datos con los equipos de medición y ampliar el tema de investigación en clase.
- Realizar los cálculos correspondientes para obtener los valores reflejados en el diseño de tesis.
- Comparar los valores obtenidos con los calculados y determinar qué diferencias existen y porque.

#### 4.6.5 Materiales y Equipos de Laboratorio

- Osciloscopio
- Generador de Funciones
- Bobina Tesla
- Multímetro
- Punta de Medición de alto voltaje
- Reproductor de audio
- Aislamientos

#### 4.6.6 Informe

- Leer y realizar un resumen de la práctica referente a la los temas de consulta de Bobina Tesla.

**Figura 27. Seguridad y Precauciones**



**Fuente: Autores**

- Verificar que el breaker principal y el breaker del tablero de control de la Bobina Tesla estén en la posición de apagado, y que la puesta a tierra este conectada.
- Seleccionar el aislamiento dieléctrico que se someterá a prueba, colocarlo en la punta de prueba dentro de la Bobina Tesla. Los datos de característica del aislamiento deberán ser apuntados antes de iniciar la práctica.

**Figura 28. Fusible 600 V – 4 Amps.**



**Fuente: Autores**

- Conectar un dispositivo reproductor de música al plug de control de la Bobina Tesla, o conectar el Generador de Funciones por separado en cada bobina. (en este caso se trabajará sin tensión en la Bobina Tesla), se calibrará el Generador de Funciones con los siguientes datos:
  1. Forma de Onda: Salida diete de cierra de 50  $\Omega$ .
  2. Frecuencia: 10 Hz
  3. Voltaje pico – pico: 1V.

Se conecta el Osciloscopio en paralelo al inductor y serie al generador de funciones, se envía la señal a través de la bobina y la marcación se registrará en el osciloscopio.

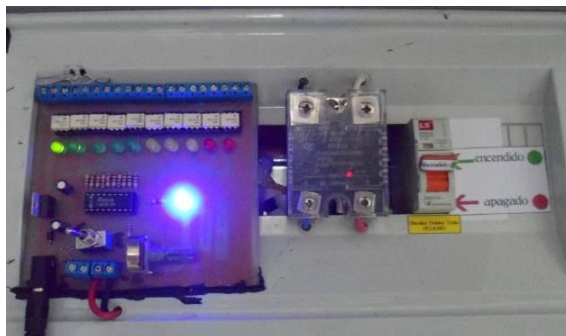
**Figura 29. Conexión del Generador de Funciones y el Osciloscopio**



**Fuente: Autores**

- Si el ingreso de señal es con un audio, se ajusta el controlador de salida de señal del vúmetro.

**Figura 30. Tablero de Control.**



**Fuente: Autores**

- A través del potenciómetro se puede ir controlando el nivel de voltaje, es decir se controla el flujo de volumen a la vez que se controla el voltaje de salida.

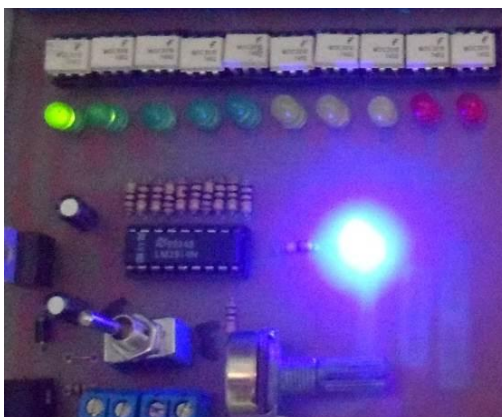
**Figura 31. Potenciómetro Controlador**



**Fuente: Autores**

- Se tiene una marcación visible por la emisión de luz de los diodos LED.

**Figura 32. Visualización por medio de Leds**



**Fuente: Autores**

- Se coloca el aislamiento para prueba en la punta de prueba que está ubicada sobre el toroide, ya que permite que el rayo se desplace con mayor rapidez hacia este.



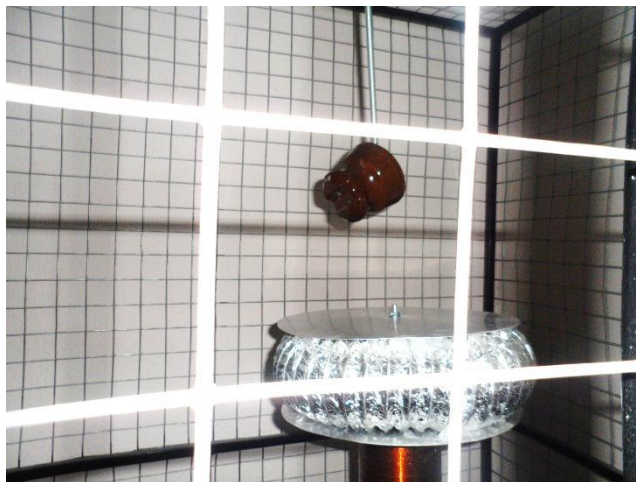
**Figura 33. Aislamiento colocado en punta de prueba tipo péndulo**



**Fuente: Autores**

- Si el rayo no aparece mientras se va incrementando el flujo de voltaje, se denotara que el aislamiento o fusible a prueba está en correcto funcionamiento.

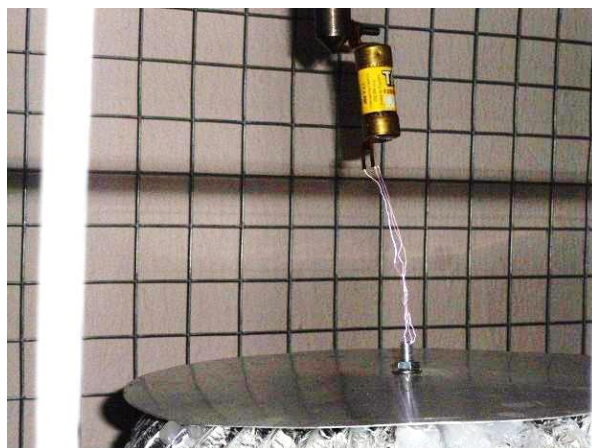
**Figura 34. Generación de voltaje sin ruptura del aislamiento**



**Fuente: Autores**

Pero si el rayo empieza a aparecer y va incrementando, se demuestra que el aislamiento se ha quemado.

**Figura 35. Ruptura del aislamiento por alto voltaje**



**Fuente: Autores**

- Para obtener una lectura más exacta del voltaje que se está suministrando, se conecta la punta de alto voltaje al extremo superior del toroide y se observa la marcación de voltaje en el Voltímetro. En el Voltímetro se mostrará cual fue el valor de tensión máxima al cual fue sometido dicho aislamiento, así se comprobará su tensión de ruptura. La relación de voltaje dada es de 300 a 1.

**Figura 36. Marcación de Voltaje de Ruptura**



**Fuente: Autores**

#### **4.6.7 Bibliografía**

1. Método Para Medición Del Valor De Inductancia De Las Bobinas, Ing. Ricardo Araguillin, Ing. Fernando Montenegro.

#### **4.6.8 Manual de mantenimiento de la Bobina Tesla**

El objetivo principal es dar un buen mantenimiento para el correcto uso de la Bobina Tesla y evitar el desgaste y deterioro de los componentes de la misma.

Existen varias áreas críticas en los componentes para lo cual se debe considerar los siguientes pasos:

- Inspección
- Limpieza
- Ajustes

Adicional se debe llenar la tabla de mantenimiento programado de la Bobina Tesla para tener un detalle exacto de las actividades realizadas.

##### **4.6.8.1 Inspección**

Se recomienda realizar una inspección semanal del entorno de la Bobina Tesla con la finalidad de encontrar piezas dañadas, fallas leves en las conexiones, o imperfecciones en la bobina.

Para ello es necesario que el breaker principal y el breaker del tablero de control estén en la posición de apagado, una vez verificado la desconexión completa de la bobina se puede realizar la medición de cada una de las bobinas con un multímetro, equipo Elvis con los cuales se verifica el estado de las bobinas, de los pruebas realizadas se debe considerar la continuidad, la impedancia, la resistencia, y el valor de la capacitancia, ya que estos valores determinan el funcionamiento de la Bobina Tesla. Se recomienda verificar que los cables de puesta a tierra y las conexiones desde la bobina hacia los mismos estén en perfecto estado.

#### **4.6.8.2 Limpieza**

Se debe mantener cada uno de los componentes al igual que el entorno en perfecto estado, limpio de polvo, limaduras y residuos de cualquier tipo, ya que cualquiera de estos puede generar daño en la bobina.

Se recomienda realizar limpieza de cada una de las partes de la Bobina Tesla con sumo cuidado, como en el caso del spark gap, el transformador de alto voltaje y la bobina primaria. En el caso del tablero de control se recomienda realizar limpieza con supervisión de un docente y extremo cuidado con las conexiones.

#### **4.6.8.3 Ajustes**

Es indispensable revisar cada uno de los tornillos que existen en la bobina, ya que estos por efectos de corrientes parasitas, vibraciones y deterioro del tiempo tienden a aflojarse, por lo cual es necesario un ajuste rígido.

**Cuadro 4. Tabla de Mantenimiento Programado.**

<b>TABLA DE MANTENIMIENTO PROGRAMADO DE LA BOBINA TESLA</b>				
<b>DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD</b>	<b>TIPO DE MANTENIMIENTO</b>	<b>FECHA</b>	<b>FALLO ENCONTRADO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>Limpieza Espacio Físico</b>	Preventivo	1 de julio del 2013	ninguno	Limpieza general del entorno.
<b>Medición de Impedancias de bobinas</b>	Preventivo	3 de agosto del 2013	ninguno	Ninguno
<b>Medición de Capacitancias</b>	Preventivo	1 de octubre del 2013	Ninguna	El valor de la capacitancia continúa en el 5% de tolerancia.

**Fuente: Autores**

#### **4.7 Resumen del mantenimiento**

Con las debidas protecciones tanto físicas y personales se realizará las pruebas y mediciones necesarias para lograr tener una estadística de funcionamiento, para posteriormente dejar en claro los pasos a seguir para el correcto uso de la Bobina Tesla y los mantenimientos específicos a los cuales debe ser sometida.

La Bobina Tesla prestará servicios de generación y control de alto voltaje, constando con sus respectivas protecciones aisladas para no causar daños personales ni materiales. Las convenidas prácticas deben realizarse solo bajo la supervisión del docente a cargo.

#### **4.8 Aplicaciones de la Bobina Tesla**

El circuito de la Bobina Tesla diseñado para operar como un doble circuito resonante Tesla puede ser utilizado para generar alternativamente pruebas de aislamiento con la desventaja que, cuando se experimenta con diferentes objetos, el cambio de capacitancia afecta la frecuencia de

oscilación del devanado secundario por lo que el circuito original debe ser re-sintonizado para mantener la operación de resonancia.

Debido a que la forma de voltaje que se obtiene del secundario Tesla es similar a la onda que presentan algunos transitorios del sistema de potencia, como son las operaciones de “swicheo”, resulta de interés someter diferentes elementos que componen el sistema de potencia a este tipo de forma de onda.

#### **4.8.1 Transmisión**

Las Bobinas Tesla de grandes diseños que operan con picos de potencia muy elevados deben ser ajustadas y operadas cuidadosamente, no solo por eficiencia del equipo sino por el margen de seguridad que deben tener.

El proyecto de transmisión de voltaje experimentado por Tesla consistía en elevar las frecuencias de resonancia en una bobina, generando un campo eléctrico con un desplazamiento sumamente largo, lo cual permitía conectar cualquier equipo eléctrico a esta emisión de voltaje sin necesidad de conductores eléctricos.

Para ello Tesla construyó diversos prototipos de bobinas, siendo su mayor proyecto una torre gigante, la que era capaz de transmitir altos voltajes a distancias más grandes lo que a su vez la convirtió en un proyecto a un más peligroso e inestable, ya que el desprendimiento de los arcos eléctricos no tenía un solo punto de referencia y se descaraba a diversos puntos en tierra.

# CAPÍTULO V

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

Posteriormente al diseño y construcción de la Bobina Tesla, se ha determinado las siguientes conclusiones:

1. Realizar prácticas en alto voltaje en la Carrera permite encaminar a reforzar los conocimientos teóricos que se imparte diariamente.
2. La Bobina Tesla es un transformador de tipo resonante, es decir las bobinas primaria y secundaria generan altas frecuencias de resonancia, las cuales al estar equilibradas ionizan el aire, permitiendo incrementar el voltaje a valores picos de miles de voltios.
3. El condensador en la Bobina Tesla permite la carga y descarga de energía almacenada, en el mercado no existe un condensador óptimo o específico para cada diseño de Bobina Tesla, por lo cual fue necesario elaborarlo, para ello se hizo un circuito serie paralelo con treinta condensadores de 100nf a 16kV, se dispuso tres filas en paralelo de 10 condensadores en serie cada una, obteniendo el valor de 29.14nf a 16kV.

4. El número de espiras de los bobinados, cálculo del condensador, toroide, y la frecuencia de resonancia, están comprobados de acuerdo a cálculos para el correcto funcionamiento de la Bobina
5. Tesla, se parte con los valores medidos con equipos adecuados como el ELVIS, osciloscopio, y generador de pulsos.
6. La Bobina Tesla trabaja con altos voltajes, que son de riesgo extremo. Para ello la bobina tiene una Jaula de Faraday como protección para mitigar las corrientes parásitas, y el operador debe estar equipado con botas dieléctricas, ropa jean, y tapones auditivos.
7. Con la puesta a tierra se mitigan todas las corrientes parásitas generadas por el uso de la Bobina Tesla.

## **5.2 Recomendaciones**

El diseño y construcción de la Bobina Tesla es considerada como una herramienta tecnológica, la cual es un aporte en beneficio y mejoramiento de una educación integrada, por esta razón se sugiere las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda realizar las prácticas con todas las seguridades pertinentes, en vista de que se está trabajando con altos voltajes, los cuales pueden ocasionar daños tanto físicos como materiales.



2. Las pruebas de alto voltaje se las debe realizar solo con la autorización y supervisión de un docente y mínimo entre dos personas, cada operario debe estar debidamente equipado.
3. Antes de realizar una práctica, se debe verificar que los breakers de protección de la Bobina Tesla estén apagados, y que ninguno de los operadores este dentro de la Jaula de Faraday, de la misma manera se debe asegurar con el candado la jaula antes de ponerla en funcionamiento.
4. Es recomendable realizar investigaciones adicionales para desarrollar métodos de control distintos a los del uso del vúmetro, también se puede reformular los cálculos para incrementar más el voltaje de salida y que el rayo generado sea mucho más grande.
5. Debe existir un mantenimiento continuo, de al menos una vez al mes, para evitar posibles fallos o variaciones en las tolerancias inherentes a las sustancias dentro del entorno en que se encuentra situada la Bobina Tesla.
6. Al operar la Bobina Tesla, se recomienda seguir las normas de seguridad, en presencia del docente a cargo y tomando conciencia del peligro al que se está expuesto.

### **5.3 Bibliografía**

1. ALVAREZ PULIDO, Manuel, "Transformadores", (2009), editorial Alfa Omega.

2. BROKERING CRISTINE, Walter, "Los sistemas eléctricos de potencia", (2008), editorial Person Educación.
3. BOYLESTAD, Roberth, "Introducción al análisis de circuitos", (2004), editorial Pearson Educación.
4. CULTURAL, "Manual de electrónica Aplicada", (2008), editorial cultural.
5. EDMINISTER, Joseph, "Circuitos eléctricos", (2001), editorial McGraw Hill Interamericana.
6. FITZGERALD, A.E, "Máquinas Eléctricas", (2006), editorial McGraw Hill Interamericana.
7. GARCIA FRASANEOS, José, "Electrotecnia", (2009), editorial Paraninfo.
8. LEVY, Rubén R, "Las puestas a tierra criterios de seguridad eléctrica y técnica", (2009), editorial Universitas Libres.
9. MANZANO, Orrego, "Mantenimiento de máquinas eléctricas", (2004), editorial Thomsom.
10. THEODORE, Whildi, "Máquinas eléctricas y sistemas de potencia", (2007), editorial Pearson Educación.
11. Pedro Avelino Pérez. (2001). Transformadores de Distribución (Teoría, Cálculo, Construcción y Pruebas), Segunda Edición. Editorial Reverté S.A.

12. Peter Batian. (1996). Electrotécnica (Cursos Formativos). Ediciones Akal, S.A.

13. Ramón Pallás Areny. (1993). Adquisición y Distribución de Señales. MARCOMBO S.A.

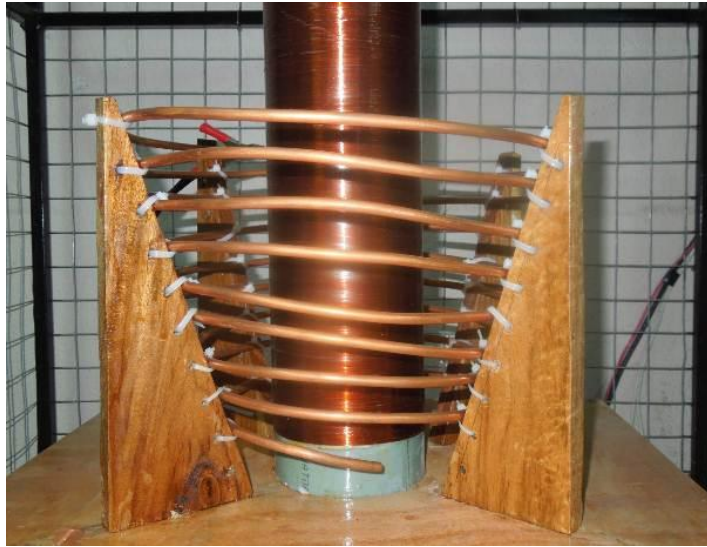
14. Raymond A. Serway, Jerry S. Faughn. (2007). Física para Bachillerato General. Volumen 2, Sexta Edición. Thomson Editores S.A.

#### **5.4 Linkografía**

- <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1392/1/Diseno%20y%20construccion%20de%20una%20bobina%20tesla.pdf>
- [http:// Bobina Tesla con materiales caseros y reciclados.mht](http://BobinaTeslaconmaterialescaserosyreciclados.mht)
- [http:// bobina-tesla-la-verdadera-t394319](http://bobina-tesla-la-verdadera-t394319)
- [http:// Bobina Tesla Proceso de construcción](http://BobinaTeslaProcesodeconstruccion)
- [http:// Construcción-de-una-fácil-bobina-de-Tesla](http://Construccion-de-una-facil-bobina-de-Tesla)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Bobina de Tesla](http://es.wikipedia.org/wiki/Bobina_de_Tesla)
- [http:// How to make a high voltage amp;quot;singing amp;quot; arc](http://Howtomakeahighvoltagequot;singingquot;arc)
- <http://solarpraxis.blogspot.com/2012/02/efecto-skin-en-conductores.html>
- [http:// tesla1.htm](http://tesla1.htm)
- [http:// verhaga.php](http://verhaga.php)

## 5.5 Anexos Fotográficos

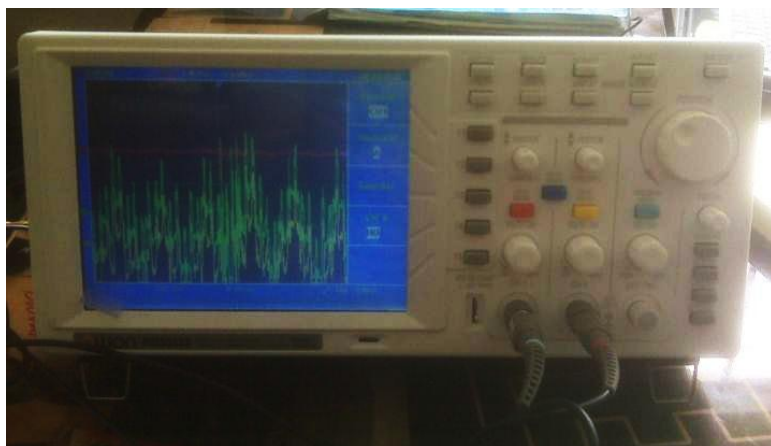
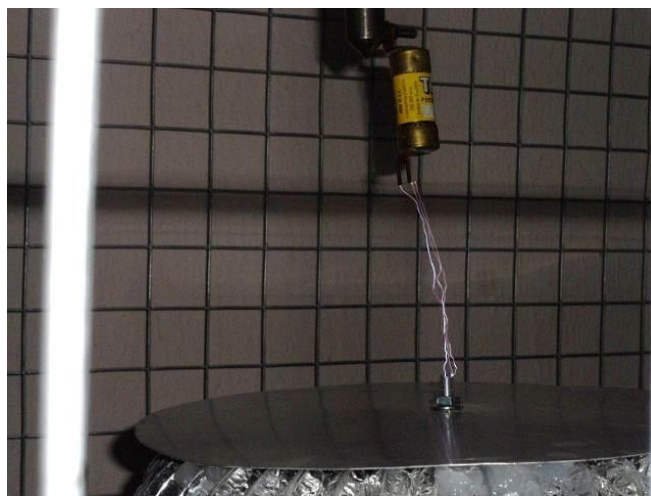
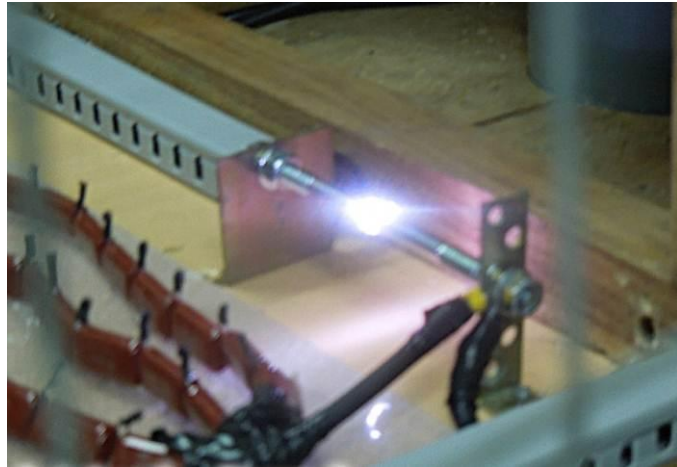




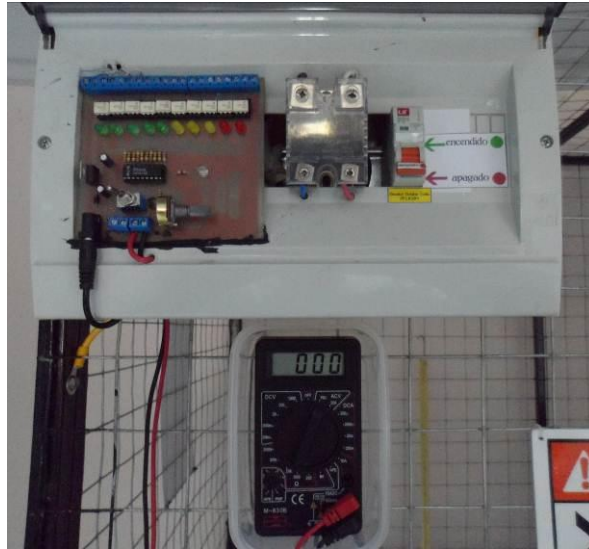


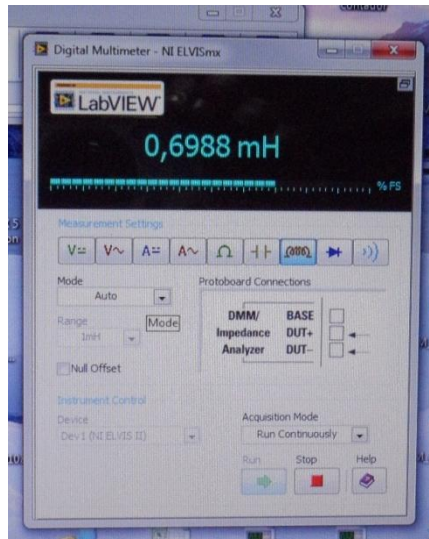












## CERTIFICADO


A petición de los interesados:

Certifico que la tesis titulada DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE, de autoría de los egresados: Bolaños Arias Francisco Ismael, Rivera Chiriboga Diego Roberto, se socializó el documento en mención el 30 de octubre del 2013, a los estudiantes del Séptimo Semestre de la Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

En honor a la verdad, faculto a los intestados hacer uso del presente documento en lo que estimen conveniente.

Ibarra 30 de octubre del 2013

Atentamente,



Ing. Pablo Méndez  
DIRECTOR DE TESIS



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## ACTA DE ENTREGA – RECEPCIÓN

### CLAUSULA I.-

En la ciudad de Ibarra, a los veinte y dos días del mes de Noviembre del año 2013, comparecen:

Los señores:

N°	N° CEDULA	NOMBRES
1	100340029-6	BOLAÑOS ARIAS FRANCISCO ISMAEL
2	100343311-5	RIVERA CHIRIBOGA DIEGO ROBERTO

Graduados de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico, en la calidad de donantes de: **UNA BOBINA TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE.** Con los siguientes elementos:

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO
1	Bobina Tesla, componentes completos
1	Jaula de Faraday
1	Tablero de Control
1	Circuito Integrado (Vúmetro)
1	Punta de medición de alto voltaje
1	Multímetro

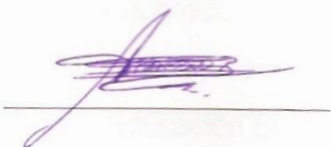
2	Taco térmico de protección en el tablero principal
1	Puesta a tierra
1	Punta para rayos
20	Condensadores de repuesto

**CLAUSULA II:**

La donación de la Bobina Tesla es para uso exclusivo como material didáctico para prácticas de los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

A partir de la presente fecha, queda bajo la responsabilidad y custodia del Doctor Gustavo Gonzales, encargado del laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico.

**Entregue Conforme:**



Bolaños Arias Francisco I.

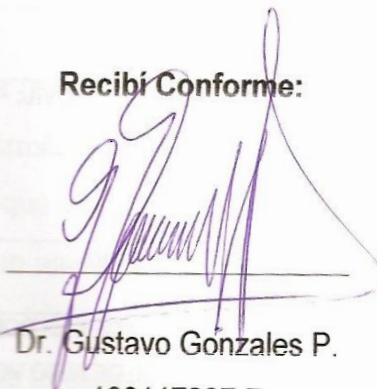
100340029-6



Rivera Chiriboga Diego R.

100343311-5

**Recibí Conforme:**



Dr. Gustavo Gonzales P.

100117227-7



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## 1.- IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100340029-6		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Bolaños Arias Francisco Ismael		
DIRECCIÓN:	Ibarra		
E- MAIL:	Ing_francisco86@yahoo.com		
TELÉF. FIJO:	062608978	TELÉF. MÓVIL:	0983127540

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE”
AUTORES:	BOLAÑOS ARIAS FRANCISCO ISMAEL / RIVERA CHIRIBOGA DIEGO ROBERTO

<b>FECHA:</b> <b>AAAMMMDDDD</b>	2013 / 11 / 22
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA</b>	<b>PREGRADO ( x )      POSGRADO ( )</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
<b>ASCESOR / DIRECTOR:</b>	Ing. Pablo Méndez

## **2.- AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**

Yo, Francisco Ismael Bolaños Arias, con cédula de identidad Nro. 100340029-6, en calidad de autor (es) y titular (es) de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo descrito anteriormente, hago la entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo de la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

## **3.- CONSTANCIAS**

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolla, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al 12 día del mes de Diciembre del 2013

**EL AUTOR:**

Firma: 

**Nombre:** Bolaños Arias Francisco Ismael  
**C.C:** 100340029-6

**ACEPTACIÓN:**

Firma: 

**Nombre:** ING BETTY CHÁVEZ  
**Cargo:** JEFE DE BIBLIOTECA

**Facultado por resolución de Consejo Universitario.**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



## CESIÓN DE LOS DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**Bolaños Arias Francisco Ismael**, con cédula de Identidad Nro. **100340029-6**, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en la calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominada: "DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE" que ha sido desarrollada para optar por el título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Firma.....

**Nombre:** Bolaños Arias Francisco Ismael

**Cédula:** 100340029 – 6

Ibarra al 12 del mes de **Noviembre** del 2013



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## 1.- IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1003433115		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Rivera Chiriboga Diego Roberto		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Ibarra		
<b>E- MAIL:</b>	drobertor@hotmail.com		
<b>TELÉF. FIJO:</b>	062957442	<b>TELÉF. MÓVIL:</b>	0985147975

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	"DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE"

<b>AUTORES:</b>	BOLAÑOS ARIAS FRANCISCO ISMAEL / RIVERA CHIRIBOGA DIEGO ROBERTO
<b>FECHA:</b> <b>AAAMMMDDDD</b>	2013 / 11 / 22
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA</b>	<b>PREGRADO ( x )      POSGRADO ( )</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
<b>ASCESOR / DIRECTOR:</b>	Ing. Pablo Méndez

## **2.- AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**

Yo, Diego Roberto Rivera Chiriboga, con cédula de identidad Nro. 1003433115 en calidad de autor (es) y titular (es) de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo descrito anteriormente, hago la entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo de la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

## **3.- CONSTANCIAS**

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolla, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al 12 día del mes de Diciembre del 2013

**EL AUTOR:**

Firma: 

**Nombre:** Rivera Chiriboga Diego Roberto  
**C.C:** 1003433115

**ACEPTACIÓN:**

Firma: 

**Nombre:** ING BETTY CHÁVEZ  
**Cargo:** JEFE DE BIBLIOTECA

**Facultado por resolución de Consejo Universitario.**

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



## CESIÓN DE LOS DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

**Rivera Chiriboga Diego Roberto**, con cédula de Identidad Nro. **1003433115**, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en la calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominada: "DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA PARA LA GENERACIÓN Y CONTROL DE ALTO VOLTAJE" que ha sido desarrollada para optar por el título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Firma.....

**Nombre:** Rivera Chiriboga Diego Roberto

**Cédula:** 1003433115

Ibarra al 12 del mes de **Noviembre** del 2013