



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

Título del proyecto:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOBINA TESLA”**

Eduardo Pérez de Obanos Francés

Vicente Senosiáin Miquélez

Pamplona a 19 de Febrero de 2010

# Índice

## MEMORIA

### 1. Introducción.

1.1. Objetivo del proyecto.	5
1.2. Historia.	5
1.3. Principio de funcionamiento.	7
1.4. Aplicaciones.	12
1.5. Aspectos de seguridad.	14

### 2. Elementos.

2.1. Esquema básico.	15
2.2. Variac.	15
2.3. Transformador de alta tensión.	16
2.4. Diodos rectificadores.	17
2.5. Bobina de choque.	18
2.6. Condensador primario.	18
2.7. Bobina primaria.	20
2.8. Bobina secundaria.	21
2.9. Condensador secundario.	22
2.10. Explosor.	23
2.11. Conexión a tierra.	25

### 3. Modelado y simulación.

3.1. Programa de simulación.	26
3.2. Cálculo de los principales parámetros.	26
3.3. Circuito de simulación.	27
3.4. Resultados de simulación.	28

### 4. Cálculo y diseño de los elementos constituyentes.

4.1. Transformador de alta tensión.	31
4.2. Bobina secundaria.	31
4.3. Terminal superior.	33
4.4. Condensador primario.	34
4.5. Bobina primaria.	34
4.6. Explosor.	35
4.7. Diodos rectificadores.	35
4.8. Bobina de choque.	36

### 5. Ensayos y medidas.

5.1. Medida de la capacidad del condensador primario.	37
5.2. Medida de la resistencia e inductancia de la bobina secundaria.	37
5.3. Medida de la resistencia e inductancia de la bobina primaria.	38
5.4. Medida del coeficiente de acoplamiento entre bobinas.	38
5.5. Medida de la frecuencia de resonancia del primario.	39
5.6. Medida de la frecuencia de resonancia del secundario.	40
5.7. Medida de la capacidad parásita de la bobina secundaria.	42
5.8. Medida de la tensión de carga del condensador primario.	43

5.9. Medida de la tensión de salida.	44
<b>6. Experiencias de laboratorio.</b>	
6.1. Descargas de corona con distintos electrodos.	45
6.2. Ionización de gases a baja presión.	49
6.3. Jaula de Faraday.	51
<b>7. Conclusiones.</b>	
7.1. Desarrollo del proyecto.	53
7.2. Enumeración de conclusiones.	54
<b>8. Planos constructivos.</b>	
8.1. Esquema eléctrico.	55
Plano 1. Bobina secundaria.	56
Plano 2. Bobina primaria.	57
Plano 3. Toroide.	58
Plano 4. Condensador primario.	59
Plano 5. Explosor.	60
Plano 6. Conjunto de montaje.	61
<b>9. Presupuesto.</b>	
9.1. Presupuesto Completo.	62
9.2. Presupuesto Real.	63
<b>10. Referencias bibliográficas.</b>	
10.1. Páginas Web consultadas.	64

10.2. Libros y documentos consultados.	64
--	----

## **11. Hojas de características.**

11.1. Condensador EPCOS B32656-S0105-K561.	65
--	----

11.2. Diodo SEMIKRON HSK E 17000/7600-0.3.	78
--	----

11.3. Barniz de revestimiento ELECTROLUBE SCC3.	83
---	----

# 1. Introducción

La Bobina Tesla es un dispositivo capaz de emitir descargas eléctricas que pueden llegar a medir varios metros y emitir luz por medio de la generación de pulsos de alta tensión.

Dada la espectacularidad del proyecto y viendo que en la universidad se disponía de los medios necesarios tanto de material como de medidas de seguridad, me decidí a diseñar y construir una bobina Tesla.

## 1.1. Objetivo del Proyecto

El Objetivo principal del proyecto es diseñar y construir una bobina Tesla de tamaño medio y observar las descargas emitidas desde el terminal superior.

Además realizare una serie de pruebas para comprobar si los resultados obtenidos en nuestra experiencia se asemejan a los de estudios anteriores.

## 1.2. Historia

### 1.2.1. Nikola Tesla



Tesla nació en el pueblo de Smiljan en la Frontera Militar (*Vojna Krajina*) austrohúngara, se educó en Graz y posteriormente en Praga, donde estudió ingeniería eléctrica. En 1881 viajó a Budapest para trabajar en una compañía de telégrafos estadounidense. Al año siguiente se trasladó a París para trabajar en una de las compañías de Thomas Alva Edison, donde realizó su mayor aporte: la teoría de la corriente alterna, lo cual le permitió idear el primer motor eléctrico de inducción en 1882.

En 1884 se trasladó a Nueva York, creando su propia compañía en 1886 tras romper con Edison después de tener muchas diferencias ante la eficiencia entre la corriente continua (CC) y la corriente alterna (CA) de Tesla. Tenía un laboratorio en la calle Houston en Nueva York. En 1887 logra construir el motor de inducción de corriente alterna. En 1891 inventó la bobina de Tesla.

### **1.2.2. La Bobina Tesla**

En la primavera de 1891, Tesla realizó una serie de demostraciones con varias máquinas ante el *American Institute of Electrical Engineers* del *Columbia College*. Continuando las investigaciones iniciales sobre voltaje y frecuencia de William Crookes, Tesla diseñó y construyó una serie de bobinas que produjeron corrientes de alto voltaje y alta frecuencia. Estas primeras bobinas usaban la acción disruptiva de un explosor (*spark-gap*) en su funcionamiento.

Los dispositivos posteriores fueron en ocasiones alimentados desde transformadores de alto voltaje, usando bancos de condensadores de cristal de botella inmersos en aceite para reducir las pérdidas por descargas de corona, y usaban explosores rotativos para tratar los niveles de alta potencia. Las bobinas Tesla conseguían una gran ganancia en voltaje acoplando dos circuitos LC resonantes, usando transformadores con núcleo de aire. A diferencia de los transformadores convencionales, cuya ganancia está limitada a la razón entre los números de vueltas en los arrollamientos, la ganancia en voltaje de una bobina Tesla es proporcional a la raíz cuadrada de la razón de las inductancias secundaria y primaria.

Estas bobinas posteriores son los dispositivos que construyen usualmente los aficionados. Son transformadores resonantes con núcleo de aire que genera muy altos voltajes en radio frecuencias. La bobina alcanza una gran ganancia transfiriendo energía de un circuito resonante (circuito primario) a otro (secundario) durante un número de ciclos.

Aunque las bobinas Tesla modernas están diseñadas usualmente para generar largas chispas, los sistemas originales de Tesla fueron diseñados para la comunicación sin hilos, de tal manera que él usaba superficies con gran radio de curvatura para prevenir las descargas de corona y las pérdidas por streamers.

### **1.3. Principio de funcionamiento**

La forma en que operan los transformadores de Tesla es la siguiente: Conectado el transformador de alto voltaje a la línea eléctrica se establece una corriente a través del circuito transformador – condensador – bobina primaria. A las frecuencias de operación del transformador la bobina primaria tiene una reactancia inductiva prácticamente nula y no influye en la magnitud de la corriente establecida, la cual resulta ser solo función de la impedancia interna del transformador y la reactancia capacitiva del condensador. Esta corriente carga el condensador de alto voltaje, elevando la diferencia de potencial entre sus placas y almacenando más y más energía en este. Por leyes de Kirchoff es inmediato el hecho de que el voltaje establecido entre los electrodos del explosor es igual al voltaje entre las placas del condensador. Por lo tanto, cuando el condensador se carga a un voltaje lo suficientemente alto como para que la rigidez dieléctrica del aire entre los electrodos del explosor sea superada, el campo eléctrico entre estos arranca electrones de las moléculas de aquel y se establece un arco eléctrico de baja impedancia que actúa como un puente que cierra el circuito condensador – bobina primaria... y entonces se originan los pulsos de alta frecuencia.

Físicamente los circuitos primario y secundario no tienen conexiones eléctricas en común; sin embargo se encuentran enlazados permanentemente por su inductancia mutua, por los efectos electrodinámicos que produce uno sobre el otro cuando están en operación; más concretamente, por el campo electromagnético que se establece en el espacio circundante. Cuando se cierra el circuito primario se establecen corrientes eléctricas de alta frecuencia que crean un campo electromagnético a su alrededor. Este campo induce en la bobina secundaria corrientes eléctricas que fluyen a lo largo del conductor, desde el toroide hasta la base conectada a tierra. Estas corrientes son máximas en la base del secundario y mínimas en la parte superior.

El campo electromagnético variable induce corrientes, pero también voltajes en el circuito secundario. En particular sabemos que el toroide colocado en la parte superior de la Bobina tiene una capacitancia intrínseca dependiente de su posición respecto al suelo y al resto de los componentes de la bobina, pero también el conductor del que está hecha la bobina secundaria tiene su propia capacitancia. En operación el toroide se convierte en un depósito para la carga eléctrica y en consecuencia para la energía proveniente del circuito primario, energía transmitida por inducción y a través del campo electromagnético. La acumulación de carga en el toroide produce un rápido incremento de voltaje hasta que este es tan alto que se produce emisión electrónica hacia el espacio circundante. Así se producen las descargas que observamos al poner uno de estos aparatos en funcionamiento.

El funcionamiento de la bobina Tesla puede ser visto como dos circuitos resonantes débilmente acoplados por el aire. El coeficiente de acoplamiento entre las bobinas  $L_1$  y  $L_2$  suele estar entre 0,1 y 0,2, en mi caso es 0,175, más adelante explicare como realizar la medida.

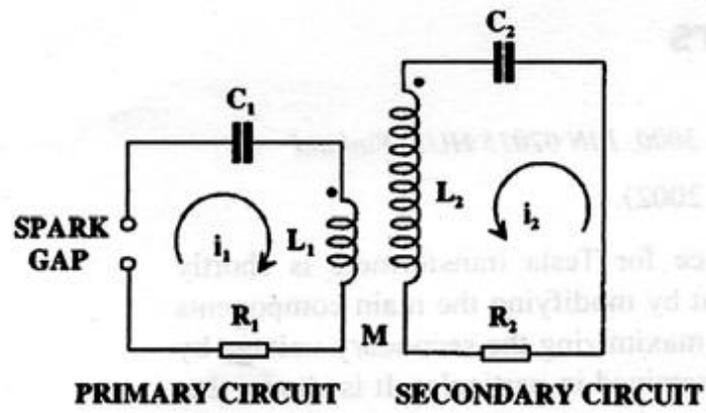


Fig. 1.1 Circuitos equivalentes Tesla

El circuito primario se forma cuando salta el arco en el explosor conectando en serie el condensador primario  $C_1$ , la bobina primaria  $L_1$  y su resistencia equivalente. El circuito secundario lo forman la bobina secundaria con su resistencia equivalente, y la suma de las capacidades propia de la bobina secundaria y del terminal superior a tierra. La bobina secundaria tiene uno de sus terminales a tierra y el terminal superior muestra una capacidad equivalente a tierra, así es como se cierra el circuito secundario. El circuito primario y secundario están acoplados entre ellos con una inductancia mutua  $M$ .

De acuerdo con la primera ley de Kirchoff, la suma de voltajes a lo largo del circuito completo es cero.

$$R_1 i_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (1.1)$$

$$R_2 i_2 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0 \quad (1.2)$$

Si  $q_i$  es la carga instantánea en los condensadores  $C_1$  y  $C_2$ , para cada circuito es

$$i_i = \frac{dq_i}{dt} \quad i = 1,2 \quad (1.3)$$

Sustituyendo en la ecuación (1.1) y (1.2)

$$R_1 \frac{dq_1}{dt} + \frac{1}{C_1} q_1 + L_1 \frac{d^2 q_1}{dt^2} + M \frac{d^2 q_2}{dt^2} = 0 \quad (1.4)$$

$$R_2 \frac{dq_2}{dt} + \frac{1}{C_2} q_2 + L_2 \frac{d^2 q_2}{dt^2} + M \frac{d^2 q_1}{dt^2} = 0 \quad (1.5)$$

Reorganizando e introduciendo el operador  $\mathcal{D}$  como el diferencial respecto del tiempo

$$\left[ \mathcal{D}^2 + \frac{R_1}{L_1} \mathcal{D} + \frac{1}{L_1 C_1} \right] q_1 + \frac{M}{L_1} \mathcal{D} q_2 = 0$$

$$\left[ \mathcal{D}^2 + \frac{R_2}{L_2} \mathcal{D} + \frac{1}{L_2 C_2} \right] q_2 + \frac{M}{L_2} \mathcal{D} q_1 = 0$$

De las ecuaciones de arriba se deduce la siguiente ecuación característica.

$$\begin{aligned} (1-k^2)D^4 + \left( \frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2} \right) D^3 + \left( \omega_1^2 + \omega_2^2 + \frac{R_1 R_2}{L_1 L_2} \right) D^2 + \\ \left( \frac{R_1}{L_1} \omega_2^2 + \frac{R_2}{L_2} \omega_1^2 \right) D + \omega_1^2 \omega_2^2 = 0 \end{aligned} \quad (1.8)$$

Donde:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1.9)$$

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \quad i = 1, 2 \quad (1.10)$$

$k$  es el coeficiente de acoplamiento ( $0 < k < 1$ ), mientras que  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son, respectivamente las pulsaciones de resonancia de los circuitos 1 y 2 desacoplados (también llamadas resonancias de circuito abierto).

La ecuación (1.8) es una ecuación lineal homogénea de cuarto grado que tiene cuatro raíces complejas  $D_1, D_2, D_3$  y  $D_4$ . Si estas raíces son distintas entonces las cuatro funciones

$$y_i = e^{D_i t} \quad i = 1..4 \quad (1.11)$$

constituyen un espacio básico de soluciones para el sistema formado por la ecuación (1.6) y la ecuación (1.7). La solución general de este sistema es por lo tanto

$$q_1 = \sum_{i=1}^4 A_i e^{D_i t} \quad (1.12)$$

$$q_2 = \sum_{i=1}^4 B_i e^{D_i t} \quad (1.13)$$

Las constantes  $A_i$  y  $B_i$  pueden ser evaluadas usando las condiciones iniciales  $t = 0$ .

$$\begin{aligned} q_1 &= 0 \\ q_2 &= q_0 \\ \mathcal{D}q_1 &= \mathcal{D}q_2 = 0 \end{aligned} \quad (1.14)$$

Donde  $q_0$  es la carga inicial del condensador primario. Los voltajes del condensador primario y secundario son simplemente

$$v_1 = \frac{1}{C_1} q_1 = \frac{1}{C_1} \sum_{i=1}^4 A_i e^{D_i t} \quad (1.15)$$

$$v_2 = \frac{1}{C_2} q_2 = \frac{1}{C_2} \sum_{i=1}^4 B_i e^{D_i t} \quad (1.16)$$

Las soluciones para  $v_1$  y  $v_2$  solo pueden ser calculadas para el caso ideal de  $R_1 = R_2 = 0$ . Las raíces de la ecuación (1.8) tienen solo parte imaginaria y el voltaje en el secundario se puede expresar como

$$v_2(t) = \frac{2kV_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{w_2 + w_1}{2}t\right) \sin\left(\frac{w_2 - w_1}{2}t\right) \quad (1.17)$$

Donde:

$$T = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \frac{L_2C_2}{L_1C_1} \quad (1.18)$$

$$w_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) - \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(1-k^2)}} \quad (1.19)$$

$$w_2 = \omega_2 \sqrt{\frac{(1+T) + \sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}}{2(1-k^2)}}$$

$T$  es el coeficiente de sintonización, definido como el cuadrado del cociente de las frecuencias de resonancia desacopladas, mientras que  $V_1$  es el voltaje inicial a través de  $C_1$ ,  $w_1$  y  $w_2$  son las frecuencias de resonancia del primario y el secundario cuando están acoplados. Las restricciones de los valores de  $k$  y  $T$  hacen que  $w_1$  y  $w_2$  sean siempre reales y que  $w_2 > w_1$ .

La ecuación (1.17) es importante y muestra que el voltaje del secundario es una oscilación de alta frecuencia  $(w_1 + w_2)/2$  cuya amplitud se modula por otra oscilación de baja frecuencia  $(w_1 - w_2)/2$ .

## **1.4. Aplicaciones**

### **1.4.1. Prueba de materiales aislantes**

Los materiales aislantes usados en fuentes de tensión de alto voltaje están expuestos a altos voltajes de alta frecuencia. Las pruebas tradicionales realizadas con alta tensión en corriente continua no revelan el verdadero comportamiento de los materiales frente a esta tensión. Se han obtenido resultados satisfactorios utilizando fuentes de alta tensión de alta frecuencia para estas pruebas.

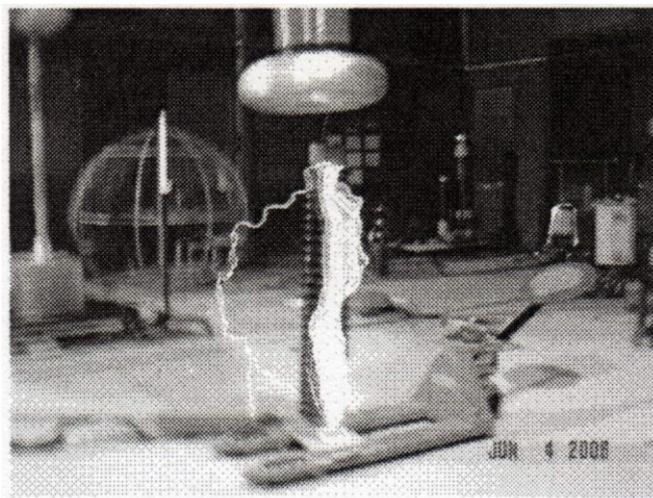
Los transformadores de núcleo metálico no son los más adecuados para generar pulsos de alta tensión a alta frecuencia, hay que utilizar ferrita en vez de hierro lo que aumenta el coste considerablemente para la potencia necesaria. Además, la potencia reactiva demandada por la carga capacitiva de objeto de prueba tiene que pasar también por el transformador y ser suministrada por él.

Los transformadores de núcleo de ferrita tienen una capacidad muy alta comparada con el objeto de estudio y produce altos efectos no lineales de flujo que dan como resultado armónicos no deseados.

Los transformadores de núcleo de aire como la bobina Tesla no tiene efectos no lineales de flujo ya que su núcleo es de aire, además, se puede disminuir fácilmente su capacidad haciendo el secundario más grande y aumentando la separación entre sus espiras.

### **1.4.2. Prueba de Aisladores de alta tensión**

Asimismo se pueden utilizar las bobinas Tesla para la prueba de aisladores de protección para alta tensión, ya que las descargas producidas por las bobinas Tesla son muy parecidas a las perturbaciones transitorias que se dan en sistemas de potencia, como los arcos a tierra producidos en maniobras de encendido.



### **1.4.3. Generación de Pulsos de alta frecuencia**

Las fuentes que generan pulsos de alta tensión con una tasa de repetición alta son muy utilizadas para diferentes problemas. Por ejemplo, pueden ser utilizadas para generar radiación electromagnética para medir objetos con una gran precisión o pulsos de microondas con 3 cm de longitud de onda.

Se han publicado numerosos artículos remarcando el uso de bobinas Tesla en generadores relativistas de rayos de electrones. Su principal ventaja frente al generador de Marx es la alta tasa de repetición de los pulsos y el bajo coste debido al reducido número de condensadores necesarios.

Se tiene constancia de uso de bobina Tesla en cantidad de aparatos portátiles de tubos de rayos catódicos y tubos de rayos X, usados para análisis de joyas y minerales y para radiografías rápidas en campo abierto.

### **1.4.4. Investigación sobre rayos**

La investigación sobre las descargas naturales de rayos ha estado motivada por el deseo de evitar accidentes espectaculares, como los que han ocurrido a lo largo de la historia. Unas descargas eléctricas imprevisibles causaron daños exteriores e interfirieron los ordenadores e instrumentos de la nave Apolo 12 al partir hacia la Luna en 1969. Otras descargas generaron una orden falsa que desvió y destruyó un cohete Atlas-Centauro, en 1987. Poco después indujeron el disparo antes de tiempo de tres cohetes en posición horizontal, en vez de vertical.

Mientras que las descargas nube-tierra han sido estudiadas muy extensamente, las descargas nube-nube y nube-aire necesitan ser estudiadas más profundamente ya que son más difíciles de ser medidas. Las observaciones de campo de estas descargas pueden aclarar bastante poco sobre su comportamiento; su proceso de propagación y su velocidad de descarga son estudiadas mejor escalando las descargas obtenidas en laboratorio.

## **1.5. Aspectos de seguridad**

Dada la peligrosidad de trabajar con alta tensión, hay que seguir unas pautas de seguridad a la hora de la construcción y prueba de la bobina Tesla:

- Se guardaran distancias suficientes entre conductores a diferente tensión para evitar fallos de aislamiento. La mayoría de los cables tienen aislamiento plástico de 1000 V. En el primario la mayor diferencia de potencial es de 15 kV entre conductores. El aire seco tiene una tensión de ruptura de 3000 V/mm, por lo que con una distancia mayor de 5mm entre conductores no aislados sería suficiente, aunque por seguridad los conductores están separados un mínimo de 10 cm.
- Tras la parada de la bobina los condensadores pueden quedar cargados, por lo que es necesario cortocircuitarlos o ponerles una resistencia para descargarlos antes de manipularlos. Para la descarga utilizaremos una pértiga aislada cuya punta está puesta a tierra y guantes aislantes.
- No se debe mirar directamente a las chispas del explosor, ya que por su alta intensidad lumínica, pueden producir lesiones en los ojos e incluso pérdida parcial o total de visión.
- Durante el funcionamiento de la bobina Tesla se apartaran del radio de acción de la bobina Tesla todo tipo de aparatos de medida y electrónicos en general. Por las pruebas realizadas las mayores chispas observadas son de alrededor de 1 m, pero por precaución retiramos todos los aparatos eléctricos fuera de la verja de seguridad durante las pruebas.
- Las descargas eléctricas ionizan el oxígeno del aire produciendo ozono, el cual es tóxico. Es conveniente esperar un rato antes de acceder a la zona de descargas tras la parada del aparato y no tenerlo mucho rato seguido funcionando.
- Siempre que se conecte la bobina Tesla se hará desde la cabina puesta a tierra en la que se encuentran los mandos y con la verja de protección correctamente cerrada.

## 2. Elementos

En este apartado voy a realizar una descripción detallada de las características que deben tener los diferentes elementos constituyentes de una bobina Tesla.

### 2.1. Esquema básico

Este es el esquema básico de bobina Tesla para funcionar con corriente continua, inicialmente probé con corriente alterna, pero como tuve problemas para conseguir descargas decidí probar con el modelo en corriente continua:

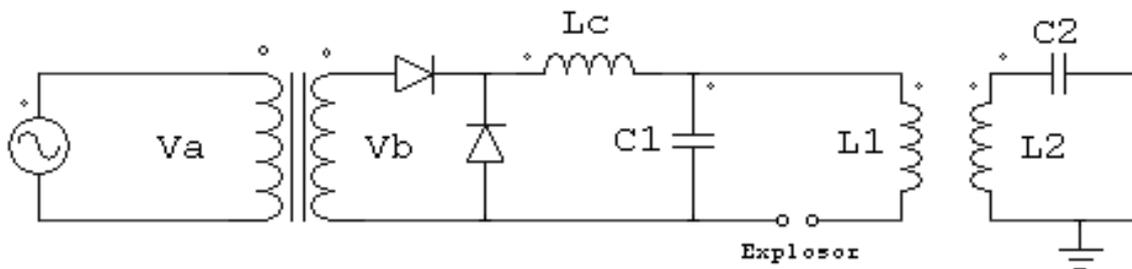


Fig.2. 1 Esquema básico bobina Tesla

### 2.2. Variac

Con el Variac regulo la tensión de entrada al transformador de alimentación, el variac utilizado se encuentra dentro de la cabina puesta a tierra del laboratorio, tiene 3 regulaciones de tensión máxima (28.5V/ 60V/ 226V) y una rueda que va del 0% al 100%. Tiene una protección magnetotérmica de 10 amperes.



Fig.2. 2 Regulación Variac

## 2.3. Transformador de alto voltaje

El Transformador de Alto Voltaje es la fuente principal de energía en una bobina de Tesla convencional. Eleva el voltaje convencional de 110-240 V hasta valores de miles de voltios; generalmente se utilizan voltajes dentro del rango de 8 hasta 20 kV en el circuito primario de la bobina.



Fig.2. 3 Transformador Alto Voltaje

He utilizado uno de los transformadores disponibles en el laboratorio de alta tensión para minimizar costes. Es un transformador de medida con dos regulaciones, una 22000/110 y otra 13200/110. Para mi proyecto lo usaré como transformador elevador, lo he regulado a 110/22000, ya que necesito alrededor de 15 kV para el correcto funcionamiento de mi bobina Tesla.

## 2.4. Diodos rectificadores

Los Diodos rectificadores como su propio nombre indica sirven para rectificar la tensión de salida del transformador. Con los diodos utilizados conseguimos una rectificación de la tensión de salida del transformador de alimentación bastante buena con un rizado pequeño. Los he cogido del laboratorio de alta tensión, están diseñados para aguantar cada uno 17 kV y 300 mA.



**Fig.2. 4 Diodo Semikron 10000V**

En mi caso es un SEMIKRON HSK E 17000/7600-0.3



**Fig.2. 5 Diodo Semikron 17000 V**

## **2.5. Bobina de Choque**

La bobina de choque ( $L_c$ ) impide el flujo de corriente al transformador durante el cierre del explosor. Mientras el explosor esta abierto no afecta prácticamente al funcionamiento, ya que al trabajar con corriente continua la impedancia que aporta la bobina es despreciable, pero cuando se cierra el explosor y se produce la descarga de los condensadores, la gran impedancia a alta frecuencia de  $L_c$  impide el flujo de corriente de vuelta al transformador.

He utilizado como bobina de choque el bobinado secundario de un transformador de medida de alta tensión que había en el laboratorio con una inductancia de 2 H.



Fig.2. 6 Trafo Medida usado como  $L_c$

## **2.6. Condensador Primario**

El condensador de alto voltaje es quizás la parte más sensible de una bobina de Tesla. Dado que está sometido a voltajes enormes y a que sus descargas producen corrientes eléctricas del orden de cientos de amperes a frecuencias de cientos de kHz, es una pieza de enorme importancia en el funcionamiento del sistema entero.

En principio, el condensador es un depósito para la energía proporcionada por el transformador. Además tiene como función, en conjunto con la bobina primaria y el explosor, generar los pulsos de alta frecuencia que hacen funcionar a la bobina.

Los valores de capacidad del condensador principal suelen estar entre  $0,05 \mu\text{F}$  y  $0,2 \mu\text{F}$ . Su valor influye en la frecuencia de resonancia del primario y del secundario, y en la máxima potencia disponible para la bobina Tesla.

Dada la naturaleza de su función, el condensador utilizado debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Tener una alta resistencia dieléctrica. Como se trabaja con altos voltajes el condensador debe ser capaz de soportarlos; primero debe resistir voltaje iguales al pico

del transformador, e incluso debe ser capaz de tolerar picos ocasionales de hasta el doble del voltaje de aquel.

- Que el dieléctrico sea apropiado para su uso a radiofrecuencias. Aunque el capacitor se carga con corriente continua o alterna en el rango de 50-60 Hz, su descarga es una oscilación eléctrica de cientos de miles de ciclos por segundo. A estas frecuencias el dieléctrico no debe absorber cantidades importantes de energía pues esta energía naturalmente se convierte en calor, lo cual puede afectar su estructura molecular. Los condensadores comerciales y los caseros de buena calidad tienen como dieléctrico polipropileno, polietileno o poliestireno, plásticos cuyas pérdidas a radiofrecuencias son muy bajas y prácticamente no sufren calentamiento interno.

- Tolerar la corriente de descarga. La corriente de descarga de un capacitor es del orden de cientos de amperes y debe ser capaz de resistirlos; de otro modo sufrirá de calentamiento excesivo que podría llegar a destruirlo.



**Fig.2. 7 Condensadores comerciales**

Dada la importancia del condensador principal y las características que debe tener, decidí confeccionarlo como una combinación serie paralelo de condensadores comerciales de 1  $\mu\text{F}$  y 1 kV de tensión nominal.

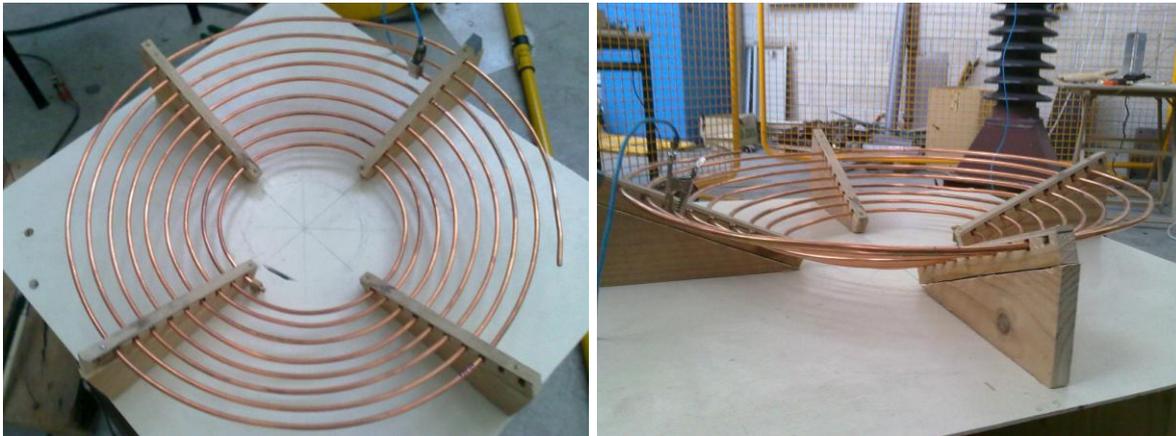
## **2.7. Bobina Primaria**

La bobina primaria es un arrollamiento de conductor de baja inductancia y gran conductividad eléctrica. Por lo general estas bobinas constan de 15 o menos espiras de conductor, usualmente tubo de cobre arrollado en formas diferentes según se necesite. No se utiliza un conductor macizo ya que sería muy caro y no merece la pena ya que por el efecto pelicular la corriente circularía solo por la superficie del conductor.

Es práctica común usar uno de tres diseños: espiral plana, espiral cónica invertida y solenoide recto. La bobina primaria tiene la función de generar el campo electromagnético mediante el cual se transfiere la energía almacenada en el primario al circuito secundario

La bobina primaria debe estar hecha de tal modo que su inductancia sea variable: esto no se logra ni variando su forma geométrica ni reduciendo el número de espiras, sino simplemente que el conductor no esté aislado: de esta manera basta con desplazar uno de los puntos de contacto de la bobina para que la corriente eléctrica circule por menos espiras, lo que reduce la inductancia.

Por conveniencia, el punto fijo de contacto se conecta a la espira interna de la bobina, y el contacto móvil se conecta sobre cualquier otra parte del conductor. El objetivo final es igualar la frecuencia de oscilación del primario con la frecuencia natural de oscilación de la bobina de secundaria, es decir, ponerlas en resonancia.



**Fig.2. 8 Bobina Primaria**



Punto de conexión móvil de la bobina primaria

Para mi bobina he utilizado 9,5 vueltas de tubo de cobre de 6mm, arrollados en forma de espiral cónica invertida. He elegido este diseño para conseguir el factor de acoplamiento deseado.

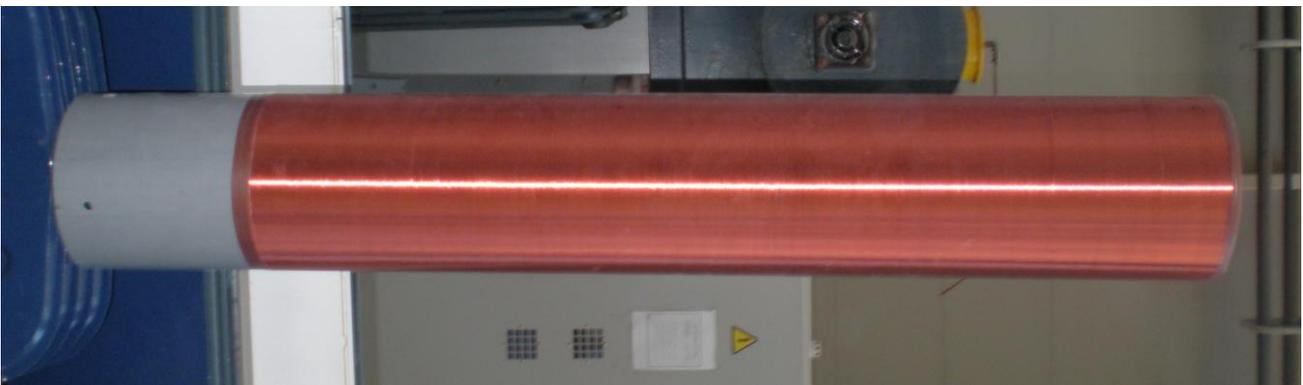
## **2.8. Bobina Secundaria**

La bobina secundaria junto con la primaria son la parte transformadora del Transformador de Tesla. Es en este gran solenoide donde se generan los altos voltajes que producen esas espectaculares descargas al aire, que son el principal objetivo de este proyecto.

La bobina secundaria usualmente se construye en forma de solenoide, pero también puede tener forma cónica. Se construye sobre alguna forma cilíndrica plástica. El material más común es el PVC por su rigidez y bajo costo.

El secundario se devana con conductor de cobre de calibres que van de 0,3 a 1 mm de diámetro. La elección exacta depende de las dimensiones que se deseen para la bobina y la potencia manejada por el sistema, además de considerar que los secundarios tienen entre 800 y 1500 espiras de conductor de cobre por lo general. La longitud del devanado depende de la potencia del sistema, ya que mayores potencias implican descargas más largas y más posibilidades de que se forme un arco entre el toroide y la bobina primaria. Esto no es problema si se cuenta con dispositivos de protección adecuados para el transformador, pero tampoco es muy vistoso que la mayor parte de las descargas terminen incidiendo sobre el primario. Se recomienda guardar una relación altura-diámetro (H:D) de 3:1 a 5:1 para un óptimo funcionamiento; además, la inductancia de la bobina crece proporcionalmente al área transversal de la forma y directamente proporcional al cuadrado del número de espiras.

Una vez devanado el secundario es muy buena idea darle un recubrimiento de barniz para mantener firme el alambre y evitar que pierda fuerza, además de que se ve muy bien; inclusive se tiene más protección para el conductor pues la resistencia dieléctrica a la formación de arcos a lo largo secundario se incrementa. En pocas palabras, se garantiza una vida más larga a la bobina.



**Fig.2. 9 Bobina Secundaria**

En mi caso utilicé un trozo de tubería de PVC que había en el laboratorio y que por dimensiones se adaptaba a mis necesidades. La bobina tiene 1100 vueltas de alambre de cobre barnizado de 0,5 mm de diámetro y guarda una relación H:D de 3,75.

## **2.9. Terminal Superior**

El terminal es el punto de emisión eléctrica de una bobina de Tesla. Generalmente es un toroide o una esfera de aluminio, pero también puede ser un disco o una simple punta. Como todo conductor tiene una capacitancia.

La importancia del terminal radica en que es un lugar de almacenaje de energía para la alimentación de las descargas al aire. La elección del terminal es una tarea crucial para obtener las mayores descargas a una potencia dada.

Por lo general se utiliza un toroide como terminal eléctrico. Los toroides tienen capacidades muy grandes por su gran radio de curvatura externo, a diferencia de las esferas que necesitan ser muy voluminosas para igualar la capacidad. Luego está el diámetro menor del toroide, el cual en buena medida determina el voltaje de emisión. Toroides de sección grande tienen emisiones eléctricas bajas o prácticamente nulas, mientras que toroides delgados lanzan descargas con mucha facilidad.

Un beneficio adicional de un toroide es que disminuye la intensidad del campo eléctrico que circunda la parte alta de la bobina secundaria. Estos campos eléctricos son tan intensos que producen emisión electrónica en las espiras superiores y no solo en el extremo del conductor. La colocación de un toroide elimina estas emisiones y brinda un único punto de descarga. Finalmente, se encuentra el hecho de que un toroide luce muy bien.

Idealmente un toroide, al igual que una esfera, cuenta con una superficie suave y uniforme libre de irregularidades y asperezas. Un toroide así es costoso y difícil de conseguir. Por lo tanto, es más sencillo y económico construir un toroide con cierto grado de irregularidades usando materiales empleados para otros fines, como conducto de ventilación, el cual es flexible y se le puede dar forma de toro.



**Fig.2. 10 Terminal Superior en forma de toro**

En mi caso he construido el toroide con tubo de ventilación que tenía por casa de 13 cm de diámetro dándole un diámetro interior de 31,5 cm aprovechando una tubería de PVC como soporte.

## 2.10. Explosor

El explosor funciona como un interruptor de alto voltaje en el primario. A medida que se acumula carga en las placas del capacitor, el voltaje entre estas aumenta, hasta que alcanza un límite impuesto por la naturaleza de aquel; Como existen dos tipos de explosores: estático y giratorio, es apropiado estudiar cada uno por separado.

El explosor estático consiste en una serie de piezas conductoras fijas llamadas electrodos las cuales se encuentran separadas una distancia también fija. El voltaje de activación del explosor (interruptor cerrado) es directamente proporcional a la separación entre electrodos. Así, a mayor separación mayor voltaje se necesita para que se produzca un arco y el espacio entre electrodos se vuelva conductor. El tipo de explosor más simple consta de dos electrodos separados por aire.



**Fig.2. 11 Primer Explosor estático**

Este fue mi primer diseño. Con el uso las puntas se iban haciendo más pequeñas y había que acercarlas más, el disparo no era del todo uniforme ni en tensión ni en frecuencia de disparo.

Por otra parte tenemos el explosor giratorio, el cual cuenta con electrodos móviles y fijos. El funcionamiento de este es el siguiente: cuando dos electrodos, uno fijo y otro móvil se encuentran lo suficientemente cerca se produce el arco eléctrico y se descarga el capacitor. A medida que se aleja el electrodo móvil del fijo el arco tiende a extinguirse hasta que no le es posible sostenerse y se apaga. Como se aprecia, con un explosor giratorio es posible obtener cierto grado de control sobre el periodo de tiempo en que se extingue un arco; la diferencia principal radica en que en el explosor giratorio el voltaje que alcanza el capacitor no depende del espacio entre electrodos sino en el tiempo que toma que el electrodo móvil se acerque al fijo (presentaciones); es por esto que la separación entre electrodo fijo y móvil, cuando están alineados, debe ser lo más pequeña posible: del orden de décimas de milímetro, digamos, de 0,2 – 0,5 mm. Entonces el tiempo de carga del capacitor termina dependiendo de la velocidad angular del motor, es decir, las revoluciones por minuto, y del número de electrodos fijos y móviles.



**Fig.2. 12 Primer Explosor Rotativo**

Este fue mi segundo diseño, utilicé un pequeño motor de corriente continua para hacerlo girar. Por la imposibilidad de equilibrado del rotor era difícil conseguir un disparo uniforme, además los electrodos eran demasiado pequeños y el disparo no se producía siempre que debía.



**Fig.2. 13 Explosor Rotativo Definitivo**

Por último construí este explosor giratorio, el equilibrado es mucho mejor que en el anterior diseño por lo que el ajuste de las distancias entre electrodos es más preciso y con los electrodos semiesféricos se consigue el disparo con más facilidad y mucho más estable, debido al mayor radio de la superficie de disparo.

## **2.11. Puesta a Tierra**

La conexión a tierra es la unión física del conductor del cual está hecha la bobina secundaria en Transformador de Tesla con el suelo, sus sedimentos y minerales.

La conexión a tierra cobra especial importancia porque es el nodo de voltaje cero del sistema. Este nodo de voltaje constante en la base del secundario permite que el voltaje desarrollado en el terminal superior sea máximo, además de que el primario y secundario son circuitos independientes. Así que su construcción requiere ciertas condiciones para funcionar apropiadamente.

Las tierras empleadas en Bobinas de Tesla, llamadas tierras de radiofrecuencia, son tierras de muy baja impedancia, y deben estar separadas de aquellas que formen parte de la red de distribución eléctrica. Además deben tener la suficiente capacidad para desplazar las enormes corrientes generadas en la base de la bobina: esto implica conductores de gran área y longitud. El calibre de los conductores empleados para las conexiones tienen que ser grueso y lo más corto posible.



**Fig.2. 14 Conexión a tierra bobina secundaria**

La conexión a tierra la he realizado mediante una tira de metal conectada a la base del devanado del secundario. El otro extremo de la tira lo he conectado a un conductor unido a la estructura metálica del edificio, la cual hace las veces de tierra.



**Fig.2. 15 Conexión a tierra del taller**

## **3. Modelado y simulación**

En este capítulo hablaré sobre los programas utilizados para la simulación del funcionamiento de la bobina Tesla, el modelado de los circuitos y los resultados obtenidos en las simulaciones y cómo se asemejan a los resultados prácticos.

### **3.1. Programa de simulación**

El programa que he utilizado para las simulaciones es el ICAP/4

### **3.2. Modelado de cada elemento constituyente.**

Explicación detallada del modelado de cada elemento de la bobina Tesla para las simulaciones con ICAP/4

#### **3.2.1 Fuente de alimentación**

En vez de modelar el variac, el transformador de tensión y los diodos rectificadores he agrupado todo el conjunto como una fuente de tensión continua de 15 kV

#### **3.2.2 Condensador Primario**

Aunque el condensador primario esta formado por 18 condensadores de 0,1  $\mu\text{F}$  para la simulación los he modelado como un único condensador de 0,055  $\mu\text{F}$ . Inicialmente lo modelé como un condensador con una resistencia en serie, pero luego vi que era despreciable y las simulaciones se asemejaban más a la realidad sin la resistencia.

#### **3.2.3 Bobina Primaria**

La bobina primaria la modelé como una bobina ideal de 29,47  $\mu\text{H}$  con una resistencia en serie de 0,2  $\Omega$ , aunque realmente su resistencia es prácticamente despreciable con respecto a la impedancia total del circuito primario. Su capacidad se puede despreciar ya que la separación entre espiras es muy grande por lo que su capacidad es muy pequeña.

### 3.2.4 Bobina Secundaria

La bobina secundaria está modelada como una bobina ideal de 45,36 mH con una resistencia en serie de 47,78  $\Omega$  y un condensador en paralelo. En este caso la capacidad no es despreciable ya que la única separación entre espiras es el barniz del conductor por lo que se debe tener en cuenta.

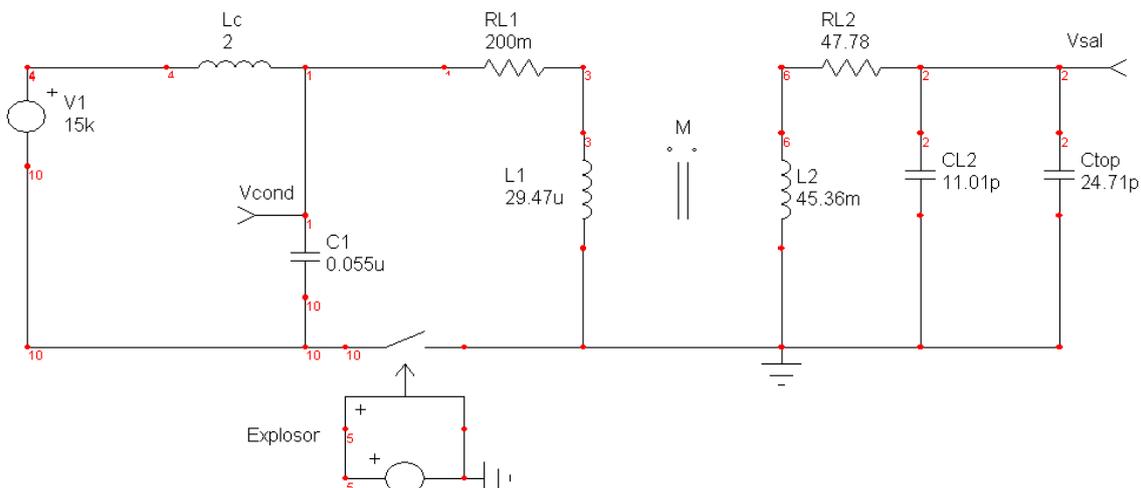
### 3.2.5 Acoplamiento entre bobinas

El acoplamiento entre las bobinas primaria y secundaria se modela como una inductancia mutua entre  $L_1$  y  $L_2$  con un factor de acoplamiento  $k = 0.175$  medido anteriormente

### 3.2.6 Explosor

El explosor está modelado con un interruptor controlado por tensión y una fuente de tensión generadora de pulsos a una determinada frecuencia, la frecuencia escogida es 25 Hz. Esta frecuencia implica un periodo de un disparo cada 4ms, haciéndola corresponder con el explosor definitivo construido.

## 3.3. Circuito de simulación.



**Fig. 3.1 Circuito Simulado con Icap4**

Este es el circuito montado para la simulación, con las sondas para observar la tensión de carga del condensador y la tensión de salida (tensión en el terminal superior).

### 3.4. Resultados de la simulación.

Los resultados obtenidos en la simulación son los esperados y como ya veremos más adelante se asemejan a los obtenidos en la pruebas en el laboratorio.

En la imagen de abajo vemos el detalle de lo ocurrido durante un disparo del explosor. La onda en azul es la tensión en el terminal superior, la negra es la tensión en el condensador y la verde es la tensión en el interruptor de disparo, por lo que cuando se da el impulso el interruptor se cierra y cuando se hace cero se abre de nuevo.

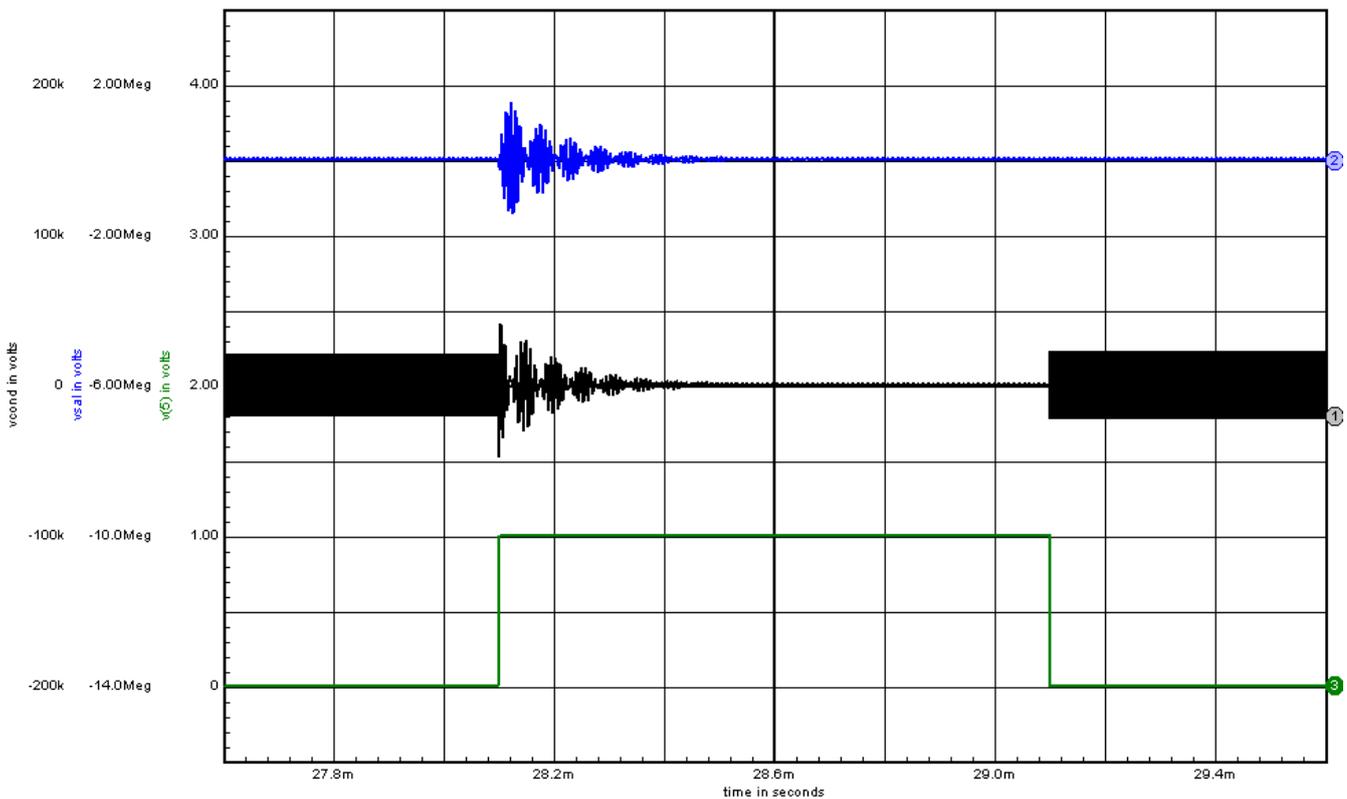


Fig. 3.2 Simulación de un disparo del explosor

Vemos cómo instantes antes del cierre del explosor el condensador principal esta cargado a una tensión de aproximadamente 15 kV. Cuando se cierra el explosor el condensador se descarga sobre la bobina primaria con una frecuencia igual a la frecuencia de resonancia.

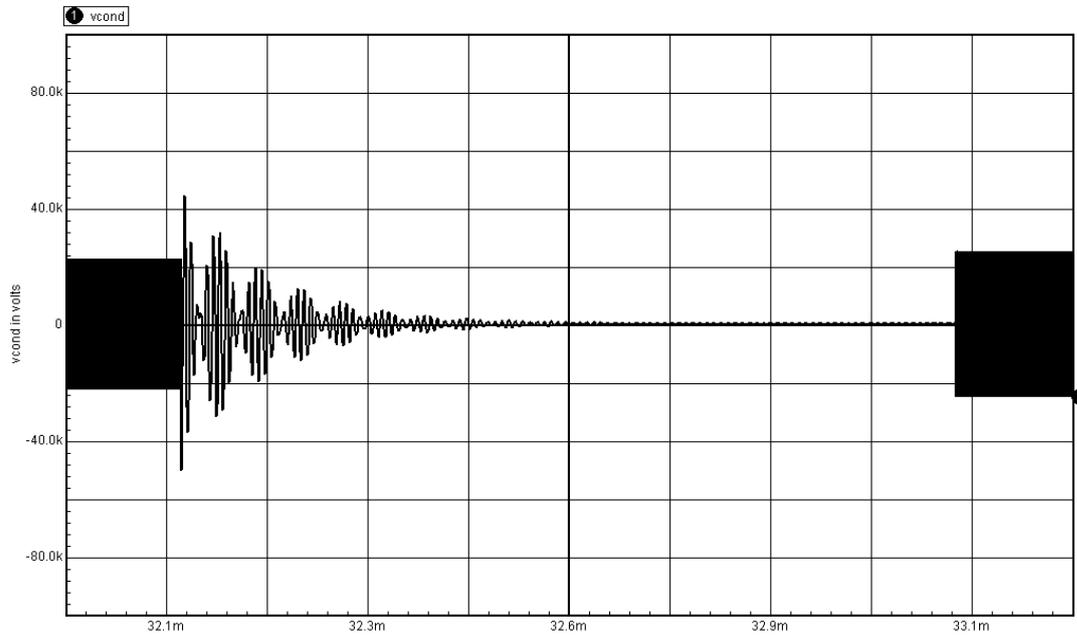


Fig. 3.4 Zoom Tensión Condensador

La energía del primario es transferida al secundario amplificada alcanzando valores de alrededor de 1,5 MV y produciendo las descargas al aire.

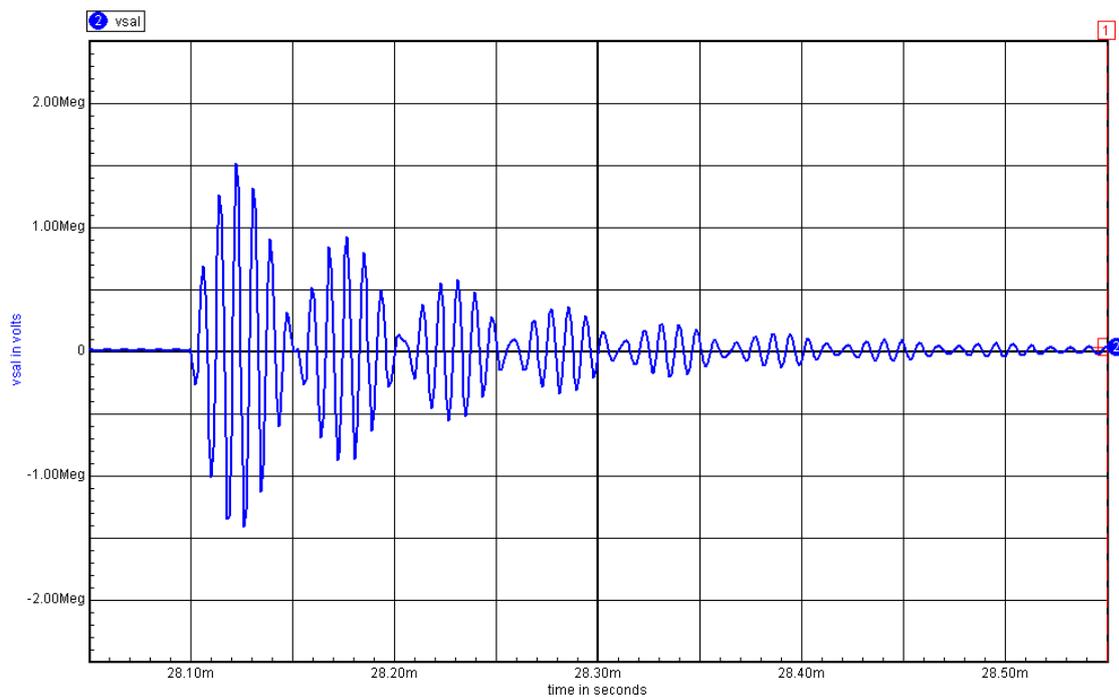


Fig. 3.3 Zoom Tensión Terminal Superior

Como ya vimos en la teoría, la tensión del secundario  $V_2$

$$v_2(t) = \frac{2kV_1}{\sqrt{(1-T)^2 + 4k^2T}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \sin\left(\frac{w_2 + w_1}{2}t\right) \sin\left(\frac{w_2 - w_1}{2}t\right)$$

Es una oscilación de alta frecuencia  $(w_1 + w_2)/2$  cuya amplitud se modula por otra oscilación de baja frecuencia  $(w_1 - w_2)/2$ .

Con los datos teóricos estas serían:

$$\frac{w_2 + w_1}{2} = \frac{225000 + 225000}{2} = 225000 \text{ Hz}$$

$$\frac{w_2 - w_1}{2} = \frac{2250000 - 225000}{2} = 0 \text{ Hz}$$

Para  $w_1 = w_2$ , el caso ideal.

En el gráfico de arriba vemos claramente las dos diferentes frecuencias de oscilación, la de alta frecuencia sería 220 kHz y la de baja frecuencia 10 kHz.

Vemos en la simulación por las diferencias de frecuencias de resonancia entre primario y secundario los datos difieren levemente de los teóricos aun habiendo ajustado al máximo las frecuencias de resonancia.

## 4. Cálculo y diseño de los elementos

En esta sección explicaré detalladamente como diseñé teóricamente y escogí cada elemento que constituye mi bobina Tesla. El diseño de la bobina Tesla debe llevar un orden para realizarlo correctamente. Primero elegiremos la fuente de tensión en función de la potencia de la bobina. En mi caso voy a diseñar una bobina de tamaño medio, aproximadamente de 1,5 kW. Después, basándonos en la potencia pasaríamos a diseñar la bobina del secundario, seleccionaremos una frecuencia de resonancia y calcularemos el valor de capacidad necesario para esa frecuencia y diseñaremos el terminal superior. Una vez tengamos el secundario calculado pasaremos al circuito primario. Primero seleccionaremos el valor del condensador primario y después calcularemos el valor de la inductancia de la bobina primaria. Tener en cuenta que estos valores son teóricos. En la siguiente sección explicaré como realicé las medidas prácticas de cada elemento por separado y daré los valores reales de todos ellos.

### 4.1. Transformador de alta tensión

Dado que el variac está protegido con un magnetotérmico de 10 A, la corriente en el primario del transformador no podía superar ese valor, por lo que necesitaba un transformador que me proporcionase una potencia máxima de 1,5 kW sin alcanzar los 10 A en el primario. Tras probar varios transformadores de los que había en el laboratorio de alta tensión y realizar algunos ensayos escogí un transformador de medida 110/13200/22000 V regulado en 110/22000 V que cumplía las características necesarias.

### 4.2. Bobina Secundaria

Cuanto más alta sea la bobina del secundario mayor será la distancia entre el Terminal superior y la bobina primaria y mayores serán las potencias que se pueden utilizar sin que salten chispas entre ambos. Para la potencia máxima que voy a usar bastaría con una bobina de 0,5 metros. Como ya vimos antes, la bobina del secundario debe guardar una proporción altura-diámetro de entre 3 y 5 unidades.

Tenía a mi disposición tubería de PVC de 16 cm y de 20 cm de diámetro, decidí construir una bobina de 60 cm de longitud. Con la tubería de 16 cm de diámetro guarda una relación H:D = 3,75, que se ajusta a los límites. El conductor utilizado para bobinarla debe tener un calibre de entre 0,3 y 1mm, como disponía de una bobina de conductor de 0,5 mm en el laboratorio decidí utilizar ese para la bobina. Por lo tanto para 60cm de bobina y un conductor de 0,5 mm de diámetro tenemos:

$N^{\circ}$  Espiras teórico = Altura / Calibre del conductor =  $60/0,05 = 1200$  espiras teóricas.

Para el cálculo de la inductancia de la misma utilicé la fórmula de Wheeler:

$$L_s = \frac{R^2 N^2}{2540 \times (9R + 10H)} \quad (4.1)$$

Donde:

$L_s$	Inductancia del secundario [ $\mu H$ ]
$R$	Radio del secundario [cm]
$H$	Altura del secundario [cm]
$N$	Número de vueltas

El número final real de espiras difiere del teórico en alrededor de 100 espiras por motivos constructivos, con 1100 espiras el cálculo teórico de la inductancia varía y la nueva inductancia teórica será:

$$L_s = \frac{8^2 \times 1100^2}{2540 \times (9 \times 8 + 10 \times 60)} = 45,36mH$$

La capacidad parasita de la bobina se puede estimar por la formula de Medhurst:

$$C_s = K \cdot D \quad (4.2)$$

Donde:

$C_s$	Capacidad de la bobina [pF]
$D$	Diámetro del secundario [cm]
$K$	Constante que depende de H/D, $K = 0,100976 \cdot \frac{H}{D} + 0,30963$

En mi caso, H/D = 3,75 por lo que K=0,6883, por tanto:

$$C_s = 0,6883 \times 16 = 11,01pF$$

La cantidad de cable necesario para la bobina secundaria es:

$$l_s = 2\pi Rn = 2 \times \pi \times 0,08 \times 1100 = 552,9m \quad (4.3)$$

Y por tanto la resistencia de la bobina será:

$$R_s = \rho \frac{l_s}{\pi \left(\frac{G}{2}\right)^2} = 0.017 \times \frac{552,9}{\pi \left(\frac{0,5}{2}\right)^2} = 47,87\Omega \quad (4.4)$$

### **4.3. Terminal Superior**

La capacidad del toroide se calcula con la siguiente formula empírica:

$$C_{top} = 2,8 \times \left(1,2781 - \frac{d_2}{d_1}\right) \times \sqrt{0,1217 \times d_2 \times (d_1 - d_2)} \quad (4.5)$$

Donde:

$C_{top}$	Capacidad del Toroide [pF]
$d_1$	Diámetro exterior [cm]
$d_2$	Diámetro de la sección transversal [cm]

En mi caso:

$$C_{top} = 2,8 \times \left(1,2781 - \frac{13}{57,5}\right) \times \sqrt{0,1217 \times 13 \times (57,5 - 13)} = 24,71pF$$

La frecuencia de resonancia del secundario totalmente ensamblado sería:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s(C_s + C_{top})}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{45,36 \cdot 10^{-3} (35,72 \cdot 10^{-12})}} = 125KHz \quad (4.6)$$

## 4.4. Condensador Primario

El valor de la capacidad del condensador primario suele estar comprendido entre 0,05  $\mu\text{F}$  y 0,2  $\mu\text{F}$ , en mi caso disponía de 20 condensadores de 1  $\mu\text{F}$  y 1 kV de tensión nominal. Con ellos podía conseguir valores comprendidos entre los límites superior e inferior con combinaciones serie paralelo de ellos, pero para que aguantasen los 15 kV de tensión del circuito primario necesitaba por lo menos ramas de 15 condensadores en serie con lo que conseguía una capacidad de 0,066  $\mu\text{F}$  de capacidad. Al final tras varias pruebas decidí darle algo más de margen de tensión y dispuse 18 condensadores en serie consiguiendo una tensión máxima admisible de 18 kV y una capacidad de 0,055  $\mu\text{F}$ .

## 4.5. Bobina Primaria

La forma elegida para la bobina primaria inicialmente fue la de espiral plana de Arquímedes, pero tras alguna prueba decidí cambiarla a una espiral cónica invertida para aumentar el factor de acoplamiento entre el primario y el secundario. El valor de  $L_1$  lo calculo igualando la frecuencia de resonancia del primario y del secundario.

$$f_p = f_s = 125\text{kHz} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (4.7)$$

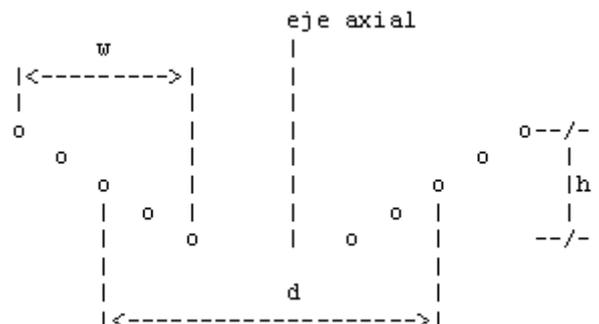
$$L_1 = \frac{1}{(2\pi \cdot f_s)^2 \cdot C_1} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 125000^2 \cdot 0,055 \cdot 10^{-6}} = 29,47\mu\text{H}$$

Dado que la bobina secundaria debe ir colocada dentro de la primaria el diámetro interior de la espiral tiene que ser mayor que el diámetro del solenoide del secundario más un margen para evitar arcos entre ambas bobinas. La bobina secundaria tiene un diámetro de 16 cm y dejo un margen de 3 cm a cada lado, por lo tanto el diámetro interior de la bobina primaria será de 22cm. La inductancia de la espiral cónica invertida se calcula con un formula empírica.

$$L_1 = n^2 \cdot d \cdot \frac{1}{40,8 + 112 \frac{w}{d}} \quad (4.8)$$

Donde:

$L_1$	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]



En mi caso la bobina que he construido tiene 8,5 vueltas, un diámetro medio de 38 cm y una anchura de espiras de 16 cm:

$$L_1 = 8,5^2 \cdot 38 \cdot \frac{1}{40,8 + 112 \cdot \frac{16}{38}} = 31,21 \mu H$$

Hay que tener en cuenta que esta es la inductancia total de la bobina, y que una de las conexiones es móvil. Por lo tanto deberé calcular dónde poner la pinza de conexión para obtener una bobina de 29,47  $\mu H$ .

$$n = \sqrt{\frac{L_1 \cdot \left(40,8 + 112 \cdot \frac{w}{d}\right)}{d}} = \sqrt{\frac{29,47 \cdot \left(40,8 + 112 \cdot \frac{16}{38}\right)}{38}} = 8,25 \text{ Vueltas} \quad (4.9)$$

## 4.6. Explosor

La tensión de ruptura del aire seco es aproximadamente de 3000V/mm. Por lo que para que salte un arco con una tensión de 15 kV debería haber una separación de 5mm como mucho. Como el explosor es rotativo y quiero que la velocidad de giro sea lo que marque la frecuencia de disparo y no la separación de los electrodos, utilizo una separación mucho mas pequeña, de alrededor de 1mm en cada lado, 2mm en total, de tal forma que siempre que se alineen los electrodos se produzca el arco eléctrico y con ello el cierre del circuito primario.

He medido la velocidad de giro del rotor de explosor con un tacómetro digital, las medidas son de aproximadamente 375 rpm. Como el explosor dispara 4 veces por vuelta, vemos que dispara 1500 veces por minuto, que son 25 veces por segundo. A esta velocidad de giro, se dispara cada 40ms, tiempo suficiente para que el condensador primario alcance la carga total.

## 4.7. Diodos rectificadores

Necesitaba unos diodos que aguantasen los 15 kV de tensión de pico que hay en el secundario y 150 mA de corriente. Los diodos que había en el laboratorio soportan 17 kV y 300mA, así que satisfacían con creces mis necesidades para este proyecto.

## **4.8. Bobina de choque**

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 suficientemente grande. Como construir una bobina de inductancia elevada es bastante costoso y complicado decidí utilizar el devanado secundario de unos de los transformadores de medida de alta tensión del laboratorio cuya inductancia era de 2 H.

## **5. Ensayos y medidas**

En este capítulo contaré cómo realice los ensayos prácticos pertinentes para el cálculo de las medidas reales de los diferentes elementos y parámetros. Y cómo ajusté la bobina Tesla para que se ajustasen lo más posible a los cálculos teóricos y simulaciones realizadas.

### **5.1. Medida de la capacidad de $C_1$ .**

El condensador primario es una combinación en serie de 18 condensadores de 1  $\mu\text{F}$ . Teóricamente su capacidad es 0,055  $\mu\text{F}$ , la medida práctica la realizo con un medidor RLC con capacidad de medir a frecuencias de 1 Hz a 20 kHz y a 100 kHz. La frecuencia de operación de la bobina Tesla es 125 kHz por lo que ajusto el aparato en la frecuencia más próxima que es 100 kHz.

El valor obtenido para  $C_1$  es de 0,056  $\mu\text{F}$  que es prácticamente el valor teórico.

### **5.2. Medida de la resistencia e inductancia de $L_2$ .**

La bobina secundaria es un solenoide de alrededor de 1100 espiras arrolladas sobre una tubería de PVC con núcleo de aire, su resistencia teórica es de 47,82  $\Omega$ , y su inductancia teórica es de 45,36 mH.

Al igual que con los demás elementos realizamos las medidas tanto de resistencia como de inductancia con el medidor RLC a 100 kHz de frecuencia.

Los valores de resistencia e inductancia medidos son  $R = 10 \text{ k}\Omega$  y  $L_2 = 44,1 \text{ mH}$ . El valor de la resistencia es distinto al calculado teóricamente o medido con el multímetro, ya que esta medida se está realizando a una frecuencia de 100 kHz. La resistencia medida con el multímetro es de 50  $\Omega$  que se asemeja más a la resistencia teórica calculada. Pero es la resistencia de 10  $\text{k}\Omega$  la que realmente actúa durante el funcionamiento de la bobina Tesla.

### 5.3. Medida de la resistencia e inductancia de $L_1$ .

La bobina primaria consta de 9 metros de tubería de cobre de 6mm de diámetro y 1mm de espesor, arrollados en formas de espiral cónica invertida de 8,5 vueltas.

Medimos tanto su resistencia como su impedancia con el aparato RLC a 100 kHz de frecuencia.

Los valores de resistencia e inductancia medidos son  $R = 0,27 \Omega$  y  $L_1 = 32,3 \mu\text{H}$ .

### 5.4. Medida del coeficiente de acoplamiento $k$ .

El factor de acoplamiento en las bobinas Tesla suele estar entre 0,1 y 0,4. Para medir el factor de acoplamiento de las bobinas primaria y secundaria de mi transformador Tesla montaré el siguiente circuito:

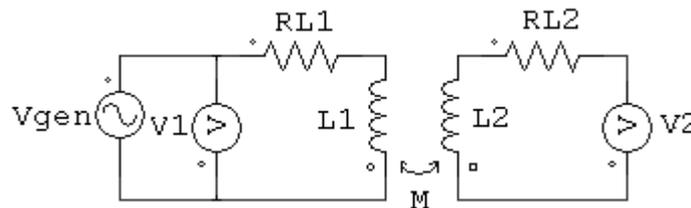


Fig.5. 1 Circuito para medida de  $k$

Dado que estamos trabajando a una frecuencia de alrededor de 125 kHz no podré hacer las medidas con el multímetro digital y necesitaré usar un osciloscopio, para la tensión  $V_1$  utilizaré el canal 1 para  $V_2$  el canal 2.

Pero para que el método funcione  $\omega L_1 \gg RL_1$ , siendo  $\omega$  la pulsación,  $L_1$  la inductancia propia de la bobina primaria y  $RL_1$  su resistencia. Y también la impedancia del voltímetro conectado al secundario debe cumplir que

$$R \cdot V_2 \gg \sqrt{(\omega \cdot L_2)^2 + R_2^2} . \quad (5.1)$$

Sólo entonces puede calcularse  $k$  como

$$k = \frac{V_2 \cdot n_1}{V_1 \cdot n_2} \approx \frac{V_2 \sqrt{L_1}}{V_1 \sqrt{L_2}} \quad (5.2)$$

Siendo  $n_1$  y  $n_2$  el número de espiras del primario y secundario respectivamente,  $L_1$  y  $L_2$  sus inductancias y  $V_1$  y  $V_2$  su tensión en bornes.

Tenemos una frecuencia de resonancia de 125 KHz  $\implies \omega = 2\pi f_0 = 785398$  Hz. Regulamos la tensión de entrada a 2 V y la lectura de la tensión de salida 13 V. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} V_1 &= 2 \text{ V} \\ V_2 &= 13 \text{ V} \\ L_1 &= 32,3 \text{ } \mu\text{H} \\ L_2 &= 44,1 \text{ mH} \end{aligned}$$

$$k = \frac{V_2 \sqrt{L_1}}{V_1 \sqrt{L_2}} = \frac{13 \sqrt{32,3 \cdot 10^{-6}}}{2 \sqrt{44,1 \cdot 10^{-3}}} = 0,179$$

## 5.5. Medida de la $f_0$ del primario.

Para la medida de la frecuencia de resonancia del circuito necesitaremos un generador de señales, un osciloscopio y una resistencia de medida  $R_m$  de alrededor de 5  $\Omega$ , nos valemos del hecho de que a la frecuencia de resonancia la impedancia del condensador y la de la bobina tienen el mismo módulo pero signo contrario y su suma es cero de tal manera que sólo veremos su parte resistiva, montamos el circuito de la figura, con el osciloscopio observamos la tensión en la resistencia de medida, y con el generador de señales vamos variando la frecuencia de de la señal de entrada, cuando alcancemos la frecuencia de resonancia la tensión en la resistencia alcanzará un máximo ya que al hacerse la impedancia del conjunto  $C_1$ - $L_1$  mínima la tensión en  $R_m$  será máxima.

La Impedancia del circuito es:

$$Z = R_m + ZL_1 + ZC_1 = R_m + (j\omega L_1 + R_l) + \left(\frac{-1}{j\omega C_1} + R_c\right) \quad (5.3)$$

A la frecuencia de resonancia:

$$j\omega L_1 + \frac{-1}{j\omega C_1} = 0 \implies Z = R_m + R_l + R_c \quad (5.4)$$

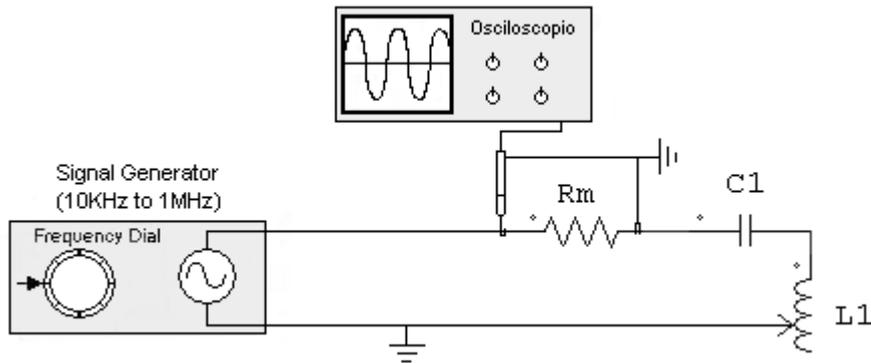


Fig.5. 2 Montaje para medida de  $f_0$  del primario

Poniendo en practica el método explicado obtenemos una frecuencia de resonancia en el primario de 125 kHz, inicialmente era inferior, por ello tuve que ajustar el conector variable de la bobina primaria para que coincidiese con la frecuencia de resonancia del secundario.

## 5.6. Medida de la $f_0$ del secundario.

Para la medida de la frecuencia de resonancia del secundario nos basamos en el mismo principio pero utilizaremos una resistencia de medida  $R_m$  de alrededor de 1 k $\Omega$  ya que la impedancia del conjunto  $L_2$ - $C_{top}$  es mayor.

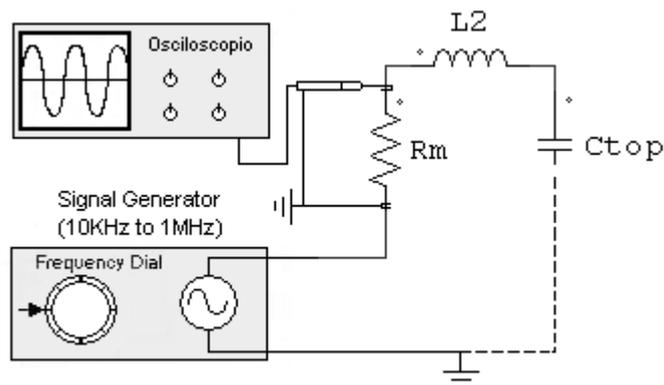
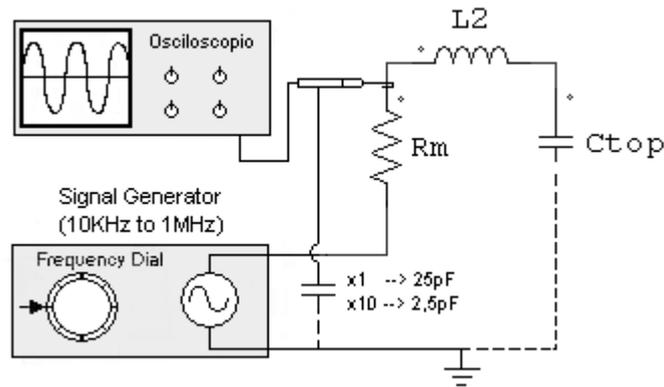


Fig.5. 3 Montaje para medida de  $f_0$  del secundario

Al realizar las medidas vi que no se asemejaban demasiado a las teóricas y tras darle varias vueltas me percate de que la sonda del osciloscopio tiene una capacidad de

25 pF que al conectarla al circuito para realizar la medida se suma a la del circuito, al colocar la sonda en x10 la capacidad se reduce entre 10 y sería de 2,5 pF y no afecta tanto a la medida.

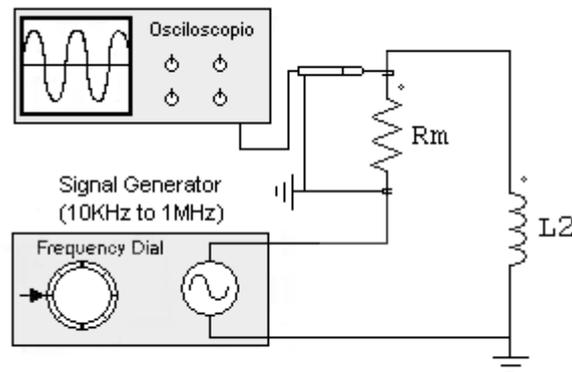


**Fig.5. 4 Detalle Capacidad de la sonda del osciloscopio**

Como tanto la inductancia de la bobina secundaria como su capacidad y la capacidad del toroide son constantes la frecuencia de resonancia del secundario también lo será. Aplicando el método de medida obtengo una valor de alrededor de 225 kHz de frecuencia de resonancia del secundario.

## 5.7. Medida de la capacidad parásita de $L_2$ .

Para conocer la capacidad parásita de la bobina secundaria he realizado una medida por Autoresonancia. Para ello he montado el siguiente circuito de medida:



**Fig.5. 5 Montaje para Medida por Autoresonancia**

El montaje es muy similar al utilizado para medir la frecuencia de resonancia de los circuitos primario y secundario. Una vez medida la frecuencia de resonancia de la bobina y conociendo el valor de su inductancia, podemos deducir el valor de la capacidad parasita.

$$f_A = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_{L2}}} \longrightarrow C_{L2} = \frac{1}{(f_A \cdot 2\pi)^2 \cdot L_2} \quad (5.5)$$

La frecuencia de resonancia la hayamos variando la frecuencia de la tensión que alimenta el circuito y observando en el osciloscopio a que frecuencia se alcanza un pico de tensión, esa será la frecuencia a la que el valor de la impedancia capacitiva y la impedancia inductiva de la bobina son del mismo valor absoluto pero de signo contrario y se anulan.

Realizando las medidas obtenemos una frecuencia de resonancia de alrededor de 230 kHz, y sabiendo que  $L_2$  vale 44.1 mH, deducimos que:

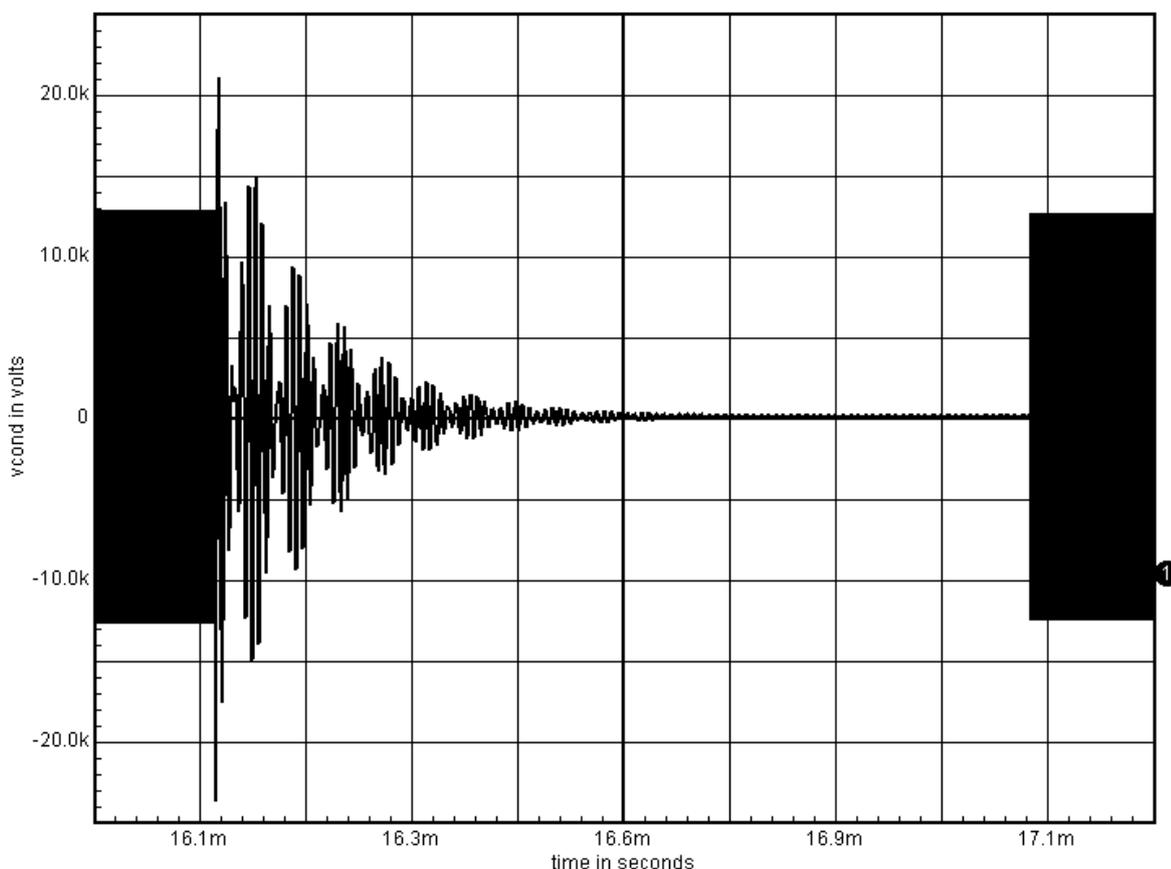
$$C_{L2} = \frac{1}{(f_A \cdot 2\pi)^2 \cdot L_2} = \frac{1}{(230000 \cdot 2\pi)^2 \cdot 44.1 \cdot 10^{-3}} = 10,85 \text{ pF}$$

Valor muy similar al calculado teóricamente que era de 11,01 pF.

## **5.8. Medida de la tensión de carga de $C_1$ .**

La tensión en el condensador durante el funcionamiento de la bobina la monitoricé con un osciloscopio dentro de la cabina puesta a tierra del laboratorio de alta tensión y a través de un transformador de medida de con una relación de transformación 66000/110 para reducir la tensión.

Inicialmente realicé la conexión en bornes de los condensadores de tal forma que en osciloscopio observaba en todo momento la tensión del condensador y observé la tensión de carga del condensador. Después ajusté el osciloscopio para que sacase una captura en el momento del disparo del explosor para observar el proceso de descarga y poscarga del condensador para poder compararlo con las simulaciones. La forma de onda obtenida era prácticamente igual a la de la simulación y aunque su amplitud variaba un poco dado que el ajuste de tensión se hace manualmente con el variac.

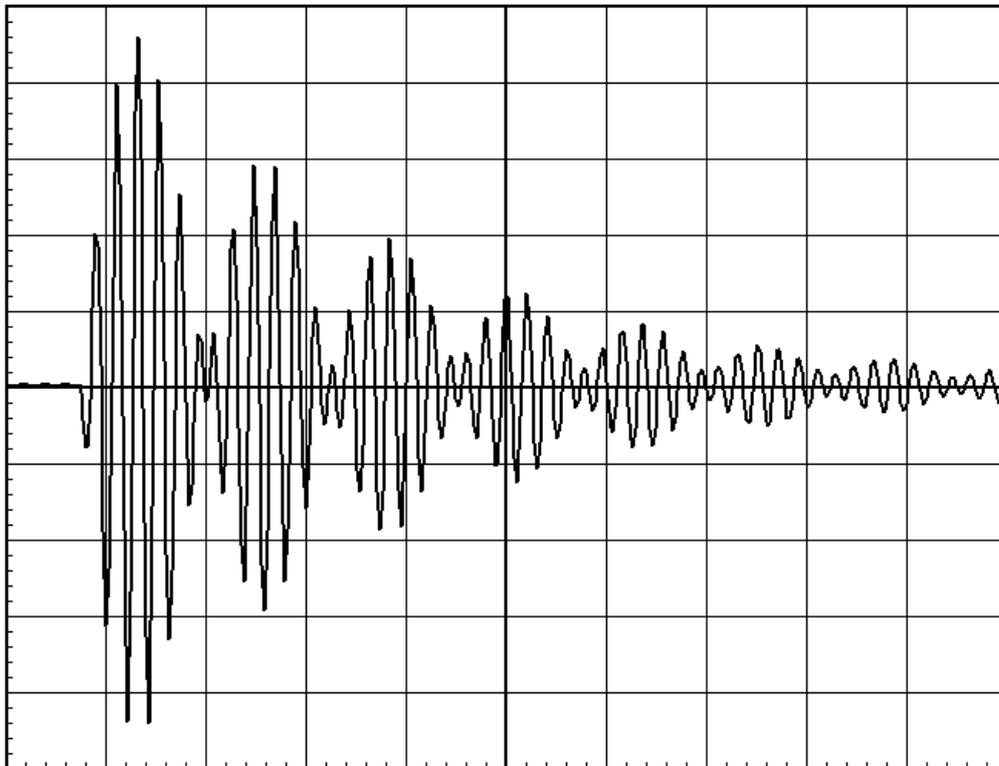


**Fig.5. 6 Tensión Condensador**

## **5.9. Medida de la tensión de salida.**

Como no se puede conectar directamente ninguna sonda al secundario debido a la elevada tensión que hay en el, alrededor de 1,5 MV tendí un cable por el suelo del laboratorio conectado al osciloscopio. Al igual que si colocamos un tubo fluorescente cerca de la bobina se enciende porque se induce una tensión en el, lo mismo ocurre con el conductor, de tal manera que podía ver en el osciloscopio la forma de onda de la tensión del secundario. Aunque este método no nos sirve para conocer la magnitud de la tensión obtenida, nos hacemos una idea del buen o mal funcionamiento de la bobina por la forma de onda obtenida.

Ajustando el osciloscopio igual que en el caso anterior para que capture una imagen en el momento de disparo del explosor, ajustando la escala posteriormente conseguí una forma de onda muy similar a la de las simulaciones, aunque de una amplitud mucho menor, ya que el cable estaba a más de 3 metros de la bobina.



**Fig.5. 7 Tensión de Salida**

## **6. Experiencias de laboratorio**

En este capítulo hablaré sobre las pruebas realizadas en el laboratorio y las conclusiones obtenidas.

### **6.1. Descargas de corona con diferentes electrodos.**

#### **6.1.1 Descarga con toroide**

Las descargas obtenidas miden unos 30 ó 40 cm de longitud. Salen alrededor de todo el terminal, aunque tienden a salir de los mismos puntos todo el rato por imperfecciones que pueda haber en la superficie del toroide.

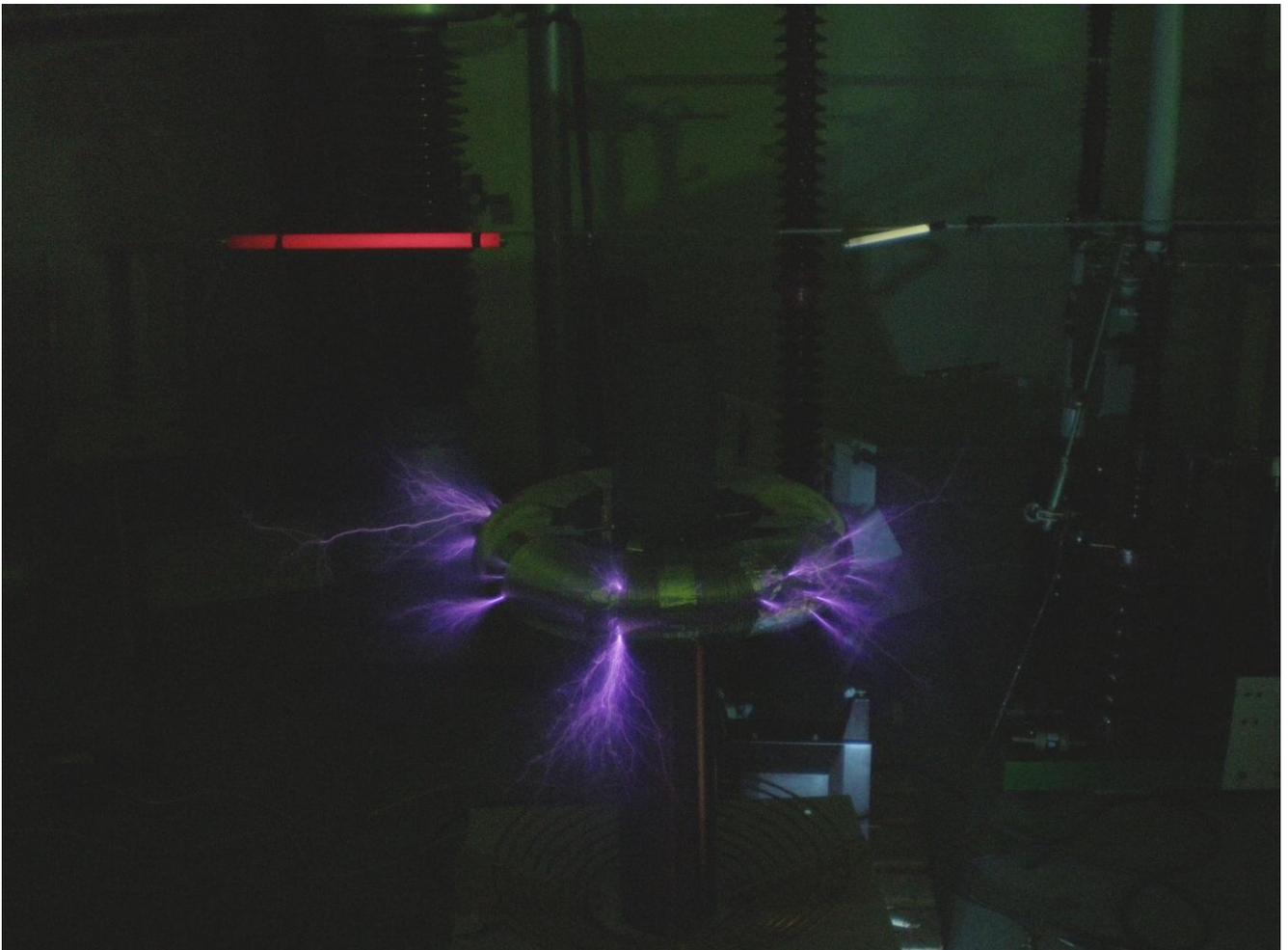
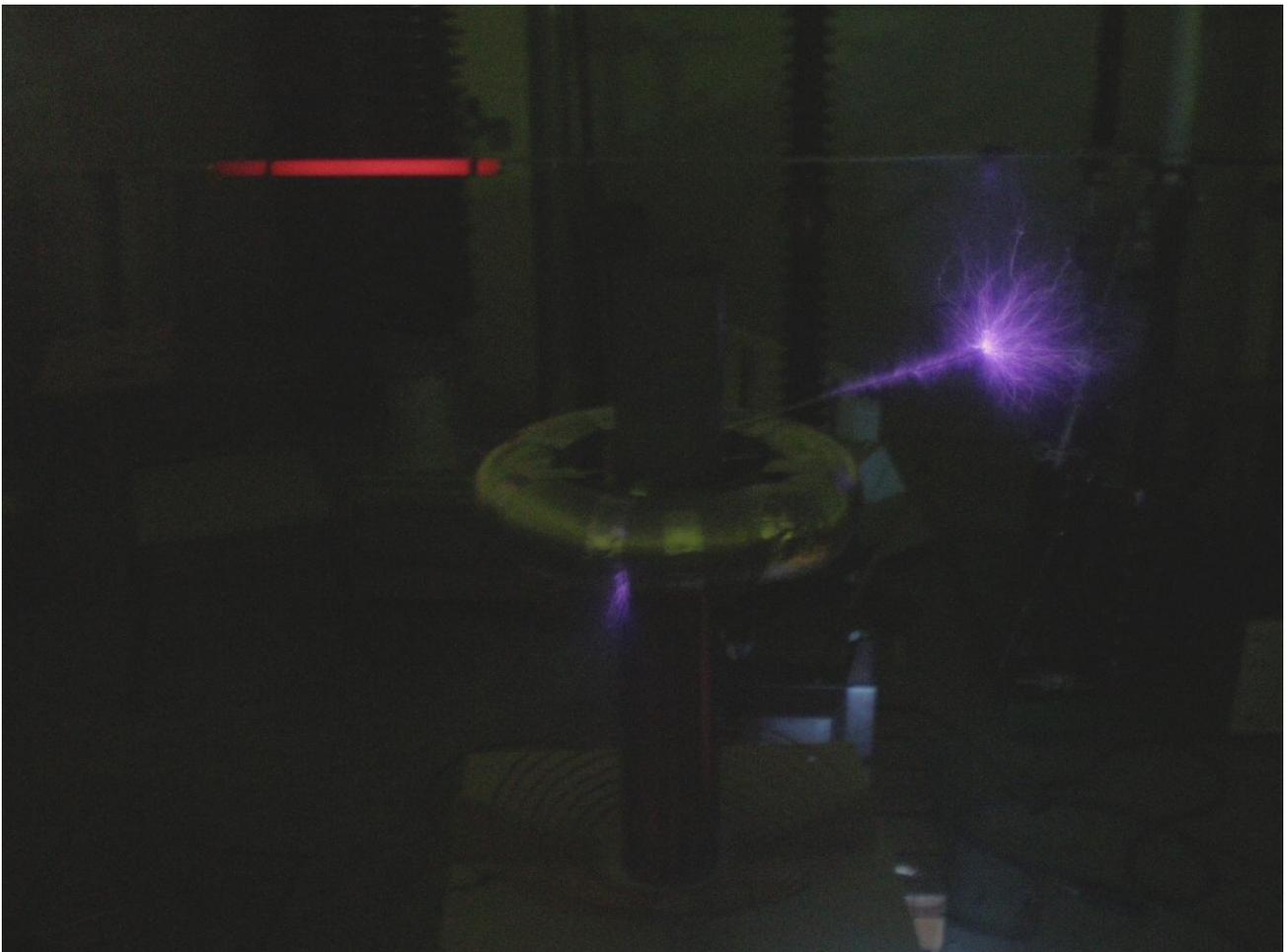


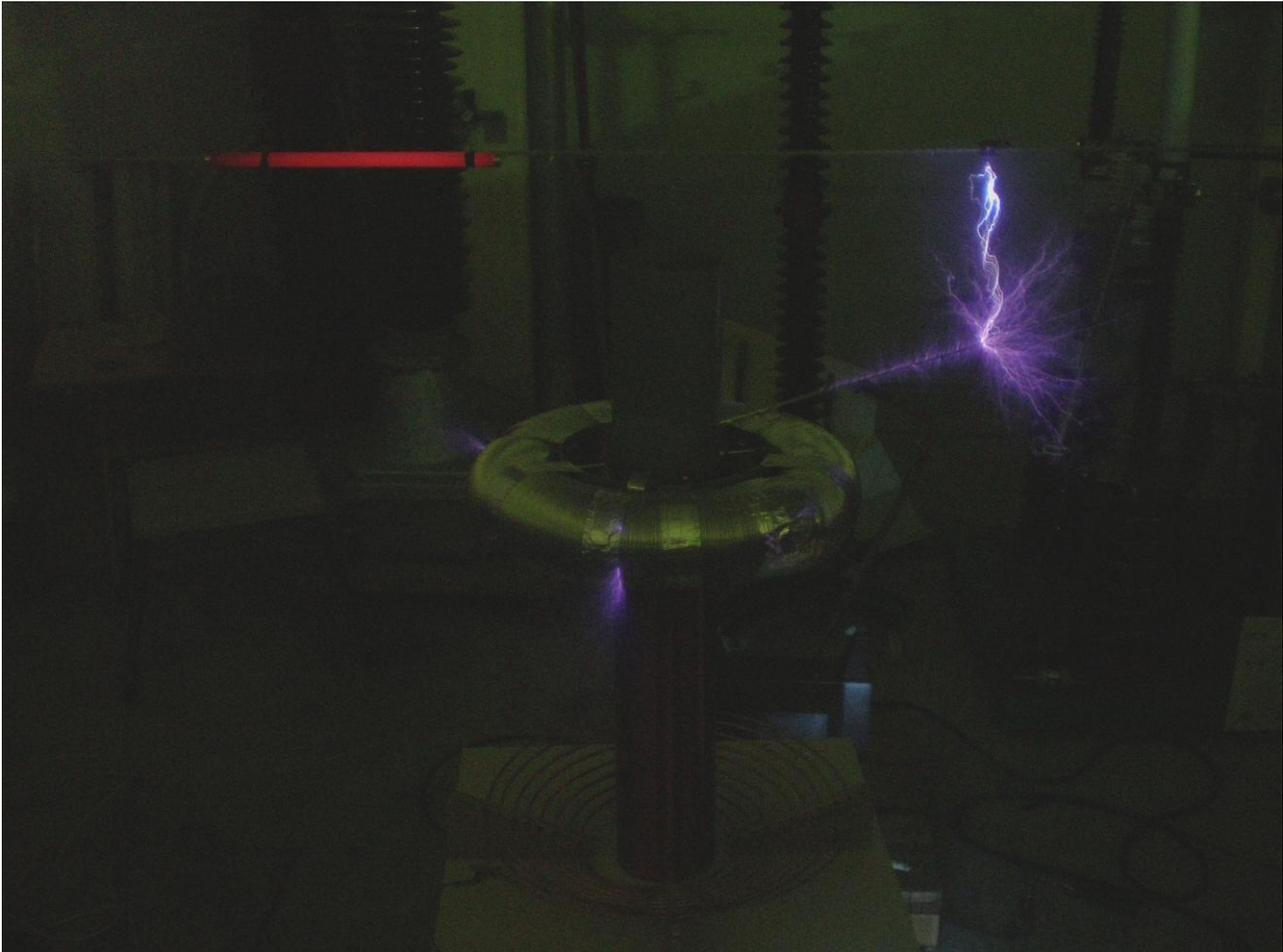
Imagen 6. 1 Descargas con Toroide

### **6.1.2 Varilla metálica horizontal**

Al colocar la varilla metálica sobre el toroide en posición horizontal, la mayoría de las descargas salen por la varilla. Esto es porque tiene un radio de curvatura menor que el del toroide y el campo eléctrico en su superficie es mayor. A unos 60 cm de la punta de la varilla se encuentra una sirga conectada a tierra, muchas de las descargas inciden sobre ella como se ve en las imágenes siguientes.



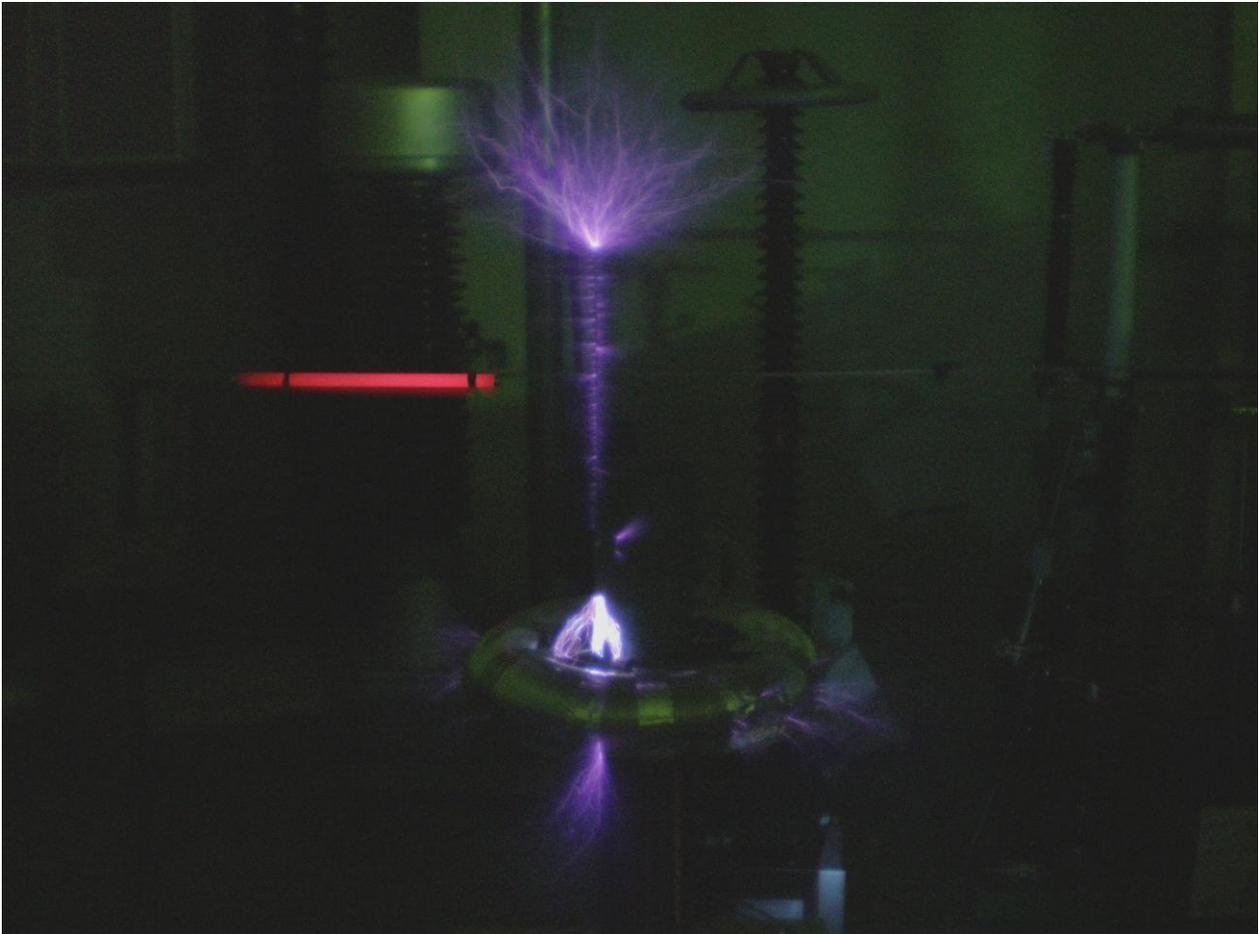
**Imagen 6. 2. Descarga con Varilla Horizontal**



**Imagen 6. 3 Descarga con Varilla Horizontal**

### **6.1.3 Varilla metálica vertical**

Al colocar la varilla en posición vertical a 10 cm del toroide, las descargas que salen del toroide inciden sobre base de la varilla y salen otra vez por la punta superior de la misma como se ve en las imágenes.



**Fig.6. 4 Descarga con Varilla Vertical**

### **6.1.4 Varilla metálica vertical con esfera.**

Al colocar en la punta de la varilla una esfera conductora como se ve en las imágenes, conseguimos un efecto similar al anterior. Las descargas que salen del toroide inciden sobre la varilla y salen de nuevo por la esfera superior.

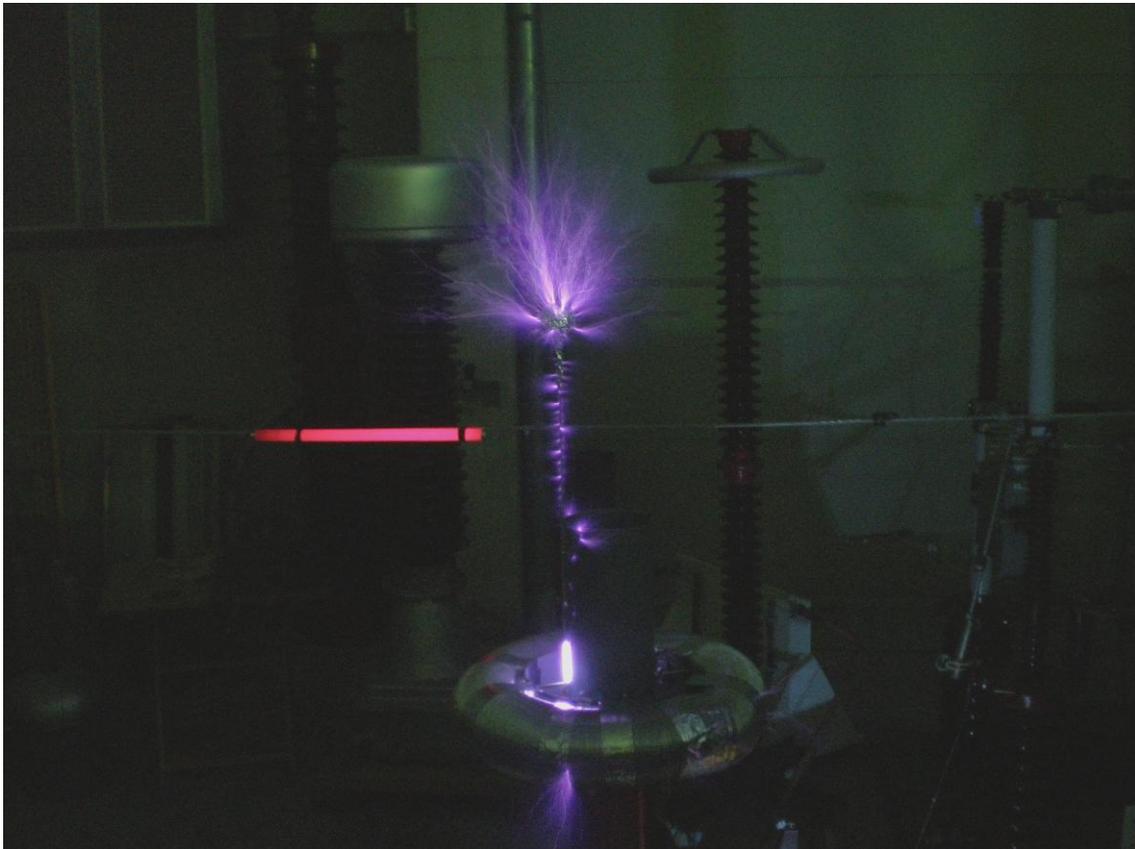


Fig.6. 5 Descarga con Varilla Vertical con Esfera

## **6.2. Ionización de gases a baja presión.**

Una luminaria fluorescente está formada por un tubo o bulbo fino de vidrio revestido interiormente con una sustancia que contiene fósforo y otros elementos que emiten luz al recibir una radiación ultravioleta de onda corta. El tubo contiene una pequeña cantidad de vapor de mercurio y un gas inerte, habitualmente argón o neón, a una presión ligeramente inferior a la presión atmosférica. Asimismo, en los extremos del tubo existen dos filamentos hechos de tungsteno.

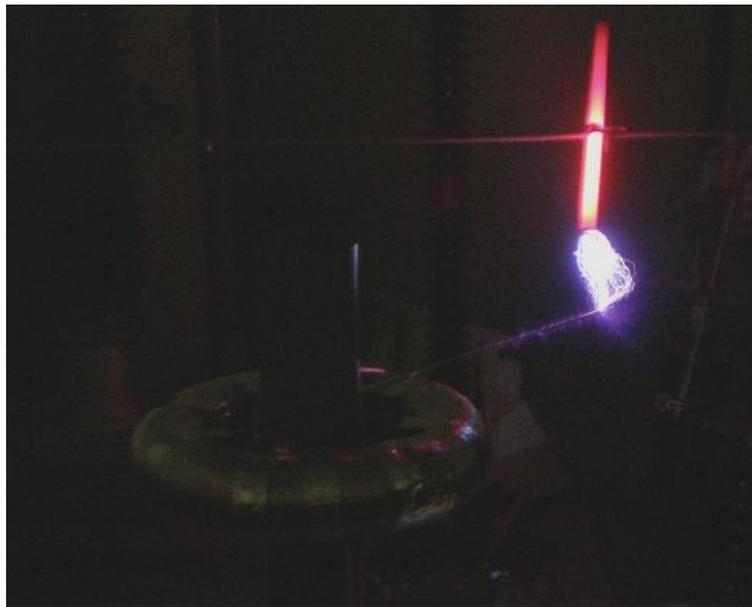
Los filamentos, al calentarse, desprenden electrones que ionizan el gas argón que llena el tubo, formando un plasma que conduce la electricidad. Este plasma excita los átomos del vapor de mercurio que, como consecuencia, emiten luz visible y ultravioleta.

El revestimiento interior de la lámpara tiene la función de filtrar y convertir la luz ultravioleta en visible. La coloración de la luz emitida por la lámpara depende del material de dicho recubrimiento interno.

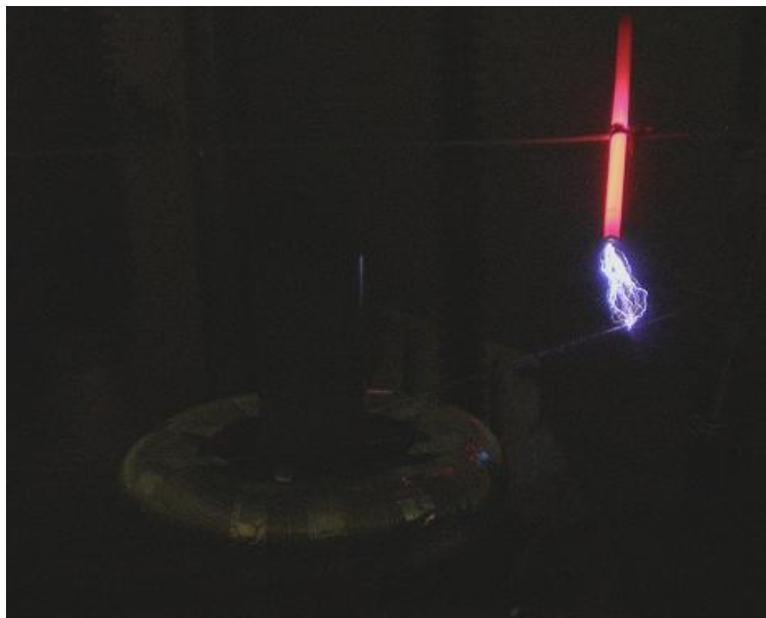
Esta misma ionización se puede conseguir, y se consigue colocando los tubos fluorescentes cerca de la bobina Tesla con los elevados campos electromagnéticos que genera, o dejando que las descargas eléctricas que desprende la bobina incidan directamente sobre uno de los terminales del tubo fluorescente.

Se puede observar en las imágenes anteriores, cómo los tubos fluorescentes colocados en la sirga detrás de la bobina están iluminados.

En las siguientes imágenes vemos cómo el tubo se ilumina con bastante más intensidad al incidir las descargas directamente sobre él, que estando situado a más distancia.



**Imagen 6. 6 Descarga Incidiendo sobre Tubo Fluorescente**



**Imagen 6. 7 Descarga Incidiendo sobre Tubo Fluorescente**

### 6.3. Jaula de Faraday.

Una jaula de Faraday es una caja metálica que protege de los campos eléctricos estáticos. Debe su nombre 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.

El funcionamiento de la jaula de Faraday se basa en las propiedades de un conductor en equilibrio electrostático. Cuando la caja metálica se coloca en presencia de un campo eléctrico externo, las cargas positivas se quedan en las posiciones de la red; los electrones, sin embargo, que en un metal son libres, empiezan a moverse puesto que sobre ellos actúa una fuerza dada por:

$$\vec{F} = e \vec{E}_{ext}$$

Dónde  $e$  es la carga del electrón.

Como la carga del electrón es negativa, los electrones se mueven en sentido contrario al campo eléctrico y, aunque la carga total del conductor es cero, uno de los lados de la caja (en el que se acumulan los electrones) se queda con un exceso de carga negativa, mientras que el otro lado queda con un defecto de electrones (carga positiva). Este desplazamiento de las cargas hace que en el interior de la caja se cree un campo de sentido contrario al campo externo.

El campo eléctrico resultante en el interior del conductor es por tanto nulo.

Como en el interior de la caja no hay campo, ninguna carga puede atravesarla; por ello se emplea para proteger dispositivos de cargas eléctricas. El fenómeno se denomina apantallamiento eléctrico.

Para mi experiencia he utilizado como jaula de Faraday una jaula pájaros metálica. Primero coloqué un tubo fluorescente dentro de la jaula y otro fuera de ella. Vemos en las fotografías siguientes, cómo con el tubo fluorescente dentro de la jaula cerrada no se ilumina, ya que el campo en el interior de la jaula es cero. Sin embargo el fluorescente de fuera sí.

En la segunda fotografía vemos que al colocar los dos fluorescentes fuera de la jaula se iluminan ambos.

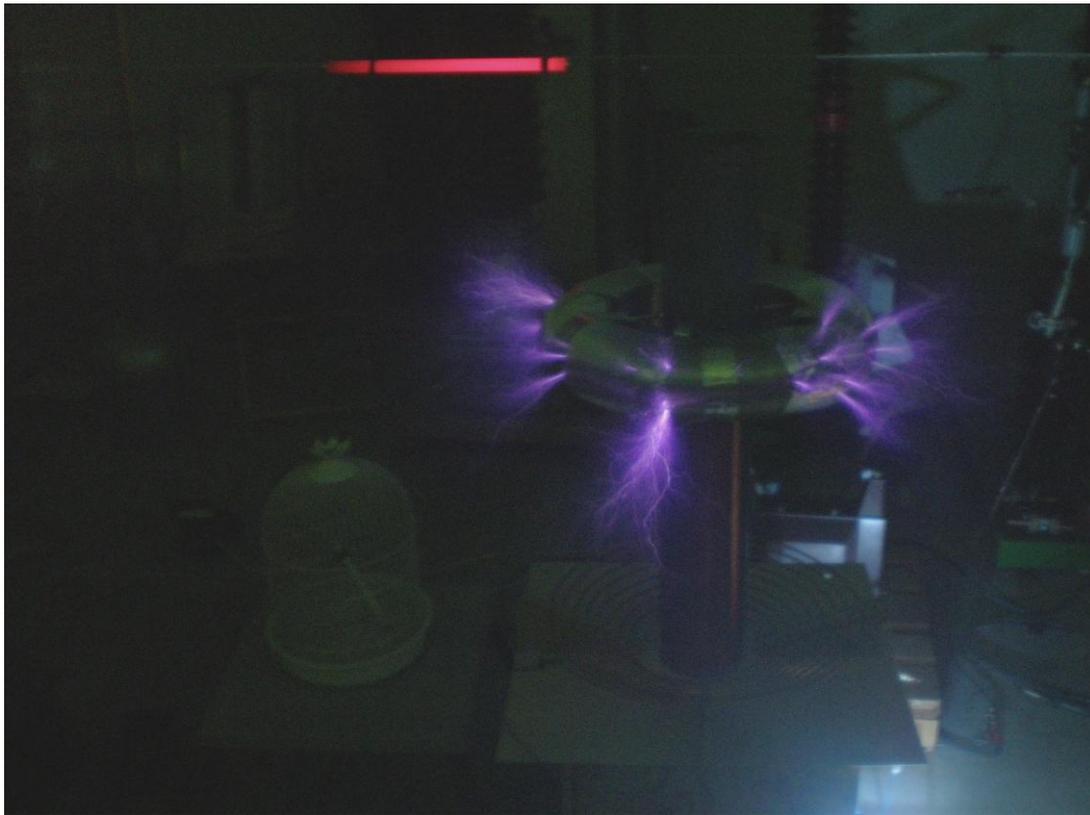


Fig.6. 8 Fluorescente dentro de Jaula Faraday

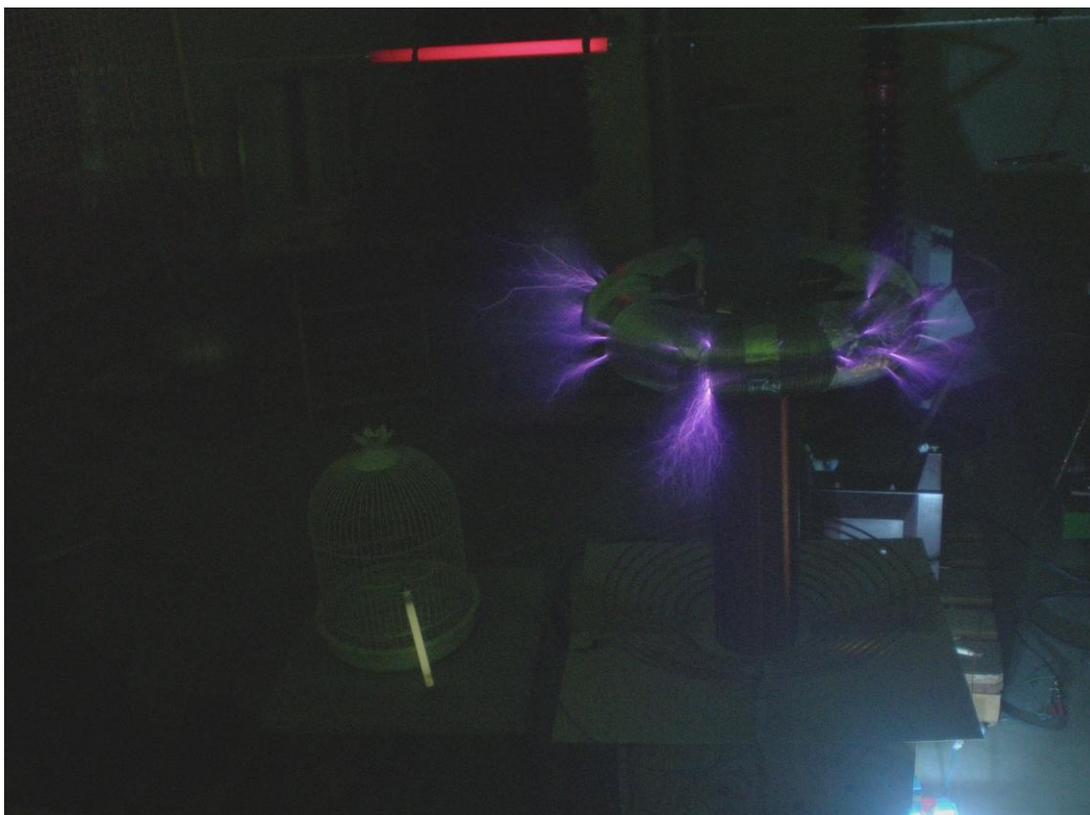


Fig.6. 9 Fluorescente fuera de Jaula Faraday

## **7. Conclusiones**

### **7.1. Desarrollo del proyecto.**

Durante las pruebas fui sacando diferentes conclusiones que me llevaron al diseño final de la bobina Tesla.

Se ha conseguido que la bobina emita descargas al aire, visibles incluso con luz con lo que el objetivo principal del proyecto está logrado, pero para lograr este objetivo han sido necesarias muchas pruebas y cambios en el diseño de la bobina Tesla.

Inicialmente probé con un diseño en corriente alterna y con un explosor estático. Después de varios cambios en la capacidad de los condensadores, en la tensión de entrada, en la inductancia de la bobina primaria tratando de ajustar al máximo las frecuencias de resonancia del primario y secundario no obtuve resultados aparentes de ningún tipo de emisión de descargas.

La bobina secundaria inicialmente tenía una relación H:D de 5 unidades. Investigando observé que se recomendaba una relación de entre 3 y 5 unidades para el buen funcionamiento de la bobina, por lo que como era un poco ajustado decidí reducir la altura de la bobina, de tal forma que la nueva relación H:D era 3,75. Con este cambio tuve que reajustar nuevamente la frecuencias de resonancia, pero aún y todo no conseguí un buen funcionamiento de la bobina.

Como pensaba que el fallo de diseño residía en el explosor probé con otros explosores estáticos y al final me decidí por construir uno rotatorio con el que conseguía un disparo mucho más uniforme y estable. Aun así no conseguí ningún resultado aparente. Remarco lo de aparente porque tras las pruebas en las que conseguí ver las descargas me percaté de que posiblemente anteriormente ya había conseguido descargas pero de una intensidad menor y no visibles a simple vista con la luz que había en el laboratorio durante las pruebas.

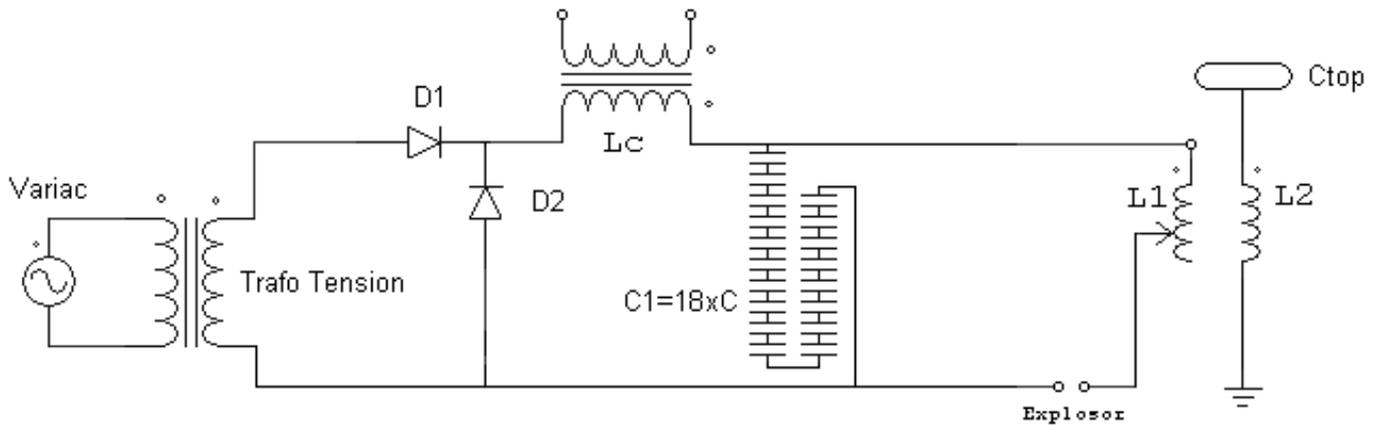
Tras más cambios y pruebas sin conseguir descargas decidí pasar al modelo de corriente continua, ya que me permitía trabajar a mayor potencia con el mismo diseño, con la posibilidad de obtener chispas mayores. El único requerimiento que tiene el diseño de la bobina en corriente de continua, aparte del uso de los diodos para rectificar la corriente alterna es el uso obligado de un explosor rotativo. Al trabajar con corriente continua la tensión no se hace nunca 0, por lo que con un explosor estático en el que la separación entre electrodos es constante la chispa una vez que se encendiese no se apagaría hasta cortar la corriente en la bobina Tesla.

## **7.2. Enumeración de conclusiones.**

- He diseñado una bobina Tesla basándome en las ecuaciones de diseño de experimentos similares realizados con anterioridad por otras personas. He aplicado en todo momento los métodos que he considerado más precisos para el cálculo y diseño de los diferentes parámetros, obteniendo finalmente los resultados deseados.
- El montaje final tiene alrededor de 1,5 metros de altura total con una base de 0,5 metros cuadrados. El aparato tiene una potencia de 1,5 kW y he conseguido unas descargas de alrededor de 60 cm de longitud.
- Hay una diferencia notable entre los cálculos teóricos y las medidas reales. Por lo que tras el diseño de cualquier elemento medible es recomendable realizar medidas y rectificar el diseño del elemento o de los demás elementos que dependan del valor medido.
- Los datos obtenidos del programa de simulación son orientativos, ya que hay gran cantidad de parámetros que intervienen en el funcionamiento de la bobina Tesla que no se pueden medir con los medios disponibles o cuyo cálculo no es imprescindible.
- Las formas de onda conseguidas con el programa de simulación tienen un alto grado de concordancia con las visualizadas en el osciloscopio durante las pruebas.
- Una vez conseguidas las primeras descargas visibles el trabajo se simplifica gratamente. Los ajustes a realizar para conseguir descargas mayores pasan solo por ajustar las frecuencias de resonancia variando la capacidad de la bobina primaria.
- Para el diseño en corriente continua es necesario el uso de un explosor rotativo, ya que como la tensión nunca se hace cero el explosor estático nunca se apaga una vez cerrado el arco. Con el diseño en corriente alterna no es estrictamente necesario el explosor rotativo, pero se recomienda, ya que el funcionamiento es más estable y es más fácil de regular.

## 8. Planos Constructivos

### 8.1. Esquema Eléctrico



Este es el esquema completo de la bobina. Como se ve en la ilustración, como bobina de choque he utilizado el bobinado secundario de un transformador de medida, el condensador primario esta constituido por 18 condensadores en serie, la bobina primaria tiene uno contacto móvil para poder variar su inductancia, y como condensador secundario he utilizado un toroide.

## 9.Presupuesto

Voy a exponer el presupuesto de forma detallada de tal forma que se vea bien el material necesario para la fabricación o montaje de cada parte del proyecto. Además dado que gran parte del material es reciclado o reutilizado al final detallaré el coste total de mi proyecto específico.

### 9.1. Presupuesto Completo

Componente	Descripción	Precio Ud/m (€)	Cantidad/m	Precio (€)
<b>Alimentación</b>				
VCN-24	Transformador Primario	1547,5	1	1547,5
HSKE 023101P	Diodo rectificador	231,58	2	463,16
<b>TOTAL ALIMENTACION</b>				<b>2010,66</b>
<b>Bobina Choque</b>				
VCH-12E	Secundario Trafo Medida	835	1	835
<b>TOTAL BOBINA CHOQUE</b>				<b>835</b>
<b>Condensador Primario</b>				
B 32 651	Condensador	3	18	54
Placa Cobre Taladrada		0,2	20	4
Tornillo M2		0,05	50	2,5
Tuerca M2		0,05	50	2,5
<b>TOTAL CONDENSADOR</b>				<b>63</b>
<b>Bobina Primaria</b>				
Tubería Cobre Ø 6mm	Conductor Espiral	1,47	10	14,7
Plancha PVC 75x75x0,5cm	Base Bobina	1	1	1
Tablas Madera	Soportes Bobina	0,2	4	0,8
<b>TOTAL BOBINA PRIMARIA</b>				<b>16,5</b>
<b>Bobina Secundaria</b>				
PVC Ø 160mm	Tuberia Soporte	5	1	5
Cobre Ø 0,5mm	Conductor Bobinado	0,09	515	46,35
DCA SCC3	Barniz Aislante	5	3	15
<b>TOTAL BOBINA SECUNDARIA</b>				<b>66,35</b>
<b>Toroide</b>				
Tubo Ø 130mm	Tubo Ventilación Flexible	3	1	3
PVC Ø 315mm	Soporte Toroide	5	0,15	0,75
Tornillo M6	Sujeción Toroide-Bobina	0,15	4	0,6
Tuercas M6	Sujeción Toroide-Bobina	0,15	8	1,2
Cinta adhesiva Aluminio	Sujeción Toroide-PVC	10	1	10
<b>TOTAL TOROIDE</b>				<b>15,55</b>

<b>Explosor</b>				
Motor Corriente Continua	9700 RPM sin carga / Vn=5V	2	1	2
Barra Roscada M6	Soporte electrodos	1	0,5	0,5
Tuercas M6		0,05	8	0,4
Tornillos M6	Tornillo cabeza redondeada	0,05	6	0,3
Separador M6		0,1	1	0,1
<b>TOTAL EXPLOSOR</b>				<b>3,3</b>

<b>Otros</b>				
Cableado Conexiones	Cobre RV-K 0,6/1kV	0,5	2	1
Cableado Conexiones	Cobre Barnizado Ø 2mm	1	2	2
Tornilleria Adicional	Tuercas/Tornillos/Arandelas			3
<b>TOTAL OTROS</b>				<b>6</b>

<b>PRESUPUESTO COMPLETO</b>	<b>Precio (€)</b>
Alimentación	2010,66
Bobina Choque	835
Condensador Primario	63
Bobina Primaria	16,5
Bobina Secundaria	66,35
Toroide	15,55
Explosor	3,3
Otros	6
<b>TOTAL</b>	<b>3016,36</b>

## 9.2. Gasto Real

Dado que gran cantidad del material es reutilizado de anteriores proyectos realizados en la universidad, o material reciclado o regalado, el gasto es considerablemente inferior al presupuesto completo.

El gasto real final de mi proyecto asciende a:

<b>GASTO REAL</b>	<b>Precio (€)</b>
Alimentación	0
Bobina Choque	0
Condensador Primario	59
Bobina Primaria	14,7
Bobina Secundaria	61,35
Toroide	10
Explosor	2
Otros	6
<b>TOTAL</b>	<b>153,05</b>

## 10. Referencias Bibliográficas

La primera fase del proyecto fue la consulta de numerosos artículos y páginas Web sobre el funcionamiento y diseño de bobinas Teslas. Una vez comencé el diseño y construcción de la bobina fueron muchas las dudas surgidas, por lo que me fue necesario recurrir a muchos libros, páginas Web y documentos para solucionarlas.

### 10.1. Páginas Web consultadas

- Richie's tesla coil web page, [www.richieburnett.co.uk/tesla.shtml](http://www.richieburnett.co.uk/tesla.shtml)
- Jamie Oliver's tesla coil demonstration page, [www.frontiernet.net/~tesla/index.html](http://www.frontiernet.net/~tesla/index.html)
- Construcción de una bobina tesla, [www.cientificosaficionados.com/tesla/tesla1.html](http://www.cientificosaficionados.com/tesla/tesla1.html)
- Basic Equations for tesla coil builders, <http://f3wm.free.fr/tesla/equations.html>
- Tesla coil formula page, <http://teslacoils4christ.org/TCFormulas/TCFormulas.htm>

### 10.2. Libros y documentos consultados

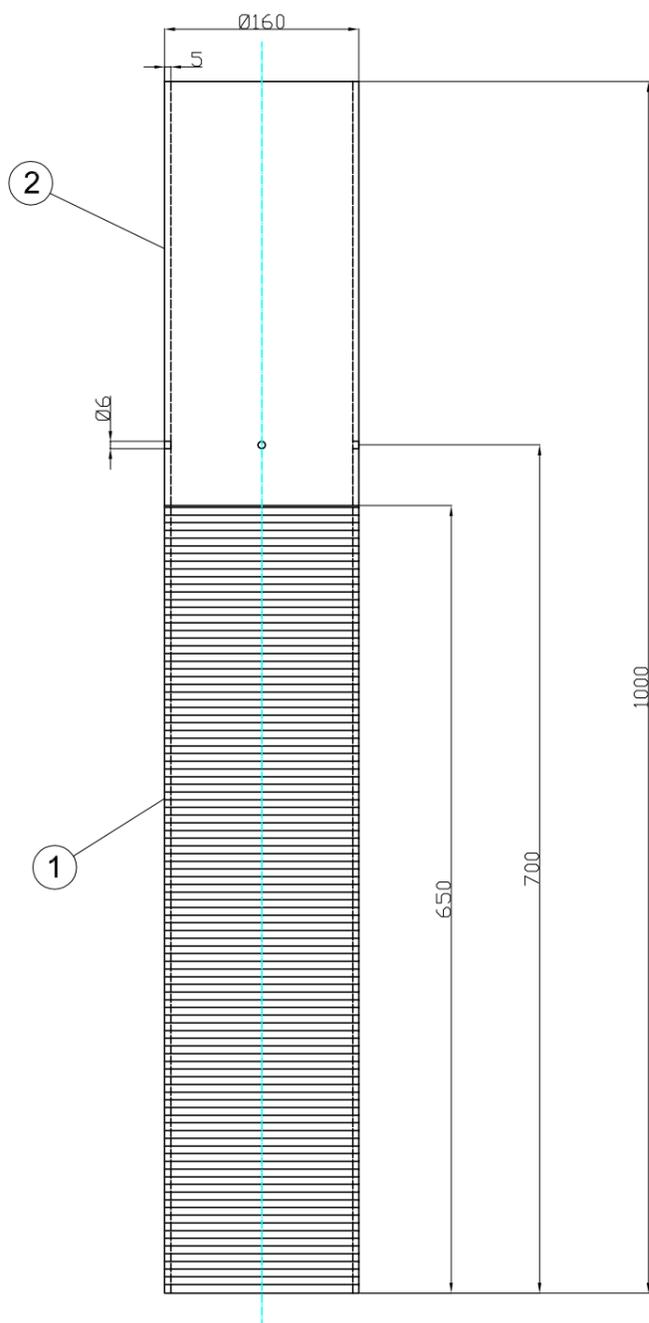
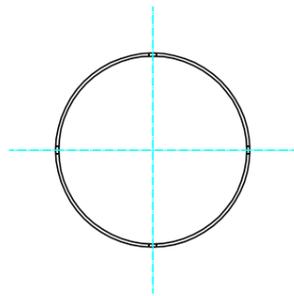
- Denicolai, Marco. "Tesla transformer for experimentation and research" (tesis de licenciatura). Helsinki University of Technology, 2001.  
Disponible en [www.elisanet.fi/dncmrc/lthesis.pdf](http://www.elisanet.fi/dncmrc/lthesis.pdf)
- Thompson, Marc T. "Inductance calculation techniques. Part II: Approximations and Handbook Methods". *Power Control and Intelligent Motion*, dic. 1999.  
Disponible en <http://www.thompsonrd.com/induct2.pdf>
- Plangkarn, B.; Apiratikul, P.; Boonchiam, P. "Low-Cost High Performance Tesla Transformer for Testing 115 kV Line Post Insulator". *2006 International Conference on Power System Technology*, oct. 2006.
- Cvetič, Jovan M. "Development of the Tesla Coil Apparatus". *6<sup>th</sup> International Symposium Nikola Tesla*. Belgrade, oct. 2006  
Disponible en [http://www.tesla-symp06.org/papers/Tesla-Symp06\\_Cvetic.pdf](http://www.tesla-symp06.org/papers/Tesla-Symp06_Cvetic.pdf)
- Johnson, Gary L. "Tesla Coil Impedance". Presentado en *The First Tesla Museum and Science Center International Conference on Nikola Tesla*, Farmingville, New York, oct. 2006.  
Disponible en <http://eece.ksu.edu/~gjohnson/TeslaCoilImpedance.pdf>

## **11. Hojas de características**

### **11.1 CONDENSADOR EPCOS B32656- S0105-K561**

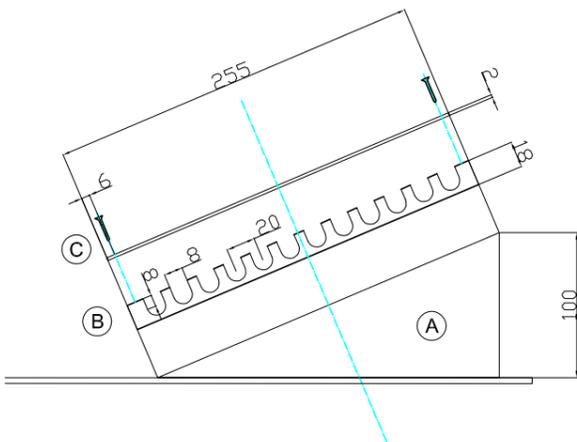
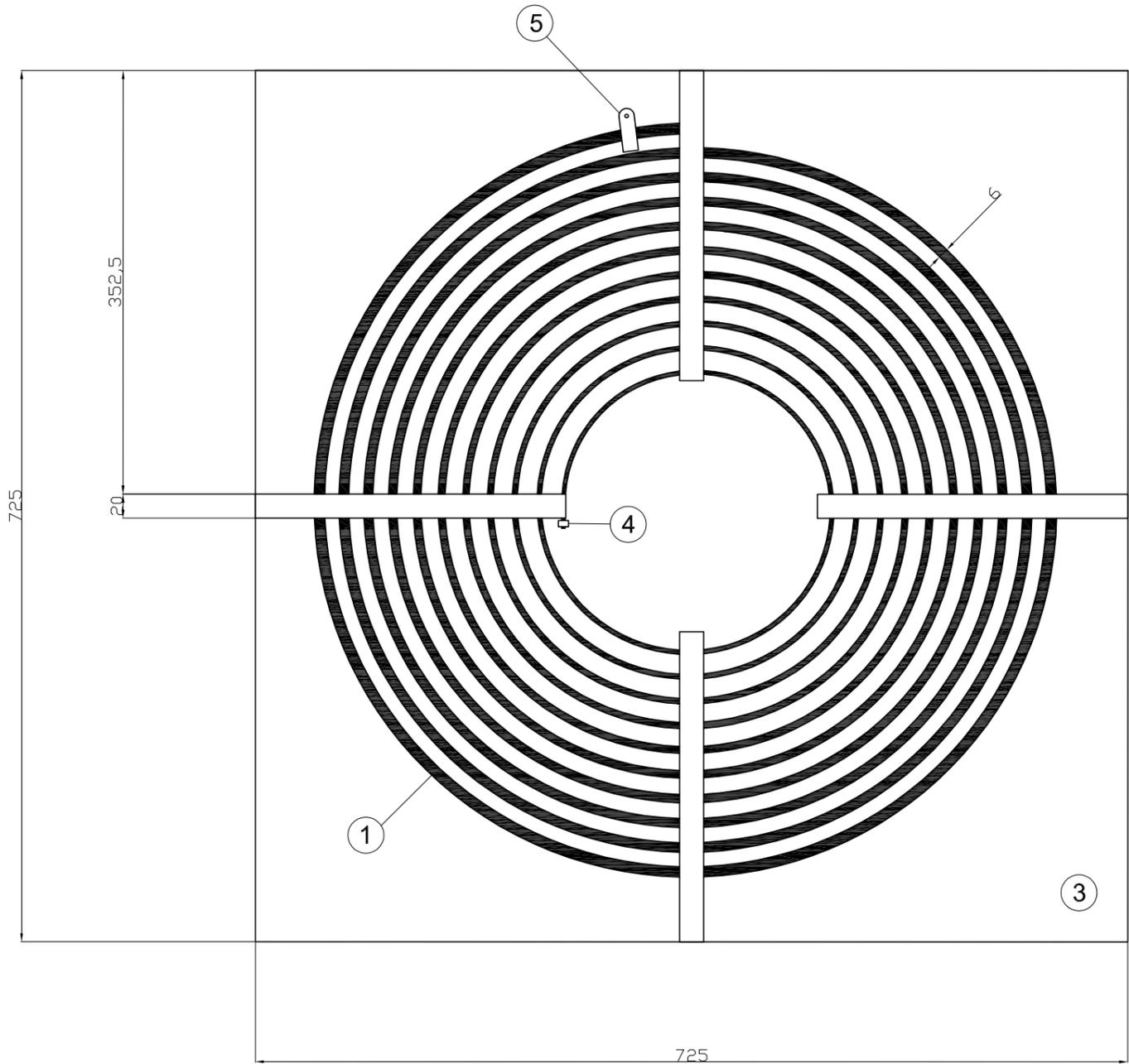
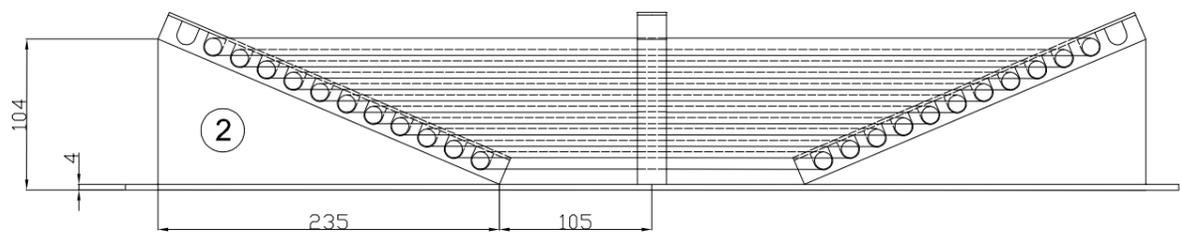
## **11.2 DIODO SEMIKRON HSK E** **17000/7600-0.3**

## **11.3 BARNIZ DE REVESTIMIENTO** **ELECTROLUBE SCC3**



 Bobinado: 1100 Vueltas de alambre de cobre Ø0,5mm	<b>Materiales:</b> ① Conductor Bobinado: Cobre Ø0,5mm ② Soporte Bobina: Tubo PVC Ø160mm		
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	<b>E.T.S.I.I.T.</b> <b>INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL E.</b>	DEPARTAMENTO: <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA</b>	
<b>PROYECTO:</b> <b>DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA BOBINA TESLA</b>	<b>REALIZADO:</b> <b>PÉREZ DE OBANOS FRANCÉS, EDUARDO</b> FIRMA:		
<b>PLANO:</b> <b>Bobina secundaria</b>	<b>FECHA:</b> <b>03/2/10</b>	<b>ESCALA:</b> <b>1/6</b>	<b>PLANO:</b> <b>1</b>

**Nota:**  
 Las conexiones en los extremos del bobinado se realizaran retirando con una cuchilla el barniz de una sección del bobinado de 2cm x 2cm y sujetando con cinta aislante una tira metalica de 2 cm de anchura y 30cm de longitud



**Materiales:**

- ① Conductor Bobinado: Cobre Ø6mm
- ② Soportes Bobina: Cuñas de Madera
- ③ Base Bobina: Plancha PVC
- ④ Conexión Fija de la Espiral: Abrazadera Metálica
- ⑤ Conexión Móvil de la Espiral: Pinza Metálica

**② Detalle Soportes Bobinado:**

- La pieza A va pegada a la base de PVC con adhesivo termoplástico.
- La Pieza B va pegada a la pieza A con adhesivo termoplástico.
- La Pieza C va sujeta a la pieza B con dos tirafondos como se ve en la imagen detallada.



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO  
TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE  
INGENIERIA ELECTRICA  
Y ELECTRONICA**

PROYECTO:

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA  
BOBINA TESLA**

REALIZADO:

**PÉREZ DE OBANOS FRANCÉS,  
EDUARDO**

FIRMA:

PLANO:

**Bobina primaria**

FECHA:

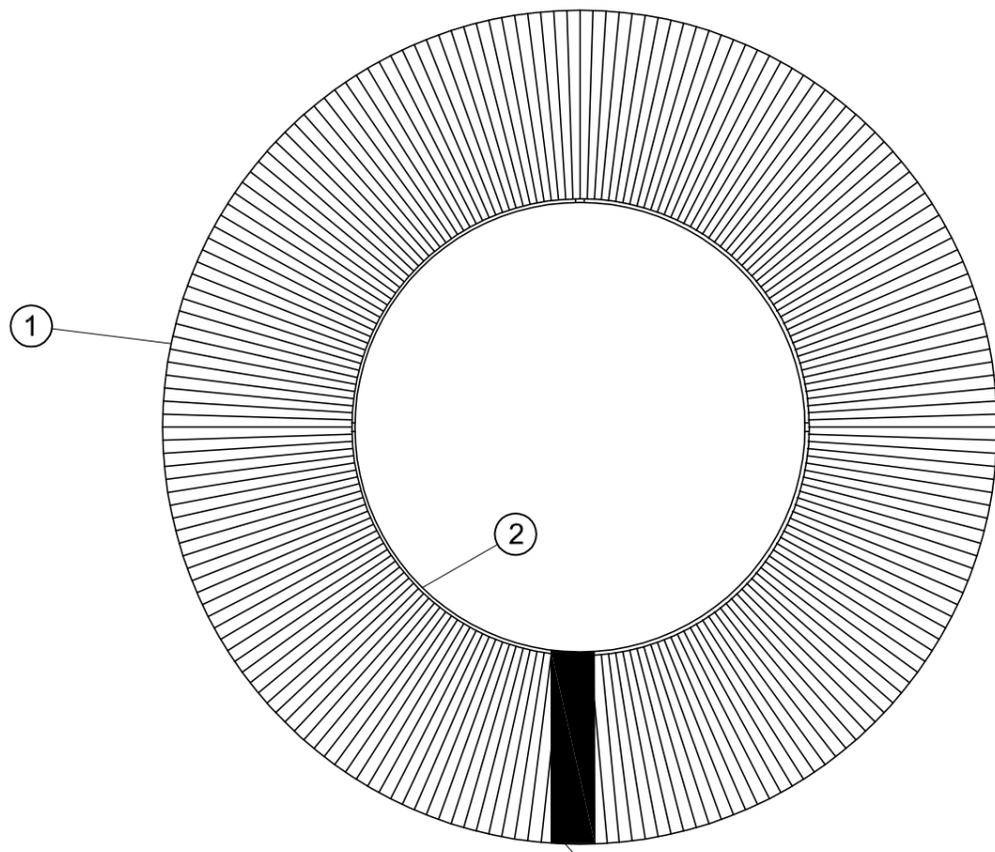
**03/2/10**

ESCALA:

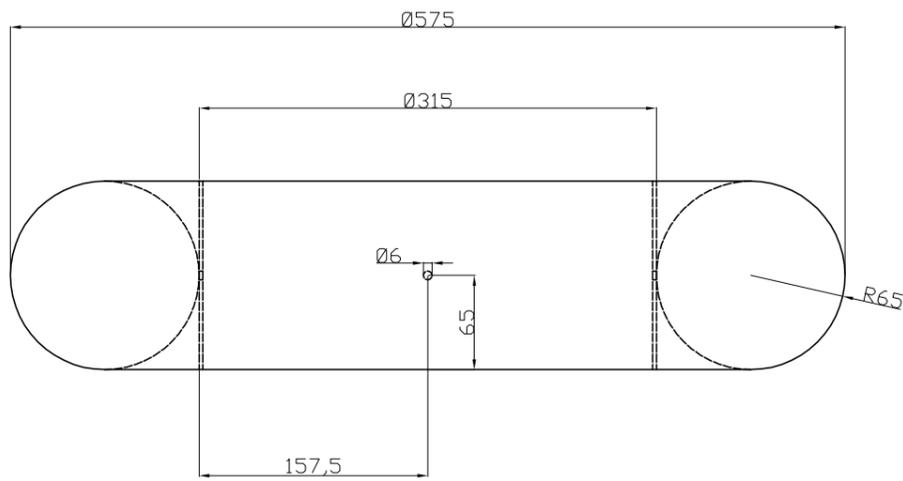
**1/5**

PLANO:

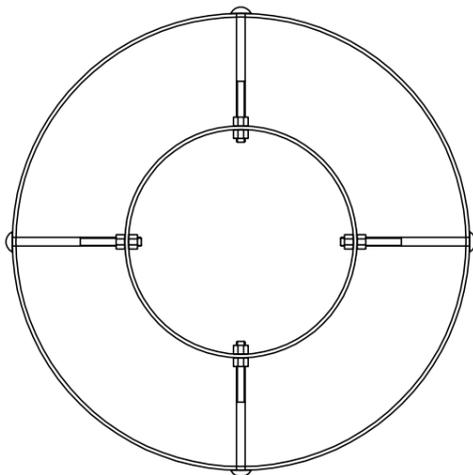
**2**



Unión con cinta adhesiva metálica

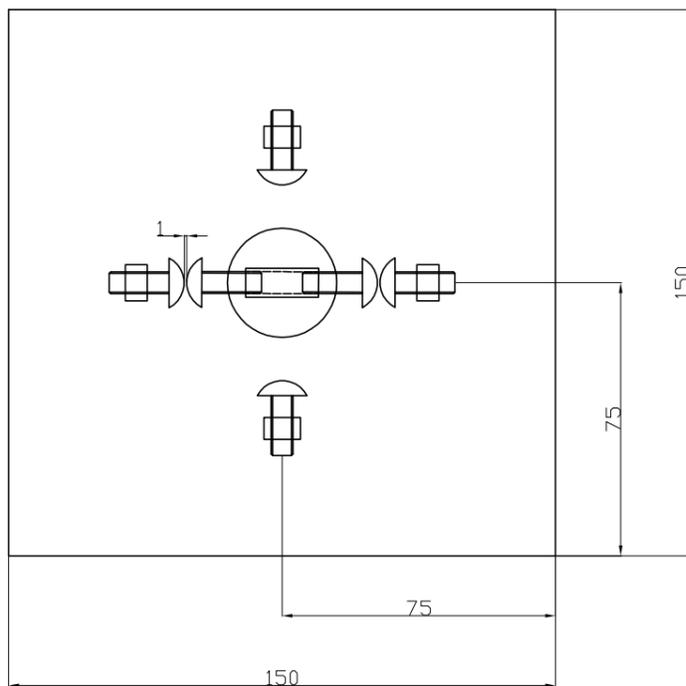
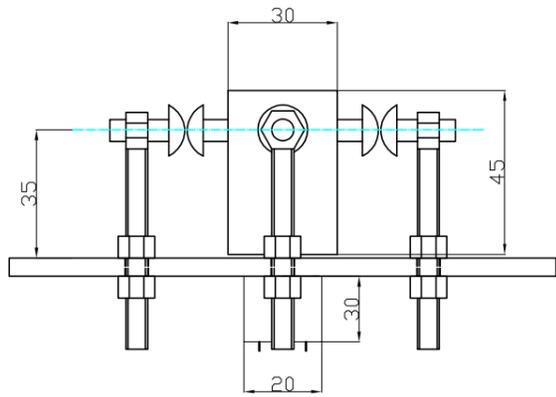


Detalle unión soporte toroide a soporte bobina secundaria:



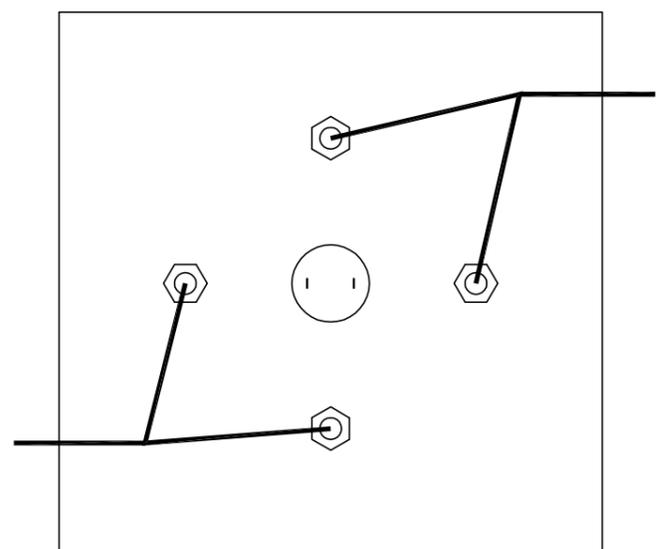
- 8 x Tuerca M6
- 4 x Tornillo M6 x 150mm

<b>Materiales:</b> ① Toroide: Tubo Ventilación Ø130mm ② Soportes Toroide: Tubo PVC Ø315mm		El toroide se esta construido a partir de un tubo de ventilación de Ø130mm. Se le ha dado forma de toro usando como soporte un tubo de PVC de Ø315mm y he unido sus extremos con cinta adhesiva metálica para conservar su conductividad. La sujeción del toroide al tubo de PVC se ha realizado también con esta misma cinta adhesiva.			
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	<b>E.T.S.I.I.T.</b> <b>INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL E.</b>		DEPARTAMENTO: <b>DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA</b>		
	PROYECTO: <b>DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA BOBINA TESLA</b>		REALIZADO: <b>PÉREZ DE OBANOS FRANCÉS, EDUARDO</b>		
PLANO: <b>Toroide</b>		FIRMA:	FECHA: <b>03/2/10</b>	ESCALA: <b>1/5</b>	PLANO: <b>3</b>



#### Detalle Conexión Explosor:

En esta vista inferior del explosor se ve como los electrodos se conectan 2 a 2 para que se produzca el disparo 4 veces por vuelta como se había calculado.



Las tuercas han sido soldadas a la varillas metálicas con soldadura autógena  
El Motor de corriente continua se alimenta con una pila AA de 1,5V

#### Materiales:

- ① Base Explosor: Plancha PVC
- ②  6 x Tornillo Cabeza redondeada M6
- ③  12 x Tuerca M6
- ④  4 x Barra roscada M6
- ⑤  1 x Separador M6
- ⑥  1 x Motor Corriente Continua



Universidad Pública  
de Navarra  
*Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa*

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO  
TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE  
INGENIERIA ELECTRICA  
Y ELECTRONICA**

PROYECTO:

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA  
BOBINA TESLA**

REALIZADO:

**PÉREZ DE OBANOS FRANCÉS,  
EDUARDO**

FIRMA:

PLANO:

**Explosor**

FECHA:

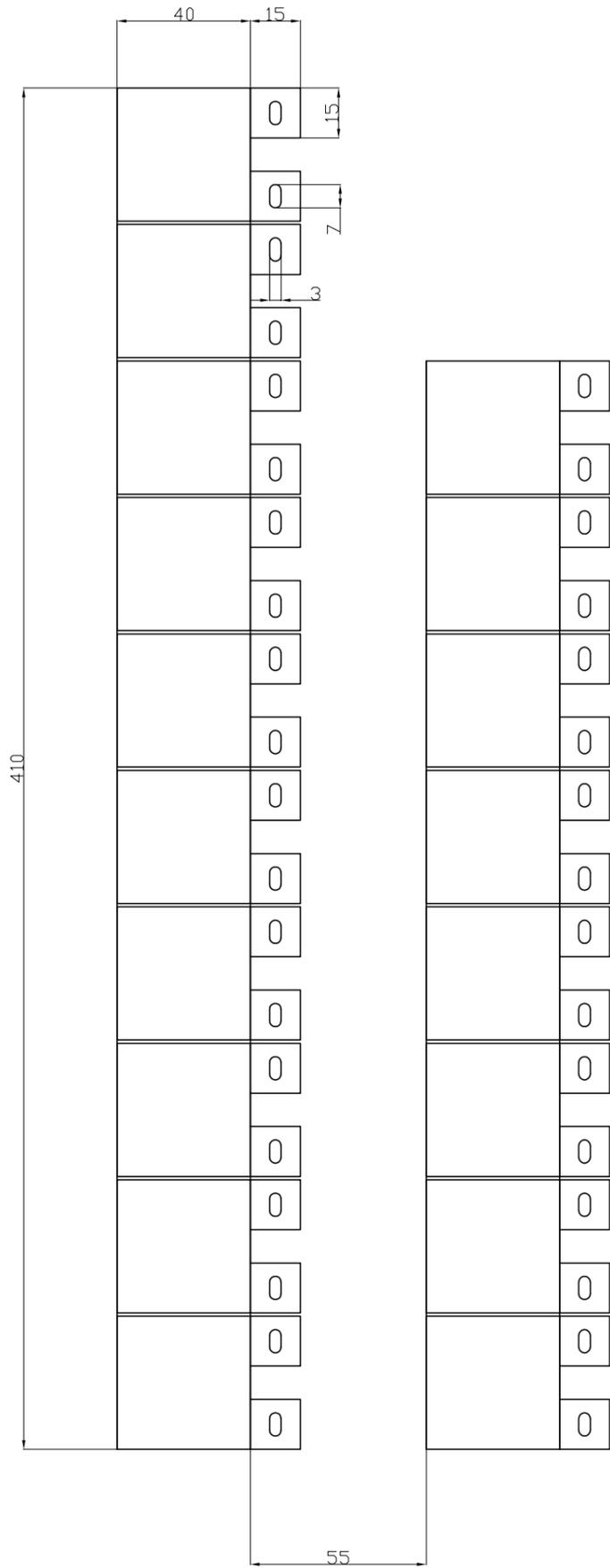
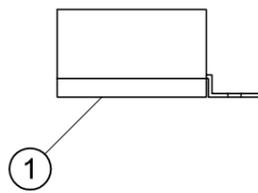
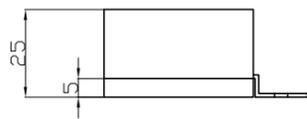
**03/2/10**

ESCALA:

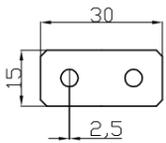
**1/5**

PLANO:

**4**



②



Los condensadores están conectados en serie con pletinas como esta y con tornillos y tuercas M2

**Materiales:**

- ① Soporte Condensadores: Plancha PVC
- ② Conexión Condensadores: Pletinas de Cobre



Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**

PROYECTO:

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA BOBINA TESLA**

REALIZADO:

**PÉREZ DE OBANOS FRANCÉS, EDUARDO**

FIRMA:

PLANO:

**Condensador Primario**

FECHA:

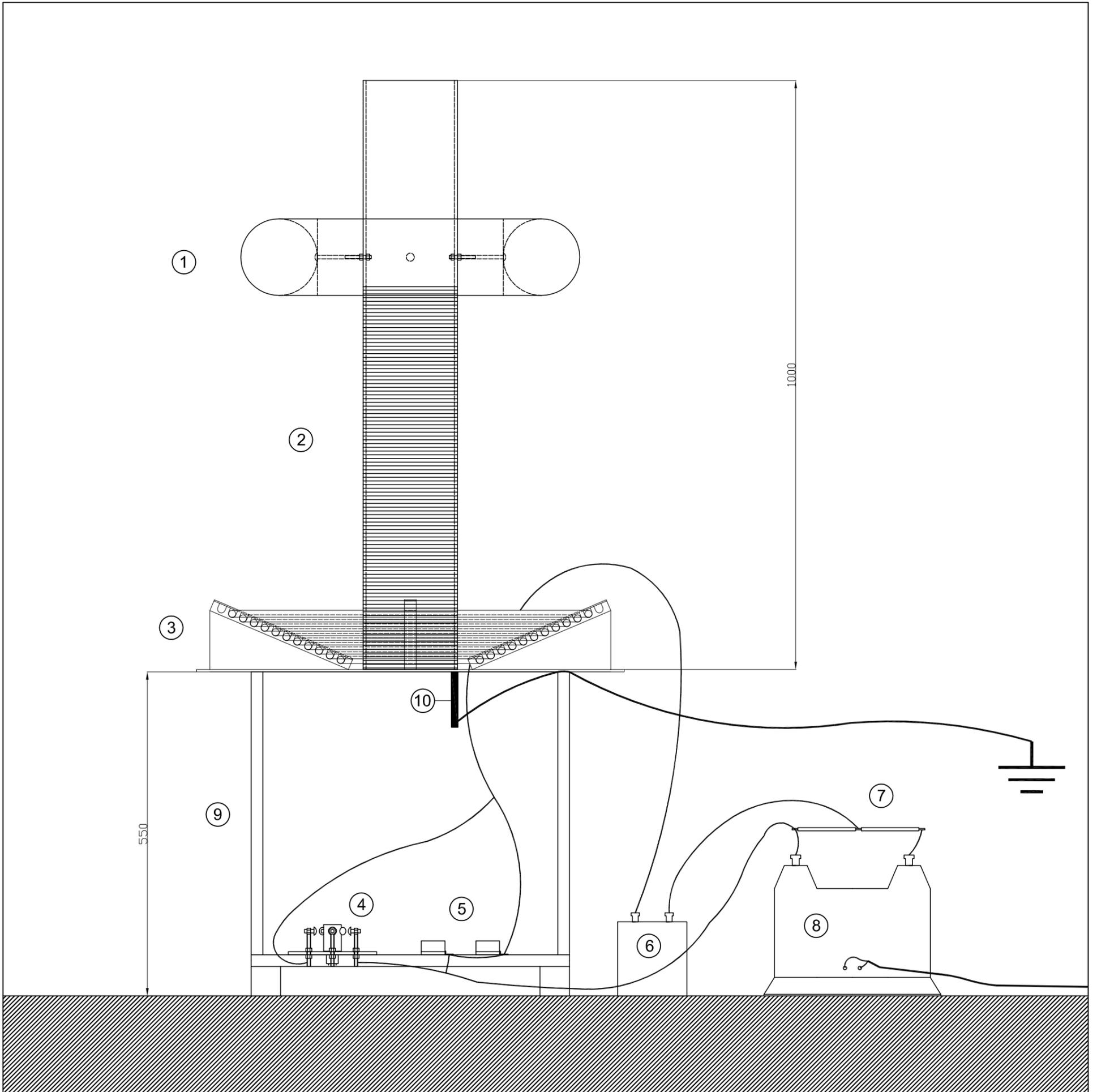
**03/2/10**

ESCALA:

**1/2**

PLANO:

**5**



**Partes:**

- |                         |                                 |
|-------------------------|---------------------------------|
| ① Terminal Superior     | ⑥ Bobina de Choque              |
| ② Bobina Secundaria     | ⑦ Diodos Rectificadores         |
| ③ Bobina Primaria       | ⑧ Transformador de Alta Tensión |
| ④ Explosor              | ⑨ Caja Soporte: Caja de Madera  |
| ⑤ Condensador Principal | ⑩ Conexión a Tierra             |



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO  
TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE  
INGENIERIA ELECTRICA  
Y ELECTRONICA**

PROYECTO:

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA  
BOBINA TESLA**

REALIZADO:

**PÉREZ DE OBANOS FRANCÉS,  
EDUARDO**

FIRMA:

PLANO:

**Conjunto Tesla**

FECHA:

**03/2/10**

ESCALA:

**1/7**

PLANO:

**6**