

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

Reproducción de música mediante la
generación de Plasma

Autores:

- Berasategui Aguirre, Imanol E.
- Bonino, Celina E.

Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos

para acceder al título de Ingeniero Electrónico

en la

Facultad Regional Paraná

Febrero de 2019

Declaración de autoría:

Nosotros declaramos que el Proyecto Final “Reproducción de música a través de plasma” y el trabajo realizado son propios. Declaramos:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firmas:

-
-

Fecha:

Agradecimientos:

En reconocimiento a nuestra casa de estudios, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Paraná. A nuestras respectivas familias, que brindaron su apoyo y paciencia en todo momento. También agradecer a nuestros amigos que supieron entender nuestras responsabilidades.

Berasategui Aguirre, Imanol E.

Bonino, Celina E.

Abstract

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

Reproducción de música mediante la generación de Plasma

Berasategui Aguirre, Imanol E.

Bonino, Celina E.

Abstract:

In order to create an audio reproduction device through the use of a physical phenomenon, the creation of a device capable of reproducing audio through the modulation of an electric discharge released in the air is constituted. This element is commonly known as a Plasma Speaker or Musical Tesla Coil.

Two solid-state Tesla coils (SSTC) were developed for two different powers, one prepared to produce complex sound waves and the other to reproduce sounds in monotone. The controllers of said coils work using MOSFET transistors, among other electronic power elements.

Accordingly, a Plasma Speaker with the ability to faithfully reproduce music and voice was obtained. It has a power of 300 watts input through an input voltage of 48 volts. The device delivers a sound power of 95 decibels, by generating a plasma spark of 1 centimeter in length.

Keywords:

Coil, Generator, High Frequency, High Voltage, Music, Power, Resonance, Tesla, Wireless, SSTC.

Resumen:

Con la finalidad de crear un dispositivo de reproducción de audio a través del uso de un fenómeno físico, se constituye la creación de un dispositivo capaz de emitir audio a través de la modulación de una descarga eléctrica liberada en el aire. Este elemento se conoce comúnmente como Parlante de Plasma o Bobina de Tesla Musical.

Se elaboraron dos bobinas de Tesla de estado sólido (SSTC) de 15 y 32 centímetros, destinadas para dos potencias distintas, una preparada para producir ondas sonoras complejas y la otra para reproducir sonidos en mono-tono. Los controladores de dichas bobinas funcionan a través del uso de transistores MOSFET, entre otros elementos electrónicos de potencia.

Consiguientemente, se obtuvo un Parlante de Plasma con la capacidad de reproducir música y voz de manera fiel. El mismo cuenta con una potencia de 300 vatios de entrada mediante una tensión de entrada de 48 voltios. El dispositivo entrega una potencia sonora de 95 decibelios, mediante la generación de una chispa de plasma de 1 centímetro de longitud.

Palabras Clave:

Alta Frecuencia, Alta Tensión, Audio, Bobina, Generador, Inalámbrico, Música, Potencia, Resonancia, Tesla, SSTC.

Reconocimientos:

Se presta especial reconocimiento al Ingeniero Lucas M. Maggiolini, por su apoyo y contribución en el presente trabajo. También destacar la disponibilidad ofrecida por el laboratorio de prácticas generales en electrónica, que facilitó el instrumental y espacio físico para realizar las mediciones técnicas pertinentes.

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE CONTENIDOS	10
INDICE DE FIGURAS	11
INDICE DE TABLAS	12
INDICE DE FORMULAS	13
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA:.....	1
1.2 INTRODUCCIÓN A LOS INDUCTORES DE TESLA.	3
• MORFOLOGÍA Y FUNCIONAMIENTO.....	3
• BOBINA DE TESLA DE ESTADO SÓLIDO (SSTC).....	4
1.3 ESTUDIO DE MERCADO:	4
• TARGET	4
• PRUEBAS DE CONCEPTO.....	4
• PRUEBAS DE PRODUCTO - COMPETENCIA	4
• ANÁLISIS DE RECURSOS	5
• ANÁLISIS DE COSTOS	5
• CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO	5
CAPÍTULO 2: DESARROLLO	6
2.1 DESARROLLO	6
2.1.1 INVESTIGACIÓN DE COMPONENTES.....	8
2.1.2 PROPUESTAS DE CIRCUITOS O ESQUEMAS.	18
2.1.3 ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO	24
2.2 DISEÑO COMPLETO	29
CAPÍTULO 3: RESULTADOS	41
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE COSTOS	41
• POSIBLES PLANES DE VENTA Y AMORTIZACIÓN DE LA INVERSIÓN.	42
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN.	44
CAPÍTULO 6: LITERATURA CITADA.	46
6.1 REFERENCIAS	46

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – NIKOLA TESLA, SOSTENIENDO UNA BOMBILLA FOSFORESCENTE ILUMINADA MEDIANTE EL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO PRODUCIDO POR LA BOBINA DE TESLA. [1]	1
FIGURA 2 – SISTEMA TESLAFORETICO (TEP). ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA. [3]	2
FIGURA 3 –BOBINA CLÁSICA DE TESLA. [4].....	3
FIGURA 4 – BOBINA DE TESLA. CIRCUITO [5]	4
FIGURA 5 –DIAGRAMA DE BLOQUES GENERAL.....	6
FIGURA 6 – PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA BOBINA PROTOTIPO.	10
FIGURA 7 –BOBINA PLANA CONCÉNTRICA.....	12
FIGURA 8 –BOBINA CÓNICA.....	12
FIGURA 9 –BOBINA CILÍNDRICA.....	13
FIGURA 10 –FORMA TOROIDE DE CAPACITOR SECUNDARIO.....	14
FIGURA 11 –FORMA ESFEROIDAL DE CAPACITOR SECUNDARIO.....	15
FIGURA 12 –FORMA TONEL DE CAPACITOR SECUNDARIO.....	15
FIGURA 13 – PRIMER PROTOTIPO DE CIRCUITO DE CONTROL DE DISPARO DE MOSFET.....	18
FIGURA 14 – ENTRADA DE AUDIO. SEGUNDO PROTOTIPO DE CONTROL DE DISPARO DE MOSFET.....	19
FIGURA 15 – SEGUNDO PROTOTIPO DE CIRCUITO DE CONTROL DE DISPARO DE MOSFET.....	19
FIGURA 16 –PLACA DEL SEGUNDO PROTOTIPO.....	20
FIGURA 17 – TRANSFORMADOR CONTROLADOR DE COMPUERTA (GDT).....	20
FIGURA 18 – TOROIDE EN CABLE DE ALIMENTACIÓN DE AUDIO.....	21
FIGURA 19 – TERCER PROTOTIPO DE CIRCUITO DE CONTROL DE DISPARO DE MOSFET.....	21
FIGURA 20 –DISIPADORES USADOS DURANTE LAS PRUEBAS.....	22
FIGURA 21 –MOSFET DAÑADO POR SOBRE CORRIENTE.....	23
FIGURA 22 –CIRCUITO DRIVER.....	25
FIGURA 23 –SEÑAL DE AUDIO EN LA SALIDA DEL GENERADOR DE MONO-TONOS EN LA.....	27
FIGURA 24 –CIRCUITO DE AMPLIFICACIÓN E INYECCIÓN DEL AUDIO.....	28
FIGURA 25 –CIRCUITO DE INYECCIÓN DE AUDIO FIDEDIGNO.....	30
FIGURA 26 –CIRCUITO DE CONTROL AUDIO FIDEDIGNO.....	31
FIGURA 27 –CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN PLACA AUDIO FIDEDIGNO.....	31
FIGURA 28 –CIRCUITO PIANO ELECTRÓNICO.....	32
FIGURA 29 –GRAFICA DE VOLTAJE VS LONGITUD EN DISTINTOS ELECTRODOS DE TC. [7]	33
FIGURA 30 –COMPARATIVA DE CHISPA CON ESCALÍMETRO.....	34
FIGURA 31 –RESULTADOS DE LA MEDICIÓN CON DECIBELÍMETRO.....	34
FIGURA 32 –NÚCLEOS DE LAS BOBINAS SECUNDARIAS Y PRIMARIA MAYOR.....	35
FIGURA 33 –PROCESO DE RE-BOBINADO DE BOBINA SECUNDARIA.....	36
FIGURA 34 –PLACA DEL CIRCUITO DE CONTROL AUDIO FIDEDIGNO.....	36
FIGURA 35 –PLACA DEL INYECCIÓN DEL AUDIO FIDEDIGNO.....	37
FIGURA 36 –PLACA DEL CIRCUITO PIANO ELECTRÓNICO.....	37
FIGURA 37 –PARLANTE DE PLASMA.....	38
FIGURA 38 –PLACA CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN PLACA AUDIO FIDEDIGNO.....	38
FIGURA 39 –SEÑAL A LA SALIDA DEL SECUNDARIO, SIN AUDIO A LA ENTRADA.....	39
FIGURA 40 –SEÑAL DE AUDIO EN LA ENTRADA DEL CIRCUITO DE INYECCIÓN DE AUDIO.....	39
FIGURA 41 –SEÑAL DE AUDIO A LA ENTRADA DEL CIRCUITO DE CONTROL.....	40
FIGURA 42 –SEÑAL DE AUDIO EN LA BOBINA SECUNDARIA DEL PARLANTE.....	40

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 – CARACTERÍSTICAS NECESARIAS PARA LAS BOBINAS.....	7
TABLA 2 – CARACTERÍSTICAS NECESARIAS PARA EL CAPACITOR DE DESCARGA.	7
TABLA 3 – CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES DE COBRE NORMALIZADOS TOMADOS DE LOS DATOS DEL PROVEEDOR.....	9
TABLA 4 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LA BOBINA SECUNDARIA PEQUEÑA.....	11
TABLA 5 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DE LA BOBINA SECUNDARIA GRANDE.	11
TABLA 6 – FRECUENCIAS DE LAS NOTAS MUSICALES EN LA OCTAVA PRINCIPAL.....	26
TABLA 7 – CÁLCULO DE RESISTENCIAS CONCATENADAS PARA GENERAR LAS FRECUENCIAS.....	26
TABLA 8 – RESUMEN DE PRESTACIONES DE LA SSTC PARA AUDIO FIDEDIGNO.	33
TABLA 9 – DISTRIBUCIÓN DE LAS HORAS UTILIZADAS.	42
TABLA 10 – COSTOS DE PROTOTIPOS.....	42

INDICE DE FORMULAS

F.1 - FRECUENCIA DE RESONANCIA DE UNA BOBINA DE TESLA.....	6
F.2 – VUELTAS EN UN SELENOIDE DE ALTURA H CON ALAMBRE AGW31	10
F.3 – PESO EN UN SELENOIDE DE LONGITUD L CON ALAMBRE AGW31.....	10
F.4 – LONGITUD DE ALAMBRE AGW31 EN UN SELENOIDE	10
F.5 –IMPEDANCIA DE UNA BOBINA PLANA CONCENTRICA	12
F.6 –IMPEDANCIA DE UNA BOBINA CÓNICA.....	12
F.7 –IMPEDANCIA DE UNA BOBINA CILÍNDRICA.....	13
F.8 –CAPACITANCIA DE UN TOROIDE	14
F.9 –CAPACIDAD DE UN ELIPSOIDE.....	15
F.10 –CAPACITANCIA DE UN DISCO.....	15
F.11 –CALCULO DE LA FRECUENCIA DE UN NE555 EN MODO ASTABLE.....	26
F.12 –POTENCIA DE LA CHISPA GENERADA.....	33
F.13 –CORRIENTE A LA SALIDA DEL CIRCUITO.....	33

Dedicado a:

Nuestro proyecto final de carrera está dedicado a aquellas personas que compartieron nuestras vivencias durante nuestra formación académica, así como a aquellas que ya no están con nosotros. A todos ellos muchas gracias.

Téc.U. Christian Kalivoda

Ing. Franco Kappes

Ing. Cristian Cellino

Ing. Ricardo Bonino

Capítulo 1: Introducción

Movidos por la curiosidad de poder generar audio, mediante un método no convencional, unido a la problemática social de falta de interés en el estudio de las ciencias físicas y sus derivados, se plantea la idea de realizar un dispositivo que permita reproducir sonido y que sea visualmente atractivo.

A su vez, unido a la admiración hacia la vida y trabajo del Ing. Nikola Tesla, es que se decide utilizar los principios básicos de su investigación en el campo de la energía inalámbrica, para conformar un instrumento orientado en la liberación de energía eléctrica modulada mediante una señal de audio, haciendo uso de una bobina de Tesla para esto.

Para llevar a cabo lo anterior mencionado, se pretende la realización de un parlante de plasma dando uso a una combinación de los conceptos adquiridos durante la carrera de grado en Ingeniería Electrónica. Se idea inicialmente como una herramienta educativa, dado su atractivo y llamativo modo de reproducir el audio inyectado.

El funcionamiento del parlante se realiza al inyectar una señal de audio o un mono-tono al circuito de control de la bobina de Tesla.

1.1 Breve Reseña Histórica:

Nikola Tesla (1853-1943), ingeniero Serbio-Americano que debe su fama a su contribución en el diseño del sistema de distribución de corriente alterna. En 1891 crea un circuito transformador resonante, al que conocemos hoy como Bobina de tesla.

Tesla utiliza las bobinas para llevar a cabo experimentos en generación de rayos X, iluminación eléctrica, electroterapia y transmisión inalámbrica de energía, entre otros.



Figura 1 – Nikola Tesla, sosteniendo una bombilla fosforescente iluminada mediante el campo electromagnético producido por la Bobina de Tesla. [1]

Hoy en día se usan las bobinas de Tesla primordialmente para la realización de efectos especiales en películas, aquellas que aún utilizan efectos prácticos, y en menor medida como detectores de pérdida en sistemas de vacío. [2]

En los últimos años, ha resurgido el uso de las bobinas de Tesla dentro del campo de la investigación científica a través del proceso conocido como “Teslaphoresis”. Éste método se utiliza para auto ensamblar nanotubos de carbono usando la bobina de Tesla. [3]

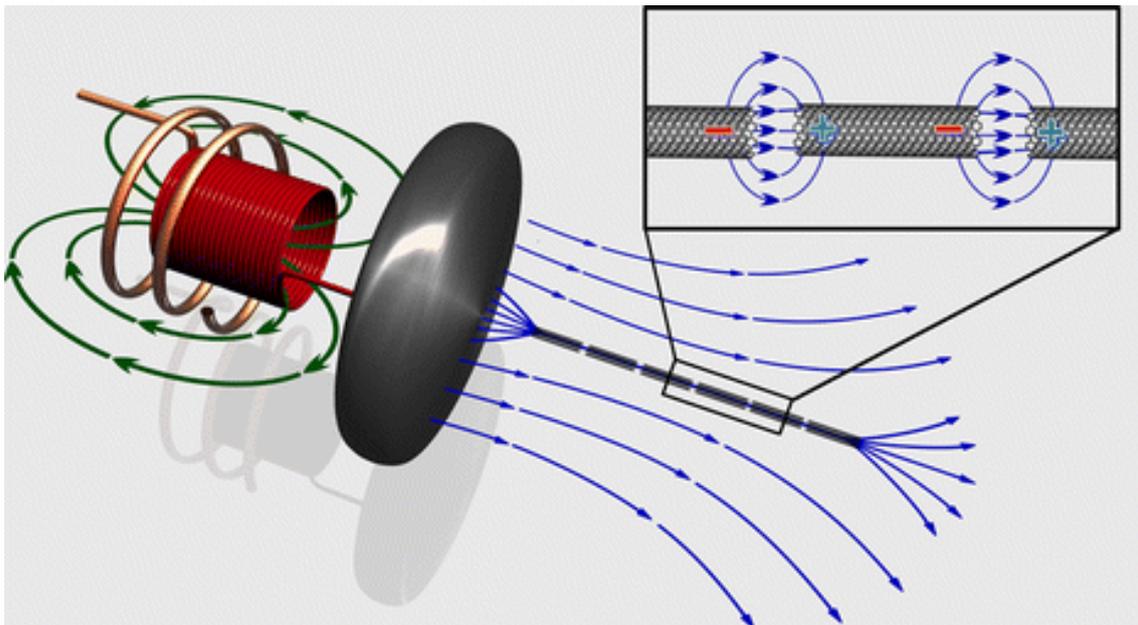


Figura 2 – Sistema Teslaforetico (TEP). Ilustración esquemática. [3]

1.2 Introducción a los Inductores de Tesla.

La bobina de Tesla (*Tesla Coil*), que a partir de ahora denominaremos TC, es un oscilador de radio frecuencia que controla un transformador resonante de núcleo de aire para producir altos voltajes de bajas corrientes. El circuito original de Tesla, hacía uso de un descargador (gap) para generar oscilaciones. A medida que la tecnología fue avanzando, los circuitos de control se fueron adaptando y mejorando. El primer cambio que se realiza es remplazar el descargador por tubos de vacío, que luego se sustituyen por transistores.

Las TC producen voltajes que alcanzan valores extremos de tensión, sin embargo, la corriente alterna es relativamente baja, debido a la frecuencia del circuito oscilante que se halla en el rango de los 5.000 Hertz y los 1.000.000 Hertz.



Figura 3 –Bobina clásica de Tesla. [4]

• Morfología y funcionamiento

Una TC clásica es un transformador elevador, cuyo valor típico de voltaje entregado se encuentra por encima de los 1.000 Volts. El circuito resonante, que permite el funcionamiento de la TC, se conforma de un capacitor y el bobinado primario y un descargador, o gap, actúa como interruptor en el circuito primario.

En el secundario del circuito se compone del bobinado secundario y se puede colocar un electrodo capacitivo para reducir descargas prematuras por efecto corona.

Tanto el bobinado primario como el secundario se deben construir con núcleos de aire. Mientras que el secundario siempre debe ser un solenoide, el primario puede tomar distintas formas dependiendo el resultado que se desea obtener.

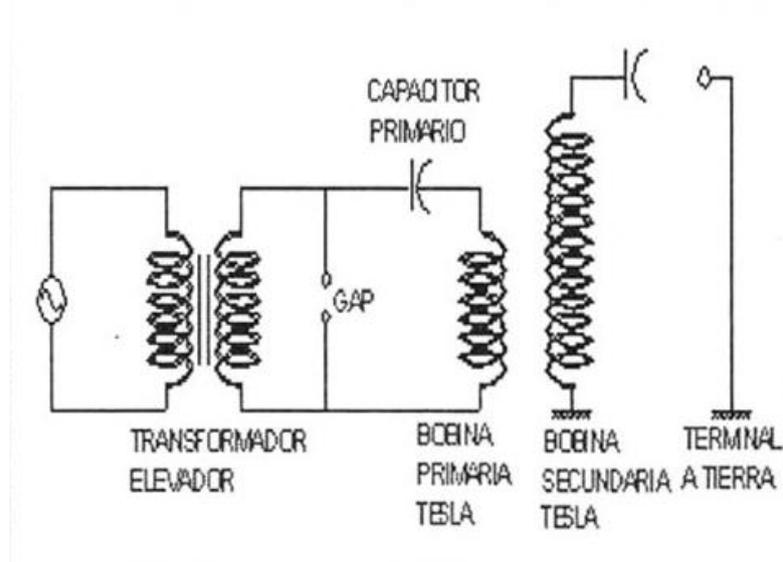


Figura 4 – Bobina de Tesla. Circuito [5]

- *Bobina de Tesla de estado sólido (SSTC)*

Con el avance de la electrónica se crea un nuevo tipo de TC, estas usan MOSFET, o transistores de potencia, para generar los pulsos desde una fuente de alimentación continua. Esto permite controlar el voltaje y la frecuencia con la que se generan los pulsos y la forma de onda.

1.3 Estudio de Mercado:

- *Target*

El producto pretende ser una ayuda educativa para mostrar de una manera amigable la ciencia detrás del funcionamiento de las cosas. Se tiene por objetivo los museos interactivos, debido al tamaño, pero se puede reducir el mismo para ser más atractivo al público general.

Teniendo en cuenta que es un parlante funcional y el auge de la decoración mediante tecnología, se puede considerar como un artefacto de diseño, una delicatessen que permite decorar a la vez de ser un objeto funcional.

- *Pruebas de concepto.*

Si bien en términos generales se trata de un objeto de uso cotidiano, un parlante, la innovación de su forma es la que permite la exclusividad del producto.

Desde el punto de vista educativo, su aspecto llama la atención y su funcionalidad permite la oportunidad de abrir la discusión sobre la transmisión de la energía, los campos eléctricos, la producción del sonido, entre otros. Permite al educador tener un elemento físico atractivo que acompaña la lección.

- *Pruebas de producto - Competencia*

A nivel nacional no es un producto que se encuentre disponible en forma comercial, tampoco es posible adquirirlo en internet como un producto final elaborado propiamente dicho.

• *Análisis de recursos*

Se comienza el proyecto con los conocimientos teóricos y la experiencia que se obtuvo durante la realización del proyecto elaborado para la materia Tecnología Electrónica perteneciente al programa de cursado de la carrera de Ingeniería Electrónica. Se cuenta gracias a ella con la experiencia previa de un pequeño prototipo de bobina de Tesla y un análisis exhaustivo de la información disponible sobre su funcionamiento.

Respecto al instrumental necesario para los avances del proyecto, los alumnos cuentan con el instrumental de medición necesario, además del acceso al instrumental que ofrece la facultad.

• *Análisis de costos.*

Para la confección del parlante de plasma será necesaria una inversión inicial de: \$10.000, teniendo en cuenta posibles problemas de desarrollo, o inconvenientes no provistos.

• *Ciclo de vida del producto*

Como nos encontramos frente a un producto que no presenta competencia en el mercado, que puede ser visto como una herramienta educativa, un artefacto de art-decor o un parlante funcional se concluye que el producto recién comienza su ciclo de vida.

Capítulo 2: Desarrollo

2.1 Desarrollo

Para poder realizar cada SSTC se analizan tres bloques principales para poder así resolver cada sección por separado y simplificar los cálculos.

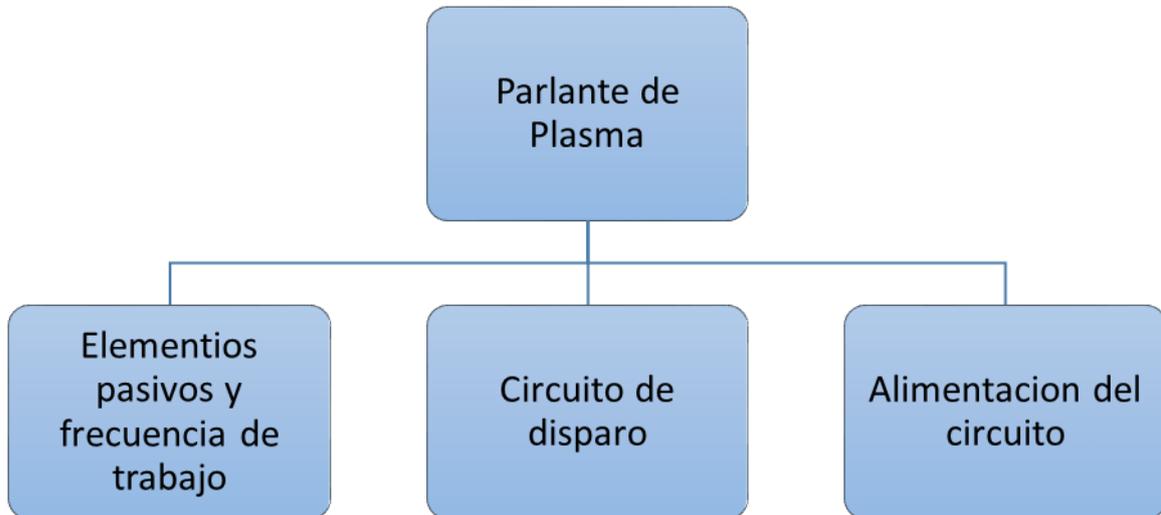


Figura 5 –Diagrama de bloques general.

• Elementos pasivos y frecuencia de trabajo.

Se debe determinar el tamaño de TC que se va a utilizar, es decir, las dimensiones físicas de la bobina.

La frecuencia de resonancia del circuito (f_0), depende de la inductancia de la bobina secundaria (L_2) y las capacitancias que conforman el secundario del circuito, es decir, la que se genera entre las espiras de la bobina secundaria (C_{L2}) y la del capacitor de descarga (C_d).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 \times (C_{L2} + C_d)}} \quad [F.1]$$

Así mismo, la ganancia que genera el circuito se debe a la relación entre los capacitores primario y secundario. En este tipo de TC la capacitancia del primario está dada únicamente por la capacidad generada entre las espiras de la bobina primaria, por lo que a partir de la frecuencia de oscilación se puede obtener las características constructivas de la bobina primaria.

Como estos parámetros se obtienen a partir de los valores constructivos de los elementos pasivos, es de vital importancia comenzar desde el tamaño físico y la forma de la TC a la que queremos llegar. Se hace hincapié en la morfología de la TC ya que

el capacitor de descarga puede ser un domo, una esfera o un solenoide; y la bobina primaria puede ser plana, cilíndrica o cónica.

Las tablas que se presentan a continuación ofrecen un resumen de los datos necesarios para realizar la forma física de la TC.

Tipo de Bobina	Datos necesarios
Cilíndrica	H = altura R = radio N = vueltas
Plana	c = ancho R = radio N = vueltas
Cónica	H = altura R = Radio promedio N = vueltas α = inclinación

Tabla 1 – Características necesarias para las Bobinas.

Tipo de Capacitor	Datos Necesarios
Toroide	d_1 = diámetro exterior d_2 = diámetro interior
Disco	R = radio h = altura
Esferoide	d = diámetro h = altura

Tabla 2 – Características necesarias para el capacitor de descarga.

• Circuito de disparo.

Para realizar el disparo de una SSTC se utilizan circuitos de potencia cuyo núcleo está formado por IGBT, MOSFET o transistores de potencia. Puede usarse un solo transistor Switching, polarizado con una resistencia a base, o usar IGBT/MOSFET en configuración de puente o semi-puente. Todas son configuraciones básicas que pueden encontrarse en cualquier manual de electrónica de potencia.

El circuito a elegir dependerá de la potencia que se desea manejar, se puede hacer configuraciones más robustas en caso de pretender descargas de gran tamaño, o una relativamente sencilla para hacer una bobina pequeña donde la chispa sea de un tamaño menor.

A su vez, para los circuitos de potencia de las SSTC se suele utilizar una pre-etapa de control del elemento de potencia, a través de circuitos generadores de PWM, o haciendo uso de un integrado temporizador como el NE555 en modo “astable”.

• Alimentación del circuito.

La alimentación del circuito dependerá de dos variables, la primera y principal es la cantidad de energía que precisa el circuito de disparo, la otra es la movilidad que se le quiere dar a la TC.

Si bien las SSTC se alimentan de tensión continua, pueden ser conectadas a la red eléctrica si así se prefiere. En este caso es necesario preceder el diseño con una configuración rectificadora apropiada. A su vez, si el circuito lo permite, es posible alimentarlo mediante una batería, en preferencia recargable, lo que dará movilidad al circuito haciéndolo inalámbrico.

*2.1.1 Investigación de componentes***I. Bobina Secundaria**

Inicialmente, se comienza con la búsqueda de núcleos posibles para fabricar la bobina secundaria. Como ya se explicó anteriormente, las TC necesitan que el bobinado secundario sea de forma cilíndrica con núcleo de aire. Es por esto que se barajan la disponibilidad de diferentes materiales y tamaños de posibles núcleos. Debido a los requisitos pretendidos inicialmente, se descartan los tubos de PVC destinados a instalaciones eléctricas exteriores, ya que las secciones transversales no alcanzan el diámetro mínimo requerido. Posteriormente, se investiga la posibilidad de utilizar tubos de cartón, por su amplia variedad de tamaños, sin embargo, estos poseen un grosor de sección muy débil y compromete la forma cilíndrica pretendida para confección de la bobina. Sin embargo, existen en el mercado, tubos de cartón de alto impacto, que se presentan con una dureza superior a los antes mencionados y la misma variedad de tamaños.

Otro material considerado para la construcción de los núcleos, son los tubos de PVC utilizado para desagüe pluvial. Cabe destacar que los diámetros que se obtienen en el mercado local son limitados, aun así, se consideran útiles para ser utilizada como núcleo de una bobina de mayor tamaño.

Una vez elegido el núcleo, se procede a elegir el alambre esmaltado que conformara la bobina propiamente dicha. Mediante la ayuda de una hoja de datos que otorga el proveedor internacional [6], se comienza por elegir el calibre adecuado y posteriormente se calcula el número de vueltas, teórico, que tendría cada bobinado.

Continuadamente, se presenta la tabla que se extrajo de la hoja de datos.

AWG or B&S Units	Section mm ²	Diameter mm	Turns per cm	Weight g/m	Length m/kg	Resistance Ω/m	Max Frecuency
0	53.48	8,252	1.21	474	2.11	0.000317	250 Hz
1	42.41	7,348	1.36	375	2.66	0.0004	325 Hz
2	33.63	6,544	1.52	295	3.39	0.0005	410 Hz
3	26.67	5,827	1.71	237	4.22	0.00063	500 Hz
4	21.15	5,189	1.93	188.40	5.31	0.000815	650 Hz
5	16.76	4,620	2.16	149.35	6.70	0.001028	810 Hz
6	13.23	4,115	2.43	118.48	8.44	0.001296	1100 Hz
7	10.55	3,665	2.73	93.99	10.64	0.001634	1300 Hz
8	8,367	3,264	3.06	74.54	13.41	0.002061	1650 Hz
9	6,633	2,906	3.44	59.09	16.92	0.002600	2050 Hz
10	5,260	2,588	3.86	46.86	21.34	0.003278	2600 Hz
11	4,169	2,304	4.34	37.14	26.92	0.004135	3200 Hz
12	3,307	2,052	4.87	29.46	33.94	0.005213	4150 Hz
13	2,627	1,829	5.44	23.41	42.72	0.006562	5300 Hz
14	2,081	1,628	6,14	18,54	53,54	0.008283	6700 Hz
15	1,651	1,450	6.90	14.71	67.98	0.010441	8250 Hz
16	1,307	1,290	7.75	11.64	85.88	0.013192	11 k Hz
17	1,040	1,151	8.69	9,270	107.9	0.016570	13 k Hz
18	0.8235	1,024	9.76	7,337	136.3	0.020935	17 kHz
19	0.6533	0.912	10.9	5,820	171.8	0.026393	21 kHz
20	0.5191	0.813	12.3	4,625	216.2	0.033212	27 kHz
21	0.4117	0.724	12.8	3,668	272.7	0.041880	33 kHz
22	0.3247	0.643	15.5	2,893	345.7	0.053096	42 kHz
23	0.2588	0.574	17.4	2,305	433.8	0.066628	53 kHz
24	0.2051	0.511	19.6	1,827	547.3	0.084070	68 kHz
25	0.1626	0.455	22.0	1,449	690.3	0.106037	85 kHz
26	0.1282	0.404	24.7	1,142	845.6	0.134499	107 kHz
27	0.1024	0.361	27.7	0.912	1096.7	0.168449	130 kHz
28	0.0804	0.320	31.2	0.716	1395.7	0.214379	170 kHz
29	0.0647	0.287	34.8	0.576	1735.1	0.266513	210 kHz
30	0.0507	0.254	39.3	0.451	2215.2	0.340263	270 kHz
31	0.0401	0.226	44,2	0,357	2798,2	0,429799	340 kHz
32	0.0324	0,203	49,2	0,288	3468.1	0.532709	430 kHz
33	0.0254	0,180	55,5	0,227	4411.1	0.677543	540 kHz
34	0.0201	0,160	62,5	0,179	5582,7	0.857516	690 kHz
35	0.0158	0.142	70.4	0.141	7087.8	1,088693	870 kHz
36	0.0127	0.127	78.7	0.113	8861.0	1,361052	1100 kHz
37	0.0102	0.114	87.7	0.0909	10997.1	1,689166	1350 kHz
38	0.0082	0.102	98.0	0.0728	13736.9	2,109997	1750 kHz
39	0.0062	0.089	112	0.0554	18043.0	2,771419	2250 kHz
40	0.0049	0.079	126	0.0437	22899.9	3,517450	2900 kHz

Tabla 3 – Características de los conductores de cobre normalizados tomados de los datos del proveedor.

Se crea un prototipo de bobina secundaria, que se usará para experimentar con el resto de los parámetros que conforman la SSTC. La misma, está realizada sobre un tubo de cartón de alto impacto de 3,5 [cm] de diámetro por 16 [cm] de alto.

Una vez obtenido los parámetros físicos del núcleo se calcula la cantidad teórica de alambre esmaltado que va a precisar la bobina. Se utiliza un alambre esmaltado de calibre AWG 31 o 0,22 [mm] de diámetro.

$$vueltas = 44,2 \left[\frac{1}{cm} \right] \times h [cm] \quad [F.2]$$

Donde el coeficiente “44,2 [1/cm]” es un valor que se obtiene de la hoja de datos del proveedor y h es la altura que se pretende que tenga el bobinado.

El siguiente parámetro a calcular es el peso del alambre esmaltado. Esto se debe a que el material se vende por cantidad de Kilogramos y no por longitud.

$$peso = 0,357 \left[\frac{g}{m} \right] \times l [m] \quad [F.3]$$

$$l = vueltas \times \pi \times diámetro [m] \quad [F.4]$$

Al igual que en la formula anterior, el coeficiente “0,357 [g/m]” se obtiene de la hoja de datos del proveedor.

Finalmente, haciendo uso de las formulas, la bobina prototipo se construyó con 660 vueltas, una inductancia teórica de 8,12 [mH].



Figura 6 – Proceso de elaboración de la bobina prototipo.

Esta bobina prototipo se utilizó como elemento de ensayo en todos los circuitos propuestos durante el proceso de creación del parlante de plasma. Y es por esa razón que el modelo final tiene características similares, únicamente se mejoraron los materiales y la forma de construcción de los bobinados secundarios.

Se eligió un tubo de cartón de alto impacto de 3,5 [cm] de diámetro por 15 [cm] de alto para la bobina pequeña. Y un tubo de PVC de 6,5 [cm] de diámetro por 32 [cm] de alto para el bobinado más grande.

Haciendo uso de las formulas antes mencionadas, las características de cada bobinado se pueden observar en las tablas a continuación.

Tipo de alambre (AGW)	31
Calibre del alambre[mm]	0,226
Diámetro del núcleo[cm]	3,5
Altura del núcleo [cm]	15
Circunferencia del núcleo [cm]	11
Cantidad de vueltas	610
Longitud del alambre [m]	72,9
Peso del alambre [g]	26,0

Tabla 4 – Características constructivas de la bobina secundaria pequeña.

Tipo de alambre (AGW)	31
Calibre del alambre[mm]	0,226
Diámetro del núcleo[cm]	6,35
Altura del núcleo [cm]	32
Circunferencia del núcleo [cm]	20
Cantidad de vueltas	1320
Longitud del alambre [m]	282,2
Peso del alambre [g]	100,7

Tabla 5 – Características constructivas de la bobina secundaria grande.

La razón por la cual se realizaron dos TC de distinto tamaño físico, es porque se pretende realizar un dispositivo que pueda reproducir fidedignamente la voz humana y otro que permita aumentar el tamaño de la chispa con la contraprestación de perder definición de sonido y solo poder reproducir mono-tonos.

II. Bobina Primaria

El bobinado primario es la parte del circuito por la que podemos hacer circular la mayor parte de la corriente. Se puede hacer en diferentes configuraciones, se eligieron tres tipos de bobinado por su capacidad de disipar calor y finalmente se eligió la que mejor aplica a las características que requiere la bobina de Tesla a fabricar.

La primera forma es una bobina plana concéntrica. Tiene por característica principal su alto poder disipativo de calor. Sin embargo, no realiza una suficiente inducción con la bobina secundaria.

$$L[\mu H] = \frac{21,5 \times N^2 \times 2a}{1 + 2,72 \times \frac{w}{2a}} \quad [F.5]$$

Donde L es la impedancia en [μH], w el ancho del área del bobinado en [cm^2], a es el radio en [cm] y N es el número de vueltas que tiene la bobina.

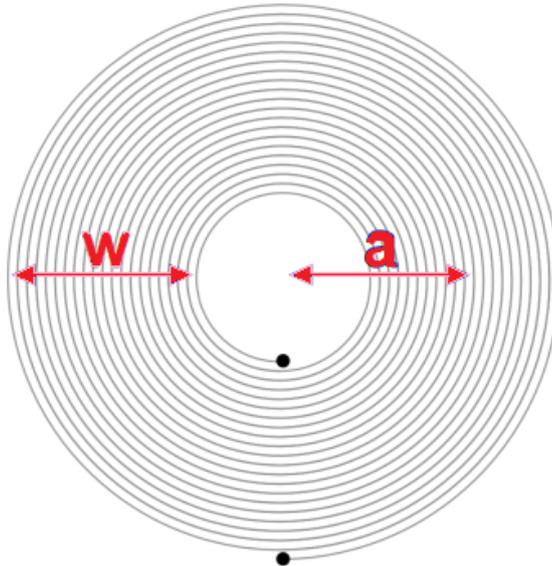


Figura 7 –Bobina Plana concéntrica.

Otra configuración posible para fabricar el bobinado primario es una bobina cónica, este tipo de bobina tiene menor disipación de calor que la bobina plana, pero genera mejor inducción entre las bobinas primaria y secundaria.

$$L[\mu H] = \sqrt{\left(\frac{R^2 \times N^2}{22,8 \times R + 25,4 \times H} \times \sin(x)\right)^2 + \left(\frac{R^2 \times N^2}{22,8 \times R + 27,94 \times w} \times \cos(x)\right)^2} \quad [F.6]$$

Donde w el ancho del área del bobinado en [cm^2], R es el radio promedio en [cm], H es la altura de la bobina en [cm] y N es el número de vueltas que tiene la bobina.

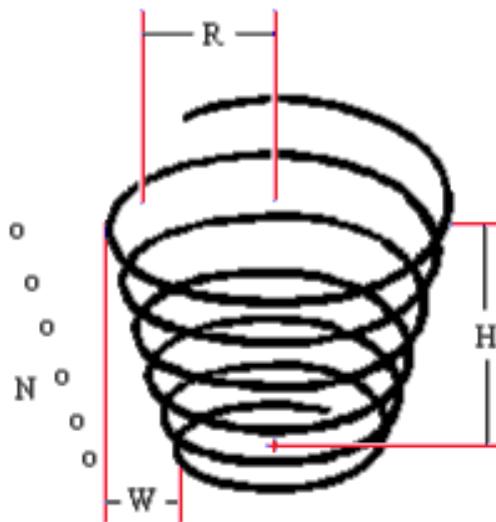


Figura 8 –Bobina cónica.

La tercera morfología de bobinado primario es una bobina cilíndrica, este tipo de bobina tiene menos disipación de calor que las anteriores, pero genera la mejor inducción entre las bobinas primaria y secundaria de las tres configuraciones mencionadas.

$$L[\mu H] = \frac{N^2 \times R^2}{22,86 \times R + 25,4 \times H} \quad [F.7]$$

Donde R es el radio [cm], H es la altura de la bobina en [cm] y N es el número de vueltas que tiene la bobina.

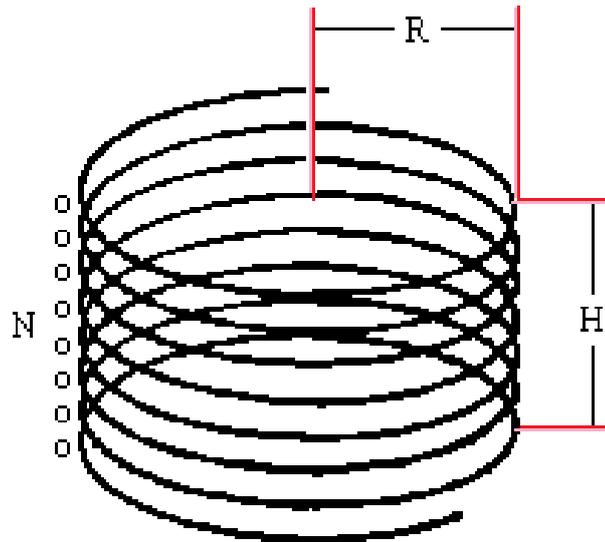


Figura 9 –Bobina cilíndrica.

Todas las fórmulas para las configuraciones de bobinado primario contemplan un núcleo de aire. Si bien el bobinado secundario se encuentra en las inmediaciones del corazón del primario, a los fines prácticos se considera que el núcleo es de aire. Al realizar las mediciones, los valores obtenidos varían imperceptiblemente por lo que se toma como válida esta consideración.

Teniendo en cuenta que la TC que se desea realizar no es de una potencia excesiva, la transmisión de temperatura entre primario y secundario no se considera un factor decisivo en la elección de la forma de bobinado a utilizar. Se prioriza la inducción entre los bobinados por lo que se elige, para el secundario, realizar una bobina cilíndrica.

Para la TC de mayor tamaño se toma la precaución de separar el primario del secundario, bobinando el primero en un núcleo, caño de PVC, cuyo diámetro es unos centímetros mayor que el del secundario. De esta manera, se evita que el calor creado por el primario invada el secundario.

III. Capacitor secundario

El capacitor secundario no es un elemento clave, es decir, se puede omitir en la creación de la SSTC. En caso de querer utilizarse, existen tres formas que aparecen con mayor frecuencia. Cuanto más perfecta, es decir menos aristas tiene, mejor es el campo electromagnético que se genera y menor es la probabilidad de generarse arcos de tensión.

La primera forma es un toroide que se hace con alambre de cobre de sección entre los 4 y los 8 [mm]. Resultando un toroide de aproximadamente de 14 [cm] de diámetro con 4 [cm] de sección

$$C = 7,11 \times \left(1,2781 - \frac{d_1}{d_2} \right) \times \sqrt{\pi \times d_1 \times (d_1 - d_2)} \quad [F.8]$$

Donde d_1 es el radio exterior en [cm] y d_2 es el radio interior en [cm].

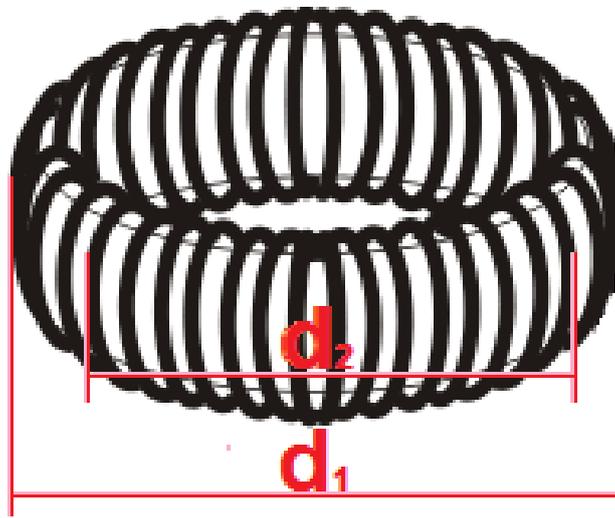


Figura 10 –Forma Toroide de Capacitor secundario.

La segunda forma es un esferoide, o esfera chata, o elipsoide; de 14[cm] de diámetro por 4[cm] alto.

$$C = \frac{\varepsilon \times d/2}{\ln\left(\frac{d}{h}\right)} \quad [F.9]$$

Donde h es la altura del esferoide en [cm], d es el radio en [cm] y ε es la constante de permeabilidad del aire o constante dieléctrica, aproximadamente igual a $8,85 \times 10^{-12}$ [C²/Nxm²].

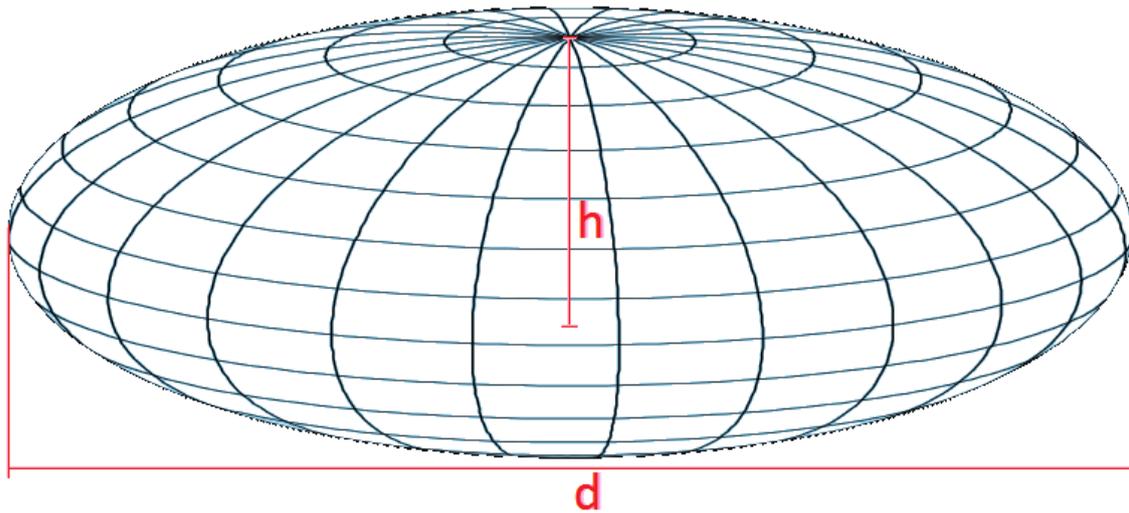


Figura 11 –Forma esferoidal de Capacitor secundario.

La tercera morfología es un tonel, o cilindro chato, o disco, de 14[cm] de diámetro por 4[cm] alto.

$$C = 8 \times \varepsilon \times R_{[E.10]}$$

Donde R es el radio en [cm] y ε es la constante de permeabilidad del aire o constante dieléctrica, aproximadamente igual a $8,85 \times 10^{-12}$ [C²/Nxm²].

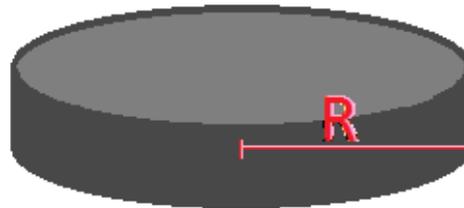


Figura 12 –Forma tonel de Capacitor secundario.

Para esta forma se utiliza el modelado de disco, para simplificar los cálculos, pero es recomendable redondear las aristas ya que de no hacerlo se estarían generando puntos donde puede aparecer efecto corona.

Si bien el diseño de una TC contempla la existencia de un electrodo de descarga secundaria, a los fines propuestos se elige **no** utilizar capacitor secundario. La existencia de éste, ayuda al tamaño del campo electromagnético de la TC, al mismo tiempo que reduce la formación del efecto corona, lo cual no es deseado por el presente trabajo. Es por esto se reemplaza el capacitor secundario por una púa u objeto sumamente agudo al extremo superior del bobinado secundario, lo que permite canalizar todo el voltaje generado, facilitando la generación de la chispa de plasma.

IV. Circuito de disparo

Este circuito es el responsable de producir la oscilación inicial sobre el bobinado primario, para luego inducir un campo electromagnético sobre el secundario, caso similar a un transformador tradicional, pero sin contar con un núcleo de metal para tal caso.

Para la generación de la oscilación es necesario contar con un capacitor principal, el cual se sumará con capacitancias parasitas propias del circuito y de la relación de bobinado primario-secundario. A su vez, se debe contar con una inductancia correspondiente, la cual estará dada por el bobinado primario. Cuando circule por estos dos elementos un voltaje en continua, se producirá una oscilación del voltaje inyectado.

Una vez obtenida la oscilación, se utiliza algún dispositivo electrónico que asegure y mantenga la circulación de dicha oscilación, dando a lugar de esta manera a una resonancia circulante por el bobinado primario. Entre los elementos electrónicos se pueden utilizar transistores de potencia, o MOSFET que cumplan con las prestaciones necesarias para los niveles de tensión, corriente y disipación de calor requeridos para el desempeño.

El diseño inicial se conformó con un MOSFET disparado mediante el uso de un dispositivo integrado, encargado de generar pulsos de ancho modulado [PWM]. Sin embargo, esta configuración no brindó los resultados esperados, aun así no se descartó su uso para futuras aplicaciones.

Posteriormente, se utilizó un circuito que consistía en dos MOSFET configurado a modo de medio puente "H", los cuales se encargarían de transmitir un medio ciclo de tensión hacia la bobina primaria por cada MOSFET. A su vez, ambos dispositivos fueron disparados por otros dos componentes, destinados a controlar y coordinar los disparos de ambos elementos de potencia, de modo tal que se establezca un continuo flujo de tensión alterna en la bobina. Todo esto, gracias a que ambos elementos de control trabajan en contrafase, uno de otro. Lamentablemente, este planteo requiere componentes de control susceptibles a variaciones bruscas de tensión, y al encontrarse conectados directamente en la bobina primaria, están en contacto con posibles casos de sobre tensión. Para que esto no suceda, se puede emplear un núcleo toroidal de ferrite como transformador, de modo de separar eléctricamente los elementos de control de los de potencia. Esto acarrea como consecuencia la disposición de un toroide exclusivo para la frecuencia de trabajo del sistema.

Por último, se decidió utilizar un circuito más simple pero que cumpla con los requisitos previamente establecidos. Para ello se utilizó un MOSFET y un transistor de potencia conectado de modo similar a un amplificador clase B. Donde la bobina principal se conectada desde el surtidor del MOSFET hacia el colector del transistor. Este tipo de configuración se conoce como "Ladrón de Joule" u oscilador de bloqueo. En este caso, el FET de óxido-metal, se encargará de limitar el flujo de corriente que ingresa en el

bobinado primario y el transistor de potencia será el que efectúe la realimentación necesaria para mantener la oscilación.

Cabe destacar que en todos los diseños de circuitos de disparo deben sintonizarse con la bobina, para que ayude a la oscilación que permite la inducción entre primario y secundario. Para lograr la sintonización se utilizan distintos capacitores y resistencias variables a lo largo del circuito.

V. Alimentación

Se realiza una fuente rectificadora de 48[Vdc] que usa un transformador reductor y un puente de diodos. Se deja la posibilidad de usar una fuente switching comercial ya que la alimentación se propone como un elemento aparte del parlante de plasma.

Como la alimentación del circuito no se considera una prioridad de diseño, ya que se adecuaron los valores a valores comerciales, no se considera menester ahondar en los detalles de la fuente de alimentación. Se recomienda utilizar una fuente de continua de 48[Vdc] comercial, pero el usuario puede optar por recrear el circuito de rectificación que se usó durante las pruebas del prototipo.

2.1.2 Propuestas de circuitos o esquemas.

I. Pruebas, experiencias.

El primer prototipo, que luego se usó como base para el circuito final, consta de un MOSFET al que se polariza de manera tal que permita la oscilación entre los bobinados en la configuración de oscilador de bloqueo. Se utiliza un capacitor y una resistencia variable para generar el disparo y se inyecta el audio por el drenador del MOSFET.

Este circuito permite que se eleve la tensión de trabajo al valor que uno desee, siempre que se tenga en cuenta los valores críticos que ofrece la hoja de datos del elemento activo.

La señal de audio se separa eléctricamente a través de un opto-acoplador, que debido a su funcionamiento no permite el paso de tensiones negativas, por lo que se pierde parte de la señal inyectada.

Este prototipo solo puede reproducir mono-tonos, o audio de mala calidad ya que se están filtrando todos los picos negativos de la señal, es por este motivo que se decide buscar otra opción.

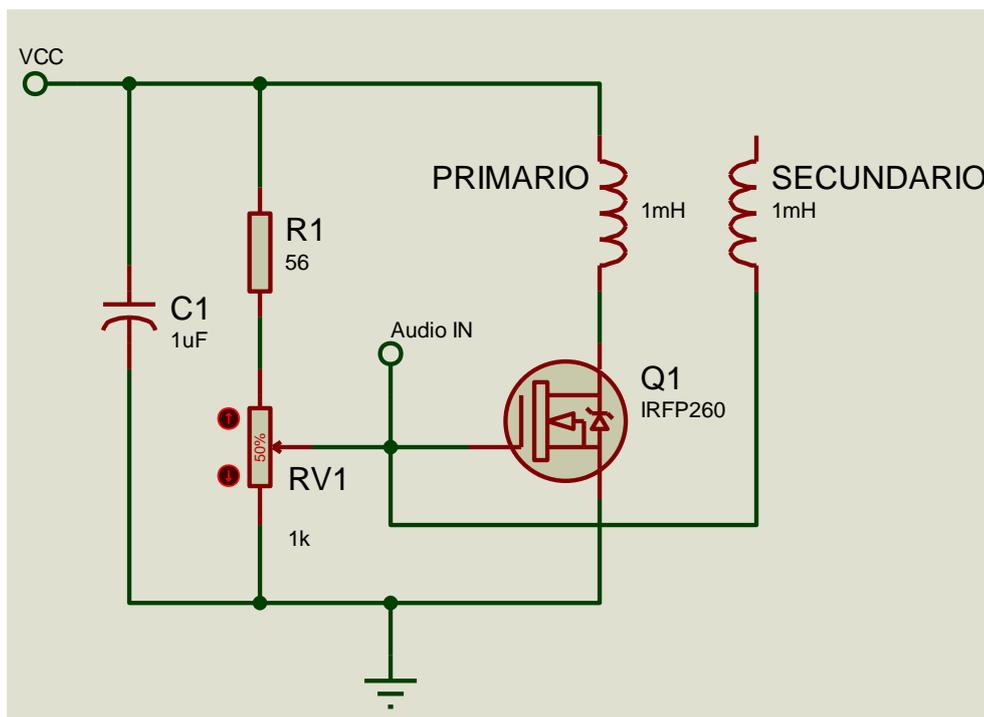


Figura 13 – Primer prototipo de circuito de control de disparo de MOSFET.

El segundo prototipo implementado, utiliza un par de circuitos integrados que controlan dos MOSFET en configuración de medio puente "H". El circuito de control y el de inyección de la señal de audio se encuentran separados eléctricamente gracias a un transformador controlador de compuerta (GDT).

Lamentablemente, no fue posible conseguir el ferrite necesario para la fabricación del GDT. Se utilizó un reemplazo, pero el circuito no logro generar chispa ya que la frecuencia natural de los ferrites que se obtuvieron era menor a la requerida.

Las partes del circuito funcionan por separado y no se descarta que de conseguir un ferrite adecuado el circuito pueda funcionar correctamente. Aun así, se procede a implementar otra solución a la problemática establecida.

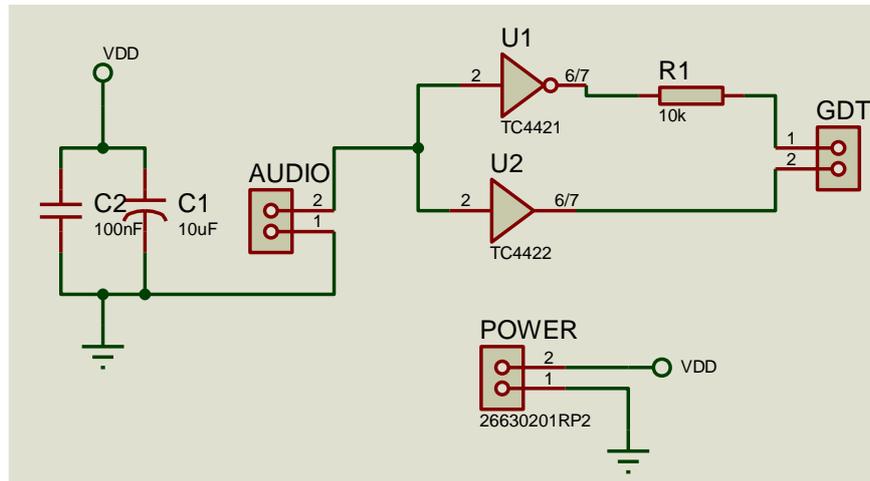


Figura 14 – Entrada de audio. Segundo prototipo de control de disparo de MOSFET.

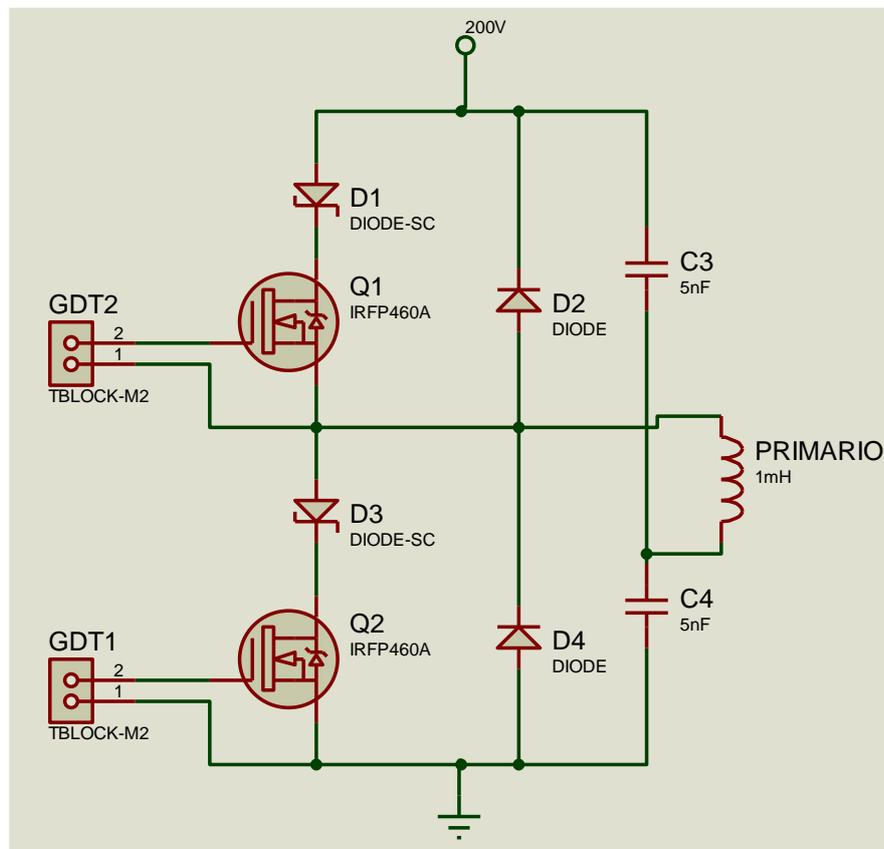


Figura 15 – Segundo prototipo de circuito de control de disparo de MOSFET.

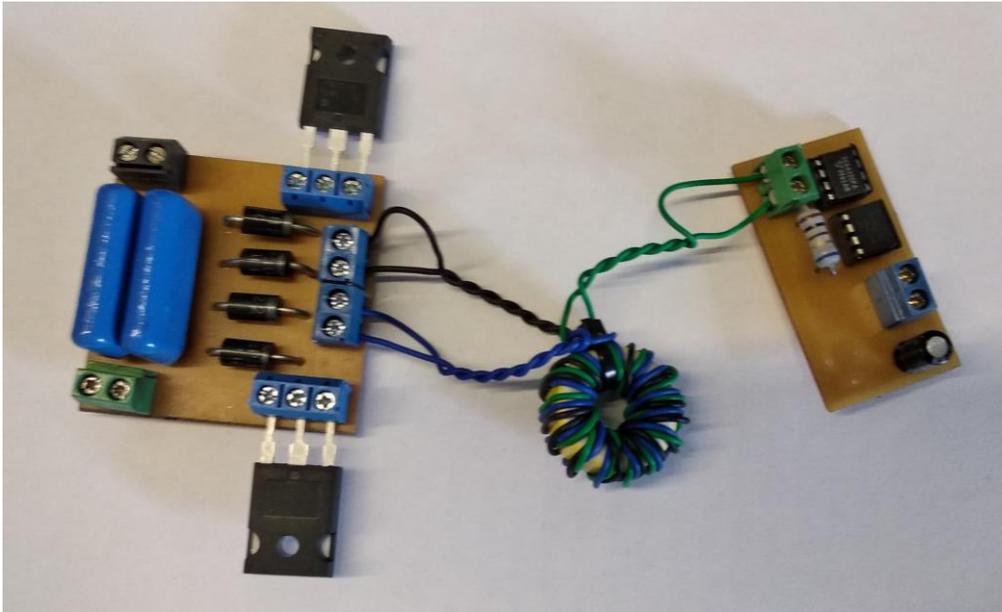


Figura 16 –Placa del segundo prototipo.

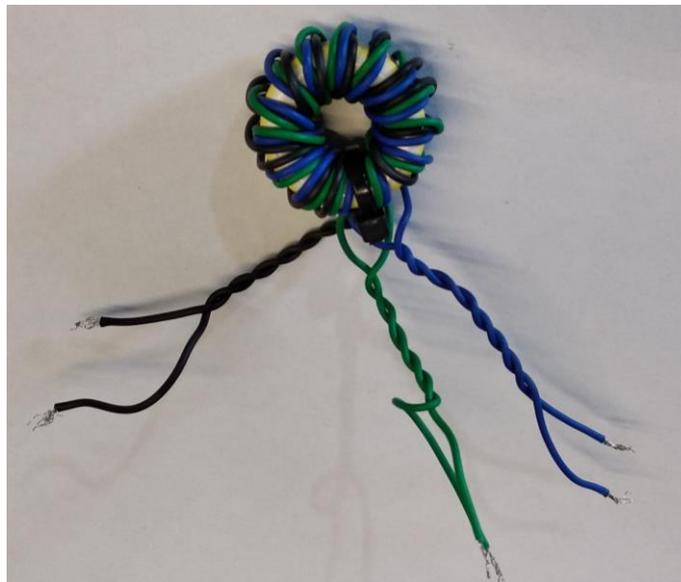


Figura 17 – Transformador controlador de compuerta (GDT).

Para el tercer prototipo se reutiliza el concepto inicial, pero se le agrega un transistor de potencia en forma similar a un amplificador clase B. Se conecta el bobinado primario entre el surtidor y el colector, y el secundario en la base del transistor. La señal de audio se inyecta entre la compuerta del MOSFET y el colector del transistor.

Al trabajar con menor tensión, aproximadamente 24 [Vdc] no es necesario aislar la entrada de audio, aun así, y por precaución, se coloca un pequeño toroide de ferrite a través del cable de audio.

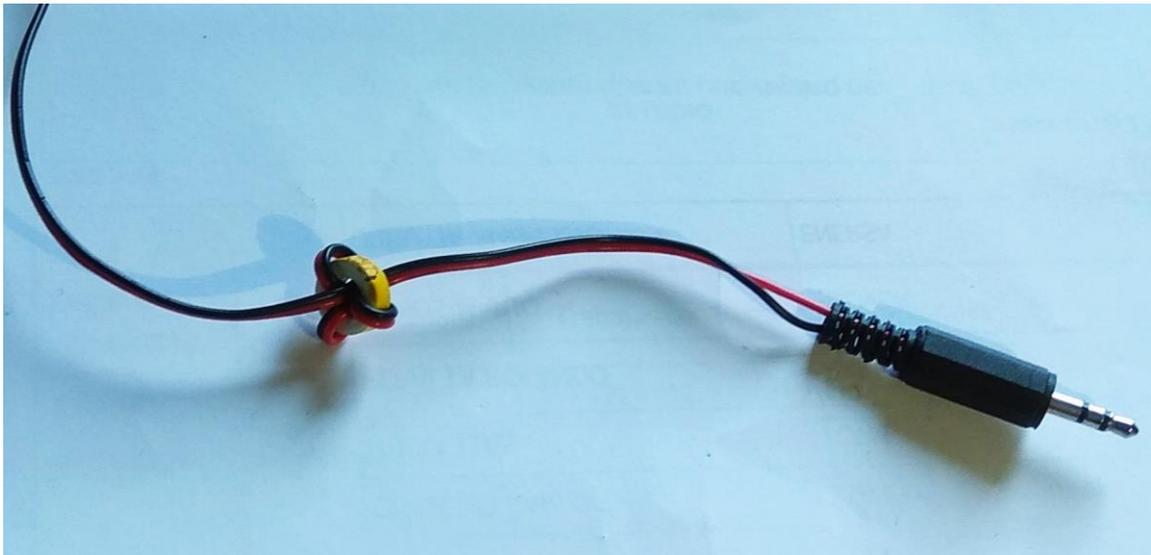


Figura 18 – Toroide en cable de alimentación de audio.

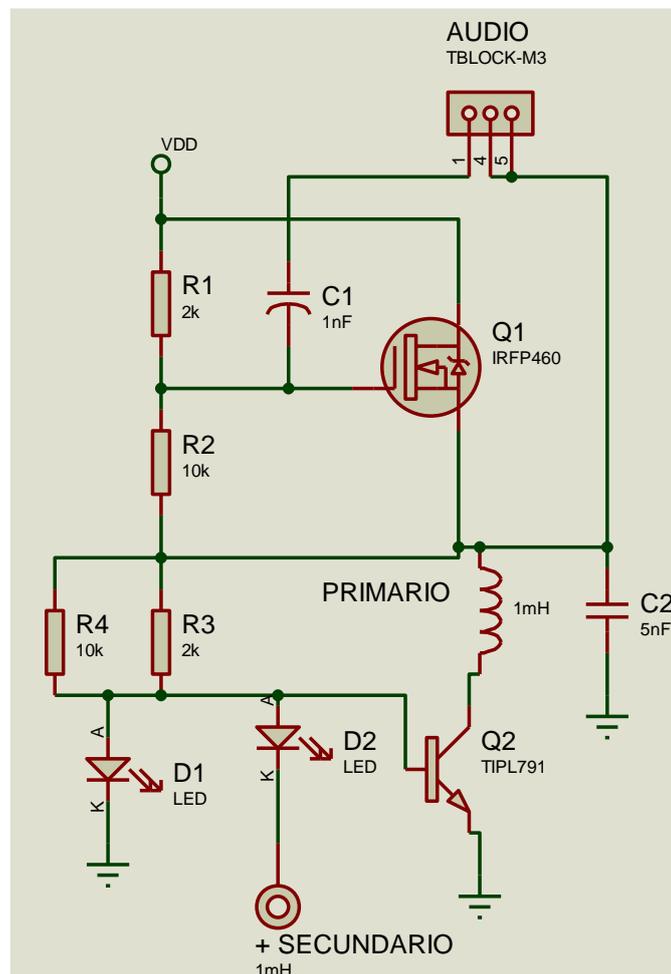


Figura 19 – Tercer prototipo de circuito de control de disparo de MOSFET.

Este circuito genera una calidad de sonido aceptable, y es el que se usa de base para el modelo final.

Durante las pruebas de calidad se decidió agregar una etapa de amplificación al audio, ya que las señales que ofrecen los reproductores comerciales son en general

pequeñas. Además, se añadieron capacitores de sintonización y diodos para filtrar y mejorar el sonido.

II. Problemas y soluciones implementadas

El primer problema que se presentó al plantear los circuitos fue la necesidad imperativa de mantener una temperatura estable en los elementos de potencia. Se colocaron distintos disipadores para encontrar los adecuados. Esto se debe a que la información disponible sobre estos elementos es escasa y no suele ser acorde a los productos ofrecidos en el mercado, haciendo que la elección de los disipadores sea un proceso de prueba y error.

Otra solución para disminuir la temperatura en los elementos de potencia fue aumentar la cantidad de vueltas en el bobinado primario, de esta manera cierta parte de la corriente es disipada en el bobinado primario y se obtiene un margen de disipación en los dispositivos de potencia.

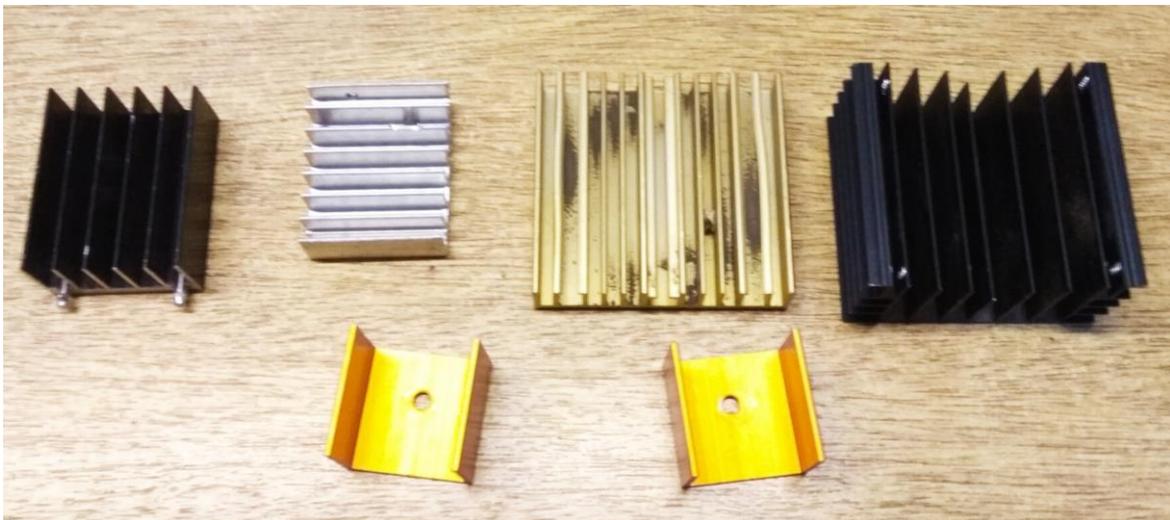


Figura 20 –Disipadores usados durante las pruebas.

El siguiente punto de contención fue la circulación de corriente y tensión que soportan los MOSFET. Esto se debe a que las TC generan altas tensiones de secundario, que pueden y suelen invadir el circuito. Si bien se colocaron resistencias para limitar la corriente y las tensiones siguiendo lo especificado en la hoja de datos, durante las primeras etapas del proyecto se exploraron los límites reales de los elementos de potencia.

Finalmente se calcularon nuevas limitaciones de corriente teniendo en cuenta los valores adquiridos durante la experimentación.



Figura 21 –MOSFET dañado por sobre corriente.

La construcción de los bobinados secundarios es un problema de tiempo, esfuerzo y precisión. La primera bobina, la de prototipo para las pruebas, se realizó a mano y el proceso duro aproximadamente cuatro horas. Los prototipos definitivos se mandaron a bobinar, pero el trabajo realizado fue de mala calidad, por lo que hubo que corregir el bobinado a mano. Esta vez el proceso llevo dos horas para la bobina de 610 vueltas y doce horas, repartidas en tres días, para la de 1320 vueltas.

La solución que se plantea para futuras TC es fabricar o adquirir un bobinador propio con cuentavueltas y motor, para que de esta manera se pueda realizar el trabajo personalmente, pero con la ayuda de la máquina.

Para el caso de la TC de mayor tamaño, era necesario utilizar mayor tensión para que se efectúe la descarga de plasma. Por consiguiente, se deben utilizar elementos de potencia de mayor tamaño. Esto trae como consecuencia, que los elementos activos que permiten trabajar con estos niveles de tensión suelen disminuir las frecuencias de conmutación, resultando en fallas térmicas por excesos de frecuencia de trabajo. Esto se puede solucionar utilizando configuraciones de puente "H", permitiendo así disminuir los tiempos de conmutación. Sin embargo, se debe aclarar que las inducciones por campo electromagnético son mayores por lo que debe separarse eléctrica y físicamente los circuitos de control de los de disparo. Como consecuencia esto plantea separaciones con elementos ópticos, los cuales no permiten el flujo de tensiones negativas, necesarias para obtener audio de calidad. Todo esto plantea un mayor tiempo de ensayo e insumo de materiales para poder obtener audio de calidad. Sin mencionar que para este diseño se aumentaría el riesgo eléctrico para cualquier manipulador inexperto.

Debido a todo esto se decide **no** implementar la configuración de TC de mayor tamaño.

2.1.3 Análisis del funcionamiento

I.Circuito Driver

Esta configuración de elementos electrónicos serán los encargados de la entrega, modulación y control de la energía suministrada a la TC.

Como se mencionó en incisos anteriores, la disposición base se trata de un circuito similar a un oscilador de bloqueo, o “Ladrón de Joule”, el cual basa su principio de funcionamiento en la interacción entre los bobinados primarios y secundarios presente en la TC.

Inicialmente se polariza el MOSFET de manera tal de controlar el flujo de corriente que circulara por el bobinado primario y posteriormente por el transistor de potencia. Por consiguiente, esto permite tener un control de la cantidad de potencia en forma de calor que se disipa, tanto por los elementos electrónicos, como por la bobina misma.

Seguidamente, el circuito oscilador de bloqueo será el encargado de producir la oscilación de la señal continua, mediante el intercambio de energía que se produce en las bobinas de la TC. Este está conformado por el transistor de potencia conectado por colector a la sección inferior del bobinado primario, que a su vez está conectado al surtidor del MOSFET en su otro terminal. El bobinado secundario tendrá el terminal inferior conectado a la base del transistor, mientras que el otro se deja abierto al aire.

En primera instancia, dicha interacción inicia cuando circule una corriente por el bobinado primario, esta producirá un campo electromagnético el cual inducirá un flujo de corriente en el secundario, pero de menor intensidad y sentido contrario. Una vez que esta corriente de secundario supera la de primario, el transistor deja de estar polarizado y se produce el corte de flujo de corriente por colector y por consiguiente en el primario. Una vez que se estableció el corte, y no se produce inducción de campo electromagnético desde el primario al secundario, este último comienza a descargarse hasta llegar a un nivel donde el transistor vuelve a permitir el paso de corriente desde la bobina primaria, pasando por colector hacia emisor, ocasionando que el ciclo comience nuevamente.

Este ciclo se repite con una frecuencia en el orden de los megahercios. Obteniéndose así el funcionamiento pretendido de la TC.

Cuando el campo electromagnético que circula por el bobinado secundario llega a su nivel máximo, este posee altos niveles de tensión elevados, por encima de los 1000 [V]. Como se aclaró en puntos anteriores, no se coloca capacitor de descarga, ya que lo pretendido en el presente trabajo es producir la descarga de la energía contenida en el secundario, en forma de chispa, al aire.

Cabe mencionar que se coloca un arreglo de puente de diodos para asegurar una tensión continua en el resto de circuitos que no forman parte del circuito driver

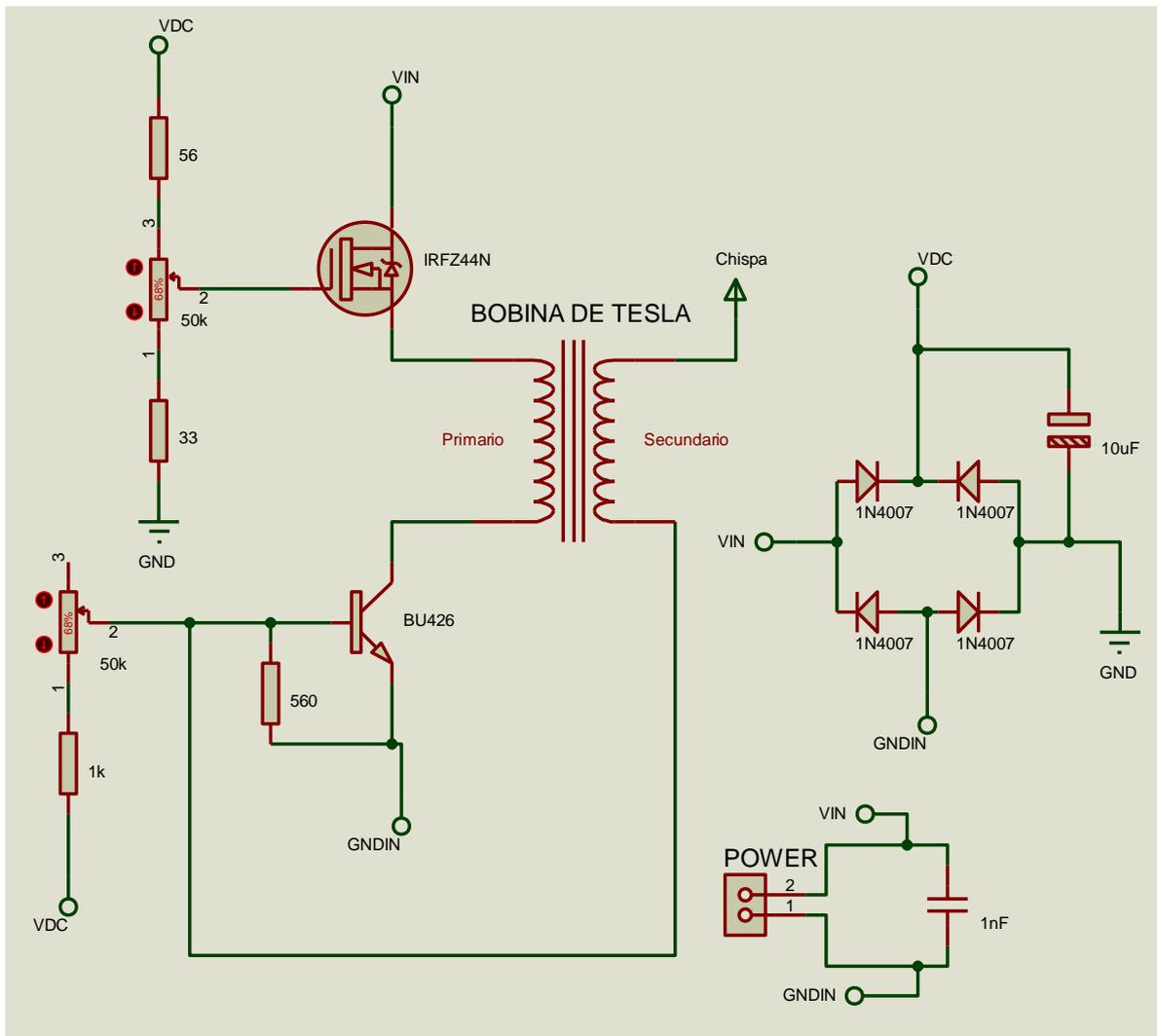


Figura 22 –Circuito driver.

II. Generador de mono-tonos

Un piano electrónico se puede considerar, esencialmente, como un generador de mono-tonos. El funcionamiento del circuito consiste en obtener frecuencias puras al pulsar cada tecla del piano.

Se realiza un teclado de una sola octava, utilizando la octava prima, debido a la disponibilidad del patrón de la nota *LA* en forma de un diapasón.

El circuito utiliza un integrado generador de pulsos de reloj, como es el NE555, y generar las frecuencias de la octava principal con sus semi-tonos.

Nota musical	Frecuencia
Do	261,63 [Hz]
Do#	277,18 [Hz]
Re	293,66 [Hz]
Re#	311,13 [Hz]
Mi	329,63 [Hz]
Fa	349,23 [Hz]
Fa#	369,99 [Hz]
Sol	392,00 [Hz]
Sol#	415,30 [Hz]
La	440,00 [Hz]
La#	466,16 [Hz]
Si	493,88 [Hz]

Tabla 6 – Frecuencias de las notas musicales en la octava principal.

Haciendo uso de la configuración “astable” que presenta el integrado, se elige concatenar resistencias para que se sumen al ir tocando los pulsadores y de esta manera genere las notas musicales.

$$f[\text{Hz}] = \frac{1}{T} \approx \frac{1,44}{(R_1 + 2 \times R_2) \times C} \quad [F.11]$$

Empleando la fórmula que se encuentra en la hoja de datos [F.11], para calcular la frecuencia, fijando previamente el capacitor C en $10[\mu\text{F}]$ y la resistencia R_1 en $10[\text{k}\Omega]$, se genera la tabla de Excel para determinar las resistencias necesarias para el circuito.

C [μF]	R_1 [$\text{k}\Omega$]	R_2 [Ω]	f [Hz]	Nota	f_{req} [Hz]	Error
10	10	9578	493,89	si	493,88	-0,01
10	10	10445	466,17	la#	466,16	-0,01
10	10	11363	440,02	la	440	-0,02
10	10	12336	415,32	sol#	415,3	-0,02
10	10	13366	392,03	sol	392	-0,03
10	10	14461	369,97	fa#	369,99	0,02
10	10	15616	349,24	Fa	349,23	-0,01
10	10	16841	329,66	mi	329,63	-0,03
10	10	18141	311,14	re#	311,13	-0,01
10	10	19521	293,63	re	293,66	0,03
10	10	20976	277,18	do#	277,18	0,00
10	10	22521	261,62	Do	261,63	0,01

Tabla 7 – Cálculo de resistencias concatenadas para generar las frecuencias.

Como nota adicional, se coloca una resistencia variable, de $10[\text{k}\Omega]$, en serie a la resistencia R_1 . De esta manera, es posible desplazarse entre las restantes octavas sin necesidad de implementarlas físicamente.

Una vez recreado el circuito, se procedió con el proceso de afinado del piano utilizando el osciloscopio para comprobar que las frecuencias de las notas sean las correctas.

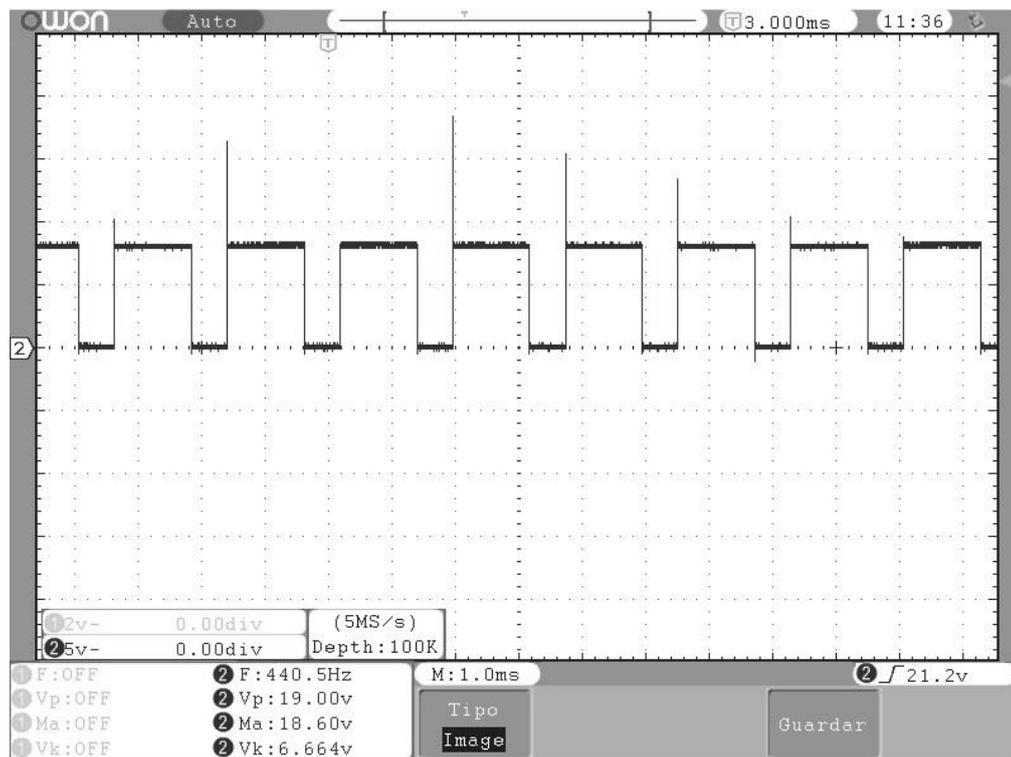


Figura 23 –Señal de audio en la salida del generador de mono-tonos en LA.

Finalmente, y con la ayuda de un diapason se procedió a corroborar el tono de la nota LA.

III. Inyección de audio

Es necesario partir de la premisa de que el audio de entrada puede provenir de un reproductor de MP3, una radio, un teléfono celular, etc. Como las salidas de estos dispositivos están pensadas para ser reproducidas por auriculares, por cuestiones de seguridad, la potencia de salida es relativamente pequeña. Es por este motivo que se requiere que la señal de audio pase por una etapa de amplificación para salvar las falencias de la fuente que proporciona el sonido.

Otra modificación necesaria es poner en tono a la señal de audio inyectada con el parlante de plasma. Esto se logra colocando un pequeño filtro sintonizador a la entrada.

Al inyectar la señal de audio al control de la TC se realiza una modulación en amplitud de la señal generada en el secundario. Esto significa que el sonido a reproducir se convertirá en el mensaje y la señal de secundario se comportará como portadora.

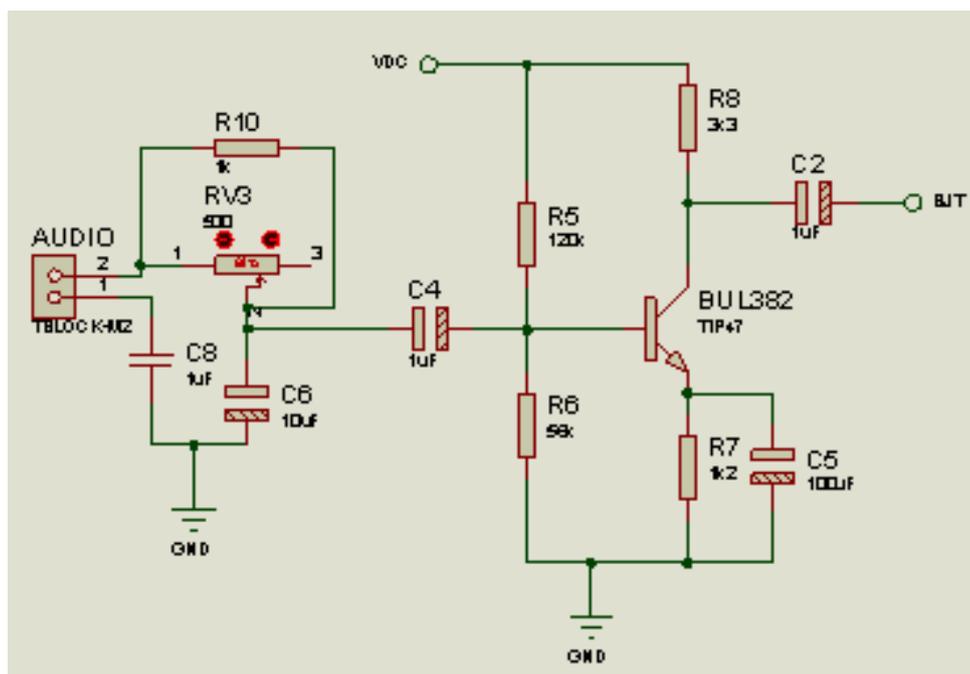


Figura 24 –Circuito de amplificación e inyección del audio.

2.2 Diseño Completo

I. Diseño final

Luego de realizar las pruebas pertinentes se decide fabricar el circuito de control de los elementos de potencia de manera aislada al de inyección del audio. De esta manera se evita la posibilidad de que los circuitos se afecten entre sí. Otro beneficio de la separación en forma física, es que permite alejar los focos generadores de puntos de calor, lo que disminuye la probabilidad transmisión indirecta del calor que ocasiona las fallas por exceso de temperatura.

Al circuito de inyección de audio se le agrega una nueva rectificación sobre la señal de continua. De esta manera, se pretende llegar a los elementos de control con la menor interferencia posible de las señales de alimentación.

Se coloca a modo de precaución, ante la posible invasión de los ruidos de línea que genera el parlante, diodos rápidos en directa hacia las entradas de los elementos de potencia. Esto evita que las posibles tensiones parasitas accedan al circuito, además protege contra posibles retornos causados por la inducción en los bobinados.

Como medida de seguridad, se coloca un LED de señal de encendido, con este indicador el usuario puede constatar cuando el elemento está funcionando. Es importante agregar un indicador debido a la posibilidad de que el parlante se puede encontrar activo, gracias a las características físicas del fenómeno que rige el parlante de plasma, pero puede no estar generando chispa hasta q se modifique alguno de los potenciómetros de control.

El usuario tiene a su alcance, tres perillas correspondientes a tres resistencias variables. Cada una de ellas modifica un aspecto del funcionamiento de la TC. Estos parámetros permiten poner en tono el parlante y modificar la intensidad de la chispa, dentro de un rango preestablecido para optimizar el funcionamiento. Se le permite modificar la corriente que circula por el circuito, de esta manera controlar la intensidad de la chispa y la dispersión de la misma. Además, la modulación que se hace sobre la descarga, de esta manera mejorar la calidad de audio a la salida. Y por último se puede modificar el tono de la señal de salida, esto permite aumentar o disminuir la señal de entrada, para permitir una variación entre los sonidos graves y agudos que se están ingresando al parlante.

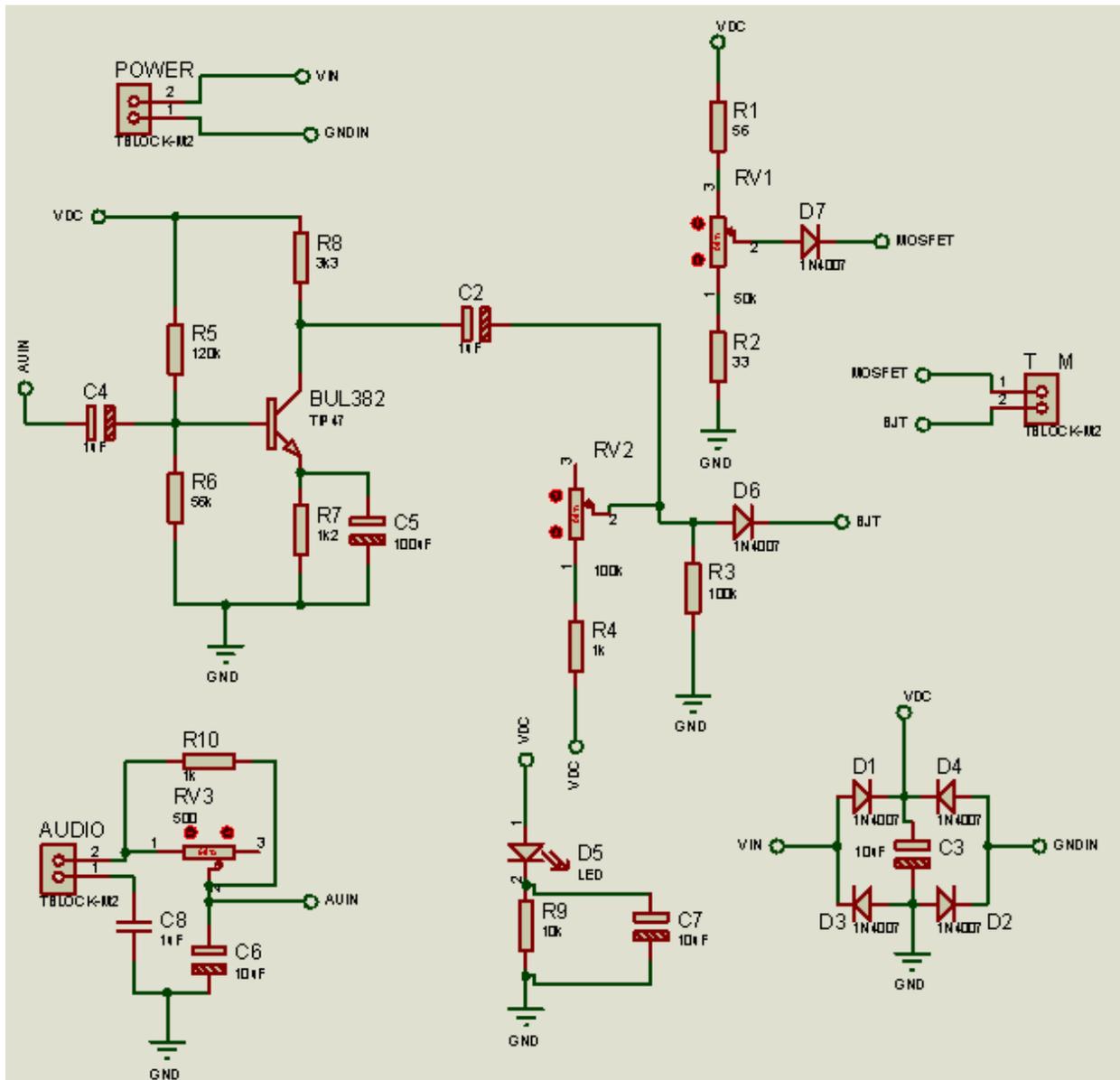


Figura 25 –Circuito de inyección de Audio fidedigno.

El circuito de control nace de separar los elementos de potencia, evitando así fugas indeseadas de señal a través de las masas que componen las partes del parlante. Se agrega, además, un capacitor de sintonización entre los terminales de alimentación de la placa.

Para disminuir la posibilidad de generación de puntos de calor y la transmisión de altas temperaturas entre los componentes de potencia, se colocan en extremos opuestos de la placa. Al mismo tiempo se realizan perforaciones para permitir el flujo de aire dentro de la carcasa detrás de cada uno de los disipadores de calor.

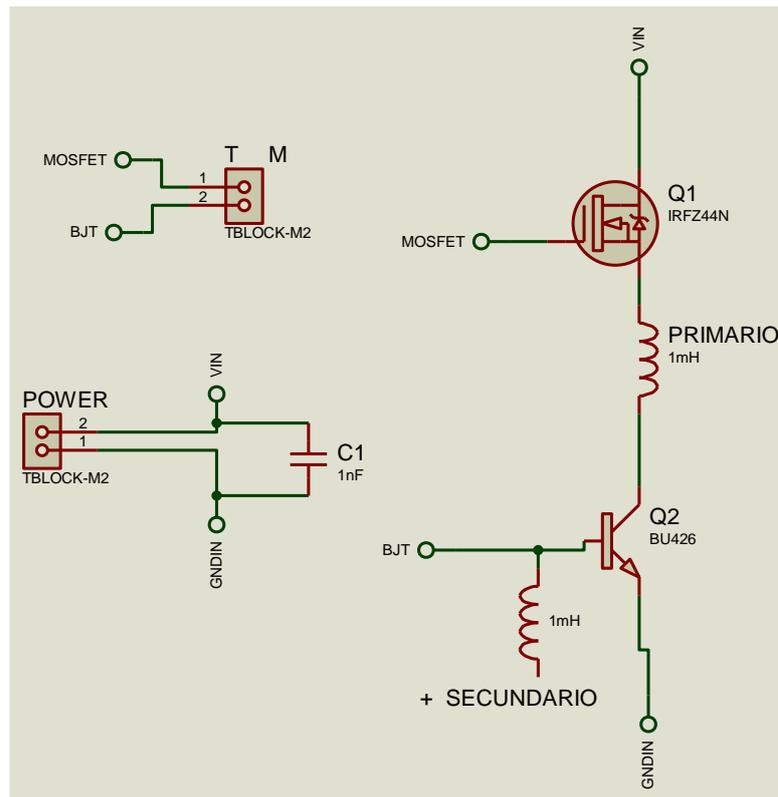


Figura 26 –Circuito de control Audio fidedigno.

La alimentación para el prototipo se realiza mediante el uso de un transformador reductor que convierte la señal de red, de 220 [Vac], a una señal de 64[V] de alterna. La señal de salida del transformador pasa por un rectificador de puente de diodos y se minimiza el ripple usando un capacitor entre el positivo y el negativo de la señal de continua de salida. El resultado a la salida es una señal de 48[Vdc].

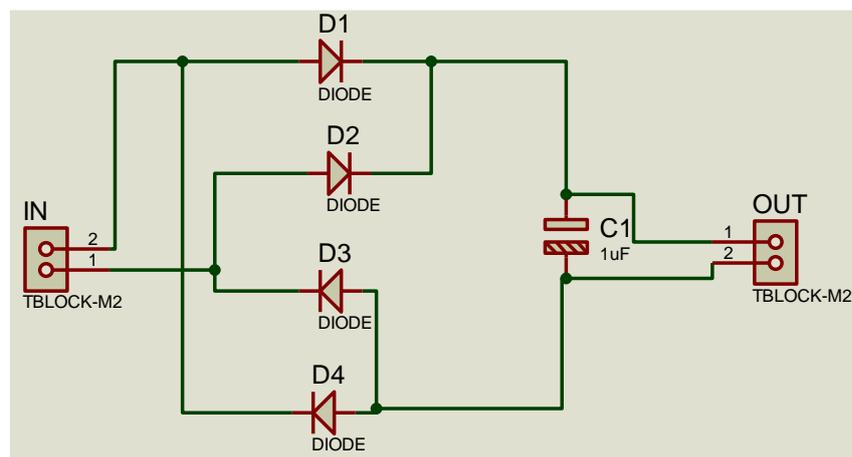


Figura 27 –Circuito de alimentación placa Audio Fidedigno.

El parlante de plasma no incluye como parte del diseño la fuente de alimentación, es por eso que se elige alimentarlo con un valor comercial. Se coloca en la carcasa del parlante un conector estándar de manera que el usuario pueda elegir la forma de alimentación que prefiera. Cabe destacar que el diseño permite utilizar fuentes de alimentación desde los 24 [Vdc] a los 50[Vdc], pero si se desea obtener una potencia de salida similar a un parlante convencional se recomienda usar una fuente de 48[Vdc].

El pequeño piano electrónico que se diseña, se alimenta con 9[Vdc], desde una batería alcalina o fuente de voltaje continuo del mismo valor. Consiste en la configuración de un integrado generador de impulsos de reloj, el NE555, en configuración “astable” con una concatenación de resistencias y pulsadores que permiten generar la octava principal.

La resistencia variable se coloca para permitir moverse entre las distintas octavas, ya que se implementó una sola de forma física.

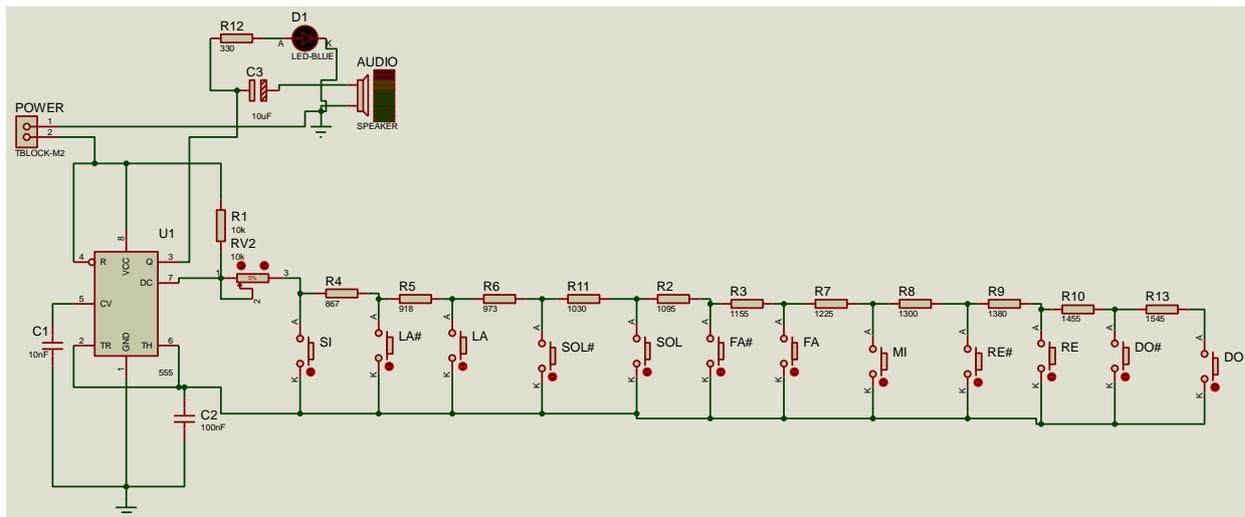


Figura 28 –Circuito Piano electrónico.

II. Prestaciones

La medición de los parámetros eléctricos de una TC es extremadamente complejo y costoso. Se necesitan elementos de precisión y un laboratorio de alta complejidad para realizar mediciones directas. Es por este motivo que se opta por utilizar métodos prácticos para obtener las características eléctricas del parlante de plasma. Estos métodos utilizan las propiedades de la descarga generada como parámetro de medición, por lo que es posible obtener el patrón de base acercando un escalímetro a la chispa de plasma.

La tensión y la potencia de salida de se calculan de forma empírica utilizando como parámetro de medición la longitud (L), en centímetros, de la máxima chispa generada, sin dispersión.

El valor de la tensión se extrapola del grafico a continuación, donde se experimentó con diferentes puntas para el secundario. La grafica específica, además, la precisión de las mediciones que se realizaron.

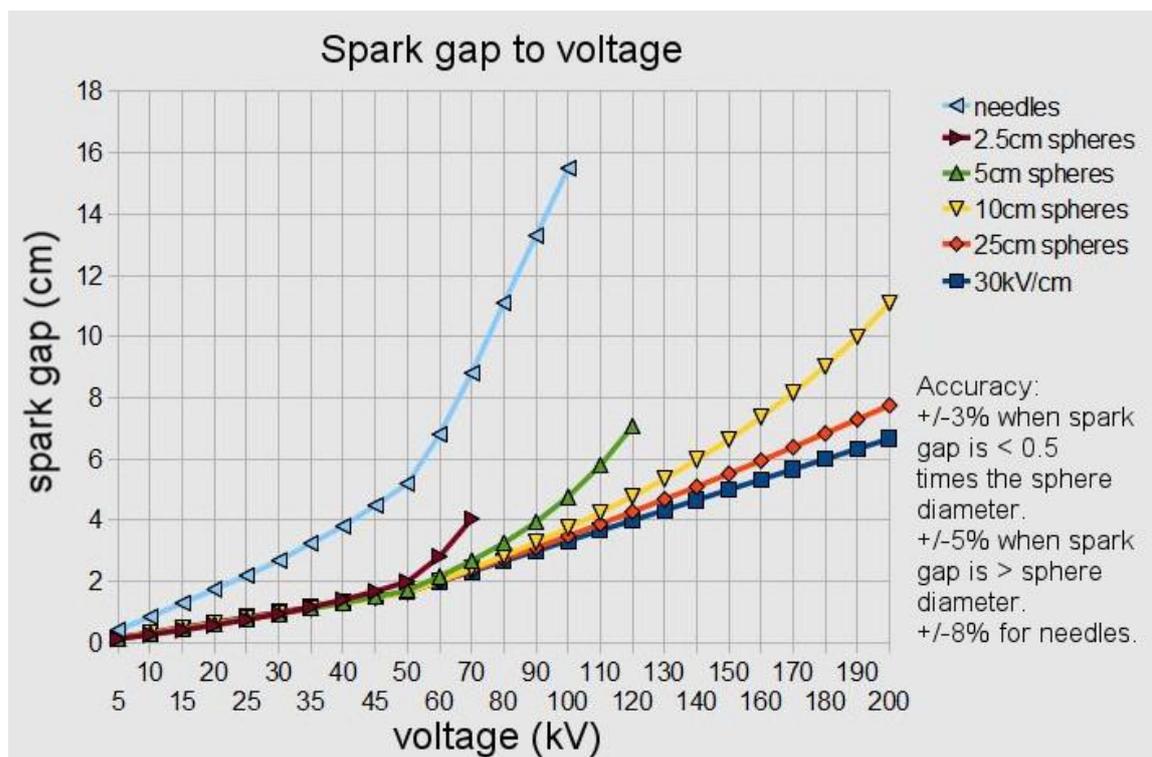


Figura 29 –Gráfica de Voltaje vs Longitud en distintos electrodos de TC. [7]

La potencia se calcula usando una relación experimental que ofrece Tesla luego de realizar sus ensayos, que ha sido ratificada en pruebas realizadas en laboratorios especializados por los aficionados de las TC.

$$P[W] = L[cm] \times \frac{750[W]}{2,54[cm]} \quad [F.12]$$

La corriente se obtiene de la despejando la fórmula básica de potencia utilizando la potencia y la tensión encontradas gracias a la descarga.

$$I[A] = \frac{P}{V} \quad [F.13]$$

Se realizan, además, mediciones en el laboratorio con un decibelímetro para obtener el valor de nivel sonoro que generan los parlantes.

Alimentación	48 [Vdc]
Tensión de salida de pico	10[kVac]
Corriente de Salida	29,5 [mA]
Tamaño de chispa	1 [cm]
Potencia	295[W]
Nivel de sonido	96[dB]
Calidad de sonido	Alta

Tabla 8 – Resumen de prestaciones de la SSTC para Audio Fidedigno.



Figura 30 –Comparativa de chispa con escalímetro.

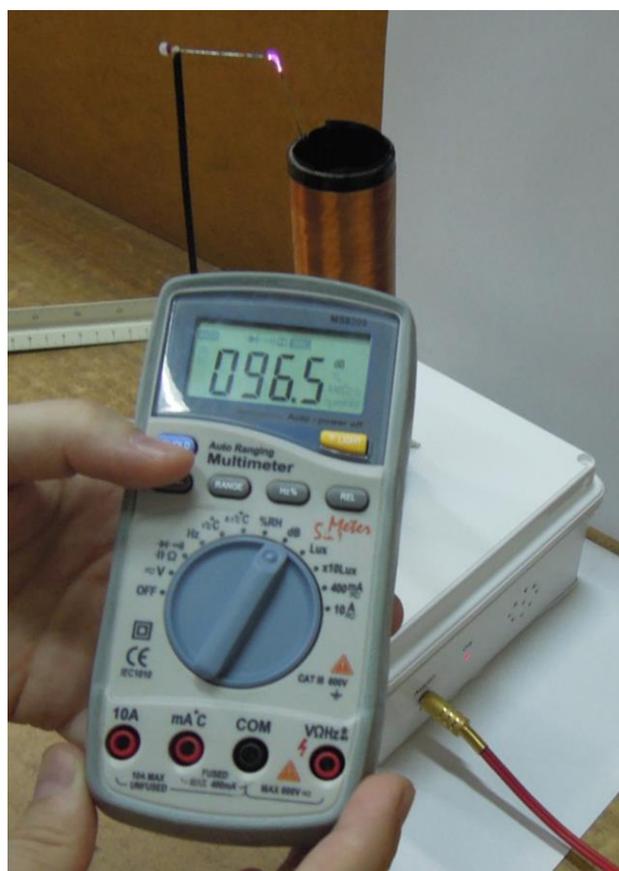


Figura 31 –Resultados de la medición con decibelímetro.

III. Fotos del hardware y capturas de pantalla de señales

Las imágenes a continuación relevan el trabajo de creación del parlante de plasma, comenzando con la construcción de los bobinados.



Figura 32 –Núcleos de las bobinas secundarias y primaria mayor.

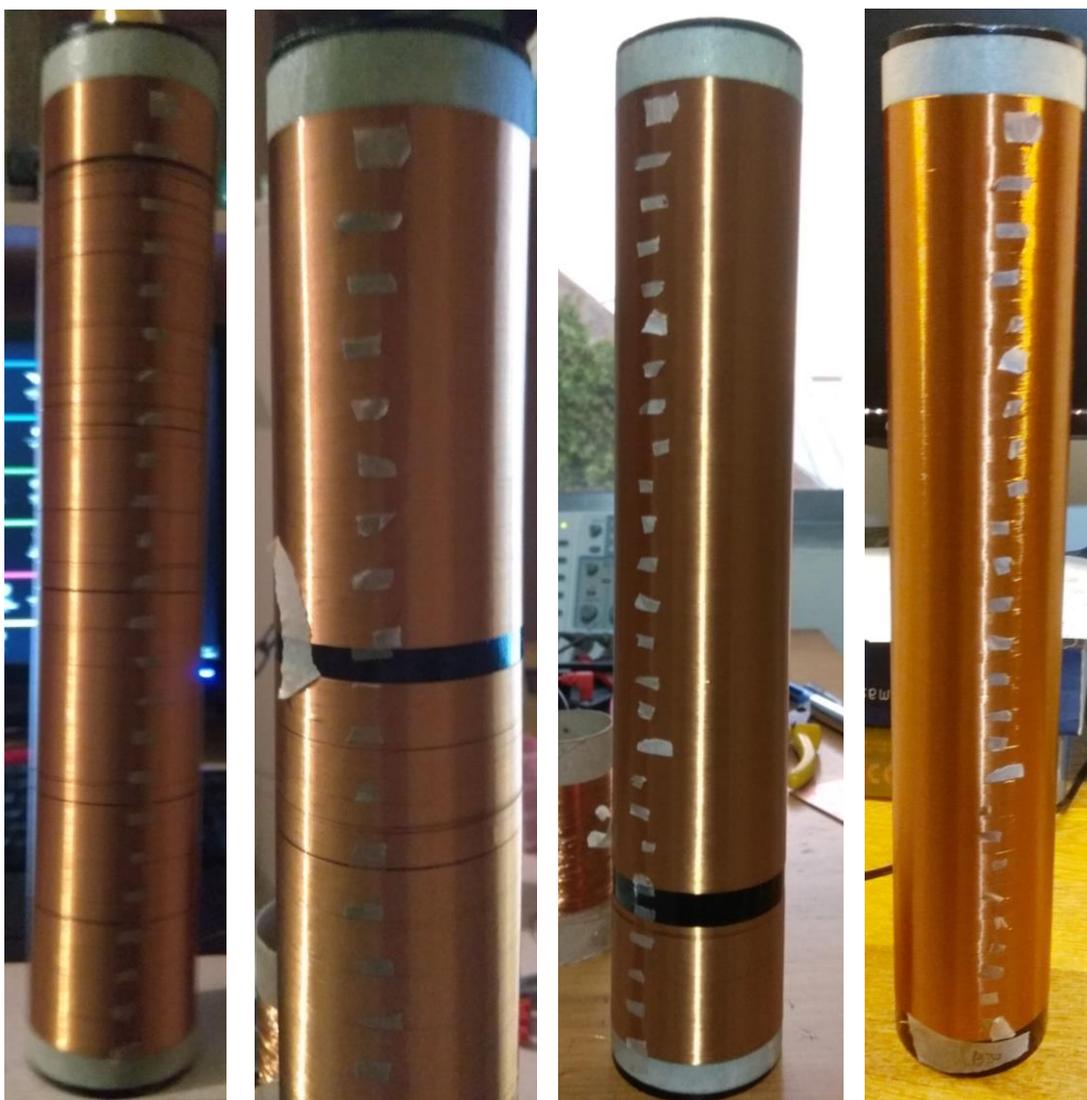


Figura 33 –Proceso de re-bobinado de bobina secundaria.

Seguidamente, se puede apreciar el parlante de plasma en su estado final y una vista de las placas que lo componen.

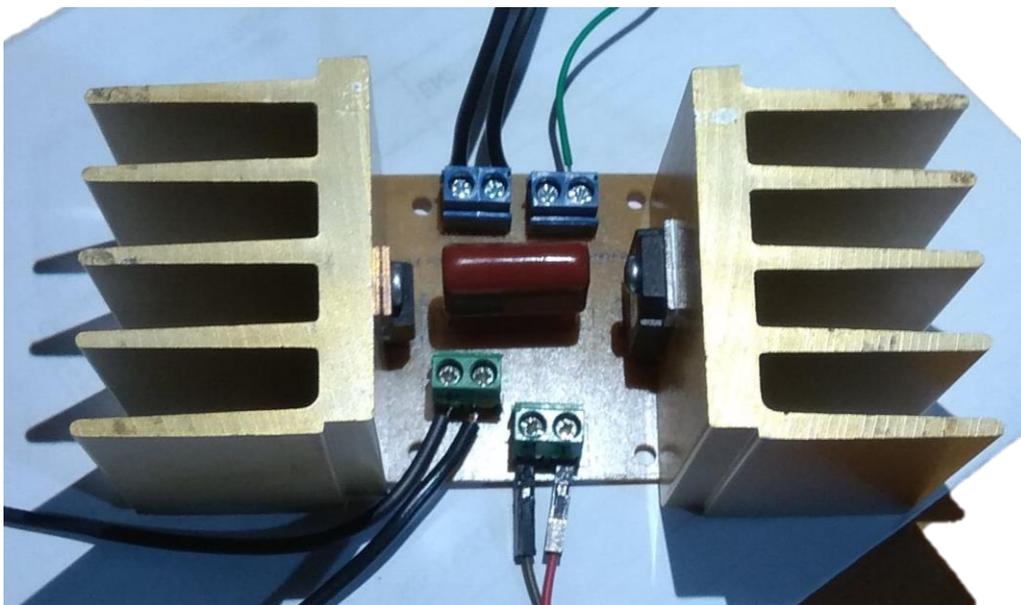


Figura 34 –Placa del circuito de control Audio fidedigno.

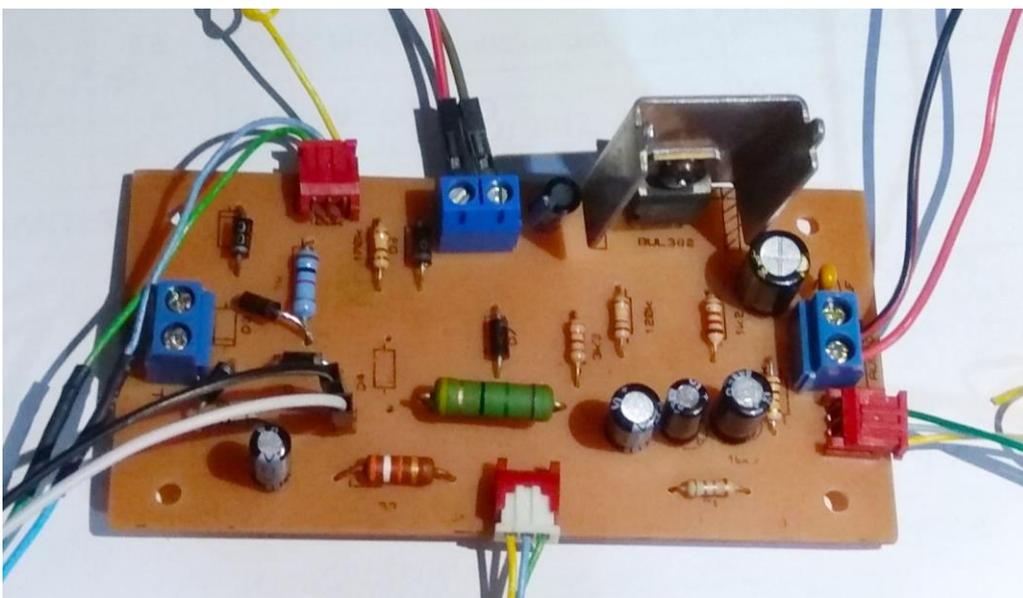


Figura 35 –Placa del inyección del Audio fidedigno.

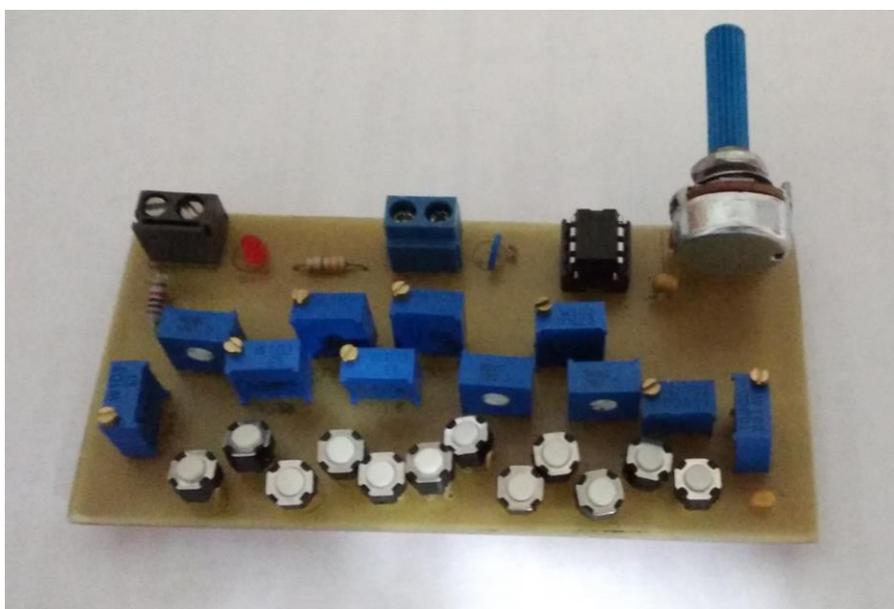


Figura 36 –Placa del circuito Piano electrónico.



Figura 37 –Parlante de Plasma.

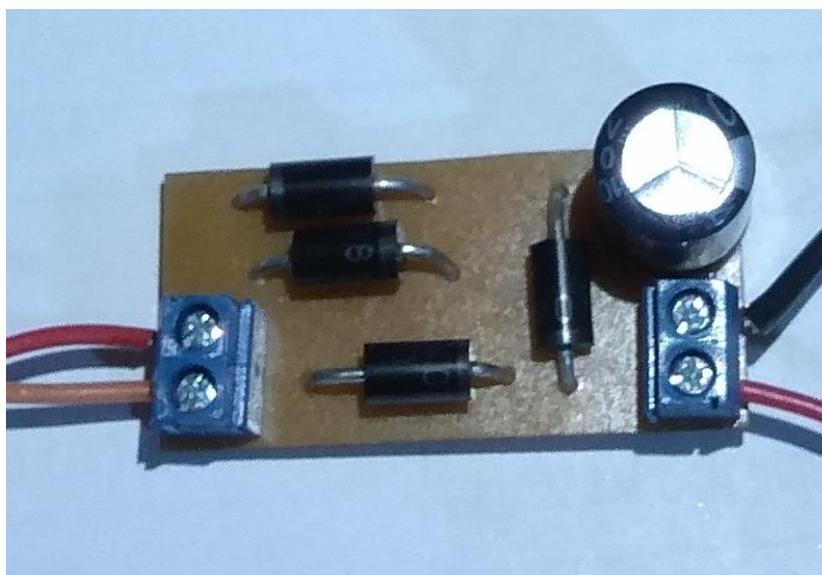


Figura 38 –Placa circuito de alimentación placa Audio Fidedigno.

Finalmente se agregan las gráficas obtenidas en el osciloscopio que permiten observar cómo se ven afectadas las señales de audio y la portadora al atravesar las distintas etapas del parlante de plasma.

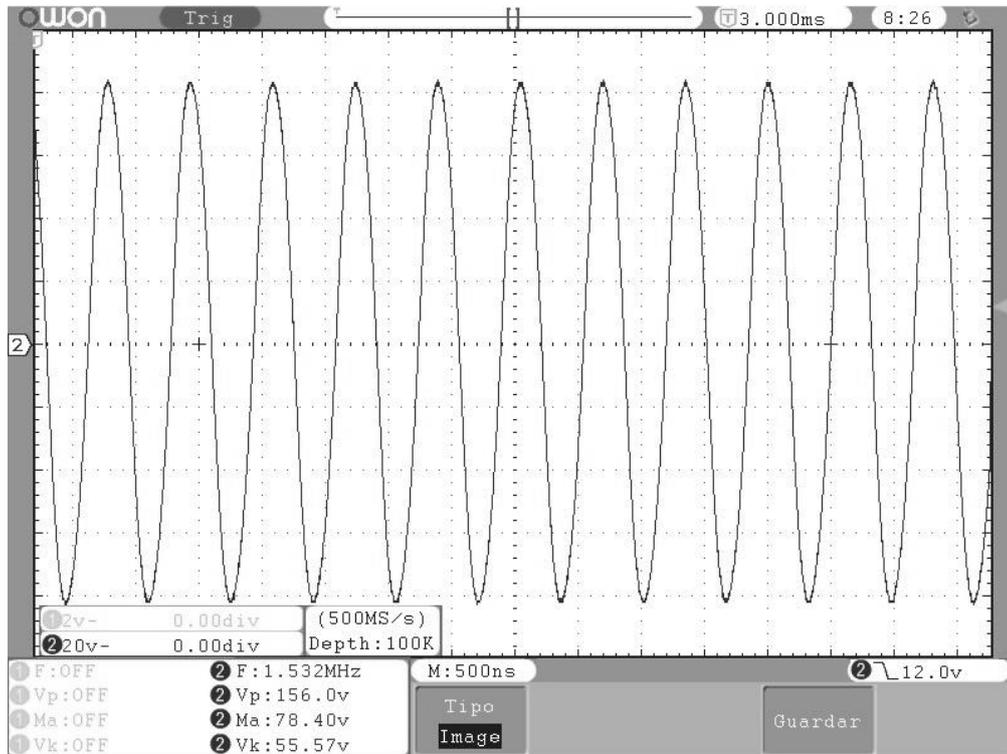


Figura 39 –Señal a la salida del secundario, sin audio a la entrada.

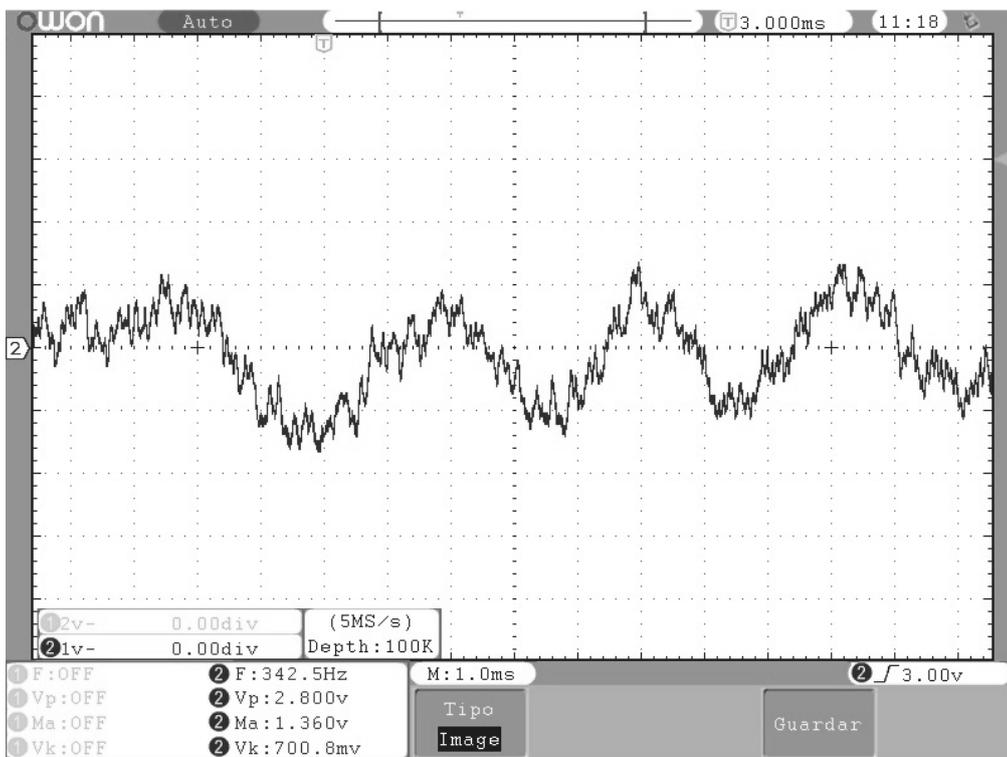


Figura 40 –Señal de audio en la entrada del circuito de inyección de audio.

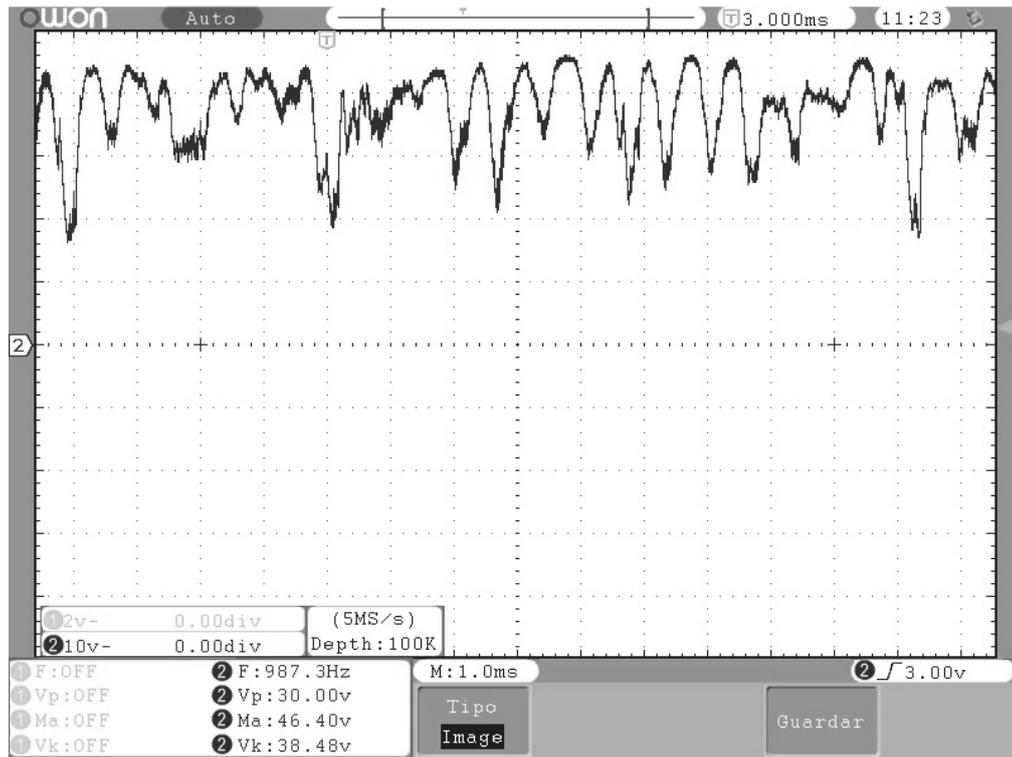


Figura 41 –Señal de audio a la entrada del circuito de control.

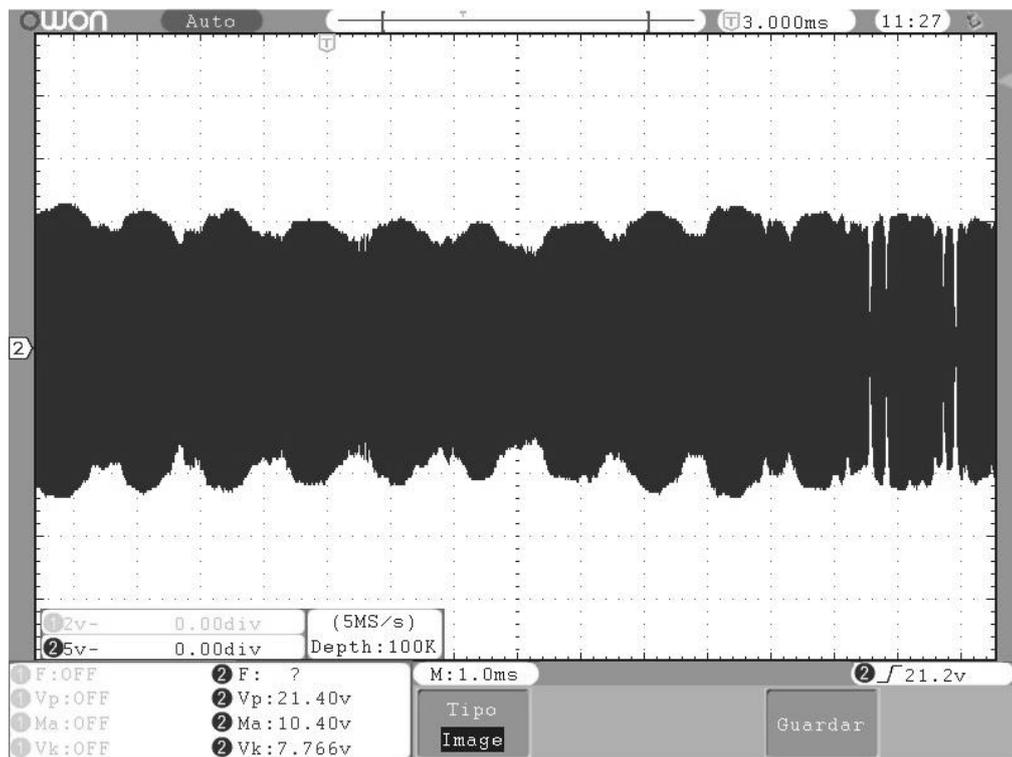


Figura 42 –Señal de audio en la bobina secundaria del parlante.

Capítulo 3: Resultados

Una vez concluido el dispositivo final, se realizaron las mediciones de prestaciones que se presentaron anteriormente, donde resaltan la potencia en vatios consumida: 295[W], así como los niveles de sonido que entrega a pleno funcionamiento: 96.5 [dB].

Estos tipos de medidas son los normalmente presentados por cualquier parlante o dispositivo que reproduzca sonido, encontrado en el mercado comercial. Esto nos da como comparativa que dichas prestaciones se asemejan muy bien a las de un parlante tradicional de entre 8 y 10 pulgadas de diámetro.

Cabe destacar que si bien estas medidas pueden ser similares, las formas de propagar el sonido no lo son. Para el caso de un parlante comercial, el desplazamiento del aire se produce de una forma mecánica a través de una membrana circular, lo cual beneficia la reproducción de sonidos de la gama media a baja, o graves. Sin embargo, para el caso del parlante de plasma, el sonido se produce cuando el dieléctrico del aire se rompe mediante la ionización del mismo a altas frecuencias. Esto, al contrario del parlante comercial, beneficia la propagación de sonidos medio-altos a altos, o agudos. Aun así, la calidad de audio emitido por el producto desarrollado es de alta calidad y nitidez.

También se procedió a medir la distancia del arco o chispa eléctrica producida por el dispositivo presentando, alcanzando 1[cm] de longitud, lo cual abarca lo esperado o pretendido al comienzo del proyecto.

Finalmente, y como se trató en puntos anteriores, el dispositivo presenta un atractivo visual indiscutible. Atrayendo la atención de cualquier persona a su alrededor, ya que presenta un fenómeno que pocas veces es vislumbrado, como lo es un arco eléctrico controlado, y a su vez este mismo puede emitir música o sonido. Todo esto despierta la curiosidad en el oyente, efecto por el cual se pretende como posible elemento didáctico e instructivo por instituciones educativas o museos, sin descartar la venta al público mediante las advertencias de seguridad y manipulación correspondientes.

Capítulo 4: Análisis de Costos

Se necesitaron 610 horas para la culminación de los prototipos y un total de \$3557. A continuación, se presentan dos tablas que disciernen los insumos necesarios para realizar el prototipo y el uso de las horas en las tareas necesarias para llegar al producto final.

Tarea	Horas utilizadas
Investigación y recopilación de información para la creación de una Bobina de Tesla	200
Creación y prueba de prototipos fallidos	100
Creación y construcción de prototipos finales	200
Afinado y puesta a punto de los circuitos	80
Diseño de carcasa y presentación final del prototipo	30

Tabla 9 – Distribución de las horas utilizadas.

Categoría	Elementos que lo componen	Precio
Bobina de Tesla	Tubo de cartón A.D.	\$30
	Alambre AGW31	\$25
	Cable multifilar 4[mm]	\$58
	Varios	\$65
Circuito de Control	Elementos de potencia	\$125
	Disipadores	\$600
	Varios	\$640
Circuito Inyección de Audio	Elementos Activos	\$67
	Elementos Pasivos	\$462
	Varios	\$1025
Carcasa	Caja	\$100
	Conectores	\$230
	Varios	\$130

Tabla 10 – Costos de Prototipos.

Tomando como parámetro del valor de la hora de investigación lo que ofrece la universidad a un alumno investigador se llega a concluir que el prototipo tiene un costo de \$34057. Donde \$30500 corresponden al tiempo invertido en el desarrollo del proyecto.

Finalmente, los próximos dispositivos no acarrearán el costo de desarrollo y se pretende venderlos por un valor aproximado de \$5000. Cabe destacar que la materia prima se cotiza en dólares y depende su valor de los impuestos que se le apliquen a la importación de los elementos electrónicos, por esta razón se ofrece un valor de venta aproximado a los costos comerciales a enero de 2019.

• *Posibles planes de venta y amortización de la inversión.*

El producto no presenta competidor en el mercado, ya que se trata de un dispositivo innovador. Por este motivo y como consecuencia, la demanda será insipiente al inicio de la comercialización. Es por eso que se introducirá al mercado mediante su previo uso en forma didáctica en ámbitos educativos. El dispositivo es de gran atractivo visual a la vez que, de interés funcional, puesto que reproduce audio de una manera no convencional a través de un fenómeno físico pocas veces utilizado por el ser humano, como lo es la chispa eléctrica.

Se comercializará en primera instancia, en el ámbito educacional con la intención de dar a conocer el producto de forma amigable y sencilla, mediante el agregado de kits didácticos que complementen el conocimiento y funcionalidad del mismo.

Primeramente, se expondrá el proyecto a las autoridades educativas pertinentes, con motivo de acercar la ciencia al alumno de forma atractiva y entretenida, usando como

fundamento la funcionalidad del producto. Se pretende distribuir un (1) producto completo (parlante de plasma y kits didácticos) por escuela técnica y universidad especializada. A su vez, se ofrecerá la posibilidad de un precio mayorista a instituciones que requieran más de un producto.

Posteriormente, una vez instaurado un conocimiento general del producto, se procederá a la comercialización en forma general del producto, pero esta vez en formato doméstico, acompañados de campañas de difusión pertinentes. Cabe destacar que los paquetes didácticos de la versión doméstica difieren de los de uso escolar.

En cuanto al mercado internacional, el proyecto cuenta con posibilidad de ser exportado del país ya que en este campo tiene poca o nula explotación. Cabe destacar que, en estos casos, el packaging o empaquetado deberá ser acondicionado para realizar traslados de distancia, puesto que se trata de un producto relativamente delicado.

Al igual que en el ámbito nacional o local, este producto puede ser insertado en el mercado internacional desde una perspectiva didáctica. Ya que el dispositivo no es de conocimiento general, debe darse a conocer de una manera amigable. Es por eso que el plan de mercado internacional será similar al implementado a nivel nacional con el agregado de lenguajes adicionales.

Capítulo 5: Discusión y Conclusión.

Como se presentó en incisos anteriores, el producto se trata de una innovación por lo cual su comparativa con artículos pre-existentes es imposible. Sin embargo, al compararlo con productos similares como son los parlantes de membrana tradicionales, se puede establecer que los resultados obtenidos con el producto finalizado, son más que alentadores y prometedores. Si bien se trata de un prototipo, las prestaciones conseguidas cumplen con lo pretendido al inicio del proyecto, emitiendo audio de calidad y brindando un espectáculo visual pocas veces visto.

Cabe recordar, que el presente trabajo se origina en la interacción entre la creación de un dispositivo innovador, que sea de atractivo para el público en general, que reúna varios conceptos aprendidos durante el transcurso de la carrera de grado, y por último que se anexe con nuestra pequeña admiración al llamado “Padre de la energía alterna”, Nikola Tesla. Por lo tanto, se pretendió utilizar algo previamente ideado por el ingeniero y reutilizarlo de manera tal que, al anexarle aspectos electrónicos, cumpla con lo previamente ideado.

Es de destacar que los costos y tiempos de investigación iniciales fueron grandes ya que, como se planteó anteriormente, no se cuenta con elementos previos de similar índole como para ser usados de base de investigación. Esto conllevó un extenso tiempo de análisis y estudio de materiales previos a utilizar, así como también las técnicas a implementar. También se debe mencionar las etapas de ensayos infructíferos, donde los problemas y desperfectos técnicos fueron de alta incidencia.

A pesar que un altavoz convencional de prestaciones similares a lo alcanzado con el presente parlante de plasma, se puede obtener en el mercado por un precio menor, se debe tener en cuenta que el mismo no solo se trata de un reproductor de sonido sino de un elemento didáctico, y de posible *Art Decó*. Se considera que el precio planteado de \$5000 o U\$D130 aproximadamente, es el apropiado considerando que está destinado a un mercado inicialmente educativo, con posibles salidas a personas inmiscuidas en la tecnología.

Si bien en un inicio se ideó realizar un segundo dispositivo, que sea de mayores prestaciones que el ya presentado aquí, los altos niveles de tensión y corriente, sumados a la difícil adquisición de componentes electrónicos que cumplan con los requisitos circuitales sometidos y los elevados costos monetarios de los mismos, sin mencionar el incremento de posibles accidentes eléctricos por personal no instruido, hicieron que la creación de este segundo dispositivo sea inviable.

Por otro lado, una problemática recurrente encontrada durante la realización y puesta a punto del dispositivo, fue la capacidad de disipación de temperatura de los elementos de potencia, debiendo estimar y realizar varias pruebas de desempeño con diferentes elementos disipativos y métodos constructivos para obtener el estado actual, donde se colocaron grandes disipadores de temperatura sujetos a los elementos de potencia.

Además, se añade orificios de ventilación en la estructura en la que se presenta el parlante.

Otro inconveniente que se debió sortear fue el de equilibrar los niveles de señal de audio de entrada, ya que no todos los dispositivos que traducen audio poseen buenos niveles en su salida, ya que estos están destinados a ser reproducidos por parlantes intrauriculares y estos deben ser normalizados para no dañar el oído. Para esto se diseña una etapa amplificadora con el propósito de elevar el nivel de sonido ingresante al sistema.

Como posibles mejoras se deja abierta la capacidad de implementar diferentes formas de realizar la etapa preamplificadora de entrada, de manera de poder abarcar un amplio espectro de dispositivos de entrada. A su vez, anexar una etapa de adaptación de impedancia en conjunto con lo antes mencionado. Otra mejora factible es el agregado de elementos de ventilación forzada dentro del receptáculo de los circuitos, de forma de prevenir posibles puntos de calor. Por último, se plantea la posibilidad de utilizar algún elemento de desacople eléctrico entre el dispositivo de entrada y el parlante de plasma, como puede ser un transformador de audio de relación 1:1.

Finalmente, si se desea utilizar este proyecto como base para futuras investigaciones, se propone ampliar las dimensiones tanto físicas como eléctricas del parlante, poniendo especial atención en los elementos de potencia y disipación de calor. Esto permitirá obtener una chispa o descarga eléctrica de mayor tamaño, aumentando el atractivo visual, a costo de menor calidad de audio, así como también aumentar el riesgo eléctrico para las personas que lo manipulen, u objetos que se encuentren dentro del radio de descarga.

Capítulo 6: Literatura Citada.

Teniendo en cuenta que la literatura sobre el tema es escasa, la mayoría de los sitios citados son recopilaciones de páginas de publicaciones para aficionados y de notas de revistas científicas que analizan los efectos que producen las Bobinas de Tesla.

6.1 Referencias

[1] <http://www.tkostocks.com/tko/wp-content/uploads/2014/10/tesla-wireless-electricity-demo-image-300x336.png>

[2] https://www.precisionplus.com/eMedia/Hosted/Aug11_Tech_Article_SpanishEU.pdf

[3] Lindsey R. Bornhoeft, Aida C. Castillo and others (Publication Date (Web): April 13, 2016). *Teslaphoresis of Carbon Nanotubes*, obtenido de ACS Publications: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsnano.6b02313>

[4] <http://teslapress.com/catTC.jpg>

[5] *Energía y Computación*, Volumen X, Nº 2- Segundo Semestre de 2001. Edición Nº18

[6] CN Magnet Wire. NO.2015, 2th Business Center, Gaojiao Park, Chashan, Ou Hai District, Wen Zhou, Chinas - <https://www.cnmagnetwire.com/>

[7] Steven Dufresne Publication Date (Web): December 8, 2016). *Measuring High Voltage in Millimeters (and Other HV Probe Tricks)*: <https://hackaday.com/2016/12/08/measuring-high-voltage-in-millimeters-and-other-hv-probe-tricks/>

Otros:

- <http://www.teslasociety.>
- <http://www.richieburnett.co.uk/tesla.shtml>