Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Eléctrica | Facultad de Ingeniería

2019

Análisis experimental de los parámetros que afectan la transmisión de energía eléctrica empleando una bobina de Tesla

Diego Fernando Gallo Ascencio
Universidad de La Salle, Bogotá

Rafael Julián Corredor Salinas
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Gallo Ascencio, D. F., & Corredor Salinas, R. J. (2019). Análisis experimental de los parámetros que afectan la transmisión de energía eléctrica empleando una bobina de Tesla. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/274

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EMPLEANDO UNA BOBINA DE TESLA.

DIEGO FERNANDO GALLO ASCENCIO
RAFAEL JULIAN CORREDOR SALINAS

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
2019

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS QUE AFECTAN LA TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EMPLEANDO UNA BOBINA DE TESLA.

DIEGO FERNANDO GALLO ASCENCIO
RAFAEL JULIAN CORREDOR SALINAS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingenieros Electricistas.

Director:
HUGO FERNANDO VELASCO PEÑA

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
2019

Nota de aceptación.

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del Director del Proyecto

_____

Firma del Jurado

_____

Firma del Jurado

Bogotá D.C. octubre de 2019.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- Dios por permitirnos estudiar y culminar satisfactoriamente nuestros estudios en ingeniería eléctrica.
- La Universidad de La Salle por brindarnos las instalaciones para realizar este trabajo de grado durante este proceso de formación como Ingenieros Electricistas.
- Al ingeniero Geovanny Marulanda por brindarnos su apoyo en el comienzo del presente proyecto.
- Al Ingeniero Hugo Fernando Velasco Peña por su colaboración, dedicación y guía como director durante el desarrollo de este proyecto.

Doy gracias a Dios y a mi familia, especialmente a mí hermana por su constante apoyo en cada decisión que he tomado; gracias a la vida porque cada día es una oportunidad más de superarme; gracias a mis padres por permitirme cumplir este logro motivándome constantemente para obtener el título de ingeniero electricista.

Diego Fernando Gallo Ascencio

A Dios y mi familia por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mi meta de obtener el título de ingeniero electricista.

Rafael Julián Corredor Salinas

RESUMEN

Asumiendo el hecho de que hoy en día la energía eléctrica es ampliamente asequible, surge la dependencia al utilizar el cableado, siendo el medio que permite transmitir la energía para alimentar los dispositivos eléctricos, esto se podría considerar como un limitante económico para la comunidad en general. Partiendo de antecedentes de investigación, se evidencia que alrededor del mundo se ha logrado transmitir energía inalámbrica de forma segura, a través del aire como medio para alimentar una carga eléctrica y eliminando la necesidad del cableado. Sin embargo, no se encuentra suficiente documentación donde evalúen los factores constructivos que puedan ayudar a mejorar la eficiencia de la potencia transmitida a una carga. Pensando en el crecimiento del uso de nuevas tecnologías de transmisión eléctrica de forma inalámbrica, se hace necesaria la implementación de nuevos estudios que determinen las afectaciones a la eficiencia, debido a diferentes factores constructivos.

El presente proyecto busca evaluar la eficiencia al alimentar una carga resistiva empleando una bobina de Tesla, estableciendo relaciones de la tensión inducida por parte de la bobina transmisora con respecto a las bobinas receptoras en función de la distancia. Dentro de los estudios se desarrolla una revisión de antecedentes para determinar factores importantes de la distancia entre bobinas, numero de espiras en cada prototipo y diámetro de formaleta en la bobina. Luego se construyen tres prototipos de la bobina de Tesla, variando el número de espiras y formaleta con diámetros diferentes, para alimentar una carga resistiva en función de la distancia, con el fin de establecer la relación que hay entré las variables físicas y la potencia transmitida. Finalmente se realiza un análisis estadístico, para determinar variación de potencia eléctrica transmitida de acuerdo al modelo constructivo.

La realización del proyecto permite afianzar los conocimientos de estudio, respecto al entendimiento del electromagnetismo y poner en contexto a la sociedad de la Universidad de la Salle sobre las nuevas alternativas de transmisión de energía eléctrica, e influenciar a nuevos avances de investigación sobre el tema que constituye el presente proyecto.

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN VII

Lista de figuras X

Lista de tablas XI

Lista de símbolos y abreviaturas 12

INTRODUCCIÓN 13

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 14
1.1. CAMPO MAGNÉTICO 14
1.2. CAMPO ELÉCTRICO 14
1.3. TEORÍA DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS 14
1.4. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS 14
1.5. LEYES ELECTROMAGNETICAS 15
1.5.1. LEY DE FARADAY 15
1.5.2. LEY DE LENZ 16
1.5.3. LEY DE GAUSS 16
1.6. EFECTO SKIN EN CONDUCTORES 17
1.7. INDUCTANCIA MUTUA 18
1.8. CIRCUITO SLAYER 18
1.9. INDUCTANCIA 19
1.10. CONCEPTOS DEL CIRCUITO ELECTRICO 21

2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO 22
2.1. BOBINA PRIMARIA 23
2.2. BOBINA SECUNDARIA 24
2.2.1. RESTRICCIONES TECNICAS DE LA BOBINA SECUNDARIA 25
2.3. CAPACITANCIA PARASITA 25
2.4. TOROIDE 26
2.5. FRECUENCIA DE RESONANCIA 28
2.6. FUENTE DE ALIMENTACIÓN 29
2.7. ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROTOTIPO 30
2.8. CONEXIÓN ENTRE BOBINA TRANSMISORA Y BOBINAS RECEPTORAS 31

3. PROCESO DE PRUEBAS 32
3.1. PRUEBAS DE VALOR DE INDUCTANCIA Y RESISTENCIA DE BOBINAS SECUNDARIAS 32
3.2. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO AUTOINDUCCIÓN BOBINA SECUNDARIA 33
3.3. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON BOBINAS RECEPTORAS. 34

4. ANÁLISIS DE DATOS 35
4.1. ANÁLISIS DE DATOS EMPLEANDO EL TEST DE SCHEFFÉ 39
4.1.1. ANÁLISIS DE EFICIENCIA 39
4.1.2. ANÁLISIS DE ILUMINANCIA 41

4.1.3. ANÁLISIS DE LA POTENCIA DE SALIDA EN LA CARGA 41
4.1.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA EN LA CARGA 41
4.2. COMPARACIÓN DE MEDIDAS RESALTANDO EL VALOR MÁXIMO Y MÍNIMO ... 42
4.3. ANALISIS FACTORIAL UNIVARIADO 44
4.3.1. COMPORTAMIENTO DE LA ONDA EN LA CARGA 47
4.3.2. GRAFICAS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA 48

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 52
5.1. CONCLUSIONES 52
5.2. RECOMENDACIONES 53
5.3. TRABAJOS FUTUROS 53

6. BIBLIOGRAFÍA 54

7. ANEXOS 56

Lista de figuras

Figura 1-1. Forma de onda electromagnética. 15
Figura 1-2. Campo eléctrico de una esfera conductora. 17
Figura 1-3. Efecto skin en un conductor eléctrico. 17
Figura 1-4. Inductancia mutua de dos devanados, variando el devanado primario. 18
Figura 1-5. Circuito SLAYER. 18
Figura 2-1. Construcción de la bobina de Tesla. 23
Figura 2-2. Bobinas variando sus formas geométricas. 25
Figura 2-3. Fotografía del tamaño de las esferas utilizadas en el proyecto. 27
Figura 2-4. Fuente de alimentación variable DC 30
Figura 2-5. Circuito electrónico del prototipo. 30
Figura 2-6. Instantes de tiempo circuito electrónico. 31
Figura 2-7. Campo eléctrico oscilante. 32
Figura 3-1. Prueba de funcionamiento bobina de Tesla. 34
Figura 3-2. Bobinas receptoras a la misma distancia de la transmisora 34
Figura 4-1. Carga a alimentar y forma de realizar la medición con el luxómetro. 36
Figura 4-2. Caracterización de la carga empleando el Banco Lorenzo. 37
Figura 4-3. Curva de caracterización de la carga obtenida con las medidas en el Banco Lorenzo 38
Figura 4-4. Grafica de la Iluminancia en sus tres mejores configuraciones. 49
Figura 4-5. Grafica de la Eficiencia en sus 3 mejores configuraciones. 50
Figura 4-6. Grafica de la Potencia de salida en sus tres mejores configuraciones. 51

Lista de tablas

Tabla 2-1. Valores calculados para la bobina secundaria variado su geometría empleando la ecuación Wheeler (1.4). 24
Tabla 2-2. Valores calculados de la capacitancia parasita en la bobina secundaria variado su geometría. 26
Tabla 2-3. Valores calculados de capacitancia de las esferas utilizadas en el proyecto. ... 27
Tabla 2-4. Valores calculados de la frecuencia de resonancia..... 28
Tabla 3-1. Toma de datos con instrumento de medición Fluke 6303A LCR Meter. 33
Tabla 3-2. Configuraciones realizadas respecto a sus variables geométricas. 35
Tabla 4-1. Ecuación polinómica de grado 6 empleada para determinar la potencia de salida en la bobina de Tesla..... 39
Tabla 4-2. Tabla de subconjuntos homogéneos de la eficiencia empleando el test de Scheffe. 40
Tabla 4-3. Tabla de comparación de medidas teniendo como referencia el tamaño de esferas. 42
Tabla 4-4. Tabla de comparación de medidas teniendo como referencia el número de vueltas en bobinas. 43
Tabla 4-5. Tabla de comparación de medidas teniendo como referencia el diámetro de formaletas. 44
Tabla 4-6. Tabla de análisis factorial inicial. 45
Tabla 4-7. Tabla de análisis factorial. 46
Tabla 4-8. Tabla de comparativa de imágenes capturadas por el osciloscopio 48

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Amperio, intensidad de corriente	A	C/S
C	Capacitancia	F	Q/V
cm	Centímetros	cm	
cm^2	Centímetros cuadrados, área	cm^2	
L	Inductancia, henrio	H	
Hz	Frecuencia eléctrica, repeticiones	Hz	n/T
in	Pulgadas, longitud	in	
m	Metro, longitud	m	
mm	Milímetros, longitud	mm	
R	Resistencia	Ω	V/A
V	Voltio, potencial eléctrico	V	J/C
W	Vatio, potencia eléctrica	W	
π	constante pi	π	
ε_0	Permitividad del vacío	F/m	
B	Campo magnético	T	
f	Frecuencia	Hz	1/T

Convenciones	Término
Hz	Hercio
kHz	kilohercio
MHz	megahercio
l	Longitud de la sección transversal
μ	Permeabilidad magnética
∅	Flujo magnético
f_f	Frecuencia final
K	Coeficiente acoplamiento
λ	Longitud de onda

Abreviaturas

Abreviatura	Término
RMS	Valor medio cuadrático
FEM	Fuerza electromotriz
CEM	Campos electromagnéticos
RF	Radio frecuencias
ELF	Frecuencias extremadamente bajas
AWG	American wire guage

INTRODUCCIÓN

La transmisión de energía eléctrica a través de ondas de radio electromagnéticas, fue un problema que se planteó Tesla (1856-1943) a principio del siglo pasado, intentando solucionarlo, construyendo la Torre Wardenclyffe (sistema de distribución de electricidad a largas distancias) infortunadamente sin éxito. Este tipo de tecnología se ve limitada por su eficiencia en términos de potencia transmitida y potencia recibida especialmente, por la distancia que existe entre el transmisor y el receptor respectivamente. Debido a esto la generación de energía eléctrica a lo largo de los años, se ha estructurado en un sistema rígido en lo que concierne a la transmisión y distribución de energía. Por lo tanto, en los últimos años las líneas de investigación se han enfocado en diseñar un sistema de transferencia de energía inalámbrica eficiente, especialmente para dispositivos eléctricos de poca potencia eléctrica, que no afecten la integridad del ser humano al exponerse a emisiones electromagnéticas.

Este trabajo muestra el proceso de construcción y pruebas de funcionamiento de la bobina de Tesla en función de sus variables geométricas, como lo es el número de espiras, diámetro de las bobinas, diámetro de la esfera y la distancia entre las bobinas emisora respecto a la receptora. Por lo cual, el propósito es evaluar la eficiencia en términos de potencia de salida y potencia de entrada, al alimentar una carga resistiva.

En los dos primeros capítulos se muestra la fundamentación teórica básica para el funcionamiento de la bobina de Tesla, al igual que el proceso constructivo de la bobina, especificando los componentes del mismo y sus variables geométricas. Luego, el tercer capítulo, presenta el proceso de pruebas de funcionamiento, ubicación y adecuación del lugar donde se toman los datos correspondientes para tener una mayor fiabilidad de los mismos, en los dos últimos capítulos se presentan los datos y análisis de mediciones obtenidas en la carga resistiva alimentada por la bobina de Tesla. Por último, se presenta conclusiones y recomendaciones del proyecto para futuras investigaciones.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este capítulo reúne los conceptos teóricos básicos de electromagnetismo que intervienen en el comportamiento del funcionamiento de la bobina de Tesla, la construcción de un circuito oscilador y además principios básicos es el entendimiento de la interacción de los campos electromagnéticos.

1.1. CAMPO MAGNÉTICO

Toda carga eléctrica crea un campo eléctrico y al variar también es rodeada por un campo magnético. El campo magnético se simboliza por (B) que es un punto en el espacio en función de la fuerza magnética donde se ejerce sobre una partícula (Serway y Kirkpatrick, 1988).

1.2. CAMPO ELÉCTRICO

El campo eléctrico se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga, la dirección del campo se toma como la dirección de la fuerza que ejercería sobre una carga positiva de prueba. El campo eléctrico está dirigido radialmente hacia fuera de una carga positiva y radialmente hacia el interior de una carga puntual negativa (Serway y Kirkpatrick, 1988).

1.3. TEORÍA DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

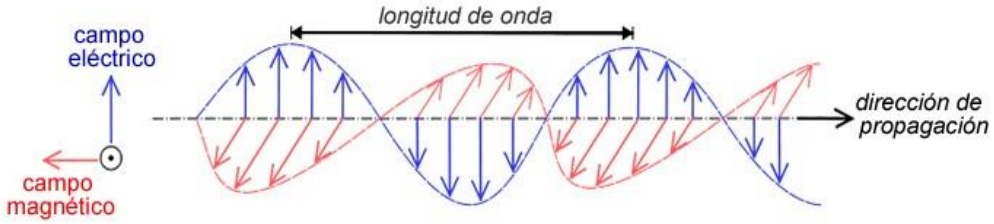
El entendimiento de los campos electromagnéticos (CEM) es de gran importancia y son una combinación invisible de campos de fuerza eléctrica y magnéticas, se pueden generar por fenómenos naturales, pero también por actividades humanas principalmente por el uso de la electricidad, la mayoría de los campos electromagnéticos generados por el hombre cambian de sentido con el tiempo dependiendo de su frecuencia, que va desde radiofrecuencias (RF), hasta frecuencias extremadamente bajas (ELF). Los campos magnéticos de radiofrecuencia (RF) se utilizan a menudo en las comunicaciones como lo son teléfonos móviles, teléfonos inalámbricos, también se utilizan en escáneres médicos, las radiofrecuencias van desde los 100 kHz a los 300 GHz.

1.4. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Son ondas de fuerzas eléctricas y magnéticas, las características de dicha onda son: la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f), donde la frecuencia se define como el número de cambios completos por cada segundo que se produce en el campo eléctrico o magnético en un punto dado, y se expresa en hertzios (Hz), la longitud de onda es la distancia entre dos máximos o dos mínimos consecutivos de la onda y es inversamente proporcional a la frecuencia. Las ondas electromagnéticas que viajan en el vacío, la velocidad es constante,

cuando las ondas electromagnéticas encuentran un objeto, una parte de esa energía es absorbida y las proporciones de energía transmitida, absorbida o reflejada por el objeto dependen de las propiedades eléctricas y forma del objeto. Se puede observar en la Figura 1-1, la forma de onda electromagnética.

Figura 1-1. Forma de onda electromagnética.



Fuente: *Radiansa consulting campos electromagnéticos*.

1.5. LEYES ELECTROMAGNETICAS

1.5.1. LEY DE FARADAY

La magnitud de la FEM inducida en un circuito es igual a la razón de cambio de flujo magnético a través del circuito, (espira de alambre encerrada, que se mueve dentro de un campo magnético). Este fenómeno se presenta en la bobina de Tesla y se presenta un cambio brusco de tensión (Hayt and Buck 2006).

La ley de Faraday establece que:

- Si el flujo ($\emptyset$) (flujo magnético la unidad de medida es Webber (Wb) que vincula un lazo o vuelta varía como una función de tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.
- El valor del voltaje inducido es proporcional a la velocidad del cambio de flujo ($\emptyset$).
- Si el flujo ($\emptyset$) varia dentro de una bobina de N vueltas, el voltaje inducido está dado por la ecuación (1.1)

$$\boldsymbol{E}_i = N\frac{\Delta\emptyset}{\Delta t} \quad (1.1)$$

donde:

E_i= voltaje inducido (V)

N = número de vueltas de la bobina

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

Δt = intervalo de tiempo durante el cual cambia el flujo ($\emptyset$)

1.5.2. LEY DE LENZ

La ley de Lenz es fundamental en los campos electromagnéticos relaciona cambios producidos en el campo eléctrico por un conductor con la propiedad de variar el flujo magnético, y afirma que la fuerza electromotriz inducida se opone siempre a la causa que lo origina (FEM). Esta ley se llama así en honor del físico germano-báltico Heinrich Lenz, quien la formuló en el año 1834. En un contexto más general que el usado por Lenz, se conoce que dicha ley es una consecuencia más del principio de conservación de la energía aplicado a la energía del campo electromagnético.

1.5.3. LEY DE GAUSS

Es la ley de Gauss establece la no existencia de monopolos magnéticos, estableciendo que las líneas de campo son cerradas, es decir, no tienen ni principio ni fin, la ley de Gauss parte de que la fuerza electrostática que existe entre cargas exhibe un comportamiento cuadrático inverso. El campo eléctrico de una esfera conductora con carga Q se puede obtener mediante la ley de Gauss si considera como una superficie gaussiana de forma esférica de $r > R$ **y** el flujo eléctrico será exactamente el campo eléctrico multiplicado por el área de la superficie esférica como se observa en la ecuación (1.2). Además en la Figura 1-2 se ilustra el campo eléctrico de una esfera conductora.

$$\boldsymbol{E}_e = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \quad (1.2)$$

donde:

E_e = campo eléctrico. [V]

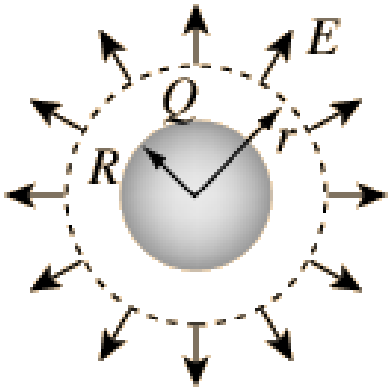
Q = Carga eléctrica. [C]

r = Distancia desde el centro de la esfera hasta donde se desea calcular el campo eléctrico. [mm]

ε_0 = Permitividad del vacío. [F/m]

Π = Constante pi.

Figura 1-2. Campo eléctrico de una esfera conductora.

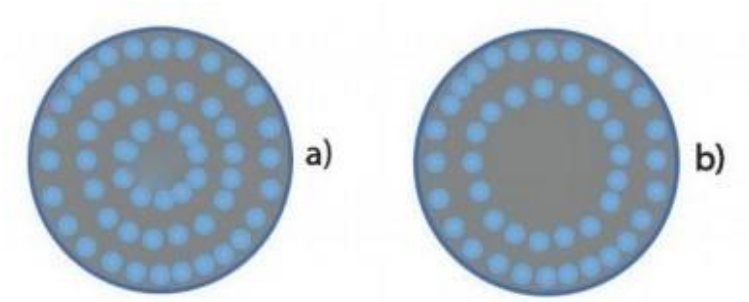


Fuente: *http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu*.

1.2. EFECTO SKIN EN CONDUCTORES

El efecto skin se presenta cuando la corriente alterna evita viajar dentro del conductor, viajando cerca de la superficie, este efecto se presenta con mayor claridad en corriente alternas de altas frecuencias, este efecto produce que la resistencia de los conductores aumente notablemente, de modo que para altas frecuencias a veces resulta ventajoso usar conductores huecos. En corriente continua, la densidad de corriente es similar en todo el conductor Figura 1-3a, pero en corriente alterna se observa que hay una mayor densidad de corriente en la superficie que en el centro Figura 1-3b.

Figura 1-3. Efecto skin en un conductor eléctrico.

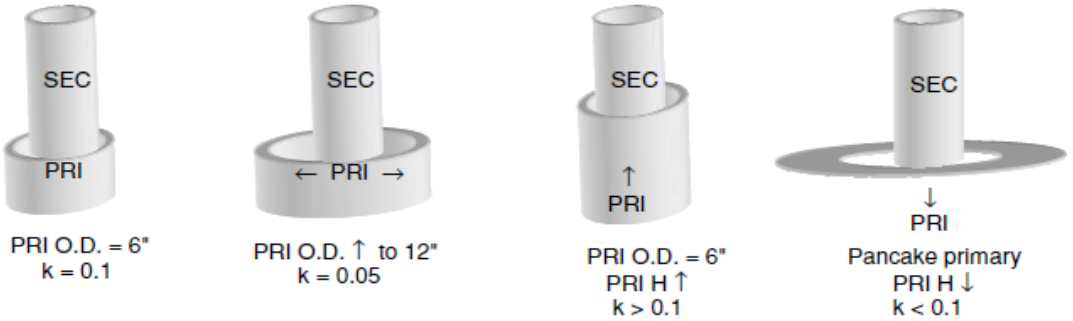


Fuente: *CITE energía Lima/Silicon Technology*.

1.3. INDUCTANCIA MUTUA

Se llama inductancia mutua al efecto de producir una fuerza electromotriz (FEM) en una bobina, debido al cambio de corriente en otra bobina acoplada, la inductancia mutua se ve afectada por la proximidad del devanado primario al secundario y las geometrías tanto de la primaria como de la secundaria como se observa en la Figura 1-4, siendo (K)el coeficiente acoplamiento de inductancia mutua.

Figura 1-4. Inductancia mutua de dos devanados, variando el devanado primario.

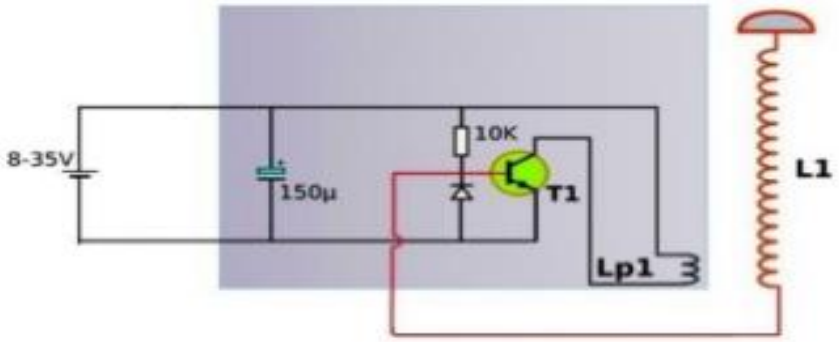


Fuente: *The ultimate Tesla coil design (Mitch Tilbury).*

1.4. CIRCUITO SLAYER

Es un circuito eléctrico oscilador fue una de las ideas del Dr. Stiffler y Gbluer como se observa en la Figura 1-5, siendo un circuito más sencillo donde no requiere bastantes componentes electrónicos, solamente un transistor encargado de realizar la conmutación permitiendo tener un circuito electrónico oscilante reemplazando el tradicional spark gap utilizado por Tesla (distancia entre dos electrodos separados por una gas o aire, permitiendo generar una chispa eléctrica), el circuito Slayer es el utilizado para la realización del proyecto permitiéndonos enfocarnos en las variables geométricas de las bobinas.

Figura 1-5. Circuito SLAYER.



Fuente: *SpigelLab Tesla´s experiments, free energy, overunity.*

1.5. INDUCTANCIA

La inductancia (L) es una propiedad de las bobinas eléctricas (cable en forma de espiras) por la cual se puede saber cuánto se opone la bobina al paso de la corriente por el efecto de la corriente inducida por la propia bobina.
La inductancia del bobinado primario (L_{Prim}) se obtiene por medio de la ecuación (1.3).

$$\boldsymbol{L_{Prim}} = \frac{{r_{prim}}^2 {N_{prim}}^2}{9r_{prim} + 10H_{Prim}} \qquad (1.3)$$

donde:

L_{Prim} = Inductancia de la bobina primaria. [μH]
r_{Prim} = Radio de la bobina primaria. [in]
N_{prim} = Número de vueltas utilizada en la bobina primaria.
H_{Prim} = Altura del devanado primario. [in]

La inductancia del bobinado secundario L_{Sec} puede ser calculada por la fórmula de Wheeler ecuación (1.4) en función del radio r y la longitud del devanado H_{sec} .

$$\boldsymbol{L_{Sec}} = \frac{{r_{sec}}^2 {N_{sec}}^2}{2540 \times (9r_{sec} + 10H_{sec})} \qquad (1.4)$$

donde:

L_{sec} = Inductancia de la bobina secundaria. [mH]
r_{sec} = Radio de la bobina secundaria. [cm]
N_{sec} = Número de vueltas utilizada en la bobina secundaria.
H_{sec} = Altura del devanado de la bobina secundaria. [cm]

De igual forma se puede calcular la longitud total del conductor de la bobina con la ecuación (1.5), cabe resaltar que el uso de esta fórmula solo es válido si $\mathrm{H}_{sec} > 0.67\, r$.

$$Longitud = 0.02\pi r_{sec} N \quad (1.5)$$

donde:

$Longitud$	=	Longitud total del conductor empleado para el embobinado. [m]
r_{sec}	=	Radio de la bobina secundaria. [cm]
N	=	Número de vueltas utilizada en la bobina secundaria.

Teniendo la longitud total del conductor en metros y sabiendo el tipo de material del conductor en este caso alambre AWG calibre 25, se puede determinar la resistencia del conductor empleando la ecuación (1.6).

$$\boldsymbol{R_{conductor}} = longitud \times ({}^{R}/_{\mathrm{cm}}) \quad (1.6)$$

donde:

$R_{resistencia}$	=	Resistencia total del conductor empleado en la bobina secundaria. [Ω]
$longitud$	=	Longitud total del conductor. [cm]
$({}^{R}/_{cm})$	=	Resistencia del conductor por cada centímetro. [cm/Ω]

De igual forma se puede calcular la capacitancia parasita $C_{parasita}$ producida en la bobina secundaria por medio de la ecuación de Medhurst (1.7).

$$\boldsymbol{C_{parasita}} = \left(0.100976\frac{H_{sec}}{D_{sec}} + 0.30963\right) \times D_{sec} \quad (1.7)$$

donde:

$C_{parasita}$	=	Capacitancia parasita de la bobina secundaria. [pF]
D_{sec}	=	Diámetro del secundario. [cm]
H_{sec}	=	Altura del devanado. [cm]

La frecuencia de resonancia F_R en la tensión de salida cuando el bobinado primario y secundario están sintonizados en la misma frecuencia, como se observa en la ecuación (1.8).

$$\boldsymbol{F_R} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Prim}C_{Prim}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Sec}C_{Sec}}} \qquad (1.8)$$

donde:

F_R	=	Frecuencia de resonancia. [Hz]
L_{Prim}	=	Inductancia de la bobina primaria. [μH]
C_{Prim}	=	Capacitancia primaria. [F]
L_{Sec}	=	Inductancia de la bobina secundaria. [μH]
C_{Sec}	=	Capacitancia secundaria. [F]

1.6. CONCEPTOS DEL CIRCUITO ELECTRICO

Los principales factores que influyen en los efectos de la transmisión inalámbrica de energía eléctrica son:

- **Bobina**: es un elemento formado por espiras de alambre arrollado que almacena energía en forma de campo magnético.
- **Diodo**: es un componente electrónico de dos terminales que solamente permite el paso de la corriente en un sentido, pudiendo actuar como elemento rectificador o detector.
- **Energía eléctrica**: Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se les coloca en contacto por medio de un conductor eléctrico para obtener trabajo.
- **Frecuencia**: es el número de oscilaciones o ciclos que ocurren en un segundo. La unidad fundamental de la frecuencia es el Hertz (Hz).
- **Inducción**: es un fenómeno descubierto por Michael Faraday, por el cual una fuerza electromotriz se origina en un medio o cuerpo al exponerse éste a un campo magnético variable, o si el campo es estático y el cuerpo afectado es móvil.

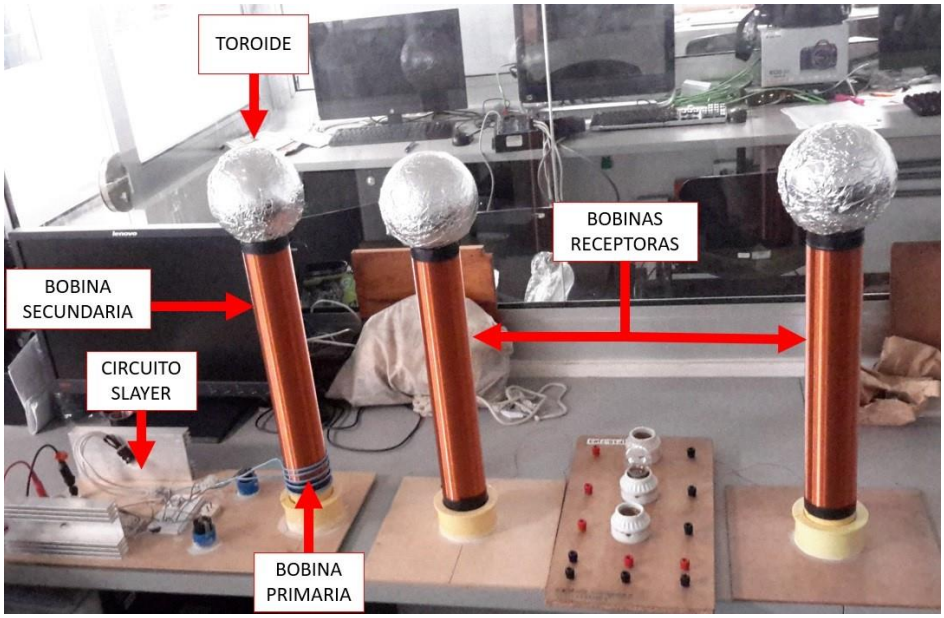
- **Oscilador**: es un dispositivo capaz de convertir la energía de corriente continua en corriente alterna a una determinada frecuencia.
- **Solenoide**: se define como una bobina de forma cilíndrica que cuenta con un hilo de material conductor enrollada sobre si a fin de que, con el paso de la corriente eléctrica, se genere un intenso campo eléctrico.
- **Transistor**: componente que tiene básicamente dos funciones: deja pasar o corta señales eléctricas a partir de una pequeña señal de mando y funciona como un elemento amplificador de señales. Consta de tres cristales semiconductores (usualmente de silicio).

2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El proyecto de construcción de la bobina de Tesla permite entender el comportamiento de la eficiencia en función de la distancia y la forma de onda en la carga. Es importante resaltar que trabajar en este proyecto abre la puerta para considerar eliminar el cableado eléctrico de una instalación. Esto reduce costos y permite no depender de puntos fijos para la alimentación de aparatos eléctricos, que muchas veces obliga a utilizar extensiones eléctricas o trasladarnos para poder llegar a esos puntos fijos. Al realizar remodelaciones eléctricas en construcciones, no generaran mayor costo, ya que solo será necesario alimentar la bobina de Tesla, donde se puede ubicar un punto fijo según el recinto. Esto ayudaría a llegar a todos los puntos del recinto y con seguridad proveer de energía eléctrica de forma inalámbrica todo el lugar. También se podría evitar los riesgos eléctricos que se producen por contacto directo con los conductores eléctricos al reducir su número.

Este capítulo presenta el paso a paso constructivo de la bobina de Tesla dicha, indicando los parámetros de construcción, especificando sus componentes, variables geométricas y demás características de diseño. Se construyó un pequeño prototipo de baja potencia, variando los parámetros establecidos anteriormente y con fines educativos, ya que siempre existen riesgos asociados al manejo de altos voltajes; la idea es mostrar el fenómeno de inducción magnética, sirviendo como base para la transmisión inalámbrica de electricidad. La figura (2-1), hace referencia a los componentes de la bobina de Tesla.

Figura 2-1. Construcción de la bobina de Tesla.



Fuente: Diseño y construcción de la bobina de Tesla.

2.1. BOBINA PRIMARIA

La bobina primaria es un enrollamiento que tiene un bajo valor de inductancia, cuya forma varía de acuerdo a la necesidad de la bobina. Los tres diseños que se suelen usar para la construcción son espiral plana, espiral cónica invertida y solenoide recto; las bobinas tipo espiral plana y solenoide recto, se pueden observar en la Figura 1-4. La bobina primaria construida para este proyecto es una bobina tipo solenoide recto, con un factor de acoplamiento $k = 0.1$, donde se utilizó alambre de cobre calibre 10 AWG (azul) para el bobinado, la altura de bobina de 2.76″, diámetro de 3.17″ y 1.585″ de radio; el bobinado fue construido con 5 número de vueltas o espiras, tal y como se muestra en la figura (2-1). Para determinar el valor de su inductancia se utilizó la ecuación (1.3), mencionada anteriormente.

$$L_{Prim} = \frac{(1.585)^2 \times (5)^2}{(9 \times (1.585)) + (10 \times (2.76))} \qquad (1.3)$$

$$L_{Prim} = 1.5\ \mu\text{H}$$

2.2. BOBINA SECUNDARIA

La bobina secundaria es la encargada de disminuir la corriente proveniente de la inducción de la bobina L_{Prim}, además aumenta el potencial eléctrico proveniente del campo magnético de dicha bobina, también es la encargada de llevar las altas tensiones al toroide, esto provoca obtener el efecto visual de un rayo, la bobina L_{Sec} al tener una tensión tan elevada y por medio de la radiación electromagnética, se encargará de transmitir inalámbricamente la energía eléctrica a una alta frecuencia.

Las bobinas L_{Sec}, se construyeron sobre un tubo de PVC por sus características de rigidez y bajo costo, variando sus formas geométricas como se mencionó anteriormente. Al realizar varias bobinas secundarias, pueden cumplir la función de bobinas receptoras como se observa en la imagen (2-1), todas las bobinas secundarias se realizaron con alambre esmaltado calibre número 25 AWG, cambiando solamente el grosor del tubo PVC y el número de vueltas de las bobinas como se observa en la imagen (2-2), para conocer las inductancias de las bobinas se usó la fórmula de Wheeler, ecuación (1.4) cabe resaltar que el uso de esta fórmula solo es válido si $H_{sec} > 0.67\, r$.

A continuación, se presenta en la Tabla 2-1, los valores calculados para la bobina secundaria, variando sus variables geométricas empleando la ecuación Wheeler (1.4). Además se ilustra en la Figura 2-2, las bobinas que se utilizaron con diferentes variables geométricas.

Tabla 2-1. Valores calculados para la bobina secundaria variado su geometría empleando la ecuación Wheeler (1.4).

Tubo PVC [in]	N_{sec}	D_{sec} [cm]	r_{sec} [cm]	H_{sec} [cm]	L_{sec} [mH]
2	800	6.49	3.245	36.40	5.968
$1\,{}^{1}/_{2}$	800	5.29	2.645	36.40	4.545
1	800	3.78	1.890	36.40	2.362
2	500	6.49	3.245	22.75	4.037
$1\,{}^{1}/_{2}$	500	5.29	2.645	22.75	2.740
1	500	3.78	1.890	22.75	1.437
2	300	6.49	3.245	13.65	2.251
$1\,{}^{1}/_{2}$	300	5.29	2.645	13.65	1.546
1	300	3.78	1.890	13.65	0.824

Figura 2-2. Bobinas variando sus formas geométricas.

Fuente: Construcción de bobinas de diferentes geométrica.

2.2.1. RESTRICCIONES TÉCNICAS DE LA BOBINA SECUNDARIA

Una de las principales restricciones de la bobina secundaria, a tener en cuenta, es el diámetro de la formaleta del embobinado secundario, que debe ser inferior a la altura de la misma formaleta y así cumplir la condición para considerarse bobina senoidal según la ecuación de Wheeler (1.4). Otra restricción que se debe tener en cuenta al momento de la fabricación de cualquier bobinado con diferentes números de vueltas, es que el embobinado nunca debe ser añadido o empalmado con otro alambre, pues debido a esto se provoca un error en la medición del valor de la inductancia. El embobinado debe de ser continuo, ya que en cualquier empalme mal realizado puede producir un arco eléctrico (esencialmente en bobinados secundarios) y dañarse el esmalte del conductor, provocando un mal funcionamiento de la bobina de Tesla. Como tercera restricción, las bobinas deben ser embobinados homogéneos, es decir no tener vueltas remontadas una encima de otra.

2.3. CAPACITANCIA PARÁSITA

Es importante conocer este parámetro, ya que afecta la capacitancia total del circuito secundario, con la ecuación (1.7) de Medhurst se hace el cálculo de dicho parámetro, también se calculó tanto la longitud del alambre empleado en la bobina, como el valor de la resistencia en ohmios empleando las ecuaciones (1.5) y (1.6) respectivamente. A continuación se presenta la Tabla 2-2,

donde se encuentran los valores calculados de la capacitancia parasita en la bobina secundaria para las diferentes configuraciones.

Tabla 2-2. Valores calculados de la capacitancia parasita en la bobina secundaria variado su geometría.

Tubo PVC [in]	N_{sec}	D_{sec} [cm]	r_{sec} [cm]	H_{sec} [cm]	$C_{parasita}$ [pF]	$Longitud$ [m]	$R_{resistencia}$ [Ω]
2	800	6.49	3.245	36.40	5,561	152.981	16.216
$1\,{}^{1}/_{2}$	800	5.29	2.645	36.40	5.313	132.885	14.086
1	800	3.78	1.890	36.40	4.845	94.954	10.065
2	500	6.49	3.245	22.75	4.306	101.893	10.801
$1\,{}^{1}/_{2}$	500	5.29	2.645	22.75	3.935	83.053	8.804
1	500	3.78	1.890	22.75	3.467	59.346	6.291
2	300	6.49	3.245	13.65	3.387	61.136	6.480
$1\,{}^{1}/_{2}$	300	5.29	2.645	13.65	3.016	49.832	5.282
1	300	3.78	1.890	13.65	2.548	35.608	3.774

2.4. TOROIDE

Este elemento de la bobina de Tesla, ayuda a dar una distribución más uniforme del campo eléctrico, siendo en el toroide comúnmente donde se genera el rayo, generalmente es una esfera en aluminio como se observa en la Figura 2-3, la cual tiene una capacitancia, este elemento tiene un gran beneficio, pues disminuye la intensidad del campo eléctrico que está en la bobina secundaria, estos campos pueden producir arcos eléctricos, por lo que la implementación del mismo reduce este efecto al igual que la frecuencia y de esta manera solo se tiene un punto, donde se localice la chispa. La esfera debe tener poca aspereza para que se tenga un buen efecto, no obstante, esto es difícil de lograr por lo que generalmente se construye con algunas irregularidades. Por otro lado, con la capacitancia de la esfera y la capacitancia parasita de la bobina secundaria, se puede hallar la capacitancia resultante del circuito secundario.

Figura 2-3. Fotografía del tamaño de las esferas utilizadas en el proyecto.

Fuente: Esferas en aluminio utilizadas en la bobina de Tesla.

Empleando la ecuación (1.9) que se presenta a continuación, se puede determinar la capacitancia de las esferas, como se muestra en la Tabla 2-3, permitiendo entender mejor el comportamiento del circuito secundario empleado en la bobina de Tesla.

$$\boldsymbol{C}_{esferica} = \frac{25.4 \times R_{esfera}}{9} \qquad (1.9)$$

donde:

$\boldsymbol{C}_{esferica}$= Capacitancia de una esfera en $[pF]$.

R_{esfera} =Radio de una esfera en $[in]$.

Tabla 2-3. Valores calculados de capacitancia de las esferas utilizadas en el proyecto.

R_{esfera} [in]	$C_{esferica}$ [pF]
1.67	4.713
1.96	5.531
2.46	6.942

2.5. FRECUENCIA DE RESONANCIA

Una vez calculada la capacitancia de las esferas, se puede hallar la frecuencia de resonancia del circuito secundario, que para cálculos teóricos debe ser la misma frecuencia de resonancia del primario. Si sabemos que la frecuencia de resonancia esta descrita por la ecuación (1.8) y si $C_{Sec} = C_T$ siendo C_T la capacitancia total del circuito secundario. En la Tabla 2-4, se encuentran los valores calculados de frecuencia de resonancia.

$$F_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Prim}C_{Prim}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Sec}C_{Sec}}}$$

Reemplazando C_S por C_T

$$C_T = C_{parasita} + C_{esferica}$$

$$F_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S\left(C_{parasita} + C_{esferica}\right)}} \qquad (1.10)$$

donde:

F_R =Frecuencia de resonancia.

L_{Sec}=Inductancia del secundario en [mH].

$C_{parasita}$ = Capacitancia parasita de la bobina secundaria en [pF].

$C_{esferica}$ = Capacitancia de la esfera en [pF].

Tabla 2-4. Valores calculados de la frecuencia de resonancia

Tubo PVC [in]	N_{sec}	L_{sec} [mH]	$C_{parasita}$ [pF]	$C_{esferica}$ [pF]	$F_{Resonancia}$ [kHz]
Datos para esfera grande de radio 2.46 [in]					
2	800	5.968	5,561	6.942	582.933
2	500	4.037	4.306	6.942	747.439
2	300	2.251	3.387	6.942	779.982
$1\,{}^{1}/_{2}$	800	4.545	5.313	6.942	674.367
$1\,{}^{1}/_{2}$	500	2.740	3.935	6.942	921.913
$1\,{}^{1}/_{2}$	300	1.546	3.016	6.942	1282

1	800	2.362	4.845	6.942	953.846
1	500	1.437	3.467	6.942	1301
1	300	0.824	2.548	6.942	1799
Datos para esfera mediana de radio 1.96 [in]					
2	800	5.968	5,561	5.531	618.587
2	500	4.037	4.306	5.531	798.655
2	300	2.251	3.387	5.531	1123
$1\,{}^{1}/_{2}$	800	4.545	5.313	5.531	716.899
$1\,{}^{1}/_{2}$	500	2.740	3.935	5.531	988.238
$1\,{}^{1}/_{2}$	300	1.546	3.016	5.531	1384
1	800	2.362	4.845	5.531	1016
1	500	1.437	3.467	5.531	1399
1	300	0.824	2.548	5.531	1950
Datos para esfera pequeña de radio 1.67 [in]					
2	800	5.968	5,561	4.713	642.740
2	500	4.037	4.306	4.713	834.087
Continuación tabla: Cálculo de frecuencia de resonancia					
2	300	2.251	3.387	4.713	1178
$1\,{}^{1}/_{2}$	800	4.545	5.313	4.713	745.571
$1\,{}^{1}/_{2}$	500	2.740	3.935	4.713	1033
$1\,{}^{1}/_{2}$	300	1.546	3.016	4.713	1455
1	800	2.362	4.845	4.713	1059
1	500	1.437	3.467	4.713	1467
1	300	0.824	2.548	4.713	2057

2.6. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación, constituye el primer elemento y uno de los más importantes para el correcto funcionamiento, ya que es de donde se proveerá de energía al circuito electrónico de la bobina de Tesla. El circuito de la bobina de Tesla es alimentado por una fuente DC variable marca Tektronix como se observa en la Figura 2-4, con una variación de 0 a 30 voltios en forma independiente o en serie de 0 a 60 voltios.

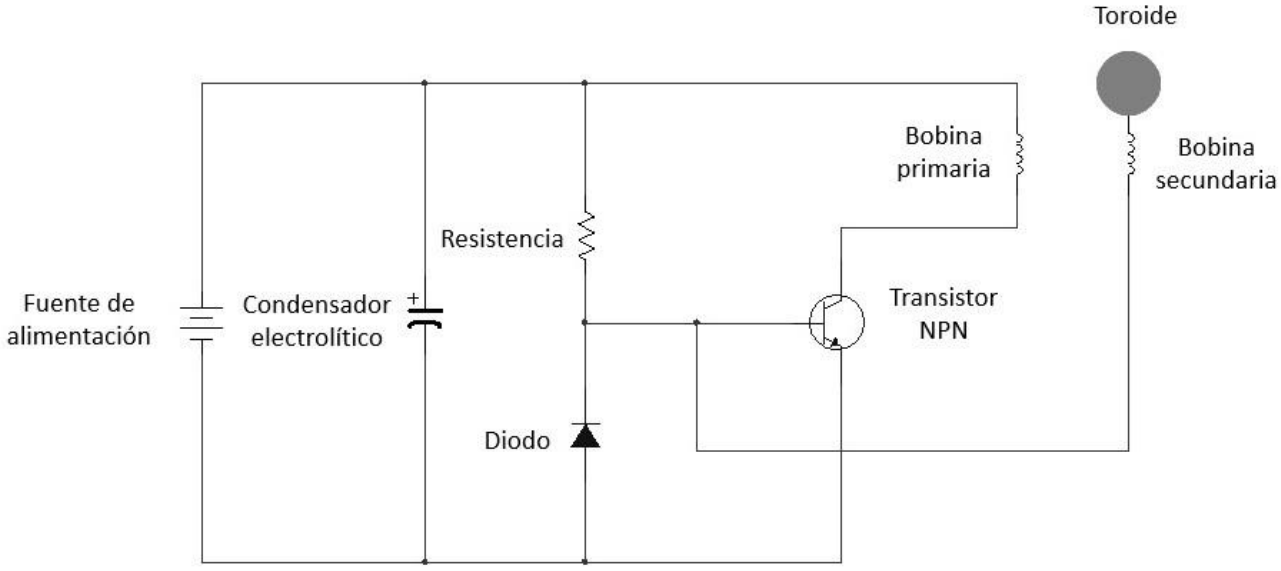
Figura 2-4. Fuente de alimentación variable DC

Fuente: *https://www.tek.com/dc-power-supply*.

2.7. ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROTOTIPO

El circuito SLAYER, descrito anteriormente en este documento, es un circuito oscilador que permite ser utilizado para alimentar la bobina primaria y está a la vez inducir a la bobina secundaria, en la Figura 2-5, se observa el circuito nuevamente para su respectiva explicación de una forma más clara.

Figura 2-5. Circuito electrónico del prototipo.

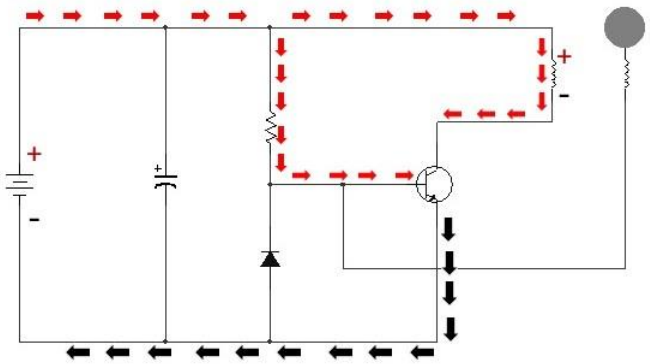


El circuito electrónico se puede entender en dos instantes de tiempo, en el instante t_1, la fuente de alimentación permite el flujo de electrones del polo positivo al polo negativo a través del circuito electrónico, esto debido que el transistor se encuentra en saturación. Por lo tanto, esto provoca la circulación de corriente entre colector y emisor del transistor permitiendo la circulación completa hasta la fuente de alimentación en el instante t_1 como se observa en la Figura 2-6a.

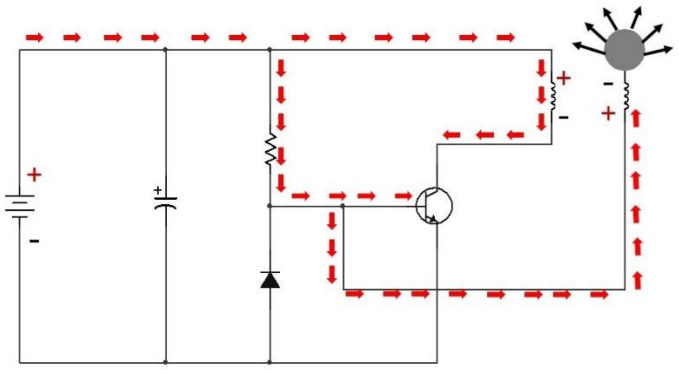
En el instante t_1, en la bobina primaria se crea un campo magnético, generando una autoinducción de voltaje y corriente en la bobina secundaria, el voltaje empieza a incrementar abruptamente por la ley de Lenz en polaridad contraria al del bobinado primario, circulando electrones por el bobinado secundario tratando de salir muchas veces en forma de arco eléctrico. Consiguiente se produce el instante t_2 debido a que es suficiente los electrones que circulan por la bobina secundaria, disminuyendo la corriente que entra al transistor y reduciendo el voltaje entre base y emisor (el cual debe ser de 0.7 V), provocando la excitación del transistor entrando en estado de corte y aumentando la resistencia entre colector y emisor. Por lo tanto, deja de circular corriente por el transistor, el cual provoca que el campo magnético de la bobina primaria disminuya y deje de auto-inducir a la bobina secundaria, como se observa en la Figura 2-6b. Cuando la bobina secundaria deja de ser auto-inducida por el bobinado primario, el transistor vuelve a entrar en saturación es decir se vuelve al instante t_1, obteniendo un circuito electrónico oscilante.

Figura 2-6. Instantes de tiempo circuito electrónico.

a) Instante t_1



b) Instante t_2



2.8. CONEXIÓN ENTRE BOBINA TRANSMISORA Y BOBINAS RECEPTORAS

En la bobina de mayor numero de vueltas denominada como bobina secundaria, se produce un alto voltaje al igual que un fuerte campo eléctrico oscilante esparciéndose en forma radial, pero debilitándose a medida que se aumente la distancia donde se origina el campo. Las demás bobinas de igual número de vueltas que la bobina secundaria, cumplen la función de bobinas receptoras, alimentando una carga en este caso un bombillo incandescente, las bobinas receptoras están separadas entre sí a una distancia constante de 100 cm, solo se varía la distancia con respecto a la bobina transmisora.

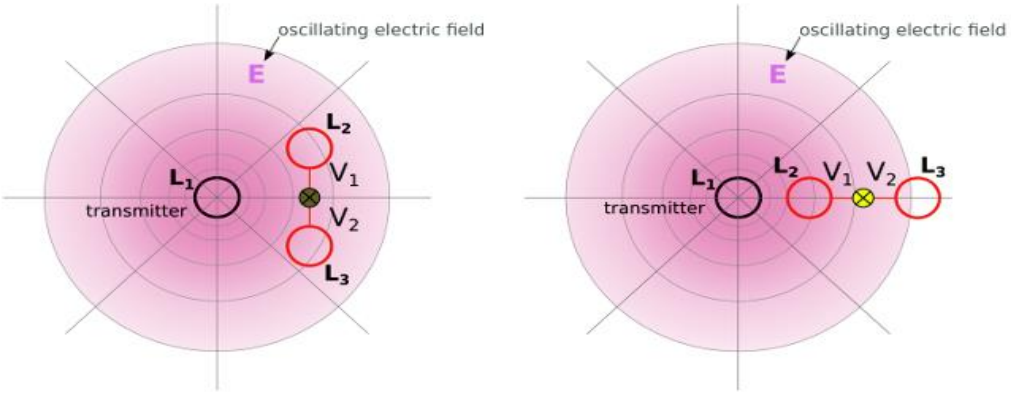
La distancia entre las bobinas receptoras y transmisora puede variar, es decir, aumentar la distancia o disminuir, cabe resaltar que para alimentar cualquier carga eléctrica debe haber un diferencial de potencial, ósea que, a mayor distancia, mayor debe ser el diferencial de potencial y mejor debe de

ser el comportamiento de la carga. Como se observa en la Figura 2-7, se generan unas líneas equipotenciales en forma radial, si las dos bobinas receptoras se encuentran en la misma línea equipotencial, no hay flujo de electrones y por ende el bombillo no enciende.

En la

Figura **2-7** L_1 cumple la función de bobina transmisora y L_2 como L_3 son las bobinas receptoras.

Figura 2-7. Campo eléctrico oscilante.



Fuente: Experimentos de SpigelLab parte 6 campo.

3. PROCESO DE PRUEBAS

Las pruebas que se aplican al prototipo permiten verificar el comportamiento de los elementos y su funcionamiento.

3.1. PRUEBAS DE VALOR DE INDUCTANCIA Y RESISTENCIA DE BOBINAS SECUNDARIAS

Se realizó la medición de inductancia y resistencia con ayuda del Fluke 6303A LCR Meter, a una frecuencia de 1 kHz. Esta prueba permite verificar los valores de inductancia y resistencia de la bobina secundaria. En la Tabla 3-1, se evidencia los datos registrados durante las mediciones.

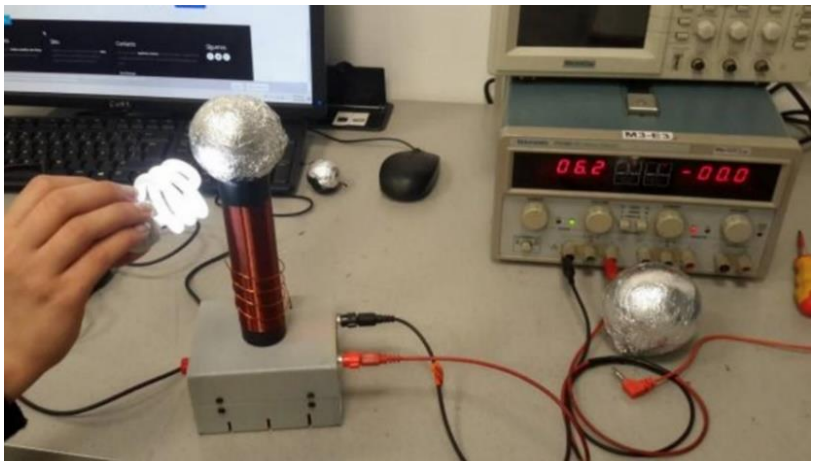
Tabla 3-1. Toma de datos con instrumento de medición Fluke 6303A LCR Meter.

		Valor Calculado		Valor Medido	
Tubo PVC [in]	N_{sec}	$R_{resistencia}$ [Ω]	L_{sec} [mH]	$R_{resistencia}$ [Ω]	L_{sec} [mH]
2	800	16.216	5.968	15.82	5.50
				14.58	5.43
				14.76	5.45
$1\,{}^{1}/_{2}$	800	14.086	4.545	13.86	3.45
				13.86	3.44
				13.79	3.43
1	800	10.065	2.362	10.06	1.697
				10.08	1.695
				10.08	1.701
2	500	10.801	4.037	11.14	3.248
				11.06	3.18
				12.10	3.265
$1\,{}^{1}/_{2}$	500	8.804	2.740	9.067	2.089
				9.120	2.091
				9.080	2.092
1	500	6.291	1.437	6.952	1.059
				6.768	1.039
				6.792	1.040
2	300	6.480	2.251	7.15	1.786
				7.085	1.799
				7.177	1.797
$1\,{}^{1}/_{2}$	300	5.282	1.546	5.98	1.194
				6.01	1.20
				6.10	1.198
1	300	3.774	0.824	4.63	0.607
				4.61	0.604
				4.56	0.602

3.2. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO AUTOINDUCCIÓN BOBINA SECUNDARIA

Inicialmente se realizó esta prueba con la conexión de las bobinas secundarias que van a cumplir la función de transmisoras, esta prueba es bueno realizarla cada vez que cambiemos la bobina secundaria, la forma más fácil y segura es acercando una bombilla fluorescente, no importa la potencia de la bombilla como se observa en la Figura 3-1, solo es para determinar si el bobinado L_{Prim} esta en el mismo sentido de L_{sec}, debido a que si no están en el mismo sentido de embobinado no se realiza el fenómeno de autoinducción, si al realizar esta prueba el bombillo no enciende podemos asegurar que el daño se encuentra en algún componente electrónico, casi siempre es el transistor.

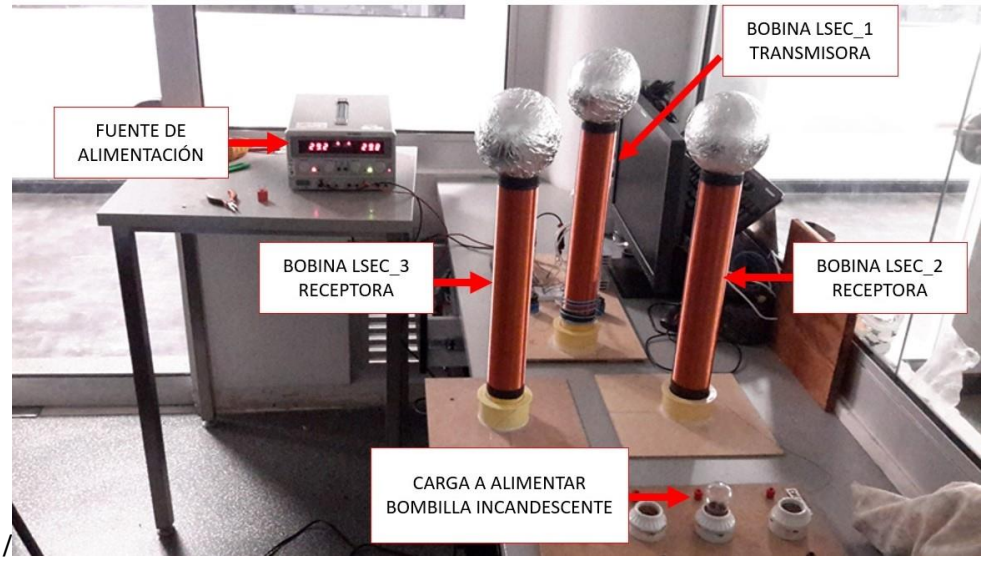
Figura 3-1. Prueba de funcionamiento bobina de Tesla.



3.3. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON BOBINAS RECEPTORAS.

Culminada la etapa de prueba de cada componente en el circuito transmisor, se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento al conectar la carga resistiva con las bobinas receptoras, en este caso un bombillo incandescente, demostrando al mismo tiempo la importancia de tener una diferencia de potencial logrando encender la carga, si la diferencia de potencial es cero, el bombillo no enciende como se observa en la Figura 3-2.

Figura 3-2. Bobinas receptoras a la misma distancia de la transmisora



De acuerdo a lo anterior, cuando las bobinas receptoras se encuentran en diferentes líneas equipotenciales, se crea una diferencia de potencial entre ellas y por consiguiente el bombillo

enciende como se observa en la Figura 3-2. Es importante resaltar que, entre las bobinas receptoras no influyen en qué sentido esta su embobinado uno del otro.

Se realizaron diferentes configuraciones, pero manteniendo el mismo principio de conexión como se mostró en el capítulo 2 Figura 2-1, por lo tanto, solo se realiza cambios las variables geométricas de las bobinas secundarias. En total fueron 27 configuraciones como se observa en la Tabla 3-2, para mayor facilidad se adjuntan al presente proyecto por medio magnético (CD-ROM), todos los datos de medición obtenidos.

Tabla 3-2. Configuraciones realizadas respecto a sus variables geométricas.

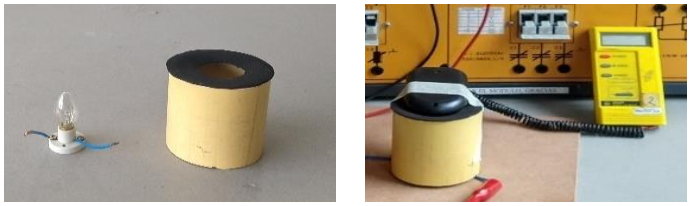
Configuración	**Tamaño de esferas**			**Tamaño de formaleta bobina secundaria transmisora en [in]**			**Tamaño de formaleta bobinas secundarias receptoras en [in]**			**Numero de vueltas bobinas secundarias**		
	Grande	Mediana	Pequeña	2	$1\,{}^{1}/_{2}$	1	2	$1\,{}^{1}/_{2}$	1	800	500	300
1	■			■			■			■		
2		■		■			■			■		
3			■	■			■			■		
4	■			■			■				■	
5		■		■			■				■	
6			■	■			■				■	
7	■			■			■					■
8		■		■			■					■
9			■	■			■					■
10	■				■			■		■		
11		■			■			■		■		
12			■		■			■		■		
13	■				■			■			■	
14		■			■			■			■	
15			■		■			■			■	
16	■				■			■				■
17		■			■			■				■
18			■		■			■				■
19	■					■			■	■		
20		■				■			■	■		
21			■			■			■	■		
22	■					■			■		■	
23		■				■			■		■	
24			■			■			■		■	
25	■					■			■			■
26		■				■			■			■
27			■			■			■			■

4. ANÁLISIS DE DATOS

En el presente trabajo uno de los objetivos principales, es determinar la potencia de salida en la carga, que para este caso es un bombillo incandescente. Al determinar la potencia de salida, se puede calcular la eficiencia y compararla entre diferentes configuraciones propuestas. Debido a

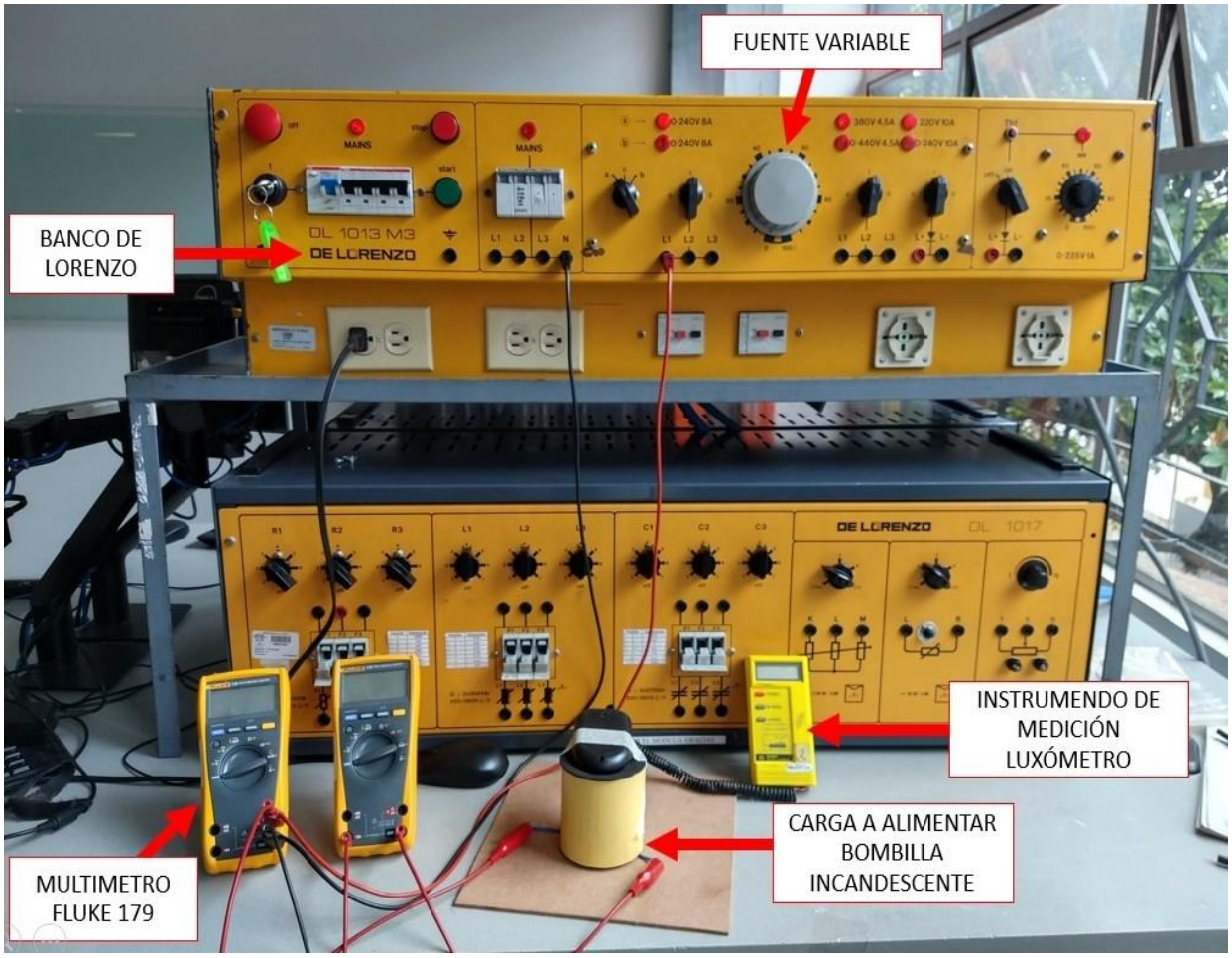
que en la carga se presentan altas frecuencias que oscilan mayores a los 100 kHz, no es posible utilizar un instrumento de medición convencional para medir la potencia de salida, ya que estos instrumentos de medición operan a frecuencia industrial de 60 Hz. Para solucionar este inconveniente, se decidió realizar una medición de forma indirecta por medio de un luxómetro, aprovechando que nuestra carga es lumínica, al encerrar el bombillo incandescente en un tubo PVC y en la parte superior colocar un luxómetro para poder caracterizar el bombillo como se observa en la Figura 4-1.

Figura 4-1. Carga a alimentar y forma de realizar la medición con el luxómetro.



La caracterización del bombillo se realizó empleando el banco de Lorenzo, debido que el banco tiene la opción de variar el voltaje de 0 a 220 voltios permitiendo llegar a la tensión nominal de 120 v del bombillo y poder determinar los luxes a plena carga. Fue necesario también alimentar el bombillo a diferentes niveles de tensión, logrando la caracterización del bombillo y así obteniendo una ecuación característica que permita registrar el comportamiento de la tensión y corriente con respecto a los luxes. La conexión del bombillo con el banco de Lorenzo se puede observar en la Figura 4-2, por lo tanto, se observa la conexión de los instrumentos de medición (dos multímetros Fluke 179), uno mide la tensión con la que estamos alimentando la carga, mientras que el otro, mide la corriente que va hacia la misma.

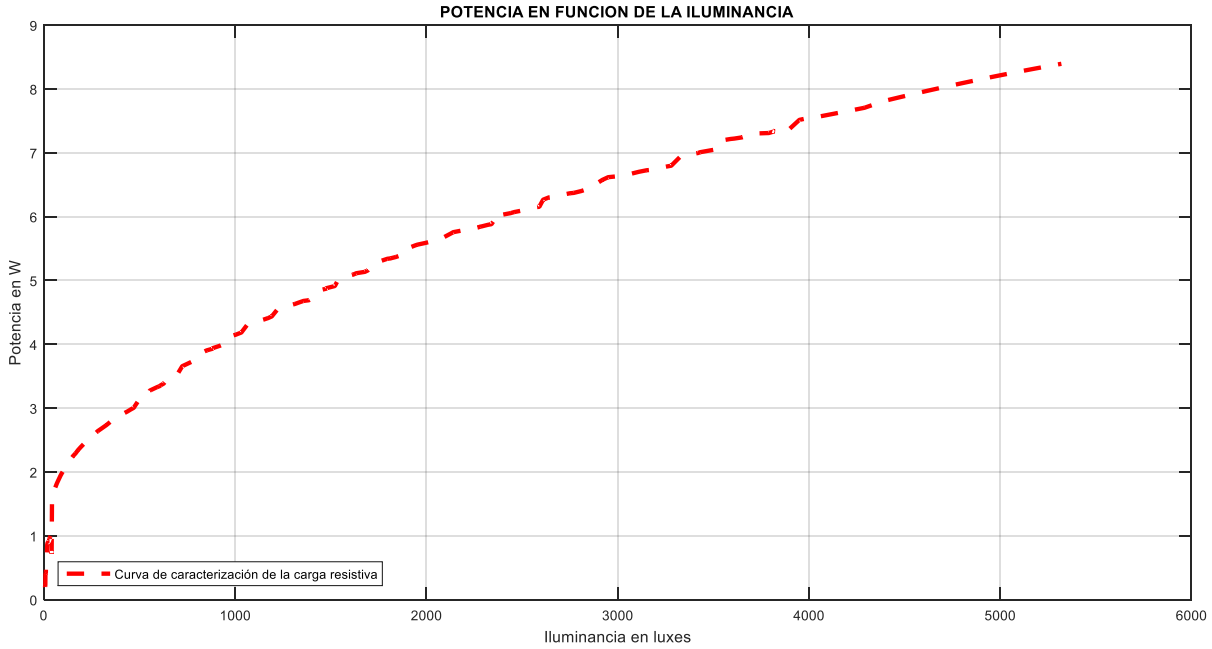
Figura 4-2. Caracterización de la carga empleando el Banco Lorenzo.



Obteniendo bastantes datos en el luxómetro a diferentes niveles de tensión, podemos entender el comportamiento de la carga y saber aproximadamente la cantidad de potencia que utiliza con referencia a los luxes. Por lo tanto, al caracterizar la carga mediante luxes versus potencia, indirectamente podemos determinar la eficiencia en el prototipo comparando la potencia de entrada con la potencia de salida, pues la potencia de salida la obtenemos por medio de la medición de la iluminancia en la carga implementando la bobina de Tesla.

Variando el voltaje paulatinamente se tomaron 224 mediciones, en el cual se pudo comprobar que el luxómetro inicia a marcar a partir de los 19 voltios aproximadamente, y su punto más alto obtenido fue de 5320 luxes, con una tensión de entrada de 128.7 V y de corriente 0.065 A. De acuerdo a las mediciones con los multímetros Fluke 179 se determinó la potencia por medio de la ecuación $P = V * I$ para los 226 datos medidos; se realizó una gráfica en función de los luxes, obteniendo una ecuación polinómica de grado 6, como se observa en la Figura 4-3.

Figura 4-3. Curva de caracterización de la carga obtenida con las medidas en el Banco Lorenzo



La ecuación polinómica obtenida es de grado 6 para mayor precisión, teniendo en cuenta que las mediciones realizadas con el luxómetro tienden a variar de forma significativa, al igual las mediciones fueron tomadas muy cercanas una de otra, por lo tanto, se debe tener una ecuación más precisa. Cabe resaltar que cuando se realizaron los primeros cálculos de potencia de salida en la bobina de Tesla se presentaron eficiencias incoherentes, es decir por encima del 100%, sin embargo, se realizó un análisis más detallado de la ecuación obtenida en Excel, donde se pudo observar que el error se debía al número de cifras significativas tomadas por el programa Excel que habitualmente son de solamente 3 cifras y también porque dicho programa tiende a redondear las cifras significativas. Para solucionar este error se realizó manualmente la configuración del programa y se tomaron más cifras significativas, hasta estar seguros que ya no se pueda redondear la cifra, esto se puede observar en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Ecuación polinómica de grado 6 empleada para determinar la potencia de salida en la bobina de Tesla.

$Y = aX^6 + bX^5 + cX^4 + dX^3 + eX^2 + fX + g$		Siendo $R^2 = 990{,}97460092 \times 10^{-3}$
a	=	$14{,}804256310 \times 10^{-21}$
b	=	$249{,}50478709 \times 10^{-18}$
c	=	$-1{,}6289286442 \times 10^{-12}$
d	=	$5{,}1967751574 \times 10^{-9}$
e	=	$-8{,}5175599965 \times 10^{-6}$
f	=	$8{,}1108731687 \times 10^{-3}$
g	=	$810{,}08627879 \times 10^{-3}$

En la Tabla 4-1, se puede observar la ecuación característica donde se ve representada como X igual al número de luxes y por otro lado Y, como el resultado de la potencia de salida. Es de importancia aclarar que la mayor cantidad de cifras significativas que se toman para calcular la potencia de salida en la bobina de Tesla, se ve determinada por la constante (a).

4.1. ANÁLISIS DE DATOS EMPLEANDO EL TEST DE SCHEFFÉ

El test de Scheffé, permite comparaciones múltiples al realizar contrastes entre las mediciones, permitiendo rechazar la hipótesis nula de igualdad de medidas mediante la técnica ANOVA, el método de Scheffé está basado en la construcción de intervalos de confianza que en el caso del presente proyecto se determinó de un 95%, es decir, con $\alpha = 0.05$ para el nivel de significancia entregada por la tabla ANOVA, este procedimiento no requiere que el modelo sea equilibrado.

4.1.1. ANÁLISIS DE EFICIENCIA

En la Tabla 4-2, se muestran los resultados del análisis posterior de comparaciones múltiples de la eficiencia por el método Scheffé, cabe mencionar que dos medidas se consideran iguales si el valor significativo (sig.) pertenece al intervalo de confianza construido por la diferencia de ellos, en nuestro caso se puede observar que la configuración 6 es la más eficiente y la configuración 27 la menos eficiente. Además, se pudo observar que, en los tres tipos de formaleta, el mejor comportamiento de eficiencia se presentó con el mismo número de vueltas e igual tamaño de esfera, que fueron las configuraciones 6,15 y 24, como se puede ver en la Tabla 4-2 (resaltado en

color amarillo), dándonos una idea de la mejor combinación que se pueda tener a consideración a lo largo del proyecto .

Tabla 4-2. Tabla de subconjuntos homogéneos empleando el test de Scheffe.

		Subconjunto para alfa = 0.05									
CONFIGURACIÓN	**N**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Configuración_27	42	0,0000									
Configuración_19	42	6,6463	6,6463								
Configuración_20	42	6,8642	6,8642	6,8642							
Configuración_21	42	6,9058	6,9058	6,9058							
Configuración_10	42	6,9807	6,9807	6,9807							
Configuración_23	42	10,4735	10,4735	10,4735	10,4735						
Configuración_12	42	10,6405	10,6405	10,6405	10,6405						
Configuración_11	42	10,9220	10,9220	10,9220	10,9220						
Configuración_26	42	11,4262	11,4262	11,4262	11,4262	11,4262					
Configuración_25	42	12,0066	12,0066	12,0066	12,0066	12,0066					
Configuración_13	42	14,1975	14,1975	14,1975	14,1975	14,1975	14,1975				
Configuración_22	42	14,8403	14,8403	14,8403	14,8403	14,8403	14,8403	14,8403			
Configuración_24	42	15,2773	15,2773	15,2773	15,2773	15,2773	15,2773	15,2773			
Configuración_2	42		17,4537	17,4537	17,4537	17,4537	17,4537	17,4537	17,4537		
Configuración_9	42		21,8551	21,8551	21,8551	21,8551	21,8551	21,8551	21,8551		
Configuración_14	42		22,3229	22,3229	22,3229	22,3229	22,3229	22,3229	22,3229		
Configuración_3	42			22,5337	22,5337	22,5337	22,5337	22,5337	22,5337		
Configuración_8	42				22,8966	22,8966	22,8966	22,8966	22,8966		
Configuración_7	42				22,9695	22,9695	22,9695	22,9695	22,9695		
Configuración_17	42				23,4791	23,4791	23,4791	23,4791	23,4791		
Configuración_18	42					26,7055	26,7055	26,7055	26,7055	26,7055	

Configuración_16	42					26,9849	26,9849	26,9849	26,9849	26,9849	
Configuración_15	42						29,1087	29,1087	29,1087	29,1087	
Configuración_4	42							30,1084	30,1084	30,1084	
Configuración_5	42								32,1470	32,1470	
Configuración_1	42									40,5292	40,5292
Configuración_6	42										48,5708
Sig.		,076	,051	,051	,416	,057	,108	,077	,130	,255	,997
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.											

4.1.2. ANÁLISIS DE ILUMINANCIA

El test de Scheffé realizado a los datos obtenidos con el luxómetro, nos deja observar también un comportamiento muy parecido al de la eficiencia, solo que en el caso de la iluminancia se presentan 4 subconjuntos homogéneos de medidas iguales. En la primera columna aparecen los niveles del factor ordenados según el valor de sus correspondientes medidas, las columnas están ordenadas de menor a mayor importancia.

En la tabla (Anexo 1), se muestran los resultados del análisis de iluminancia, en este caso se puede observar que la configuración 6, 5 y 4, (sombreado en amarillo), son las que presentan el mejor comportamiento, es decir comienza a crecer de forma parabólica constante.

4.1.3. ANÁLISIS DE LA POTENCIA DE SALIDA EN LA CARGA

El test de Scheffé realizado a los datos obtenidos de la potencia de salida mediante la ecuación polinómica de grado 6 que se obtuvo caracterizando la carga explicada en la Tabla 4-1, nos deja observar también que la configuración 6 (sombreado en color amarillo), es la más sobresaliente para alimentar la carga, en esta tabla de subconjuntos homogéneos se vuelven a presentar 8 niveles, tal como se presentó en la tabla de eficiencia. En la tabla (Anexo 2), se muestran los resultados del análisis de potencia de salida.

4.1.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA EN LA CARGA

El test de Scheffé realizado a los datos obtenidos de la frecuencia en la carga, cambian significativamente con respecto al tamaño de la esfera siendo inversamente proporcional, es decir, se presenta una mayor frecuencia de operación en la carga al disminuir el tamaño de la esfera, la

cual cumple la parte capacitiva de la bobina de Tesla y es donde se generan los arcos eléctricos, en la tabla (Anexo 3), se muestran dos subconjuntos o niveles de importancia de la misma, siendo la configuración 9, donde se presentan las mayores frecuencias, también la configuración 1 es donde la carga trabaja con menor frecuencia aproximadamente los 800 kHz (sombreado en color amarillo), por lo tanto, se ratifica que de acuerdo a la teoría entre más grande sea la esfera, menor será la frecuencia de operación en la carga.

4.2. COMPARACIÓN DE MEDIDAS RESALTANDO EL VALOR MÁXIMO Y MÍNIMO

Se realizó una comparación simple de todos los datos teniendo en cuenta el tamaño de esferas, numero de vueltas de embobinado, formaleta, distancia de medición con respecto a la bobina transmisora, con el fin de observar con mayor claridad en donde se presentaron los valores máximos, primordialmente de eficiencia, iluminancia, frecuencia y potencia de salida.

Tabla 4-3. Tabla de comparación de medidas teniendo como referencia el tamaño de esferas.

VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS OBTENIDOS DE ACUERDO A TAMAÑOS DE ESFERAS						
TAMAÑO DE ESFERAS		**EFICIENCIA [%]**	**LUXES [lux]**	**FRECUENCIA [kHz]**	**POTENCIA DE SALIDA [W]**	**NUMERO DATOS**
GRANDE	**Mínimo**	2,95	0,10	660,50	0,8109	378
	Máximo	93,65	2720,00	4292,00	6,4237	378
MEDIANA	**Mínimo**	0,00	0,00	719,90	0,0000	378
	Máximo	67,15	2950,00	2471,00	6,6479	378
PEQUEÑA	**Mínimo**	0,00	0,00	774,00	0,0000	378
	Máximo	76,89	5050,00	21020,00	8,3407	378
TOTAL	**Mínimo**	0,00	0,00	660,50	0,0000	378
	Máximo	93,65	5050,00	21020,00	8,3407	378

En la Tabla 4-3, se realiza una comparación de las diferentes medidas solo teniendo en cuenta el tamaño de esferas, sin importar en que configuración que se encuentre. Se puede observar los valores máximos, como por ejemplo el de la eficiencia que se presenta con el tamaño de la esfera grande (sombreado en color amarillo), pero el mayor nivel de iluminancia se muestra con el tamaño de la esfera pequeña, al igual que la mayor potencia de salida y frecuencia (sombreado en color

amarillo). Cabe mencionar nuevamente, que son solo valores máximos obtenidos y además no significa que se puede concluir cual tamaño de esfera es la más adecuada para el prototipo de la bobina de Tesla.

Tabla 4-4. Tabla de comparación de medidas teniendo como referencia el número de vueltas en bobinas.

VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS OBTENIDOS DE ACUERDO A NÚMERO DE VUELTAS EN BOBINAS						
NUMERO DE VUELTAS		**EFICIENCIA [%]**	**LUXES [lux]**	**FRECUENCIA [kHz]**	**POTENCIA DE SALIDA [W]**	**NUMERO DATOS**
800 VUELTAS	**Mínimo**	2,36	0,02	660,50	0,8102	378
	Máximo	93,65	2700,00	1838,00	6,4023	378
500 VUELTAS	**Mínimo**	7,36	0,20	815,70	0,8117	378
	Máximo	76,89	5050,00	2058,00	8,3407	378
800 VUELTAS	**Mínimo**	0,00	,00	1127,00	0,0000	378
	Máximo	67,15	2110,00	21020,00	5,6624	378
TOTAL	**Mínimo**	0,00	0,00	660,50	0,0000	378
	Máximo	93,65	5050,00	21020,00	8,3407	378

En la Tabla 4-4, se realiza una comparación de medidas con respecto al número de vueltas de las bobinas secundarias, sin embargo, su configuración no importa nuevamente. Para los datos encontrados, se presenta el valor máximo de eficiencia en 800 vueltas, en cambio el de 500 vueltas se presenta la mayor potencia de salida (sombreado en color amarillo). También se encontró que la mayor iluminancia y frecuencia se presenta en el de 300 vueltas (sombreado en color amarillo). Es de aclarar, que en esta tabla se evalúan los puntos más altos y mínimos en función de la importancia del número de vueltas para cada configuración y como se ve, el comportamiento de las medidas al variar las vueltas de cada embobinado.

Tabla 4-5. Tabla de comparación de medidas teniendo como referencia el diámetro de formaletas.

VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS OBTENIDOS DE ACUERDO A DIÁMETRO DE FORMALETAS						
DIAMETRO DE FORMALETAS		**EFICIENCIA [%]**	**LUXES [lux]**	**FRECUENCIA [kHz]**	**POTENCIA DE SALIDA [W]**	**NUMERO DATOS**
2 PULGADA	**Mínimo**	4,06	0,01	660,50	0,8102	378
	Máximo	93,65	5050,00	21020,00	8,3407	378
1(1/2) PULGADA	**Mínimo**	2,95	0,10	761,00	0,8109	378
	Máximo	48,74	905,00	1949,00	4,0769	378
1 PULGADA	**Mínimo**	0,00	0,00	1126,00	0,0000	378
	Máximo	28,09	257,00	4292,00	2,4134	378
TOTAL	**Mínimo**	0,00	0,00	660,50	0,0000	378
	Máximo	93,65	5050,00	21020,00	8,3407	378

En la Tabla 4-5, se puede observar que todos sus valores máximos se encuentran en la formaleta de 2 pulgadas (sombreado en color amarillo), esto nos ayuda a concluir que, al ser las bobinas secundarias más grandes en el diámetro de la formaleta, se presentan mejores condiciones para la transmisión inalámbrica, pero su comportamiento es muy variable, puesto que también se alteran por la presencia de cualquier elemento conductor o la presencia misma del ser humano, debido a que el ser humano también puede ser conductor alterando los campos electromagnéticos.

NOTA: En el CD-ROM adjunto a este proyecto, se encuentra con más detalle los datos especialmente de los valores máximos obtenidos con respecto a la distancia y a la configuración.

4.3. ANALISIS FACTORIAL UNIVARIADO

El análisis factorial univariado es una técnica estadística que nos permite la reducción de datos, las variables observadas se modelan como combinaciones lineales de factores permitiendo observar el grado de significancia y descartar combinaciones que no presentan relevancia. Al utilizar un error $\alpha = 0.05$ utilizamos una confiabilidad del 95% es decir en la siguiente Tabla 4-6 nos enfocamos en el valor de significativo (Sig.) si el valor está por encima de 0.05 se descarta esta combinación y se vuelve a realizar el procedimiento de análisis factorial descartando combinaciones. El proceso de análisis factorial se termina cuando todos los valores significativos obtenidos están menores a $Sig. < 0.05$.

Tabla 4-6. Tabla de análisis factorial inicial.

Realización de pruebas					
Variable dependiente a analizar: EFICIENCIA					
Origen	**Tipo III de suma de cuadrados**	**Grados libertad**	**Media cuadrática**	**Estimación varianza**	**Sig.**
Modelo corregido.	244218,055[a]	804	303,754	3,763	0,000
Intersección.	402925,190	1	402925,190	4991,793	0,000
Tamaño de esferas.	2411,200	2	1205,600	14,936	0,000
Numero de vueltas.	17940,905	2	8970,453	111,134	0,000
Formaleta.	57467,623	2	28733,811	355,980	0,000
Distancia.	30012,956	41	732,023	9,069	0,000
Formaleta; Distancia.	26780,688	82	326,594	4,046	0,000
Numero de vueltas; Distancia.	9055,780	82	110,436	1,368	0,032
Tamaño de esferas; Distancia.	2647,479	82	32,286	0,400	1,000
Numero de vueltas; Formaleta.	16733,092	4	4183,273	51,826	0,000
Tamaño de esferas; Formaleta.	3925,387	4	981,347	12,158	0,000
Tamaño de esferas; Numero de vueltas.	9261,365	4	2315,341	28,684	0,000
Numero de vueltas; Formaleta; Distancia.	31928,318	164	194,685	2,412	0,000
Tamaño de esferas; Formaleta; Distancia.	6788,881	164	41,396	0,513	1,000
Tamaño de esferas; Numero de vueltas; Distancia.	6762,124	164	41,232	0,511	1,000
Tamaño de esferas; Numero de vueltas; Formaleta.	11090,995	7	1584,428	19,629	0,000
Error	23165,931	287	80,718		

Total	695568,098	1092			
Total, corregido	267383,986	1091			
a. R al cuadrado =0 ,913 (R al cuadrado ajustada = 0,671)					

En la Tabla 4-6, al realizar el análisis factorial univariado se puede observar que 3 valores significativos están por encima de 0.05 (sombreado en color amarillo), es decir no presentan importancia en el modelo y debemos realizar nuevamente un análisis factorial excluyendo estas combinaciones. También se puede observar que, en las tres combinaciones geométricas a eliminar, predomina el tamaño de esferas al igual que la distancia por lo tanto son variables que en el modelo son de baja importancia.

Tabla 4-7. Tabla de análisis factorial.

Realización de pruebas					
Variable dependiente a analizar: EFICIENCIA					
Modelo corregido.	**Tipo III de suma de cuadrados**	**Grados libertad**	**Media cuadrática**	**Estimación varianza**	**Sig.**
Intersección.	228198,838[a]	394	579,185	10,302	0,000
Tamaño de esferas.	403102,188	1	403102,188	7170,120	0,000
Numero de vueltas.	2418,259	2	1209,130	21,507	0,000
Formaleta.	17941,530	2	8970,765	159,566	0,000
Distancia.	57468,219	2	28734,109	511,104	0,000
Modelo corregido.	32912,335	41	802,740	14,279	0,000
Formaleta; Distancia.	26792,423	82	326,737	5,812	0,000
Numero de vueltas; Distancia.	11198,355	82	136,565	2,429	0,000
Numero de vueltas; Formaleta.	16733,092	4	4183,273	74,409	0,000
Tamaño de esferas; Formaleta.	3925,387	4	981,347	17,456	0,000
Tamaño de esferas; Numero de vueltas.	9261,365	4	2315,341	41,184	0,000
Numero de vueltas; Formaleta; Distancia.	31674,020	164	193,134	3,435	0,000

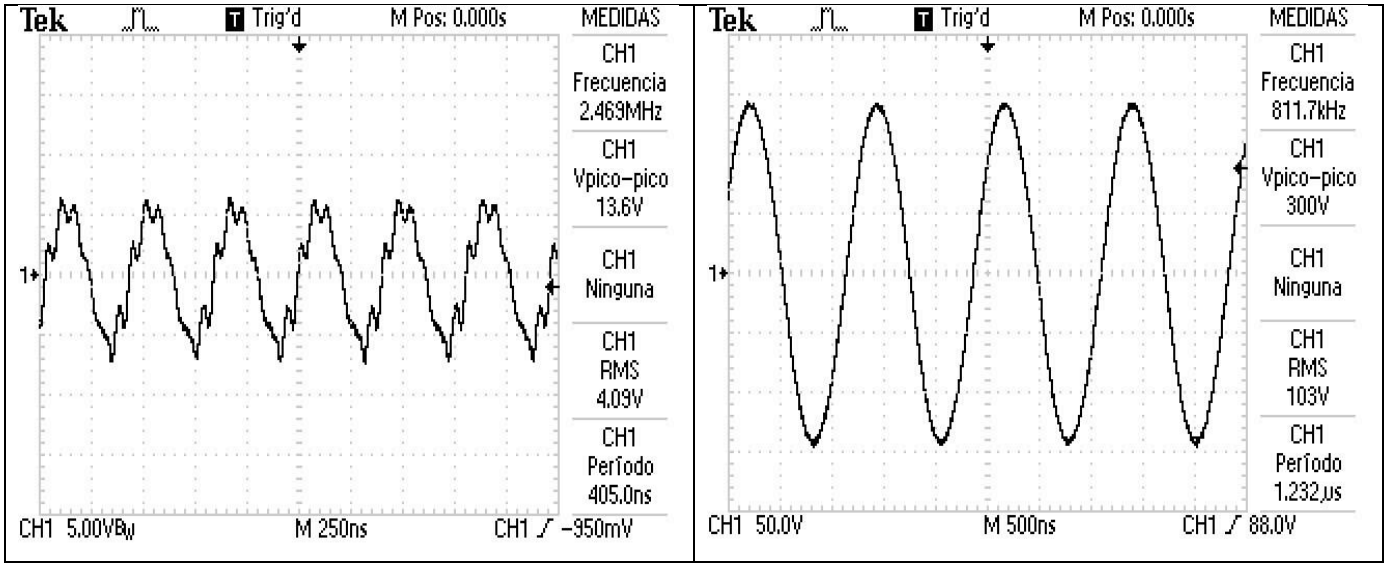
Tamaño de esferas; Numero de vueltas; Formaleta.	11090,995	7	1584,428	28,183	0,000
Error	39185,148	697	56,220		
Total	695568,098	1092			
Total, corregido	267383,986	1091			
a. R al cuadrado = 0,853 (R al cuadrado ajustada =0,771)					

En la Tabla 4-7, después de realizar de nuevo el análisis factorial univariado eliminando las combinaciones que no presentan significancia, se observa que ningún valor significativo supera el valor de error $\alpha = 0.05$ es decir $Sig. < 0.05$ y estas combinaciones que quedan si representan importancia en el proyecto realizado. Se puede concluir que las variables geométricas más importantes para las diferentes combinaciones, es el número de vueltas y el tamaño de la formaleta, puesto que se ve referenciado en la mayoría de los casos propuestos en la tabla. Sin embargo, el número de vueltas presenta una importancia elevada, ya que siempre presenta una mayor media cuadrática cuando se combina con la formaleta y tamaño de esfera. Para el caso del tamaño de esfera presenta una importancia leve, pero no se debe despreciar ya que, influye en la frecuencia de operación que se está sometiendo la carga.

4.3.1. COMPORTAMIENTO DE LA ONDA EN LA CARGA

El comportamiento de la onda que presento en la carga resistiva fue muy variable y con bastante distorsión, especialmente cuando procedía a cambiar la distancia de las bobinas receptoras con respecto a la bobina transmisora. Las ondas que por lo general presentaban mayor distorsión fueron cuando la tensión en la carga era mínima y se encontraba a una alta frecuencia. Sin embargo, a medida que la tensión aumentaba y la potencia de salida también, se encontraron señales que presentaban una mejor forma sinusoidal y la frecuencia tendía a disminuir; en la Tabla 4-8, se puede observar algunas imágenes referentes. Es de resaltar, que cuando las ondas presentaban una distorsión considerable, se encontraban puntos muy bajos de eficiencia y, por el contrario, cuando se evidenciaban ondas con tendencia a presentar un comportamiento sinusoidal eran los puntos más altos de eficiencia y con una frecuencia relativamente baja.

Tabla 4-8. Tabla de comparativa de imágenes capturadas por el osciloscopio



4.3.2. GRAFICAS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA

Al realizar el Test de Scheffé, permite evidenciar las configuraciones más importantes a tener a consideración, por lo tanto, ayuda a enfocar esencialmente en casos que sean más útiles para el análisis con respecto al comportamiento de la iluminancia, eficiencia y potencia de salida, en función de la distancia. Por lo tanto, se grafican las configuraciones 1, 4, 5 y 6, respectivamente para evidenciar el comportamiento a diferentes distancias.

En la Figura 4-4, se comparan las configuraciones 6,5 y 4, que tuvieron mayor relevancia, dichas configuraciones se evaluaron entre la iluminancia y la distancia. En el caso de la configuración 6, presenta un valor mayor en iluminancia con respecto a las otras configuraciones, pero se evidencia de igual forma que a distancias grandes su poder lumínico en la carga baja considerablemente. Para el caso de las configuraciones 5 y 4, se evidencia que tienen un comportamiento muy similar en valores de iluminancia y que a son buenos modelos para la transmisión inalámbrica a distancias más grandes que la configuración 6, aunque su poder lumínico baje considerablemente.

Figura 4-4. Grafica de la Iluminancia en sus tres mejores configuraciones.

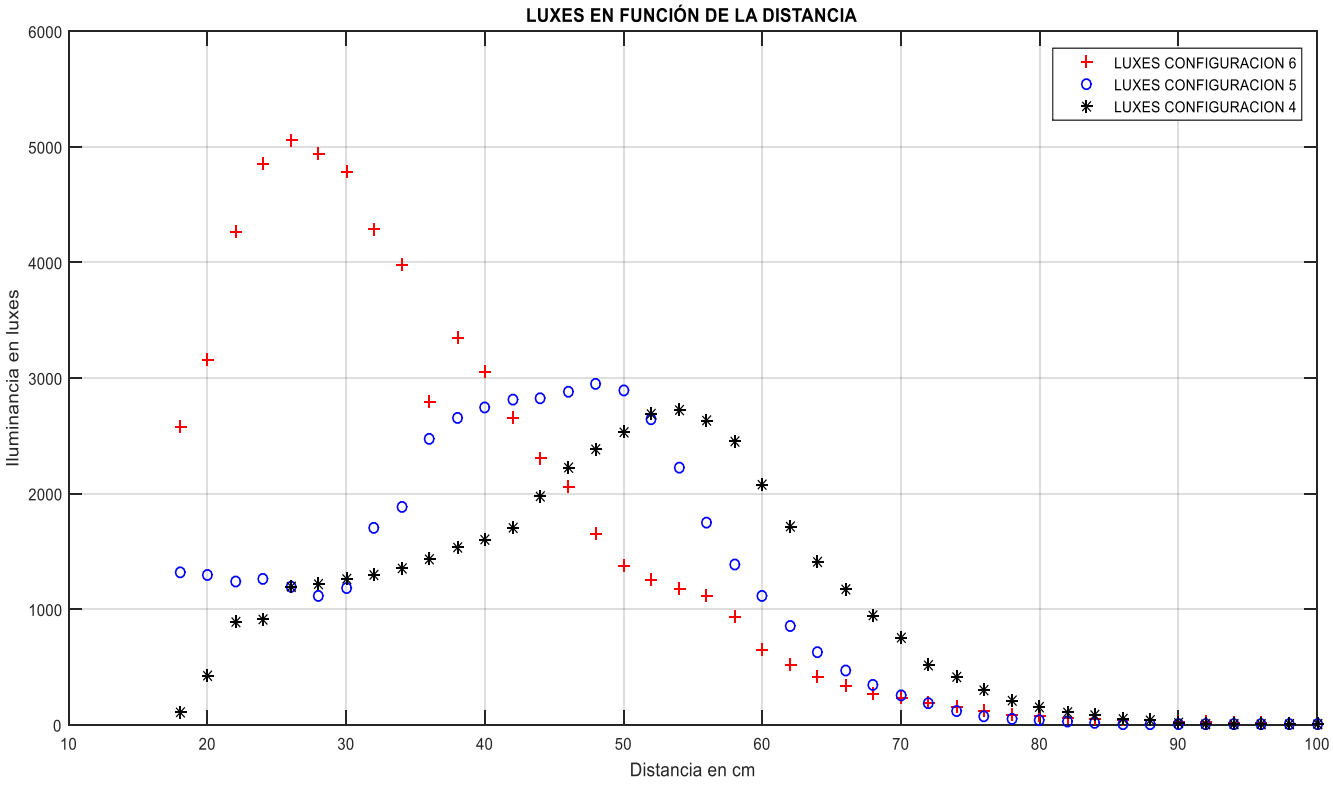
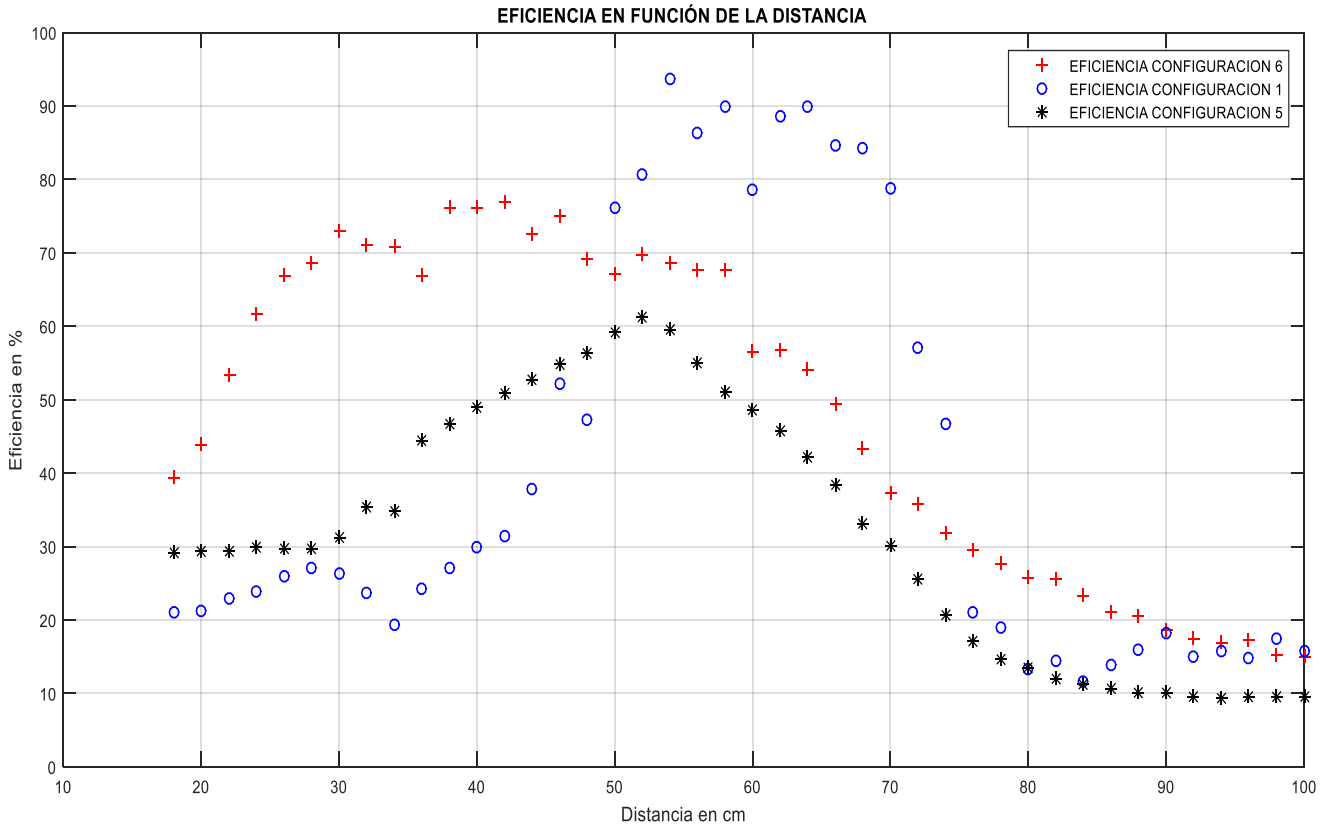


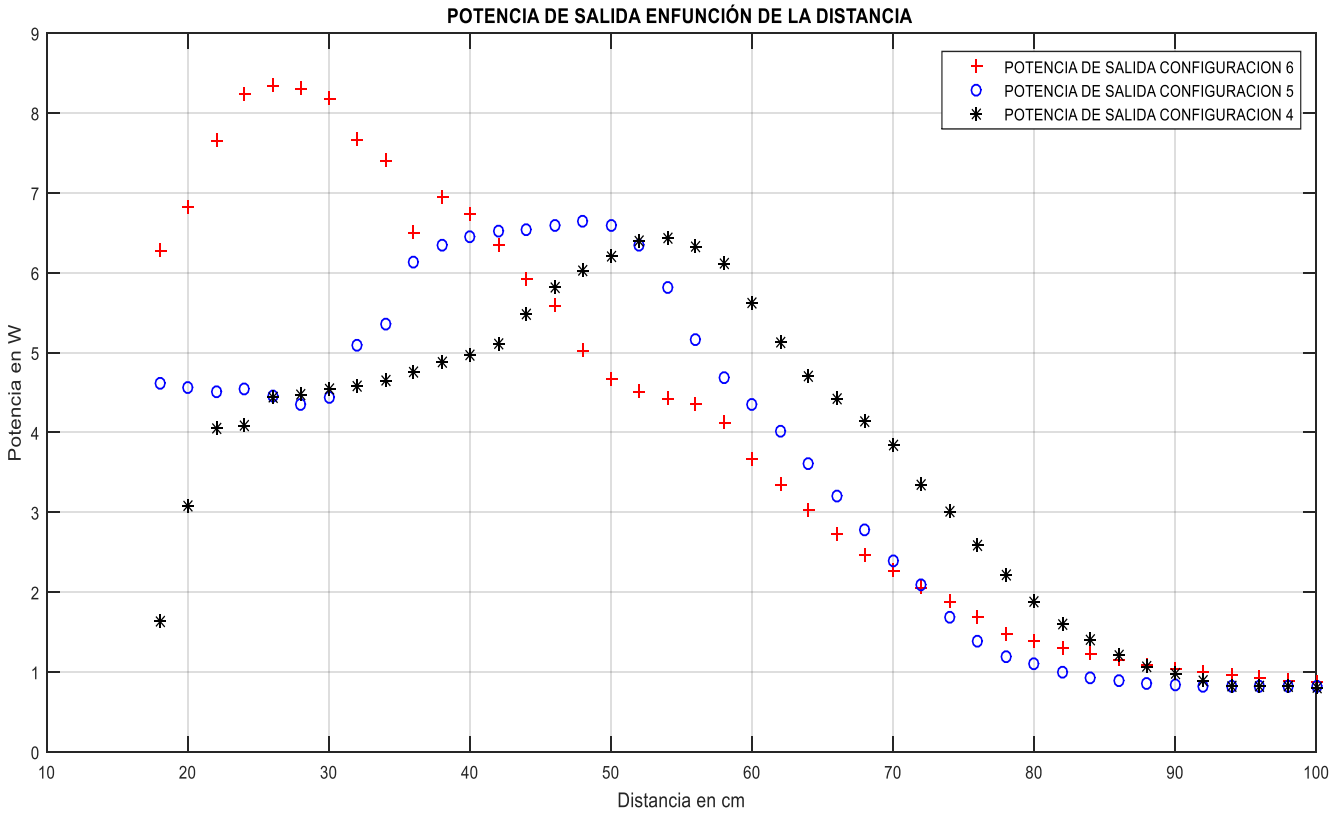
Figura (4-5), se comparan las configuraciones 1, 5, 6, que presentaron mejores eficiencias, ya que presentaron un mayor grado de importancia en el test. Se puede observar en la configuración 1, si bien es la que presenta valores máximos, tiende a sufrir fácilmente variaciones siendo un problema debido a que sus datos no presentan similitud o muy dispersos; las configuraciones 5 y 6, presentan un mejor comportamiento y casi uniforme entre ellas a partir de la distancia de 60 cm, que corresponde a la separción entre la bobina transmisora con respecto a las receptoras.

|**Figura 4-5**. Grafica de la Eficiencia en sus 3 mejores configuraciones.



En la Figura 4-6, se comparan las configuraciones que presentaron mejores potencias de salida en la carga según el estudio realizado por el Test de Scheffé, siendo las configuraciones 6, 4 y 5, con grado de importancia en el respectivo orden. Se puede observar en la configuración 4, un buen comportamiento en función de la distancia, aunque su valor de potencia no sea mayor al valor de las otras configuraciones, tiende a una regularidad a diferentes distancias. Para el caso de la configuración 5 presentan valores de potencia muy dispersos en diferentes distancias, que no demuestra una buena confiabilidad. En la configuración 6, se encuentran valores de potencia mayores a diferencia de las otras configuraciones, pero se sigue presentando que dicha configuración a grandes distancias, disminuye la potencia que le entrega a la carga.

Figura 4-6. Grafica de la Potencia de salida en sus tres mejores configuraciones.



En las últimas tres graficas presentadas, se puede ver la presencia de las configuraciones 4, 5 y 6 dándonos a entender la importancia que estas presentan en el proyecto, y merecen un estudio más profundo para futuras investigaciones. Es de resaltar que la configuración 6 fue la más importante de todas, esta configuración está conformada por un embobinado de 500 vueltas en la bobina secundaria, tamaño de esfera pequeña y formaleta de 2 pulgadas, lo interesante de esta configuración es que no tiene los valores máximos empleados en el proyecto los cuales fueron (embobinado de 800 vueltas ni tampoco el tamaño de esfera más grande) solamente el tamaño de formaleta más grande.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se construyó un prototipo de la bobina de Tesla para alimentar una carga resistiva, en el desarrollo del prototipo se evidencia los efectos de la temperatura en el circuito electrónico específicamente en el transistor. Se comprobó que, al variar las formas geométricas constructivas de la bobina de Tesla, especialmente en el circuito secundario compuesto por la bobina transmisora, el tamaño de la formaleta, numero de vueltas en el embobinado y el tamaño del toroide tienen un efecto significativo al alimentar la carga resistiva, dándonos a entender que esto juega un factor importante para la transmisión inalámbrica de energía eléctrica.

- Al mantener la bobina primaria fija con respecto a las bobinas transmisoras, especialmente al cambiar el tamaño de la formaleta de las mismas, el acoplamiento mutuo disminuye considerablemente entre la bobina primaria y secundaria. Esto provoca que los resultados obtenidos en la carga no sean eficientes, tal como se observa en las configuraciones con formaleta de 1 pulgada. A medida que cambiamos el tamaño de formaleta específicamente disminuyendo, con la formaleta de 1 pulgada, se presentan los valores menos eficientes especialmente en la configuración 27 (formaleta de 1 pulgada, tamaño de esfera pequeña y embobinado de 300 vueltas), donde no se logró encender el bombillo.

- Las pruebas estadísticas son de gran utilidad para entender fenómenos con base en toma de datos y proyectos experimentales. Gracias al Test de Scheffé se pudo clasificar las configuraciones realizadas de la más eficiente a la menos eficiente; la configuración más eficiente fue la 6 (formaleta de 2 pulgadas, tamaño de esfera pequeña y embobinado de 500 vueltas), dándonos a entender que, si bien el tamaño de la esfera es importante, no necesariamente la más grande es la que mejor comportamiento presenta. El prototipo de la bobina de Tesla en este caso tiende a ser más un acoplamiento inductivo que capacitivo, presentando mayor homogeneidad en los datos obtenidos.

- Se pudo observar también en el Test de Scheffé que las mediciones realizadas en los tres tipos de formaleta, el mejor comportamiento de eficiencia en cada formaleta coincidieron las mismas variables geométricas, es decir mismo número de vueltas al igual que mismo tamaño de esfera, dándonos a tener una idea, donde la mejor combinación posible entre tamaño de esferas con número de vueltas es 500 vueltas de embobinado con tamaño de

esfera pequeña, estos mismos comportamientos se presentaron para la iluminancia, potencia de salida y frecuencia.

- El tamaño de las esferas juega un papel importante para el manejo de la frecuencia de operación en la carga, puesto que al aumentar el tamaño de la esfera, aumenta la parte capacitiva en el circuito secundario y disminuye la frecuencia de operación en la carga; pero al aumentar la carga capacitiva o el tamaño de la esfera al igual que el de la bobina transmisora, este empieza a tener un comportamiento inestable puesto que se ve afectado por distintos elementos conductores que se encuentren alrededor.

- Realizando el análisis factorial univariado nos permite observar cuales de las variables geométricas pueden presentar mayor relevancia al realizar combinaciones, concluyendo que el número de vueltas al igual que el diámetro de la formaleta son las variables geométricas más importantes, resaltando el número de vueltas por encima de la formaleta, puesto que, al realizar combinaciones con el tamaño de la esfera, el número de vueltas del embobinado es el que presenta un mayor valor en su media cuadrática.

5.2. RECOMENDACIONES

Cuando se realice un proyecto de grado que involucre construcción de prototipos eléctricos, es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Para realizar este tipo de pruebas deben estar presente preferiblemente más de una persona, nunca manejar el equipo sin conocer el principio de funcionamiento y peligros relacionados con las altas tensiones producidas en el circuito secundario.
- No realizar pruebas con la bobina de Tesla especialmente en recintos cerrados sin contar con los conocimientos necesarios, ya que esta puede provocar quemaduras internas debido a los arcos eléctricos que esta provoca por su alta tensión.
- Se debe estar controlando constantemente el circuito electrónico, debido a los altos niveles de temperatura que se presentan en el transistor encargado de realizar la conmutación.

5.3. TRABAJOS FUTUROS

El aporte principal de esta tesis, fue realizar un estudio de sus variables geométricas constructiva; en futuras investigaciones se espera que se complemente estos temas realizando un circuito electrónico más robusto y en un espacio más grande, al igual que enfocarse en la bobina primaria para el estudio de la inducción mutua entre el bobinado primario y secundario. También se debe enfocar en diferentes tipos de conexiones de la carga, por ejemplo, ya no con dos bobinas

receptoras, sino solo con una bobina receptora a un punto de la carga y en el otro extremo de la misma ir conectado a tierra.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, Charles K. and Matthew N. O. Sadiku. 2006. *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. McGraw-Hill.

- Aziz, Pusparini Dewi Abd, Ahmad Lukhfhy Abd Razak, Mohd Izhar Abu Bakar, and Nulida Ab. Aziz. 2016. "A Study on Wireless Power Transfer Using Tesla Coil Technique." Pp. 34–40 in *2016 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*. IEEE.

- Barco, Héctor, Ríos Edilberto Rojas, Calderón Elisabeth, and Restrepo Parra. n.d. *FÍSICA Principios de Electricidad y Magnetismo*.

- Branimir. n.d. "SpigelLab Tesla's Experiments, Free Energy, Overunity ..." Retrieved March 12, 2019 (https://www.spigellab.com/).

- Chabalko, Matthew J., Mohsen Shahmohammadi, and Alanson P. Sample. 2017. "Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer."

- Chae, DongJu and YoungSeok Kim. 2018. "Analysis for Electrical and Thermal Hazard in KW-Class Wireless Power Transmission Environment." Pp. 1–5 in *2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow)*. IEEE.

- Currents, Eddy. n.d. "Foucault – Eddy Currents Campos Electromagnéticos Cuasiestacionaria En Conductores." 1–6.

- Garnica, Jaime, Raul A. Chinga, and Jenshan Lin. 2013. "Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field." *Proceedings of the IEEE* 101(6):1321–31.

- Hayt, William H. and John A. Buck. 2006. *Teoría Electromagnética*. McGraw-Hill/Interamerica.

- José Pérez. 2010. "ELECTRICIDAD INALÁMBRICA." Universidad Tecnologica de Pereira.

- Krbal, Michal and Petr Siuda. 2015. "Design and Construction Solution of Laboratory Tesla Coil." *Undefined*.

- Mitch Tilbury. n.d. *The_ULTIMATE_Tesla_Coil_Design*. 2008 The McGraw-Hill Companies.

- Recomendaci, La, Esta Recomendaci, La Recomendaci, Esta Recomendaci, Esta Recomendaci, and Esta Recomendaci. 2016. "ITU-T."

- Sarwar, Muhammad Bilal, Perumal Nallagownden, Zuhairi Baharudin, and Mohana Sundaram Muthuvalu. 2016. "Review of Different Techniques Used for Wireless Transmission of Electrical Energy" edited by Z. A. Abdul Karim, Z. Hj Baharudin, M. F. Basrawi, M. M. Rahman, and M. Mat Noor. *MATEC Web of Conferences* 38:01005.

- Serway, Raymond A. and Larry D. Kirkpatrick. 1988. *Física Para Ciencias e Ingeniería V1*. Vol. 26.

- Skvarca, Jorge. 2006. "Artículos e Informes Especiales / Articles and Special Reports Normas y Estándares Aplicables a Los Campos Electromagnéticos de Radiofrecuencias En América Latina : Guía Para Los Límites de Exposición y Los Protocolos de Medición." 20(figura 1):205–12.

7. ANEXOS

Anexo 1

LUXES					
CONFIGURACIÓN	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Configuración_27	42	0,0000			
Configuración_26	42	0,5667			
Configuración_25	42	1,1886			
Configuración_19	42	7,9729			
Configuración_21	42	23,0667			
Configuración_20	42	25,6857			
Configuración_23	42	41,1117			
Configuración_10	42	42,1429			
Configuración_9	42	43,3605			
Configuración_24	42	72,6143			
Configuración_22	42	99,6429			
Configuración_12	42	115,9483	115,9483		
Configuración_18	42	134,2960	134,2960		
Configuración_11	42	135,7200	135,7200		
Configuración_17	42	155,4095	155,4095		
Configuración_13	42	159,2143	159,2143		
Configuración_8	42	186,6157	186,6157		
Configuración_16	42	197,2476	197,2476		
Configuración_14	42	267,3571	267,3571		
Configuración_15	42	342,9048	342,9048		
Configuración_7	42	355,4071	355,4071		
Configuración_2	42	507,6905	507,6905	507,6905	

Configuración_3	42	571,7710	571,7710	571,7710	
Configuración_1	42		787,3740	787,3740	
Configuración_4	42			1059,5705	1059,5705
Configuración_5	42			1110,5476	1110,5476
Configuración_6	42				1544,8810
Valor Significativo		0,405	0,072	0,265	0,811

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Anexo 2

POTENCIA DE SALIDA [W]									
		Subconjunto para alfa = 0.05							
CONFIGURACIÓN	**N**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Configuración_27	42	0,000000							
Configuración_26	42	0,718229	0,718229						
Configuración_25	42	0,819712	0,819712						
Configuración_19	42	0,873898	0,873898	0,873898					
Configuración_21	42	0,990990	0,990990	0,990990					
Configuración_20	42	1,009679	1,009679	1,009679					
Configuración_9	42	1,021557	1,021557	1,021557					
Configuración_23	42	1,123205	1,123205	1,123205	1,123205				
Configuración_10	42	1,127295	1,127295	1,127295	1,127295				
Configuración_24	42	1,324671	1,324671	1,324671	1,324671				
Configuración_8	42	1,476750	1,476750	1,476750	1,476750	1,476750			
Configuración_22	42	1,501038	1,501038	1,501038	1,501038	1,501038			
Configuración_12	42		1,581524	1,581524	1,581524	1,581524			
Configuración_18	42		1,636538	1,636538	1,636538	1,636538			
Configuración_11	42		1,645276	1,645276	1,645276	1,645276			

Configuración_17	42		1,733098	1,733098	1,733098	1,733098	1,733098		
Configuración_13	42		1,872026	1,872026	1,872026	1,872026	1,872026		
Configuración_7	42		1,947978	1,947978	1,947978	1,947978	1,947978		
Configuración_16	42		1,994005	1,994005	1,994005	1,994005	1,994005		
Configuración_14	42			2,338388	2,338388	2,338388	2,338388	2,338388	
Configuración_15	42				2,548712	2,548712	2,548712	2,548712	2,548712
Configuración_2	42				2,569043	2,569043	2,569043	2,569043	2,569043
Configuración_3	42					2,913521	2,913521	2,913521	2,913521
Configuración_1	42						3,209936	3,209936	3,209936
Configuración_5	42							3,621643	3,621643
Configuración_4	42							3,697033	3,697033
Configuración_6	42								4,057547
Valor Significativo		0,055	0,363	0,081	0,097	0,106	0,071	0,207	0,050

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Anexo 3

FRECUENCIA [kHz]			
CONFIGURACIÓN	**N**	**Subconjunto para alfa = 0.05**	
		1	**2**
Configuración_1	42	799,8571	
Configuración_2	42	863,4905	
Configuración_3	42	889,4452	
Configuración_10	42	901,6024	
Configuración_4	42	938,7048	
Configuración_11	42	964,2881	
Configuración_5	42	1007,9143	
Configuración_6	42	1023,3822	
Configuración_12	42	1026,8452	

Configuración_13	42	1192,5952	
Configuración_7	42	1223,2619	
Configuración_14	42	1280,0000	
Configuración_19	42	1306,3095	
Configuración_8	42	1324,5476	
Configuración_20	42	1389,6905	
Configuración_15	42	1392,8571	
Configuración_21	42	1473,2381	
Configuración_16	42	1601,7619	
Configuración_22	42	1704,2619	
Configuración_17	42	1728,9048	
Configuración_23	42	1830,3571	
Configuración_18	42	1911,9048	
Configuración_24	42	2012,1905	
Configuración_25	42	2329,0714	
Configuración_26	42	2429,3810	
Configuración_27	42	2672,7619	
Configuración_9	42		7702,7143
Valor Significativo		1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.