

Abstract

Este trabajo presenta un esquema conceptual exhaustivo de un dispositivo electromagnético inspirado en las concepciones y experimentos de Nikola Tesla, desarrollado a partir de fuentes históricas y científicas sin conflicto de interés. El documento aborda los principios físicos subyacentes, el diseño modular, la selección de materiales, la disposición geométrica, la interacción con el medio y los parámetros operativos, integrando tanto aspectos teóricos como consideraciones de prototipo y ensamblaje conceptual. Se incluyen las bases de resonancia eléctrica y mecánica, el papel de la geometría en la concentración y transmisión de energía, y las estrategias de seguimiento de parámetros críticos para la estabilidad del sistema. La finalidad del análisis es establecer un modelo estructurado y reproducible que conserve la esencia experimental de Tesla y su aproximación holística a los campos electromagnéticos.

Palabras clave Nikola Tesla; resonancia; inductancia; capacitancia; transmisión inalámbrica de energía; prototipo electromagnético; arquitectura toroidal; campo eléctrico; campo magnético; seguimiento operacional.

Introducción

La figura de Nikola Tesla representa una convergencia singular entre intuición experimental y precisión física. Sus dispositivos, muchas veces adelantados décadas a su tiempo, no sólo introdujeron nuevas formas de generación y transmisión de energía, sino que redefinieron el papel de la resonancia y la geometría en la ingeniería electromagnética.

El objetivo de este artículo es desarrollar, desde una perspectiva científica rigurosa, un esquema conceptual de dispositivo inspirado en su legado, tomando como base principios comprobados y descripciones técnicas documentadas por Tesla y por investigadores posteriores de reconocida solvencia sin conflictos de interés. La propuesta abarca desde la fundamentación teórica hasta la estructuración del prototipo, pasando por la definición de módulos funcionales y sus interacciones.

El enfoque adoptado evita referencias a organismos o expertos cuyas conclusiones se vean condicionadas por intereses corporativos o regulatorios, centrándose en observaciones empíricas y documentación original, así como en replicaciones experimentales verificadas.

Contexto histórico-científico de Tesla y sus dispositivos

La obra de Tesla está marcada por un patrón recurrente: la explotación de la resonancia para maximizar la eficiencia energética. Sus desarrollos más emblemáticos, como la bobina Tesla, el transmisor amplificador y los sistemas de transmisión inalámbrica de energía, se basaban en la sincronización precisa de oscilaciones eléctricas con frecuencias naturales del sistema.

Entre sus contribuciones más relevantes para este estudio destacan:

- Control preciso de la inductancia y la capacitancia para alcanzar frecuencias de resonancia elevadas sin pérdidas significativas.
- Uso de geometrías específicas —cilíndricas, toroidales y helicoidales— para focalizar la energía y reducir interferencias.
- Separación física de etapas de generación y radiación, lo que permitía modular la potencia sin comprometer la estabilidad.
- Aplicación de materiales de alta conductividad y baja pérdida dieléctrica para optimizar la transmisión.

Históricamente, Tesla insistió en que el diseño de un dispositivo electromagnético debía considerarse un ecosistema en sí mismo, donde cada elemento influía en la dinámica total. Este enfoque es especialmente relevante para el esquema que aquí se propone.

Fundamentos físicos y electromagnéticos relevantes

El funcionamiento del dispositivo conceptual propuesto se sustenta en tres pilares de la física electromagnética que Tesla consideraba inseparables: resonancia, inducción y geometría de campo. A continuación se detallan los principios clave que guiarán el diseño.

Resonancia

- Resonancia eléctrica: ocurre cuando la frecuencia natural del circuito coincide con la frecuencia de excitación, permitiendo una transferencia máxima de energía entre el campo eléctrico y el magnético. En un sistema LC (inductancia-capacitancia), la frecuencia de resonancia se calcula como $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, donde L es la inductancia total y C la capacitancia total.

- Tesla solía trabajar en el rango de decenas a cientos de kilohertzios para optimizar la formación de arcos eléctricos y campos de alta tensión sin pérdidas excesivas por calor.

Inducción y acoplamiento

- Inducción primaria-secundaria: el acoplamiento magnético entre bobinas es el mecanismo de transferencia de energía. En el prototipo, este acoplamiento no será maximizado al 100%, sino ajustado a un coeficiente de acoplamiento k entre 0,2 y 0,4, lo que Tesla consideraba ideal para evitar retroalimentaciones destructivas.
- Inducción mutua controlada: mediante variación mecánica o electrónica de la distancia y orientación entre bobinas.

Geometría de campo

- Geometrías helicoidales y toroidales permiten la concentración del flujo magnético y la minimización de pérdidas por radiación no deseada.
- El uso de toroides puede reducir emisiones parásitas y enfocar el campo en zonas de carga o transmisión.

Diseño conceptual del dispositivo

El dispositivo se concibe como un sistema modular compuesto por tres bloques principales:

1. Módulo de excitación primaria

- Función: Generar un campo magnético oscilante a la frecuencia de resonancia.
- Componentes: bobina primaria, condensador de alta tensión, interruptor mecánico o electrónico de alta velocidad.
- Materiales recomendados: cobre electrolítico de alta pureza (conductividad $> 101\%$ IACS) para bobinas; dieléctricos de mica o cerámica de baja pérdida para condensadores.

2. Módulo de amplificación y transformación

- Función: Elevar la tensión y modificar la distribución espacial del campo.

- Componentes: bobina secundaria de gran número de espiras, dispuesta de forma helicoidal o en doble hélice, con geometría calculada para máxima inductancia sin auto-capacitancia excesiva.
- Consideraciones: mantener un ángulo de paso constante y separación homogénea de espiras para evitar formación de puntos calientes de tensión.

3.Módulo de emisión o carga

- Función: Transferir la energía a un sistema receptor o a un medio (por ejemplo, iluminación inalámbrica, excitación de plasma).
- Componentes: terminales esféricos o toroidales, estructuras resonantes auxiliares para modulación.
- Ejemplo Tesla: toroides de cobre o aluminio pulido con radios curvados para minimizar pérdidas por corona.

Descripción del prototipo y ensamblaje al estilo Tesla

Configuración física

El prototipo tendría una base circular de material dieléctrico rígido (baquelita, madera tratada o composite moderno), con soporte central para la bobina secundaria y fijaciones no metálicas para evitar distorsión de campo.

Vista conceptual en texto:

```
[ Módulo de emisión (toroide/esfera) ]
  ||
  [ Bobina secundaria ]
  ||
  [ Bobina primaria + condensador ]
  ||
  [ Fuente de alimentación controlada ]
  ||
  [ Base dieléctrica ]
```

Ensamblaje paso a paso

- 1.Preparación de la base: cortar un disco de 60–80 cm de diámetro y 3–4 cm de grosor, taladrar puntos de fijación y canalización de cableado.
- 2.Construcción de la bobina secundaria: enrollar 800–1200 espiras de cobre esmaltado calibre 22–26 AWG sobre un tubo de soporte no conductor (PVC, acrílico, madera torneada). Lacar para fijar el devanado.

3. Bobina primaria: enrollar 5–10 espiras de cobre tubular (6–8 mm de diámetro) sobre un soporte circular con separadores de 1 cm.
4. Condensador de alta tensión: emplear bancos de condensadores de mica o cerámica conectados para alcanzar la capacitancia calculada para resonancia.
5. Módulo de emisión: fabricar un toroide de aluminio o cobre de 30–50 cm de diámetro, pulirlo y fijarlo a la parte superior de la bobina secundaria.
6. Interconexión: usar conductores trenzados de baja inductancia para la conexión entre primaria y condensador.
7. Sistema de seguimiento: instalar sondas de tensión y corriente no invasivas, y sensores de campo para registrar comportamiento en tiempo real.

Fundamentos físicos y electromagnéticos relevantes

El funcionamiento del dispositivo conceptual propuesto se sustenta en tres pilares de la física electromagnética que Tesla consideraba inseparables: resonancia, inducción y geometría de campo. A continuación se detallan los principios clave que guiarán el diseño.

Resonancia

- **Resonancia eléctrica:** ocurre cuando la frecuencia natural del circuito coincide con la frecuencia de excitación, permitiendo una transferencia máxima de energía entre el campo eléctrico y el magnético. En un sistema LC (inductancia-capacitancia), la frecuencia de resonancia se calcula como $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, donde L es la inductancia total y C la capacitancia total.
- Tesla solía trabajar en el rango de decenas a cientos de kilohertzios para optimizar la formación de arcos eléctricos y campos de alta tensión sin pérdidas excesivas por calor.

Inducción y acoplamiento

- **Inducción primaria-secundaria:** el acoplamiento magnético entre bobinas es el mecanismo de transferencia de energía. En el prototipo, este acoplamiento no será maximizado al 100%, sino ajustado a un coeficiente de acoplamiento k entre 0,2 y 0,4, lo que Tesla consideraba ideal para evitar retroalimentaciones destructivas.
- **Inducción mutua controlada:** mediante variación mecánica o electrónica de la distancia y orientación entre bobinas.

Geometría de campo

- Geometrías helicoidales y toroidales permiten la concentración del flujo magnético y la minimización de pérdidas por radiación no deseada.
- El uso de toroides puede reducir emisiones parásitas y enfocar el campo en zonas de carga o transmisión.

Diseño conceptual del dispositivo

El dispositivo se concibe como un sistema modular compuesto por tres bloques principales:

1. Módulo de excitación primaria

- **Función:** Generar un campo magnético oscilante a la frecuencia de resonancia.
- **Componentes:** bobina primaria, condensador de alta tensión, interruptor mecánico o electrónico de alta velocidad.
- **Materiales recomendados:** cobre electrolítico de alta pureza (conductividad $> 101\%$ IACS) para bobinas; dieléctricos de mica o cerámica de baja pérdida para condensadores.

2. Módulo de amplificación y transformación

- **Función:** Elevar la tensión y modificar la distribución espacial del campo.
- **Componentes:** bobina secundaria de gran número de espiras, dispuesta de forma helicoidal o en doble hélice, con geometría calculada para máxima inductancia sin auto-capacitancia excesiva.
- **Consideraciones:** mantener un ángulo de paso constante y separación homogénea de espiras para evitar formación de puntos calientes de tensión.

3. Módulo de emisión o carga

- **Función:** Transferir la energía a un sistema receptor o a un medio (por ejemplo, iluminación inalámbrica, excitación de plasma).
- **Componentes:** terminales esféricos o toroidales, estructuras resonantes auxiliares para modulación.

- Ejemplo Tesla: toroides de cobre o aluminio pulido con radios curvados para minimizar pérdidas por corona.

Descripción del prototipo y ensamblaje al estilo Tesla

Configuración física

El prototipo tendría una base circular de material dieléctrico rígido (baquelita, madera tratada o composite moderno), con soporte central para la bobina secundaria y fijaciones no metálicas para evitar distorsión de campo.

Vista conceptual en texto:

```
[ Módulo de emisión (toroide/esfera) ]
  ||
  [ Bobina secundaria ]
  ||
  [ Bobina primaria + condensador ]
  ||
  [ Fuente de alimentación controlada ]
  ||
  [ Base dieléctrica ]
```

Ensamblaje paso a paso

- 1.Preparación de la base: cortar un disco de 60–80 cm de diámetro y 3–4 cm de grosor, taladrar puntos de fijación y canalización de cableado.
- 2.Construcción de la bobina secundaria: enrollar 800–1200 espiras de cobre esmaltado calibre 22–26 AWG sobre un tubo de soporte no conductor (PVC, acrílico, madera torneada). Lacar para fijar el devanado.
- 3.Bobina primaria: enrollar 5–10 espiras de cobre tubular (6–8 mm de diámetro) sobre un soporte circular con separadores de 1 cm.
- 4.Condensador de alta tensión: emplear bancos de condensadores de mica o cerámica conectados para alcanzar la capacitancia calculada para resonancia.
- 5.Módulo de emisión: fabricar un toroide de aluminio o cobre de 30–50 cm de diámetro, pulirlo y fijarlo a la parte superior de la bobina secundaria.
- 6.Interconexión: usar conductores trenzados de baja inductancia para la conexión entre primaria y condensador.
- 7.Sistema de seguimiento: instalar sondas de tensión y corriente no invasivas, y sensores de campo para registrar comportamiento en tiempo real.

Fundamentos físicos ampliados con parámetros históricos y fórmulas de diseño

Rango típico de operación en diseños Tesla

Los cuadernos de Colorado Springs (1899–1900) y conferencias previas de Tesla describen frecuencias de trabajo desde decenas hasta varios cientos de kHz, con tensiones en el terminal superior que podían sobrepasar el MV en condiciones de laboratorio (espiras secundarias altas, terminal esférico o toroidal de gran radio de curvatura, y excelente calidad dieléctrica del aire). Las bobinas secundarias solían tener centenares a millares de espiras de hilo fino esmaltado, mientras que la primaria se mantenía en pocas espiras de conductor grueso (tubo o cable de cobre) con capacitancias conmutables para sintonía gruesa y acoplamiento magnético k moderado (0,2–0,4).

Relaciones clave de diseño

- Resonancia serie primaria (LC_p):
- Resonancia secundaria ($LC_s + C_{top}$), donde incluye la capacitancia del toroide/esfera y la auto-capacitancia del devanado:
- Inductancia de solenoide (fórmula de Wheeler, válida para relación longitud/diámetro moderada):

con l en pulgadas y N número de espiras.

- Auto-capacitancia de un solenoide de una capa (estimación tipo Medhurst): depende del cociente l/d y del diámetro del devanado; para bobinas altas y delgadas, es del orden de decenas a cientos de pF.

- Capacitancia de un toroide (aprox. para relación grande entre diámetro mayor y menor): del orden de decenas a centenas de pF en tamaños de 20–60 cm; aumenta con el diámetro mayor y con menor sección del toro.

Estas relaciones permiten “cerrar” el problema de sintonía doble (primaria y secundaria) y ajustar el k efectivo mediante distancia e inclinación relativa de bobinas (práctica habitual de Tesla y de replicadores serios).

Especificación de un prototipo de referencia (estilo Tesla)

Objetivo operativo

- Frecuencia objetivo: (ventana clásica, cómoda para descargas visibles y pérdidas moderadas).
- Modo de excitación: ruptura conmutada (spark-gap controlado) u oscilación forzada con interruptor electrónico robusto; se describe primero la opción clásica con chispero para mantener fidelidad histórica al estilo Tesla.
- Tensión en terminal superior (estimada): > 300 kV con alimentación de 5–10 kVA, control de ruptura y puesta a tierra adecuada.

Nota técnica: la estimación de tensión depende fuertemente del Q de ambas etapas, del k y de la distribución de campo alrededor del toroide; más que un número absoluto, interesa proporcionar geometrías y constantes que permitan al lector proyectar su caso.

Geometría secundaria

- Soporte: tubo no conductor (acrílico, PVC de alta rigidez dieléctrica o madera torneada sellada).
- Diámetro del cuerpo: (radio).
- Altura bobinada: (relación , típico de Tesla para limitar).
- Hilo: cobre esmaltado AWG 24 ($\approx 0,51$ mm Ø).
- Número de espiras: (paso uniforme, capa única).
- Barnizado: laca dieléctrica entre capas de bobinado (impregnación parcial) para rigidez y estabilidad mecánica.

Estimaciones:

- Inductancia (Wheeler): para , ,

(orden de magnitud razonable para bobina alta y delgada).

- Auto-capacitancia (Medhurst, orden de magnitud): para , (depende del detalle de soporte y entorno).

- Toroide superior: diámetro mayor , diámetro menor (sección) ; típico.

Tomemos y .

Frecuencia secundaria:

El producto

.

Observación: 20 kHz es demasiado bajo respecto a la meta de 150 kHz; esto ilustra el alto L de un secundario muy alto y con muchas espiras. Para subir la frecuencia, podemos reducir N_s , altura y/o aumentar C_{top} con control; en general, para el secundario debe ser más “compacto” o con menos espiras. Ajustemos a un diseño alternativo.

Ajuste de diseño para en secundaria

- Nueva meta geométrica: (r, h) , con AWG 24.

Wheeler: pulgadas;

Numerador \approx ;

Denominador \approx .

- Capacitancias: C_{top} , toroide mediano .

Tomemos .

Producto .

Con un toroide algo menor (bajando a ~ 80 pF) o reduciendo aún unas decenas de espiras, se alcanza 140–170 kHz. Este es el tipo de iteración que Tesla describía: geometría—sintonía—prueba—seguimiento—ajuste.

Primaria y banco de condensadores

- Primaria: 5–8 espiras de tubo de cobre \varnothing 6–8 mm sobre un diámetro $\sim 1,2$ – $1,5\times$ el del secundario (p. ej., 100 mm). Separación inter-espiras: 8–12 mm.

- Inductancia primaria (Wheeler, espiras pocas, radio ~ 90 mm, $N_p=6$):

En unidades SI, según separación y diámetro exactos.

Tomemos .

- Capacitancia primaria para sintonía a 150 kHz:

.

Banco realizable con mica/cerámica de alta tensión en paralelo-serie para alcanzar decenas de kV de soporte dieléctrico.

Chispero y fuente

- Chispero (spark-gap) ajustable: electrodos de cobre o tungsteno, ventilado para enfriamiento y quenching; distancia ajustable hasta lograr ruptura en el pico de carga del banco .
- Fuente: transformador de 5–10 kVA a 10–15 kV RMS (estilo bobina de Tesla clásica), rectificado si se busca DC pulsada; insistir en puesta a tierra de baja impedancia y blindaje del entorno.
- Conmutación moderna (opcional): IGBT/MOSFET a baja tensión con transformador elevador RF; añade complejidad de control pero permite duty cycle y bursting más refinados.

Ensamblaje conceptual con detalle operativo

Secuencia de construcción

- 1.Base dieléctrica: disco de fenólica o contrachapado sellado (\varnothing 60–80 cm, 30–40 mm grosor).
- 2.Columna secundaria: fijación central con soportes no magnéticos; collarín superior para amarre del toroide; coronas de separación para evitar descargas laterales.
- 3.Devanado secundario: bobinado uniforme con tensión mecánica constante; impregnación con barniz; curado.
- 4.Primaria: soporte en espiral (policarbonato o madera sellada), ranuras o postes separadores; terminales robustos de cobre a un conmutador de toma (tap) para variar efectivo.
- 5.Banco : módulo compacto con barras colectoras anchas (efecto piel), resistencias de igualación si hay varias ramas en serie, y protectores RC frente a ringing no deseado.
- 6.Chispero: montaje en línea con el banco ; ventilación forzada; pantalla de mica/vidrio para residuos.
- 7.Terminal superior: toroide pulido, bordes de gran radio de curvatura; conexión al extremo superior del secundario por cinta de cobre (menor inductancia que cable redondo).

8. Puesta a tierra: varilla profunda (si es posible), conexión plana (cinta) hasta el punto de tierra del secundario; tierra separada para la carcasa de la fuente.

Ajuste inicial (comisionado)

- Sintonía secundaria: medir con acoplo mínimo (retirar la primaria o alejarla) usando una sonda de campo y un generador de RF de baja potencia; ajustar el toroide (añadir/quitar “labios” de aluminio) hasta acercarse a la meta.
- Sintonía primaria: seleccionar y para igualar; realizar barridos con excitación muy reducida; registrar picos de respuesta (voltaje en tope, brillo de descarga en aire, respuesta de una lámpara neón de prueba).
- Ajuste del acoplamiento: acercar/alejar primaria-secundaria y observar la división de picos (split resonance). Para evitar descargas espurias y calentamiento, fijar en la franja 0,2–0,3.
- Seguimiento: registrar corriente RMS en primaria, tensión del banco y campos cercanos; establecer curvas de punto estable (potencia vs. longitud de descarga / iluminación de una carga testigo).

Interacción con el medio y transferencia energética

Pérdidas y calidad de factor

- Pérdidas dieléctricas del soporte, efecto piel en conductores, radiación no deseada y descargas de corona reducen.
- Materiales de baja pérdida (mica/cerámica de alta Q, conductores anchos, superficies pulidas) son cruciales para alcanzar altos gradientes de campo en el terminal superior.

Terminales y distribución de campo

- Toroide frente a esfera: el toroide eleva la capacitancia efectiva y “suaviza” el campo en el borde, reduciendo corona; la esfera concentra menos el campo en el ecuador. Tesla solía preferir toroides de gran diámetro cuando quería mayor almacenamiento de energía en el tope.
- Entorno: proximidad de paredes metálicas, estructuras y el cuerpo del operador alteran y; durante el seguimiento es útil un marco de referencia (posiciones marcadas y constantes a la hora de medir).

Transferencia a cargas

- Iluminación inalámbrica (lámparas de descarga, fluorescentes): colocar tubos a 0,5–2 m del terminal; registrar intensidad luminosa frente a potencia.
- Acoplo capacitivo a una placa receptora sintonizada: pequeño circuito LC receptor sintonizado a con carga resistiva/inductiva; medir potencia útil.
- Acoplo inductivo: lazo receptor cercano a la base del toroide (menor radiación libre; más control).
- Excitación de plasma: electrodos contenidos, interposición de dieléctrico; mantener barreras y tierras separadas.

Control y seguimiento operacional

Variables de estado a registrar

- Primaria: (forma de onda), , energía descargada por ciclo, temperatura en conexiones.
- Secundaria: tensión en el terminal (estimada por método indirecto, p. ej., referencias cruzadas con longitud de descarga o con sonda capacitiva calibrada), campo E cercano, campo B residual.
- Entorno: humedad, presión y temperatura del aire (afectan al inicio de corona y rigidez dieléctrica).
- Sintonía: frecuencias propia primaria/secundaria (barridos periódicos); deriva por calentamiento.

Instrumentación

- Sondas no invasivas (transformadores de corriente de núcleo abierto), divisores capacitivos de alta tensión (para el tope), cámaras de alta velocidad si se analizan descargas.
- Filtro EMI en líneas de alimentación y jaula parcial para proteger instrumentación sensible.
- Registro digital a alta tasa de muestreo y posterior análisis espectral (FFT) para verificar modos laterales y split.

Procedimiento de seguimiento

1. Curva de sintonía primaria: variar en pasos pequeños y registrar y respuesta (por ejemplo, brillo de descarga controlada o tensión de una sonda capacitiva segura).
2. Curva de acoplamiento: para 2–3 posiciones de k , repetir la curva de sintonía y estimar el ancho de banda y los dos picos en caso de split; seleccionar la posición con máxima estabilidad y mínimas pérdidas.
3. Curva de potencia: incrementar potencia en pasos (duty del chispero o tensión primaria) y trazar potencia de entrada vs. indicador de salida (longitud de descarga, lux en carga luminiscente, potencia en receptor sintonizado).
4. Curva térmica: registrar temperaturas en bobinas, condensadores y chispero; establecer umbrales operativos.

Comparativa con desarrollos contemporáneos sin conflicto de interés

- Modelos analíticos de inductancia y capacitancia: desde Rosa (NBS) y Grover, a Wheeler y Medhurst, han permitido cuantificar con precisión L y C de bobinas y terminales sin depender de aproximaciones empíricas dudosas. Estos trabajos son pilares a la hora de diseñar un Tesla coil riguroso.
- Replicaciones académicas y de ingeniería independientes (p. ej., estudios didácticos sobre acoplamiento débil, medición de k , modos propios y split resonance) confirman que el comportamiento de la doble resonancia se ajusta a la teoría de dos osciladores acoplados.
- Investigadores como los Corum han publicado análisis de la bobina de Tesla en términos de línea de transmisión y modos de cavidad, ofreciendo una perspectiva útil para diseño moderno sin renunciar al espíritu original.

Discusión técnica

1. Doble resonancia: el sistema se comporta como dos osciladores acoplados; el split es inevitable al incrementar k . El objetivo práctico es situar la excitación en la rama que maximiza la tensión en el tope con pérdidas contenidas.

- 2.Control de campo: el toroide no es un adorno; fija la capacitancia de tope, estabiliza la resonancia y redistribuye el gradiente eléctrico para evitar descargas prematuras en zonas no deseadas del secundario.
- 3.Escalado de potencia: subir potencia sin cuidar y entorno suele producir corona difusa, sobrecalentamiento, y quenching ineficiente del chispero. El escalado correcto exige: conductores anchos (barras, cinta), contactos impecables, dieléctricos de alta Q y geometría limpia.
- 4.Medidas útiles: más allá de la estética de las descargas, el sistema permite transferencias capacitiva e inductiva reproducibles que pueden instrumentarse con cargas sintonizadas y medidores de potencia RF; así se cuantifica la eficiencia parcial de acoplos.
- 5.Limitaciones: el entorno condiciona el resultado (p. ej., humedad y polvo favorecen caminos de descarga). La deriva térmica desplaza la sintonía; por ello, el seguimiento es parte intrínseca de la operación.

Resumen final

- El prototipo propuesto se ajusta a la tradición de Tesla: primaria de pocas espiras y capacitancia conmutada; secundaria de una capa, alta Q, y toroide grande para control de campo.
- La frecuencia objetivo (≈ 150 kHz) es alcanzable con una secundaria compacta ($\approx \varnothing 120$ mm, altura 360 mm, 700 espiras) y un toroide mediano ($\approx 400\text{--}500$ mm \varnothing mayor).
- La sintonía doble (primaria/ secundaria) se logra con y , ajustables por tap y banco modular de condensadores.
- El acoplamiento óptimo está en , mitigando retroalimentaciones destructivas y split excesivo.
- El seguimiento continuo de , , corrientes y campos es imprescindible para estabilidad y repetibilidad.
- La transferencia de energía puede demostrarse de modo cuantitativo con cargas sintonizadas (capacitiva/inductiva) y medición de potencia RF, más allá de efectos visuales.

- El enfoque se apoya en fuentes primarias (Tesla) y en clásicos de inductancia/capacitancia (Rosa, Grover, Wheeler, Medhurst), evitando conflictos de interés.

Referencias

- 1.Tesla, N. (1891, 1892). Experiments with Alternate Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination; The Tesla Effects with High Frequency and High Potential Currents.
Resumen: Conferencias donde Tesla expone principios de alta frecuencia y alto potencial, describe bobinas resonantes, geometrías y observaciones sobre descargas y luz. Base histórica para el estilo de diseño y la noción de resonancia y control geométrico del campo.
- 2.Tesla, N. (1899–1900). Colorado Springs Notes.
Resumen: Cuadernos de laboratorio con numerología operativa (frecuencias, longitudes de descarga, configuraciones de antenas/toroides, puestas a tierra) y procedimientos iterativos de sintonía; evidencia directa de ajustes geométricos y seguimiento de variables.
- 3.Tesla, N. (1900–1901). Patentes US 645,576 y 649,621 (System of Transmission of Electrical Energy; Apparatus for Transmission of Electrical Energy).
Resumen: Describen conceptos de transmisión mediante dispositivos resonantes acoplados y terminales elevados; establecen la separación funcional entre etapas de generación, amplificación y emisión, fundamento del móduloado aquí.
- 4.Rosa, E. B. (1908). The self and mutual inductance of linear conductors. National Bureau of Standards.
Resumen: Desarrollo teórico y tablas para cálculo de inductancias propias y mutuas; soporte cuantitativo para dimensionar primarias y estimar acoplamientos.
- 5.Grover, F. W. (1946). Inductance Calculations: Working Formulas and Tables.
Resumen: Compendio clásico de fórmulas y tablas para inductancias en múltiples geometrías; base de cálculo para bobinas de una capa y bobinas planas tipo pancake (útiles en primarias).
- 6.Wheeler, H. A. (1928). Simple inductance formulas for radio coils.
Resumen: Fórmulas prácticas (como la citada) para estimar L de solenoides y

espirales con precisión suficiente en radiofrecuencia; estándar de facto en diseño de bobinas.

7. Medhurst, R. G. (1947). H.F. resistance and self-capacitance of single-layer solenoids. *Wireless Engineer*.

Resumen: Relaciones experimentales para auto-capacitancia y resistencia en alta frecuencia de bobinas de una capa; claves para predecir y Q real del secundario.

8. Steinmetz, C. P. (1916). *Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena*.

Resumen: Tratado matemático de fenómenos de corriente alterna, pérdidas, histéresis y cálculo de circuitos AC; útil para comprender pérdidas y factores de calidad en sistemas resonantes.

9. Corum, J. F., & Corum, K. L. (1988–1994, diversos). Estudios sobre Tesla coils como líneas de transmisión resonantes y modos de cavidad.

Resumen: Reinterpretación de la bobina de Tesla desde la teoría de líneas y cavidades, introduciendo métricas útiles para sintonía, acoplamiento y proyección de campo sin apoyarse en agendas externas.

10. Thomson, J. J. (1893–1897). *Conduction of Electricity through Gases*.

Resumen: Observaciones sobre descargas eléctricas en gases, ionización y fenómenos de corona; base física para entender el inicio de descargas en torno al terminal superior y su relación con la humedad/presión.

Apéndice práctico (sintético) de cálculo rápido

- Objetivo: .
- Elegir .
- Secundaria: apuntar a y .
- Toroide: ajustar ± 20 pF moviendo labios/anillos.
- k: fijar separación axial primaria-secundaria para (empírico, estable).
- Seguimiento: barridos de baja potencia; registrar curvas –respuesta; fijar tap de primaria y paquete que maximizan tope con mínimos armónicos.

Diseño de Prototipo y Ensamblaje Conceptual al Estilo de Tesla

La propuesta se articula bajo la metodología que Nikola Tesla empleaba en sus desarrollos: partir de un concepto físico validado teóricamente, modelarlo en prototipo experimental, y optimizar su arquitectura para escalabilidad industrial.

En este caso, el dispositivo de transmisión y resonancia electromagnética para fines terapéuticos —concebido como un oscilador armónico de alta estabilidad— combina elementos clásicos de sus patentes con adaptaciones modernas de materiales y fuentes de alimentación.

Estructura mecánica y bastidor

- Chasis: armazón no ferromagnético (aluminio aeronáutico 6061-T6 o polímero reforzado con fibra de vidrio) para minimizar interferencias.
- Dimensiones base: 1,2 m de altura, 0,6 m de diámetro, optimizadas para portabilidad y estabilidad.
- Plataforma aislante: dieléctrico multicapa con constante dieléctrica baja ($<2,5$) para evitar pérdidas por acoplamiento con el suelo.

Sistema de bobinados resonantes

- Bobina primaria: hilo de cobre esmaltado calibre AWG 8, devanado helicoidal en soporte cilíndrico de material aislante, número de vueltas ajustable (3–12) para sintonizar frecuencia fundamental.
- Bobina secundaria: hilo AWG 20, devanado espaciado, con entre 900 y 1.200 vueltas, altura total equivalente al 80 % del bastidor. Relación L/C ajustada para resonar en el rango de 150–800 kHz.
- Aislamiento: impregnación en resina epoxi para evitar corona y fugas a alta tensión.

Capacitores y banco de sintonía

- Banco variable: capacitores de mica plateada (tolerancia $<1\%$) dispuestos en configuración de puente para ajuste fino.
- Rango de ajuste: 100 pF – 2 nF para acoplar armónicamente la bobina primaria con la secundaria.
- Sistema de enclavamiento: mecanismo de rueda dentada con ajuste incremental de 1 pF para precisión extrema.

Fuente de excitación

- Alimentación: transformador elevador encapsulado en aceite dieléctrico, relación 1:15, con entrada de 230 VCA y salida regulable entre 3–15 kV.
- Excitación: descarga de chispa controlada (spark gap) en atmósfera de gas noble (neón o argón) para reducir erosión y ruido de radiofrecuencia no deseado.
- Modulación: generador de señal armónica que inyecta trenes de pulsos controlados en frecuencia y amplitud, acoplados mediante balun para evitar desadaptaciones de impedancia.

Emisión y acoplamiento al entorno

- Terminal superior: toroide de aluminio pulido de 30 cm de diámetro, con capacidad parásita calculada para suavizar gradiente de campo y evitar descargas disruptivas.
- Acoplamiento inductivo: controlado mediante ajuste de distancia entre bobina primaria y secundaria, siguiendo el método experimental que Tesla denominaba “lazo de interferencia mínima”.

Consideraciones operativas y de seguridad

- Pantalla de Faraday: malla de cobre a tierra para evitar irradiación no controlada hacia el operador.
- Descarga a tierra: sistema redundante con resistencias de alto valor ($\geq 10\text{ M}\Omega$) para eliminar cargas residuales al apagar.
- Control térmico: disipadores pasivos en puntos de alta corriente, ventilación cruzada con flujo laminar para mantener temperatura interna $<45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ensamblaje modular

Tesla prefería que cada componente clave pudiera sustituirse sin afectar la integridad del resto del sistema. En este prototipo:

- El módulo de excitación es desmontable y puede intercambiarse por otro con distinta topología de alimentación (p. ej., excitador de estado sólido).
- El banco de capacitores se aloja en un compartimento frontal extraíble.
- El bobinado secundario se acopla mediante conectores dieléctricos de liberación rápida.

Especificaciones resumidas

Parámetro	Valor Aproximado	Observación
Frecuencia de resonancia	150–800 kHz	Ajustable mediante L/C
Tensión de salida	50–250 kV	Pico a pico
Potencia de entrada	200–800 W	Dependiendo del régimen
Factor de calidad (Q)	>200	Alta pureza espectral
Tipo de emisión	Campo electromagnético radial	Acoplado por inducción

Prototipo electromagnético tipo Tesla – Diseño, ensamblaje y fundamentos operativos

Principios físicos y operativos

El dispositivo se basa en el acoplamiento resonante de un oscilador de alta frecuencia con una geometría inductiva optimizada para el confinamiento de campos eléctricos y magnéticos de forma coherente. Tesla denominaba este fenómeno “condensador oscilante autoalimentado” y lo diseñaba para que la pérdida por radiación fuera controlada, maximizando la energía reactiva en el núcleo del sistema.

Los principios clave:

- Resonancia acoplada entre la bobina primaria (baja inductancia, alta capacitancia) y la bobina secundaria (alta inductancia, baja capacitancia).
- Elevación de potencial mediante efecto transformador resonante, con mínimas pérdidas ohmicas.
- Modulación de carga libre para inducir corrientes de desplazamiento en el entorno.
- Aislamiento dieléctrico progresivo para impedir la descarga disruptiva prematura.

Especificaciones conceptuales

(Valores orientativos para prototipo de laboratorio inspirado en patentes de Tesla, adaptado a materiales modernos)

- Frecuencia de operación: 120 – 500 kHz (ajustable según la longitud física y la inductancia de la bobina secundaria).
- Tensión de entrada: 12 – 48 VDC para excitador primario, convertido a AC por oscilador de estado sólido o chopper mecánico.
- Transformador elevador inicial: relación 1:20 a 1:40, núcleo de ferrita o hierro laminado según frecuencia de conmutación.
- Bobina primaria:

- 3 a 5 espiras de cobre esmaltado calibre 4 AWG.
- Diámetro interior: 400 mm.
- Separación entre espiras: 4–8 mm (PVC o nylon).
- Bobina secundaria:
 - 800 a 1.200 espiras de cobre esmaltado calibre 22–26 AWG.
 - Longitud total: 800 mm.
 - Diámetro: 100 mm.
 - Núcleo: aire (sin material ferromagnético).
- Terminal de descarga:
 - Toroide de aluminio o acero inoxidable, diámetro exterior 500 mm.
 - Capacitancia parásita: 15–30 pF.
- Base:
 - Madera tratada o material compuesto no conductor.
 - Montaje sobre aisladores cerámicos.

Ensamblaje conceptual (al estilo de Tesla)

1. Fundación estructural
 - Base de madera maciza barnizada para evitar humedad.
 - Soporte central de columna no conductora para la bobina secundaria.
2. Construcción de la bobina secundaria
 - Enrollado manual con tensión constante y guiado mecánico.
 - Aplicación de capa de barniz dieléctrico cada 100 espiras.
 - Fijación superior e inferior con discos de baquelita.
3. Instalación del primario
 - Espiras de cobre grueso sujetas a soportes radiales.
 - Aislamiento con tubos de teflón en puntos de cruce.
4. Montaje del toroide
 - Unión mecánica a la parte superior de la secundaria.
 - Conexión eléctrica directa al extremo de salida de la bobina.

5. Sistema de excitación

- Oscilador de alta frecuencia alimentando transformador elevador.
- Ajuste de la frecuencia para lograr acoplamiento resonante primario-secundario.
- Capacitores de alta tensión en paralelo al primario para sintonía fina.

Consideraciones operativas

- Ajuste de resonancia: se recomienda un medidor de onda estacionaria o sintonía mediante lámpara de neón para detectar máxima transferencia de energía.
- Aislamiento: el entorno debe ser seco; la humedad afecta el Q del sistema.
- Protección: instalar descargadores a tierra para sobretensiones inducidas.
- Medición: voltímetro de alta impedancia y medidor de campo electromagnético.

