

Funcionamiento de una Bobina de Tesla Musical

Jorge Monzón de Castro

Estudiante de último curso del doble grado en física y matemáticas.
Presidente de la Sociedad Astronómica Syrma desde 2019.
Miembro activo de Physics League desde 2017, ganador de la fase local de la Olimpiada de física de 2017 y mención de honor en la fase Nacional.

Abstract:

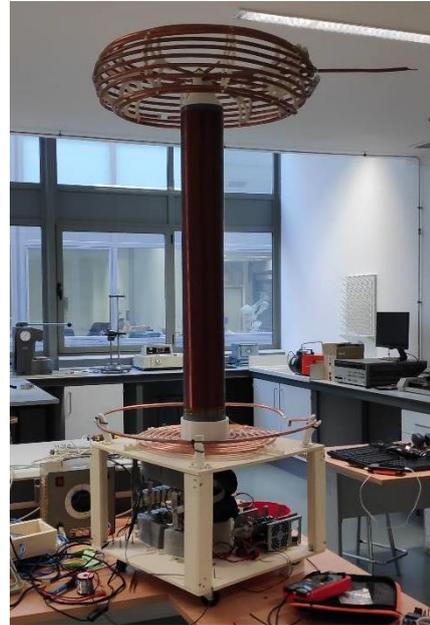
En este artículo, veremos los conceptos básicos en los que se basan las bobinas de Tesla. Empezaremos en un nivel asequible para todos los públicos tratando los conceptos básicos de electromagnetismo necesarios para comprender su funcionamiento y, poco a poco, desembocaremos en el complejísimo mecanismo del artilugio objeto del ensayo: la Bobina de Tesla de Estado Sólido y Doble Resonancia, cuyas siglas en inglés son DRSSTC (Dual Resonance Solid State Tesla Coil), la culminación de muchos años de mejora e innovación tecnológica en el campo de las bobinas de Tesla.

Palabras clave: Bobina de Tesla, Electromagnetismo, Resonancia.

¿Qué es una bobina de Tesla?

Una bobina de Tesla es un conjunto de componentes eléctricos distribuidos y acoplados de tal manera que, a grandes rasgos, introduciendo corriente eléctrica en la parte de abajo, obtenemos alta tensión en la parte de arriba, lo que desemboca en la emisión de rayos (como los de las tormentas, pero a pequeña escala).

Para profundizar un poco más en el funcionamiento de estos aparatos, vamos a comenzar explicando algunos conceptos relevantes de electromagnetismo:



Bobina de Tesla DRSSTC construida en la asociación Physics League

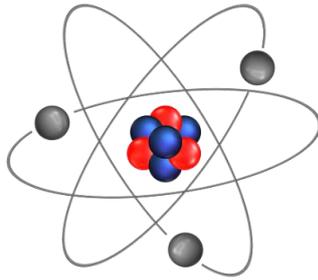
- **Electrones:**

Si buscáis sobre estos pequeñines en Wikipedia, seguramente acabéis con más dolor de cabeza del que ya llevabais, ya que actualmente su origen, forma y composición son algunos de los grandes misterios de la física, lo que lleva a la aparición de descripciones cada vez más complejas y enrevesadas de científicos cada vez más locos.

La explicación que se va a dar a continuación es parcial, pero sirve estupendamente para entender el resto del artículo.

Los electrones son partículas elementales, ladrillos indispensables con los que se construye el 100% de la materia que vemos cada día. Se encuentran en cada uno de los átomos, orbitando alrededor de los núcleos.

En ocasiones, los electrones son capaces de escapar de estas órbitas, convirtiéndose en electrones libres (como si les diesen un calcetín), y es precisamente el movimiento de estos electrones libres lo que conocemos como "electricidad".

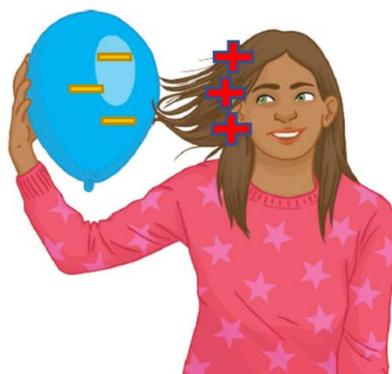


En realidad, ni son partículas, ni están orbitando, pero estos detalles pertenecen a esas explicaciones enrevesadas a las que me refería al inicio

Los electrones poseen carga negativa, y algo que hay que saber es que las cargas del mismo signo se repelen (negativo con negativo y positivo con positivo) y las de signos opuestos se atraen (positivo con negativo), como si fueran dos imanes. Esto es imprescindible para entender el siguiente apartado.

- **Electricidad estática**

¿Alguna vez has frotado un globo contra la cabeza y se te han puesto los pelos de punta? ¿O has dejado pegado el globo al techo? ¿O has atraído trozos pequeños de papel? Seguramente sepas que este tipo de fenómenos se dan por algo llamado "electricidad estática", que no es más que, como su propio nombre indica, electricidad que no se mueve, que permanece estática; una acumulación de electrones libres en un objeto. Cuando nos frotamos el globo contra el pelo, o un boli Bic contra el jersey, o una barra de ámbar contra un tejido de lana, se produce un intercambio de electrones entre los dos cuerpos gracias a un efecto físico llamado "triboelectricidad".



Es decir, en el caso del globo y el pelo, los electrones libres del pelo se los lleva el globo, quedando este con un exceso de electrones (exceso de carga negativa) y el pelo con un defecto de electrones (exceso de carga positiva). ¿Positivo y negativo? Efectivamente, esto hace que el globo y el pelo se atraigan, el pelo se quedará adherido al globo arruinándote el peinado del día.

- **Campo eléctrico**

Pero ¿cómo narices es capaz el pelo de saber que hay un globo a medio metro de distancia y que debe sentirse atraído por él?

El globo, al estar cargado negativamente, ejerce una influencia a su alrededor, más o menos la misma influencia que ejercería alguien tirándose un pedo, una especie de "acción a distancia" que tiende a repeler al resto de personas sin necesidad de tocarlos.

La influencia que ejerce un objeto cargado en su entorno la llamamos "campo eléctrico", y es el responsable de que el pelo se vea atraído hacia el globo a mucha distancia.

- **Corriente eléctrica**

Los electrones libres se sienten atraídos por cargas positivas, ¡y también por campos eléctricos! Los electrones viajan naturalmente desde zonas de campo débil hasta zonas donde el campo es intenso. Esto es lo que conocemos como "voltaje" o "diferencia de potencial", y se traduce en que cuando aplicamos un campo eléctrico sobre, por ejemplo, un cable, los electrones libres se mueven, produciendo una corriente eléctrica a través de ese cable. Este campo eléctrico podemos producirlo sencillamente con una pila. Cuanto más voltaje tenga, más rápido se moverán los electrones y más electrones se moverán, haciendo más intensa la corriente.

- **Campo magnético**

Todos hemos jugado alguna vez con un imán, hemos visto cómo los polos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen, ¡a distancia!, significa por tanto que podemos volver a ejemplo del pedo. Un imán genera una influencia en su entorno que llamamos "campo magnético".

- **Inducción**

Ya hemos visto campo eléctrico por un lado y campo magnético por otro. Lo interesante empieza cuando los mezclamos.

¡Resulta que la electricidad es capaz de generar magnetismo y el magnetismo es capaz de generar electricidad! Este fenómeno se conoce como "inducción electromagnética".

Vivimos rodeados de ejemplos y aplicaciones de esto. Desde vitrocerámicas de inducción que calientan nuestra comida, hasta cañones electromagnéticos, pasando por todos los motores eléctricos existentes, de coches, de lavadoras, incluso cualquier mecanismo eléctrico de juguetes, todo funciona por inducción. Para entenderlo mejor, expongamos algún ejemplo.

- **Bobina**

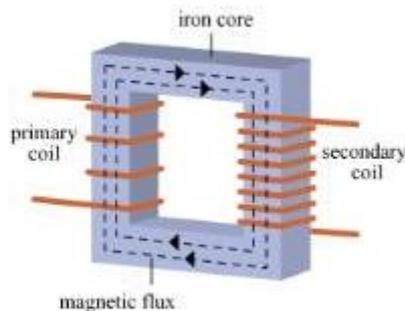
Un ejemplo clásico de inducción es una bobina, que consiste en enrollar un cable en espiral alrededor de un tubo. Al hacer pasar una corriente eléctrica por el cable, en el interior del tubo se genera un campo magnético. ¡El tubo entero se convierte en un imán!

- **Transformador**

Podemos liarla todavía más y poner, en vez de uno, dos cables distintos, enrollados alrededor del mismo tubo.

El cable 1 va a dar 15 vueltas alrededor del tubo, mientras que el cable 2 va a dar 1500 vueltas. Vemos que el segundo cable tiene 100 veces más vueltas que el otro.

Si metemos corriente por el cable 1, como ya hemos visto antes, producirá, por inducción, un campo magnético en el interior del tubo. Lo sorprendente ahora es que ese campo magnético producirá, por inducción también, electricidad en el cable 2. Concretamente, electricidad con 100 veces más voltaje y 100 veces menos intensidad.



Esquema de un transformador. Supongamos, para el ejemplo, que el secundario tiene 100 veces más vueltas que el primario

Este montaje se conoce como "transformador" porque transforma la corriente del cable 1 en una corriente en el cable 2 con características diferentes.

- **Corriente continua y alterna**

La corriente continua se forma como hemos visto antes en el apartado de campo eléctrico. Si aplicamos un voltaje a un cable, los electrones se desplazan por su interior.

En corriente alterna, el voltaje cambia de polaridad constantemente. Esto produce que los electrones ya no vayan únicamente en una dirección, sino que estén constantemente cambiando de sentido. Se puede ver como que los electrones ya no se desplazan, sino que vibran, moviéndose de lado a lado muchas veces por segundo. Esas vibraciones se transmiten a lo largo de todo el cable y conforman la corriente alterna.

Por ejemplo, una pila produce corriente continua, mientras que la corriente que nos proporcionan los enchufes domésticos es corriente alterna, de 50 Hercios (es decir, los electrones vibran 50 veces por segundo).

Un transformador SOLAMENTE funciona con corriente alterna, el campo magnético se transforma en eléctrico solamente si se encuentra variando constantemente. Para visualizarlo, podemos pensar que un imán no produce corriente en un cable si está quieto, pero si lo movemos muy rápidamente de un lado a otro, sí, producirá corriente alterna.

- **Condensador**

Podemos verlo como dos placas de metal separadas, conectadas a un circuito. Si lo conectamos a corriente continua, una de las placas se va a llenar de electrones, mientras que los electrones de la otra placa se van a ver repelidos, quedándose una placa con carga negativa y otra con carga positiva y almacenando una gran cantidad de energía.

En corriente alterna, a una de las placas le ponemos y le quitamos los electrones constantemente, por lo que, gracias a las repulsiones y atracciones del campo eléctrico, se produce un "tira y afloja" que hace que la placa de enfrente se cargue alternativamente positiva y negativamente, generando nueva corriente alterna.

En resumen, en corriente alterna transmiten la corriente, mientras que en corriente continua la almacenan.

- **Toma de tierra**

Es uno de los elementos de seguridad más importantes de toda instalación eléctrica. Normalmente consiste en una gran estructura metálica (que, en el caso de las casas, se encuentra en el interior de las paredes) que posee una estaca metálica que perfora el suelo (la tierra) varios metros.

Esto le otorga a la estructura (y a todo lo que esté conectado a ella) las siguientes cualidades:

- Siempre se encuentra a 0 voltios, es lo que se llama la referencia de potencial. Si nosotros decimos que algo está a, por ejemplo, 5 voltios, siempre es respecto a la tierra.

- Cualquier derivación eléctrica, cualquier pulso o corriente que se introduzca en la toma de tierra será inmediatamente disipada. La toma de tierra engulle las corrientes eléctricas y no deja rastro de ellas, lo cual es muy útil para proteger nuestros aparatos eléctricos frente a, véase, picos de voltaje.

En un enchufe doméstico, la toma de tierra del edificio asoma en las dos pestañas metálicas que sobresalen. No son solo un elemento para que el enchufe encaje mejor, sino que son el elemento principal de seguridad de los electrodomésticos de gran potencia, que siempre poseen un enchufe grande con partes metálicas que se ponen en contacto con las dos pestañas de la toma de tierra.



Una vez vistos estos conceptos, pasemos al tema que nos inquieta. Tras una breve introducción, vamos a definir, en orden de complejidad, diferentes evoluciones de las bobinas de Tesla, viendo los elementos y las características de cada una.

Generalidades sobre las bobinas de Tesla

Antes de nada, conviene establecer algunos términos comunes a toda bobina de Tesla, que nos ayudarán a comprender los siguientes apartados.

Una bobina de Tesla está formada, en realidad, por dos bobinas, las llamadas "bobina primaria" y "bobina secundaria". La bobina primaria suele tener entre 4 y 10 espiras, mientras que la secundaria suele tener del orden de miles de espiras. Actuando como un transformador, si introducimos corriente por la bobina primaria, obtenemos un voltaje muy elevado en la bobina secundaria.

Generalmente, las bobinas secundarias suelen acabar en una cabeza toroidal (topload, en inglés), que es la que recibe el alto voltaje de la bobina secundaria y de la que salen los rayos.

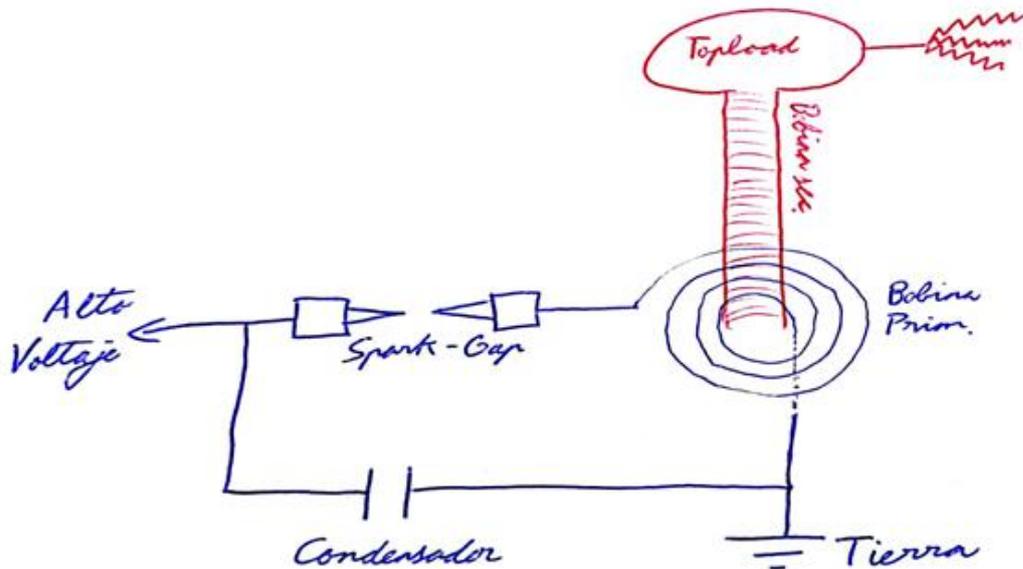
En la bobina primaria, como ya hemos visto en el apartado anterior, tenemos que introducir corriente alterna para obtener esos altos voltajes en la bobina secundaria, no nos vale con conectarla a una pila, ya que las pilas producen corriente continua.

Las bobinas de Tesla se van a distinguir, principalmente, por las formas de alimentar la corriente alterna de la bobina primaria. Se puede hacer a lo bruto, como en una bobina de "Spark Gap", o de una manera extremadamente eficiente e inteligente como en una DRSSTC.



Partes de una bobina de Tesla: dentro de la estructura de madera se encuentra la electrónica necesaria para que todo funcione. Encima de la madera se encuentra la bobina primaria y a continuación la secundaria y el "topload".

- Bobina de Tesla de Spark Gap



Este es el ejemplo más sencillo y clásico de bobina de Tesla. Se recoge corriente de una fuente de alto voltaje, que puede ser la corriente del enchufe pasada por un transformador y un rectificador (elemento que convierte la corriente alterna en continua). Esa corriente se lleva hasta un condensador de alta capacidad (suele ser una batería de condensadores de grandes dimensiones) que se carga poco a poco. El condensador está conectado a un tornillo, separado unos milímetros de otro tornillo que está conectado a uno de los extremos de la bobina primaria, cuyo extremo libre se conecta a tierra.

Cuando el condensador se carga lo suficiente, entre los dos tornillos aparece un voltaje cada vez más grande, hasta que el aire del medio no lo puede resistir y salta una chispa entre los dos, descargando el condensador entero y, en consecuencia, transportando una corriente de una intensidad muy alta.

Esta corriente atraviesa la bobina primaria y se disipa en la toma de tierra.

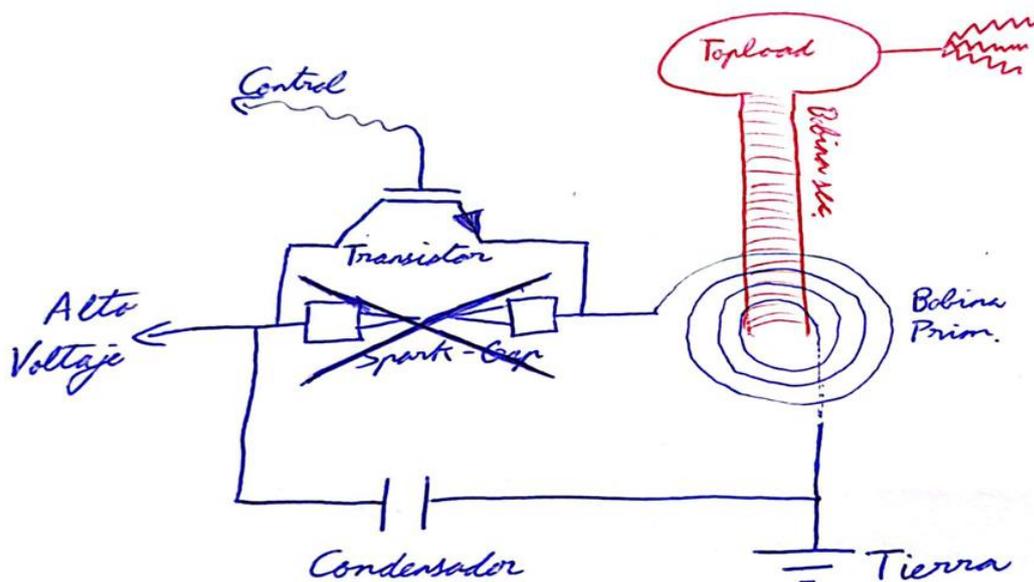
Al atravesar la bobina primaria, genera un campo magnético que aparece y desaparece muy rápidamente, generando una corriente en la bobina secundaria que produce un rayo en el toroide.

Tras la descarga, el condensador comienza a cargarse de nuevo, estableciendo un ciclo de cargas y descargas que se repite varias veces por segundo, dependiendo de a qué distancia pongamos los tornillos (creando una especie de corriente alterna). Si los ponemos muy cerca, se descargará muchas veces por segundo con menos potencia, y si los alejamos más, se descargará menos veces por segundo, con más potencia. Este espacio entre tornillos se conoce popularmente como "spark gap", en español "espacio de chispas", y la configuración mostrada permite obtener una bobina de Tesla que lance varios rayos por segundo, muy potentes.

- **Bobina de Tesla de Estado Sólido (SSTC)**

La bobina de Tesla de Spark Gap tiene su gracia, pero no podemos controlar la cantidad de rayos por segundo que salen del toroide, porque es muy difícil regular la distancia entre los dos tornillos.

Este problema se arregla con las SSTC, que sustituyen los tornillos por transistores, sistemas que permiten regular la frecuencia de los rayos.



Podéis preguntaros: si ya tenemos rayos ¿para qué queremos controlar la cantidad de rayos que salen cada segundo?

Pues para hacer música.

Imaginaos que tenemos un aparato que golpea una mesa repetidamente, y podemos controlar la velocidad de golpeo. Si le decimos que dé, por ejemplo, 10 golpes por segundo, lo único que vamos a oír es un repiqueteo molesto. No obstante, si le decimos que dé 50 o 100 golpes por segundo, vamos a empezar a oír algo interesante: envolviendo ese sonido amartillante, va a empezar a aparecer un sonido grave y continuo, conocido como envolvente. Si ordenamos al aparato que dé 500 o 1000 golpes por segundo, la envolvente se volverá mucho más aguda. Un ejemplo más cotidiano es el motor de un coche. Su sonido son simplemente explosiones individuales de un combustible en un pistón, cuya envolvente es grave cuando el coche está en reposo, pero se vuelve todo lo aguda que queramos si aumentamos el número de explosiones por segundo, cosa que conseguimos pisando el acelerador.

Un rayo es una pequeña explosión en el aire, un chasquido muy fuerte. Si controlamos el número de rayos por segundo, controlamos el sonido que produce su envolvente. Con la elección correcta de frecuencias, obtenemos notas musicales. Por ejemplo, un "do" se obtiene con, aproximadamente, 523 rayos por segundo, y un "re", con 587.

Una vez establecida la importancia de controlar el número de rayos por segundo, ¿Cómo lo consigue una Bobina de Tesla de Estado Sólido?

Una SSTC es, en esencia, lo mismo que una bobina de Spark Gap, pero sin el Spark Gap. Los dos tornillos son sustituidos por uno o dos transistores.

Los transistores son unos dispositivos que están presentes en casi todos los aparatos electrónicos que utilizamos habitualmente. Por poner números, tan solo nuestro teléfono móvil o nuestro ordenador contiene varios millones de estos pequeños milagros de la electrónica. Sin ellos, la tecnología no sería que conocemos hoy.

Su funcionamiento es como el de un interruptor, permiten o no el paso de la corriente dependiendo de si le envías o no una señal por una de sus patillas. Cuando recibe la señal, permite el paso de la corriente, mientras que, si no la recibe, bloquea el circuito.

Incorporando esta tecnología en la bobina de Tesla, cada vez que enviemos una señal al transistor, este dejará pasar la corriente, descargando el condensador y produciendo una gran corriente en la bobina primaria, induciendo la alta tensión en el secundario que producirá el rayo. De esta manera, enviando, por ejemplo, 523 señales por segundo al transistor, obtendremos 523 rayos por segundo, y sonará un "do".

- **Bobina de Tesla Resonante de Estado Sólido (RSSTC)**

Aquí es donde las cosas empiezan a complicarse. La SSTC es simple, pero extremadamente ineficiente. Solo una pequeñísima fracción de la energía eléctrica que le suministramos se emplea para producir los rayos, el resto se pierde, se malgasta.

Con una Bobina de Tesla Resonante, solucionamos parcialmente el tema de la eficiencia, consiguiendo unos rayos mucho más largos empleando la misma energía.

El concepto clave en este diseño es la resonancia, que se da cuando en un sistema que oscila a una frecuencia natural, ejercemos una fuerza que se acopla a dicha frecuencia. Por ejemplo, un columpio, como un péndulo, tiene una frecuencia natural de oscilación, y para conseguir que llegue alto, ¿Qué es más eficiente? ¿Ejercer pequeñas cantidades de impulso en los momentos adecuados o cerrar los ojos y liarte a puñetazos con él? Hay que acoplarse a su movimiento, hay que empujar en los momentos adecuados. Esto es una resonancia, un fenómeno con el que podemos aumentar la energía de cualquier sistema oscilante.

En electricidad también existen sistemas oscilantes. Cuando acoplas en serie un condensador y una bobina, resulta que la electricidad actúa como si estuviese "encerrada" entre dos paredes. Si introduces un pulso de electricidad en un sistema bobina-condensador, ese pulso rebota una y otra vez, oscila.

La frecuencia a la que lo hace depende de los parámetros del condensador y de la bobina.

Da la casualidad de que en una bobina de Tesla aparece naturalmente un sistema oscilante de este tipo: la bobina secundaria y el toroide superior. Este toroide actúa como un condensador, acumulando carga entre la propia estructura y los elementos del entorno, con el aire entre medias.

Por tanto, si introducimos un pulso en el sistema secundario (bobina secundaria y topload) de una Tesla, este pulso va a oscilar, a una frecuencia natural que podemos medir y a la que podemos acoplarnos sin más que enviando a los transistores las señales adecuadas para que conmuten exactamente “cuando el columpio pase por su lado”. Si enviamos varias señales seguidas exactamente a esa frecuencia natural, es equivalente a empujar varias veces seguidas el columpio: conseguimos que llegue muy alto con poco esfuerzo, de manera muy eficiente. Es decir, conseguimos corrientes eléctricas extremadamente altas con las que podemos obtener rayos en condiciones, aprovechando mucha más energía que antes.

En conclusión, debemos ajustar el transistor para que envíe señales exactamente a la frecuencia de resonancia del circuito secundario, debemos acoplarlo a esa frecuencia. Estas frecuencias son normalmente del orden de cientos de miles de veces por segundo (100.000-500.000Hz, siendo los Hercios, Hz, la unidad de frecuencia), lo cual es imposible de obtener con un Spark Gap.

- **Bobina de Tesla de Estado Sólido y Doble Resonancia (DRSSTC)**

Podemos darles a estas ideas una vuelta de tuerca más. Ya sabemos que el sistema secundario de la Tesla es un circuito resonante.

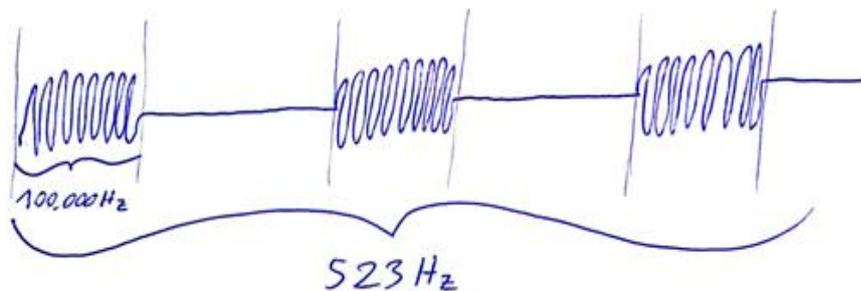
Pues también podemos convertir el sistema primario en uno de estos sin más que añadir un condensador en serie con la bobina primaria, de manera que el transistor envíe las señales a un sistema bobina-condensador en vez de simplemente a una bobina, como hacíamos antes.

Podemos calibrar este sistema de manera que la frecuencia de resonancia del sistema primario sea exactamente la misma que la del secundario, de manera que ahora tendremos dos resonancias acopladas. Esto maximiza la eficiencia, consiguiendo corrientes eléctricas en el circuito primario que en ocasiones superan los 1000 amperios (la corriente es mortal a partir de 0,02 amperios) y obteniendo rayos mucho más largos que con cualquier versión de la Tesla vista anteriormente.

Un detalle importante es el siguiente: si la frecuencia con la que introducimos los pulsos es de 100.000Hz, ¿dónde queda la música?

Los sonidos son completamente inaudibles por un humano a partir de 20.000Hz. De hecho, el rango musical de un piano es muy inferior, siendo la nota más baja de unos 27Hz y la más alta de 4.186Hz, muy por debajo de lo que le estamos pidiendo a los transistores para obtener la resonancia.

Una diferencia tan grande entre la frecuencia de trabajo y la que queremos obtener es una grandísima ventaja, ya que nos permite trabajar con envolventes. En el dibujo se aprecia bien el concepto. Encerramos la frecuencia de 100.000Hz en paquetes que se repiten, por ejemplo, 523 veces por segundo, consiguiendo una envolvente de 523Hz y obteniendo un “do”.



Este sistema funciona igual que la máquina de dar golpes en la mesa, o el motor de un coche. Es indiferente cómo suene cada pulso individual, cada “paquete”, en el caso de la mesa es un golpe, en el caso del coche una explosión de gasolina y en el de la Tesla es la onda expansiva producida por un rayo. Al final lo que oímos es la envolvente producida por todos los paquetes a la vez. En el caso de la bobina de Tesla, esto se produce de una manera tan “sencilla” como apagándola y encendiéndola 523 veces por segundo.

Conclusiones

En este artículo hemos visto unas leves pinceladas sobre el funcionamiento de estos fascinantes artilugios, pero, en profundidad, todo esto es mucho más complicado de lo aquí expuesto. Por ejemplo, lo que se utiliza para enviar los pulsos al sistema primario no es un transistor, sino que suele ser un conjunto de cuatro transistores conocido como “Puente H”. Del complejo sistema de control que lee en directo las señales de los circuitos resonantes para “empujar en el momento exacto el columpio” (una imprecisión de unos pocos microsegundos suele desembocar en una explosión) mejor ni hablamos.



Instante de la última explosión de nuestra DRSSTC.

No obstante, esencialmente son estos los fundamentos para que quien quiera indagar en este mundo pueda hacerlo sin que le falte una buena base teórica, y para que cuando vengáis a un espectáculo de la asociación “Physics League” sepáis lo que se cuece ahí dentro, ya que hemos construido de forma casera una DRSSTC que exponemos en la mayoría de las actividades.

Bibliografía

Al tratarse de conceptos básicos de física, electromagnetismo y electrónica, no hay apartado de bibliografía en este artículo. No obstante, sí que puedo recomendaros diferentes páginas web y canales de Youtube para informaros sobre este y otros muchos temas relacionados. Canales como “Styropiro”, “Electroboom”, “Physics League” o “Franzoli Electronics” son muy adecuados, así como páginas web muy detalladas de fabricantes de bobinas de Tesla como “onetesla.com”, “loneoceans.com/labs” y “kaizerpowerelectronics.dk”.