

Las Investigaciones de Heinrich Hertz Sobre las Ondas Electromagnéticas

Pedro W. Lamberti¹

FaMAF -UNC
Ciudad Universitaria (5000)
Córdoba - Argentina

Resumen

El presente trabajo tiene un doble propósito : por un lado repasar algunos aspectos históricos de los trabajos pioneros de H. Hertz sobre las ondas electromagnéticas; por el otro realizar una propuesta de réplica (actualizada) del equipo utilizado por Hertz en sus investigaciones.

Abstract

This paper has two objectives: The first one is to review the main historical aspects of Hertz's experiments on electromagnetic waves; the second one is to propose a modern replica of Hertz oscillator .

1.- Introducción

En el año 1909 la Academia Sueca de Ciencias otorgó el Premio Nobel de Física a Karl F. Braun y a Guglielmo Marconi “*por sus contribuciones al desarrollo de la telegrafía inalámbrica*”. Sin lugar a dudas, el gran ausente en esa ceremonia de entrega de los Premios fue Heinrich Hertz². Nacido en Hamburgo (Alemania) en 1857, Hertz murió a los 37 años de una septicemia. Le tocó jugar un rol fundamental (y culminante) en la segunda gran revolución de la Física. La primera fue la que involucró a hombres tales como Kepler, Galileo y Newton. La segunda tiene como sus artífices a M. Faraday (1791-1867) y a J. C. Maxwell (1831-1879). La primera nos da una visión puramente mecanicista de la Naturaleza. En la segunda se gesta y consolida el concepto de *campo*.

En la visión mecanicista, las piedras fundamentales del universo físico son las partículas, cuyos movimientos están determinados por las leyes de las fuerzas que describen las interacciones entre ellas. Estas fuerzas actúan directamente entre cualquier par de partículas puntuales a través del espacio vacío que las separa. Son por ello referenciadas como “acciones a distancia”.

La idea fundamental que hay detrás de la noción de campo (y de una teoría de campos) es que la interacción entre las masas individuales no es directa sino indirecta con

¹CONICET - Argentina

²G. Marconi es bien conocido como uno de los precursores de la radio. No ocurre lo mismo con K.F. Braun, quien ocupara el cargo de profesor de Física en la Escuela Técnica Superior de Karlsruhe, antes que lo fuera Hertz. Braun realizó investigaciones sobre la direccionalidad de las ondas electromagnéticas y sobre la sintonía de los circuitos emisor y receptor.

un intermediario, *el campo*. Las leyes básicas de la Naturaleza se diferencian por ello, en dos clases: las *ecuaciones de campo* que describen las leyes que rigen a éstos como así también su dependencia de la presencia de la materia, y las *ecuaciones de movimiento*, que describen la acción de los campos sobre las partículas materiales³. La ubicación del concepto de campo en una posición central es realizada por Maxwell⁴; por supuesto y como siempre sucede en estos casos, ese lugar privilegiado no fue logrado de forma inmediata. Su desarrollo constituye uno de los capítulos más interesantes de la historia de la Física y uno de los personajes más sobresalientes de esa historia es H. Hertz.

Durante su estancia en Berlín, entre los años 1878 y 1883, Hertz se formó bajo la tutela de Herman Von Helmholtz (1821-1894). De él aprendió la teoría electromagnética. Helmholtz era, por aquellos años, uno de los pocos físicos del continente europeo que apreciaban la importancia de los trabajos de Maxwell. La mayoría de los físicos alemanes aceptaban para los fenómenos electromagnéticos las teorías de acción a distancia de F. Neumann (1798-1895) y W. Weber (1804-1891) [1]. En ellas, las fuerzas electromagnéticas se propagan desde un cuerpo a otro con velocidad infinita. Por su parte, Helmholtz desarrolló una teoría híbrida, con la cual intentó conciliar esas teorías de acción a distancia con la teoría de campos de Maxwell. Su propuesta consistía en aceptar las teorías de acción para el espacio libre (vacío), pero adoptar la teoría de Maxwell para los dieléctricos.

En el año 1884, Hertz publica un trabajo teórico comparando la entonces nueva teoría de Maxwell con las viejas teorías electrodinámicas de acción a distancia [2]. Esto ocurrió cuatro años antes de realizar sus famosos trabajos sobre la propagación de las perturbaciones electromagnéticas. No hay duda de que el resultado de esta investigación lo llevó a la búsqueda de una verificación experimental de la teoría de Maxwell. En las conclusiones de ese trabajo dice *“En lo que precede he intentado demostrar la verdad de las ecuaciones de Maxwell partiendo de premisas que son generalmente aceptadas en las teorías electromagnéticas opuestas. [...] a partir de lo anteriormente expuesto podemos inferir sin error que si la elección (entre ambas teorías) descansa sólo entre el sistema usual del electromagnetismo y el de Maxwell, el último debe ser claramente preferido”*.

Una de las consecuencias más importantes de la interpretación que Maxwell hace de las ideas de Faraday es que los fenómenos electromagnéticos actúan a través de ondas, y su implicancia más sorprendente es la identificación de la luz con las ondas electromagnéticas. Sin embargo, la brecha entre la electrodinámica y la teoría de la luz no fue inmediatamente cubierta. En todos los casos conocidos hasta ese momento, la energía era intercambiada entre un cuerpo y otro, pero permaneciendo siempre dentro de los límites de un sistema. Por otro lado, en óptica, la energía viaja libremente a través del espacio, no ligada a ningún cuerpo material. A mediados del año 1883, Helmholtz explícita, a través de una propuesta de proyecto de investigación, su intuición sobre las ondas electromagnéticas: *“En las teorías de las acciones magnéticas de las corrientes eléctricas, una velocidad, la cual*

³El primer campo físico fue el campo electromagnético. Le siguió el campo gravitatorio (con la Teoría de la Relatividad General). Hoy en día se conocen dos más: los asociados con las interacciones débil y fuerte. A diferencia de lo que sucede con el campo electromagnético, las ecuaciones que rigen al campo gravitatorio llevan incluidas las ecuaciones de movimiento.

⁴ En la época de Maxwell la Física enfrentaba otro gran problema: la existencia o no de uno o varios éteres. Maxwell no abolió el concepto de éter, pero lo simplificó de una manera notable, aunque esa, es otra historia.....

parece ser exactamente igual a la velocidad de la luz, y la cual W. Weber caracteriza como crítica, parece jugar un rol fundamental. Su identidad con la velocidad de la luz parece indicar una relación esencial e íntima entre los procesos ópticos y eléctricos. Deberíamos, por ello, encontrar la clave de este misterioso aspecto de los fenómenos electromagnéticos, lo cual, probablemente nos podría conducir a sus fundamentos más profundos.” Fue precisamente su discípulo predilecto, H. Hertz, quien, unos cuantos años después, pudo demostrar la “*relación esencial e íntima entre los procesos ópticos y eléctricos*”. Un año antes, y con el mismo espíritu que Helmholtz, el físico irlandés G.F. FitzGerald se manifestó a favor de la posibilidad de generar energía radiante por medios puramente eléctricos. En particular afirma: “*es altamente probable que la energía de las corrientes eléctricas variables sea en parte radiada en el espacio*”. Sin embargo hizo notar que podría ser muy dificultoso detectar tal radiación.

La fecha de inicio de los trabajos de Hertz sobre ondas electromagnéticas es el 13 de noviembre de 1886. Esta fecha marca el comienzo de un proceso, denominado por M. García Doncel como la “conversión” de Hertz a las ondas hercianas. Esa conversión consiste, fundamentalmente, en sacar los fenómenos eléctricos de los materiales conductores, al espacio vacío, el que es considerado finalmente como un dieléctrico más [3].

En el presente artículo nos proponemos realizar una revisión histórica de los trabajos de Hertz sobre ondas electromagnéticas. No pretendemos realizar una investigación sobre las cuestiones epistemológicas subyacentes en la concepción de la noción de campo ni en la evolución mental del propio Hertz sobre el asunto. Mas bien, nuestro deseo es rescatar, para su eventual uso en el aula, o para aquel que esté interesado en el tema, los principales aspectos de una investigación que ha tenido consecuencias fundamentales para el posterior desarrollo de la Física y con influencias tecnológicas (y sociales) insospechadas para quien las realizó por primera vez. Finalizamos el mismo con una propuesta de réplica del sistema ideado por Hertz para la producción y detección de radiación electromagnética. El mismo no sólo permite realizar demostraciones en el aula, sino también posibilita llevar a cabo mediciones del fenómeno de resonancia descubierto por Hertz.

2.-El oscilador de Hertz

En su excelente libro sobre Hertz y el descubrimiento de las ondas electromagnéticas, J. Buchwald [4] realiza el siguiente relato “*Hacia fines de diciembre de 1887 un ambicioso joven físico alemán, llamado H. Hertz, decidió que había fabricado un nuevo fenómeno en un aula del Instituto Técnico de Karlsruhe. Rápidamente los Físicos de toda Europa construyeron dispositivos basados en la descripción de Hertz, acordando la mayoría de ellos, en la producción de ese nuevo fenómeno. Dentro de una década y media, los descendientes del aparato original de Hertz, profundamente modificados, conocidos como el oscilador dipolar y el resonador, resultaron artefactos tecnológicos de poco interés para la mayoría de los investigadores en Física*”. Extraño destino, decimos nosotros, para un equipo que, no sólo constituye la piedra fundacional de nuestra “sociedad de las telecomunicaciones”, sino que, y quizá más importante aún para la Física Contemporánea, consolidó el concepto de campo.

En esta sección realizaremos una descripción del equipo desarrollado por Hertz para el estudio de las ondas electromagnéticas. Previamente, comentaremos algunos de sus principales antecedentes.

2.1- Antecedentes

El primer dispositivo sugerido por FitzGerald, conocido como *el oscilador magnético*, consiste de un pequeño circuito de área S , en el cual la intensidad de la corriente varía de acuerdo a una simple ley periódica de periodo T y cuya intensidad máxima es cA . Se puede demostrar que la energía electromagnética irradiada por ese circuito, por unidad de volumen promediada sobre un periodo de la oscilación y sobre la superficie de una esfera de radio r es:

$$\frac{\pi A^2 S^2}{3c^2 r^4 T^2} \left(1 + \frac{4\pi^2 r^2}{c^2 T^2}\right)$$

La parte de esta energía que es irradiada corresponde al término que va como $1/r^2$. Así el valor promedio de la energía irradiada a una distancia r del oscilador es⁵:

$$\frac{4\pi^3 A^2 S^2}{3c^4 r^2 T^4}$$

Este término es pequeño, a menos que la frecuencia de la corriente sea muy grande, pues el período es la inversa de la frecuencia: $T=1/f$; así las corrientes alternas usuales no conducen a radiación apreciable. Esta situación obligó a pensar en dispositivos en donde se produjesen variaciones más bruscas de la corriente.

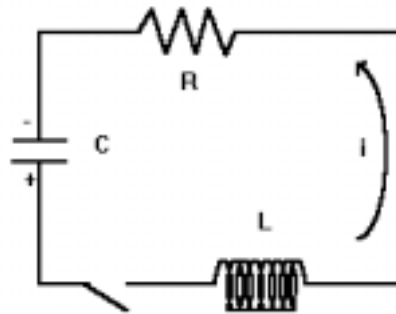


Figura 1: Circuito equivalente al oscilador de FitzGerald

En el año 1883 FitzGerald sugirió un método de obtención de corrientes de muy alta frecuencia. El mismo consistía en la utilización de las corrientes alternas que son producidas cuando un condensador se descarga. Esencialmente el dispositivo sugerido por FitzGerald puede representarse con el circuito mostrado en la figura 1. Un circuito como ese, sólo puede ser recorrido por una corriente variable. En efecto, al propagarse la

⁵ El otro término es despreciable para distancias grandes; es lo que se obtendría si los efectos de inducción de las corrientes de desplazamiento fuesen despreciados.

corriente variable por el circuito, las armaduras del condensador se cargarán y descargarán, periódicamente, jugando así el papel de “fuentes” y “sumideros” de la corriente en el circuito abierto. Además, la corriente a tiempo t está dada por $i(t)=i_0 e^{\alpha t}$, con α tomando los valores [5]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[-\frac{R}{L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{LC}} \right]$$

Nótese que si $R=0$, α toma los valores imaginarios puros, $\alpha = \pm i \omega_0$, con

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} ; \tag{1}$$

es decir la corriente en el circuito oscila con una frecuencia $f = \omega_0/2\pi$. Si $R^2C > 4L$, la descarga no es oscilatoria. La expresión (1) fue obtenida por W. Thomson en 1853, a través de consideraciones energéticas, y pone de manifiesto la dependencia de la frecuencia de oscilación característica de un circuito con las propiedades de capacidad y autoinducción del mismo. Eligiendo L y C adecuadamente se pueden obtener frecuencias de oscilación tan elevadas como se desee.

W. Feddersen, en 1858, confirmó la expresión (1) al estudiar la descarga oscilante de una botella de Leyden.

2.2.- El desarrollo de Hertz

Como fue dicho anteriormente, Hertz realizó sus investigaciones sobre ondas electromagnéticas en la Universidad de Karlsruhe. Entre los equipos disponibles en su laboratorio, había un conjunto de espirales de Knochenuer. Estas son bobinas espirales planas de alambre de cobre, una encima de la otra. En los extremos de esas bobinas hay esferillas metálicas (ver figura 2). Al descargar un capacitor (botella de Leyden) en una de esas bobinas, Hertz observó que saltaba una chispa entre las esferillas de la otra bobina. Notó que se trataba de un fenómeno con determinadas regularidades y estimó además que la frecuencia de oscilación de esas descargas era del orden de 10 kHz (Feddersen había logrado descargas de frecuencia cercana al Mhz al trabajar con botellas de Leyden). El próximo paso dado por Hertz consiste en lograr frecuencias muchos más altas (longitudes de onda mucho más cortas). Con ese fin, Hertz diseñó un circuito oscilatorio abierto. El mismo constaba de dos tramos de alambre de 2 mm de diámetro y aproximadamente de 1,5 m de longitud, en uno de sus extremos cada alambre tenía adosada una esfera de zinc de 30 cm de diámetro, y en el otro extremo una esferilla de latón. Entre cada esferilla quedaba abierta una pequeña brecha, por la cual saltaban chispas. El circuito era alimentado por una gran bobina inductora, como está esquematizado en la figura 3 (en lenguaje moderno denominaríamos al circuito recién descrito como un “dipolo de semilongitud de onda

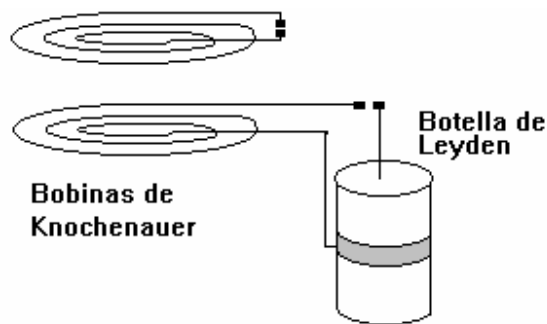


Figura 2: Bobinas de Knochenuer

alimentado capacitivamente”). La figura 4 es una fotografía del montaje utilizado por Hertz; esta imagen tiene, a nuestro entender, una gran valor histórico, pues fue tomada por el propio Hertz.

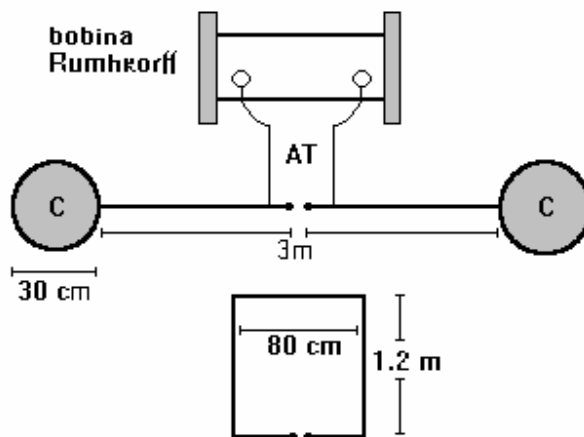


Figura 3: Esquema del montaje “emisor - receptor” utilizado por Hertz. Adaptado de la referencia [6]. Las medidas sobre el circuito secundario corresponden al “perímetro de resonancia” indicado en la figura 6.

El oscilador desarrollado por Hertz es muy similar al sugerido por FitzGerald; la única diferencia es que en el dispositivo de FitzGerald el condensador es utilizado sólo como un reservorio de energía (sus láminas están tan cerca que el campo electrostático debido a las cargas está prácticamente confinado al espacio entre ellas), y la verdadera fuente de radiación es el campo magnético alternante debido al lazo circular de alambre; en cambio en el dispositivo de Hertz el lazo de alambre no existe, las placas del condensador están separadas una cierta distancia y la fuente de radiación es el campo eléctrico alternante producido por las cargas en el condensador.

La descripción física del proceso de emisión del oscilador es el siguiente: cuando no salta chispa en el emisor, la resistencia del circuito es la del secundario de la bobina inductora. Cuando la diferencia de potencial entre las esferillas de latón supera al voltaje de ruptura del aire, una chispa salta entre ellas; de esa forma la resistencia del circuito cae

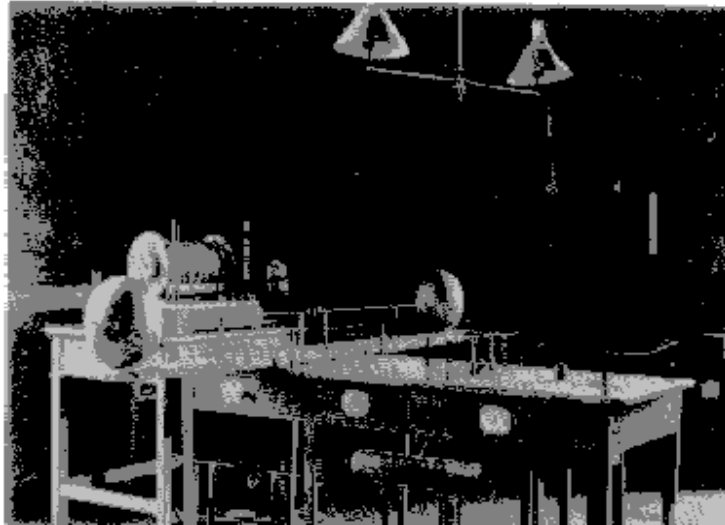


Figura 4. Fotografía del sistema oscilador- resonador, utilizado por el propio Hertz

abruptamente y se produce un cambio rápido en la corriente (di/dt), el cual genera oscilaciones de radiofrecuencia amortiguadas. En este sentido, se puede pensar a la chispa como una llave que al cerrarse produce una descarga abrupta del condensador (formado por las esferas).

Para un circuito lineal de largo l , construido con un alambre de diámetro a , la autoinductancia L está dada, aproximadamente, por ⁶:

$$L = 2 \mu_0 l \ln(l/a) \quad (2)$$

donde a es el radio del alambre con el cual está construido el circuito y μ_0 es la permitividad magnética del medio exterior. Por otro lado, la capacidad de un sistema formado por dos esferas de radio R_1 y radio R_2 separadas una distancia b es [7]:

$$C = \varepsilon_0 \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} - \frac{2}{b} \right]^{-1} \quad (3)$$

con ε_0 la constante dieléctrica del vacío. En el caso del oscilador de Hertz las dos esferas eran de igual radio y estaban separadas por una distancia bastante más grande que sus radios ($b \rightarrow \infty$). Así, la capacidad del sistema formado por las dos esferas es igual a:

$$C = \varepsilon_0 \frac{R}{2} \quad (4)$$

con R el radio de las mismas⁷. A su vez, la velocidad de la luz, c , está dada por la expresión:

⁶ El error relativo en la expresión (2) es del orden de magnitud $1/\ln(l/a)$.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

En la primera serie de trabajos Hertz utilizó un oscilador cuyo conductor lineal era de 150 cm de largo y de radio 0.25 cm; además el radio de las esferas era igual a $R = 15$ cm. Estos valores, reemplazados en las expresiones anteriores, conducen a una frecuencia de oscilación ω_0 igual a 50 Mhz (correspondiente a una longitud de onda de 6m). Al avanzar en sus investigaciones, Hertz “acortó” los brazos de su oscilador, llegando a frecuencias cercanas a los 430 MHz ($\lambda = 70$ cm). Estos valores caen justo en el umbral de las microondas, como se muestra en la figura 5.

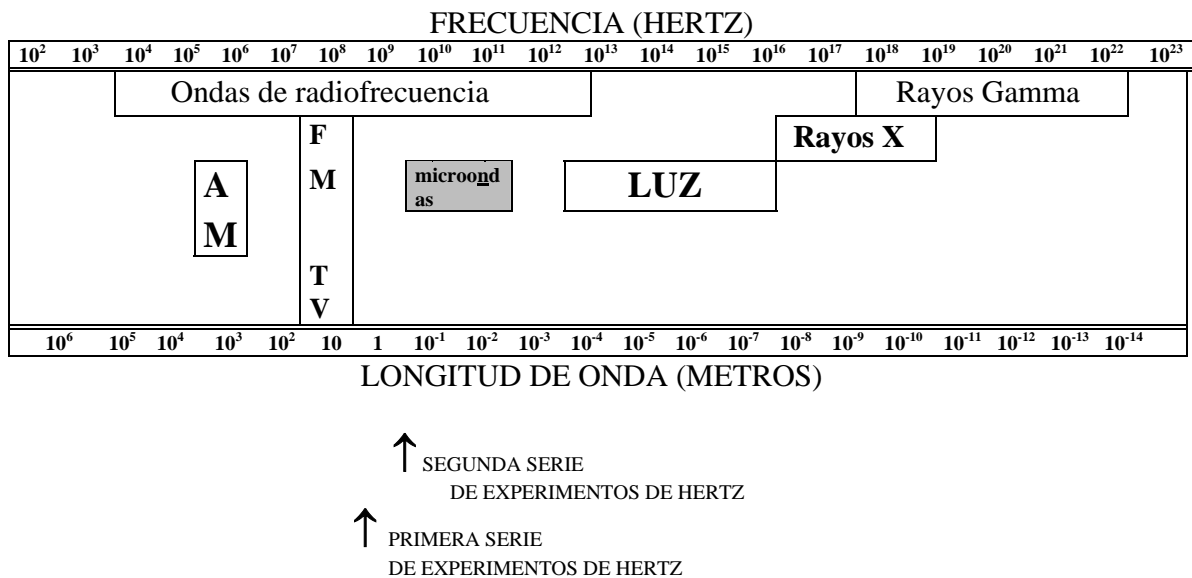


Figura 5: Espectro Electromagnético. Hertz trabajó en el umbral de la región de microondas.

El receptor utilizado por Hertz, mientras trabajaba con su emisor de $\lambda = 6$ m, consistía de un circuito formado por un lazo rectangular de alambre. El lazo estaba abierto con una pequeña separación entre sus extremos, en donde había colocado un micrómetro con el cual medía la longitud de las chispas que saltaban entre los extremos del lazo. Este micrómetro jugaba el rol, en cierta manera, de un voltímetro, con el cual podía medir la magnitud del campo electromagnético existente en la cercanía del lazo.

La forma típica de la señal emitida por un oscilador herciano es una onda sinusoidal amortiguada, como puede verse en la figura 6; el amortiguamiento se debe, principalmente a las pérdidas por radiación, pues las pérdidas en el circuito son mínimas.

⁷ Aquí Hertz comete lo que él llama un “error fatal”: toma la capacidad de una sola esfera, en lugar del sistema de esferas. Para una sola esfera la capacidad vale $C = \epsilon_0 R$. Este error se propaga a lo largo de todos sus trabajos, y fue notado por H. Poincaré.

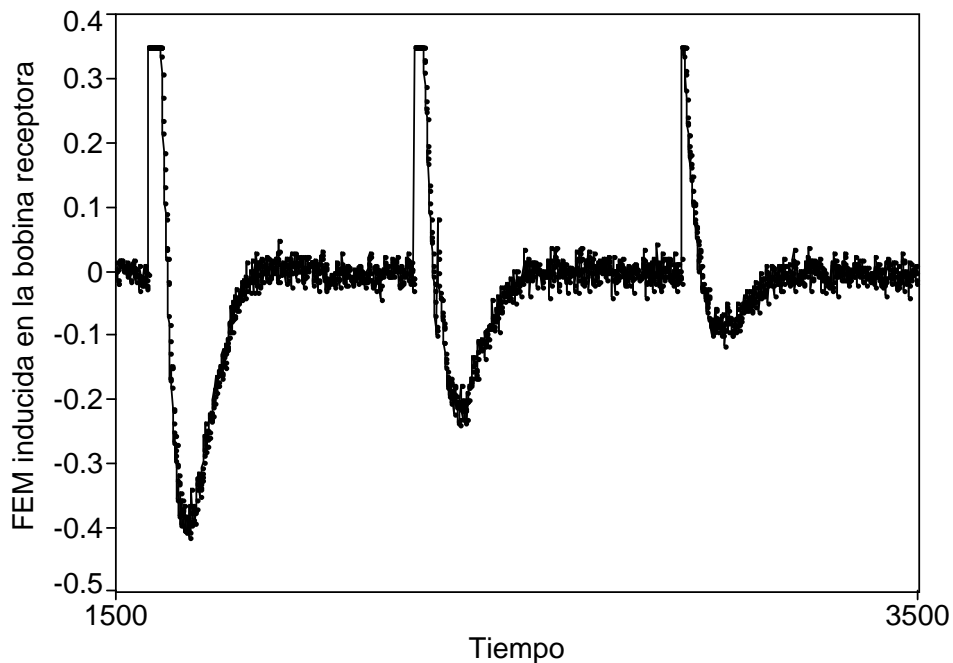


Figura 6: FEM inducida en la bobina receptora de la réplica descrita en la sección 4. Cada uno de los picos y valles que resaltan corresponden a una chispa. A su vez cada una de ellas produce una señal sinusoidal amortiguada. La escala de tiempos se ha elegido de forma tal que una división corresponde a 2×10^{-5} segundos.

3.- Trabajos fundamentales de Hertz

A lo largo del proceso de conversión de Hertz a las ondas hercianas, comentado anteriormente, el cual dura un poco más de dos años, Hertz va realizando diversos trabajos, siendo los resultados de cada uno de ellos, un eslabón en la cadena de evidencias a favor de la teoría de Maxwell. Se destacan: la verificación de la existencia de las corrientes de desplazamientos en los dieléctricos, la producción de ondas “eléctricas” estacionarias en alambres, la verificación del efecto pelicular (skin effect), ondas estacionarias en el aire, el fenómeno de resonancia, carácter óptico de la radiación producida, determinación experimental de los campos producidos por el dipolo, etc⁸... . A continuación haremos una breve descripción de algunos de estos trabajos.

3.1 Corriente de desplazamiento

⁸Otro descubrimiento realizado por Hertz fue el efecto fotoeléctrico. Su descubrimiento fue en cierta forma casual, aunque para nada fue considerado por Hertz un fenómeno de poca importancia.

En el año 1879 la Academia Prusiana de Ciencias ofrece un premio (conocido como el Premio de Berlín) a quien “establezca experimentalmente cualquier relación entre las fuerzas electromagnéticas y la polarización dieléctrica de los aisladores”. Helmholtz sugiere a su alumno predilecto que encare este tema de investigación, ofreciéndole además toda la colaboración de su laboratorio en caso de aceptar la propuesta. Inicialmente Hertz no se entusiasma con ese problema. Debieron pasar casi siete años para que Hertz encarase ese trabajo (8/9/1887); lo hizo recién cuando dispuso de su oscilador. En particular, pudo demostrar que un material aislante ubicado cerca del oscilador modificaba la respuesta del detector comprobando así que en los cuerpos aislantes pueden producirse corrientes eléctricas de alta frecuencia detectables por sus efectos de inducción electromagnética. Esto significó la verificación experimental de la existencia de las corrientes de desplazamiento en los aislantes, lo cual era de importancia fundamental para la teoría de Maxwell; (ver ref. [7], pag 839).

3.2 Experimentos de resonancia

Era conocido en la época de Hertz, que una corriente alternada podía actuar resonantemente sobre otro circuito, es decir, que una corriente de una dada frecuencia debe tener una acción inductiva mucho mayor sobre un circuito de la misma frecuencia característica de oscilación (tener presente la expresión (1)), que sobre un circuito de frecuencia propia ligeramente distinta. Con el fin de verificar este fenómeno de resonancia en su sistema emisor - receptor, Hertz fijó las condiciones de emisión de su oscilador y varió el perímetro del circuito secundario o receptor. En este experimento él observó que la longitud de la chispa producida en el secundario era distinta para cada uno de los valores del perímetro. La figura 7 muestra esos resultados, poniéndose de manifiesto el fenómeno de resonancia indicado. Desde un punto de vista físico, ello se explica por el hecho de que variando la longitud del circuito se varían la capacidad y la autoinducción del mismo (ver expresión (2)).

3.3 Efecto pelicular (Skin Effect)

Fue el propio Maxwell quien sugirió el fenómeno del efecto superficial, es decir, aquel que pone de manifiesto la tendencia de las corrientes alternas de alta frecuencia a penetrar sólo una pequeña distancia dentro de un conductor. A medida que la frecuencia se eleva, la longitud de penetración disminuye, con lo cual la energía portada por las ondas viaja mayoritariamente a través del espacio exterior de los conductores. Para investigar esto Hertz encerró su detector en una caja metálica con paredes de distintos espesores, todos menores a 1/20 mm. El observó la completa anulación de los efectos sobre el circuito secundario.

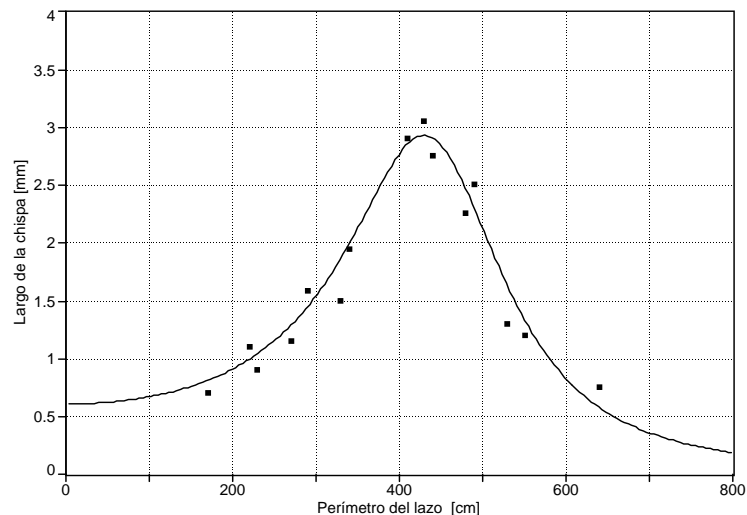


Figura 7: Gráfico obtenido por Hertz al estudiar el fenómeno de resonancia.

3.4 Ondas estacionarias “en el aire”

Al comienzo de las investigaciones con su oscilador, Hertz no pensaba en términos de ondas electromagnéticas. Más bien, veía en él solo un circuito en el cual se producían corrientes de muy alta frecuencia capaces de inducir corrientes oscilatorias en el secundario. Poco a poco va convenciéndose de que en realidad está en presencia de un fenómeno de características ondulatorias. Este descubrimiento, sin lugar a dudas, coloca a Hertz entre uno de los físicos experimentales más geniales de la historia de la Física. Con su equipo “emisor-receptor” va detectando “valles” y “montañas” a lo largo del espacio, basándose solo en el largo de las chispas, de centésimas de milímetro, que saltaban en el circuito secundario. La distancia entre esos valles y montañas correspondían a una longitud de onda de 9,6 metros.

Con el mismo procedimiento pudo determinar sobre todo un plano la dirección del campo eléctrico creado por su oscilador (y a través de toda el aula en donde realizó sus trabajos). Posteriormente confirma el carácter óptico de la radiación producida (propagación rectilínea, verificación de las leyes de refracción y reflexión y propiedades de polarización).

4.- Una réplica actualizada

Muchos autores interesados en la historia de los trabajos de Hertz no han podido resistir a la tentación de construir una réplica del oscilador (ver referencias [3] y [8]). Tampoco

nosotros hemos podido hacerlo. Nuestra intención ha sido desarrollar una réplica de fácil construcción, con elementos accesibles y aprovechando algunas de las posibilidades que nos brinda la electrónica actual.

Como fuente de alta tensión usamos una bobina de encendido de un automóvil; es conveniente usar las que tienen un voltaje de salida de 24000 V (son las aptas para los vehículos que usan GNC). Como disparador de la chispa usamos el circuito mostrado en la figura 8. El circuito tal cual está diseñado permite disparar hasta unas 200 chispas por segundo. Ese número puede variarse con el potenciómetro incluido. La alta tensión se descarga sobre dos alambres de 3 mm de diámetro y 30 cm de largo. Como esferas *C* (con referencia a la fig. 3) usamos dos bolas metálicas de 5 cm de radio. Las esferillas entre las que saltan las chispas son esferitas de latón de 2 cm de diámetro. La distancia entre ellas puede variarse deslizando los alambres sobre los que están montadas. La separación entre ellas debe ajustarse hasta lograr que se produzcan chispas. El circuito disparador se alimenta con una fuente de 12 V y se acciona a través del pulsador; el consumo medio es del orden de 1,5 amperes. Se debe tener particular cuidado con el montaje de los alambres que sostienen a las esferas, pues el tema de la aislación de la alta tensión es mucho más complicado de lo que uno cree. De acuerdo a nuestra experiencia el acrílico es un muy buen aislante. Como conductor desde la salida de alta tensión de la bobina hasta uno de los conductores en el oscilador, es adecuado usar los típicos cables de bujías para automóvil.

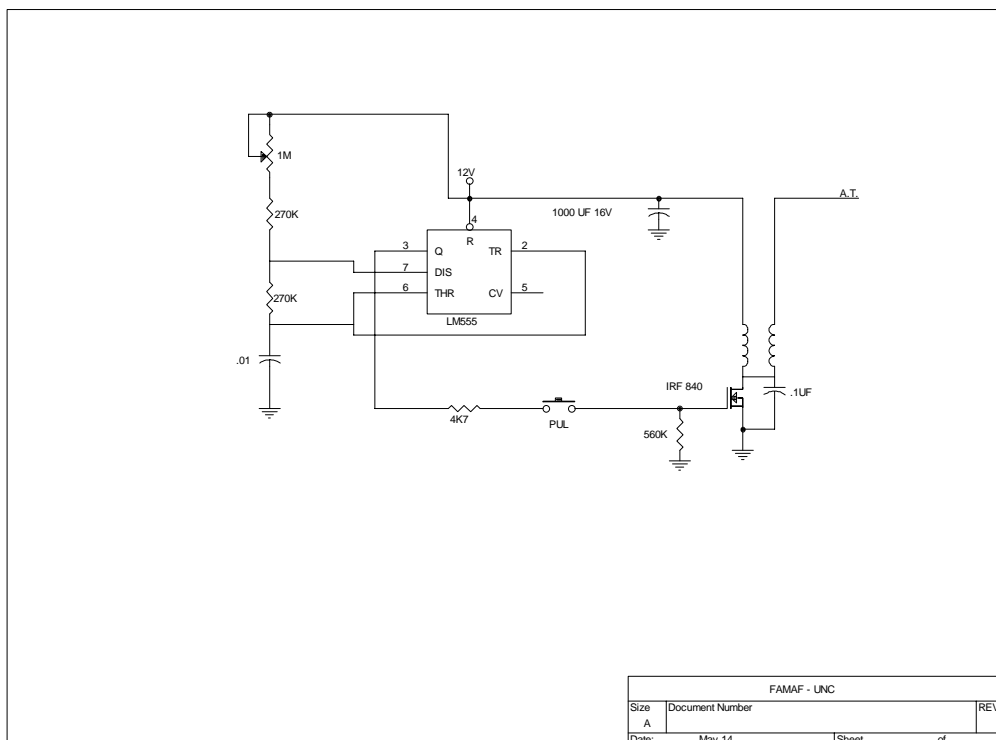


Figura 8: Circuito para el disparador de chispa.

Como receptor hemos trabajado con dos opciones. Una de ellas es simplemente una bobina construida con alambre de 0.25 mm de diámetro, enrollado sobre un trozo de caño de PVC

de 2 cm de radio y unos 20 cm de largo. La corriente inducida en la bobina se rectifica mediante un diodo 1N4148 y un capacitor; ver bloque izquierdo del circuito mostrado en la figura 9. Con 300 vueltas de alambre y núcleo de ferrite se logra que, al producir las chispas en el primario y a una distancia de 30 cm, se encienda un diodo luminoso (LED) rojo conectado a los terminales de la bobina; esto significa un voltaje inducido del orden de 1.5 volts. La otra opción consiste en amplificar la señal, ya rectificada, recibida por la bobina receptora. El circuito utilizado para tal fin está mostrado en la figura 9. Se usa un operacional IC 3140. La “carga” que se puede activar al hacer saltar las chispas, consiste de un par de diodos de distintos colores o de una chicharra. Es interesante destacar que el efecto se observa aun cuando el receptor se coloque a un metro del emisor . Este circuito se alimenta con 3 baterías de 1,5 volts. Ciertamente, estas propuestas de circuito receptor son apropiadas para demostrar el efecto producido por el salto de chispas en el primario, en lugar de ver las chispas que se inducen en el secundario, tal cual lo hizo Hertz, lo cual resulta más cómodo para su uso en el aula.

Nuestra réplica permite reproducir el experimento con el cual Hertz verificó el fenómeno de resonancia. La idea es reemplazar la bobina receptora por varios lazos de alambre de cobre laqueado de 2mm de diámetro y de distintos perímetros. A su vez, se debe conectar un voltímetro (de escala 0-5 volts) a la salida del amplificador, en lugar de los LEDs o chicharra. Se observa un crecimiento de la respuesta del circuito receptor, y posterior decrecimiento, a la señal emitida por el chispero, al variar el largo de los alambres. Graficando el voltaje medido en función del largo del lazo, se reobtiene la figura 7.

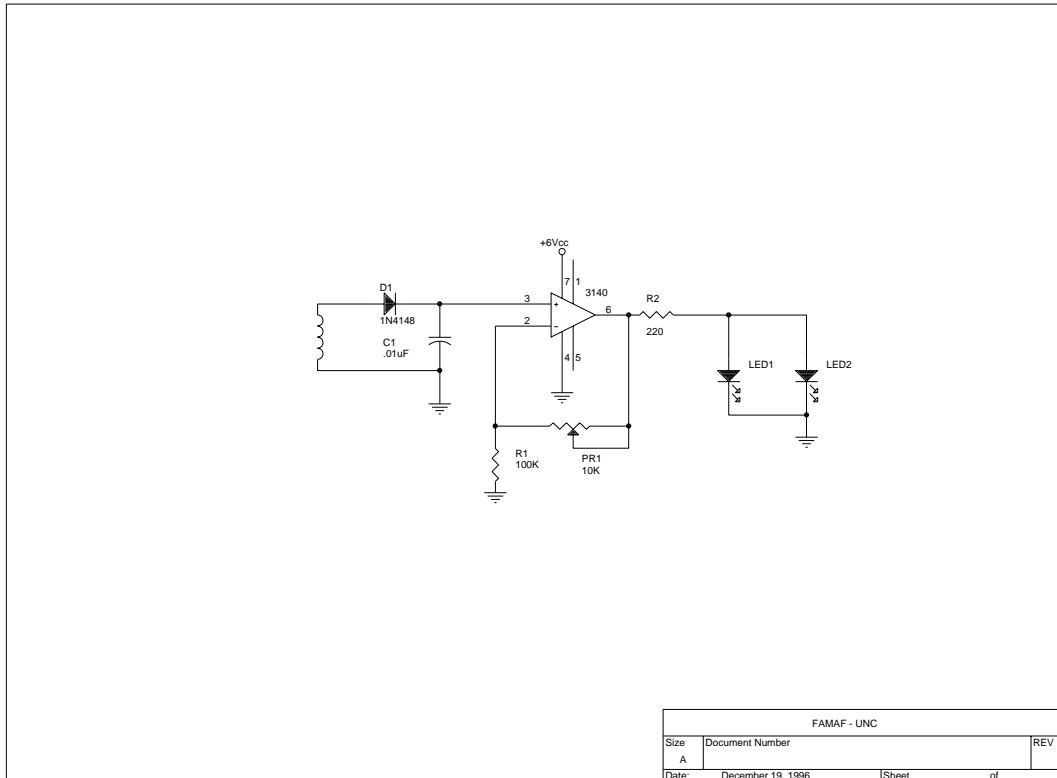


Figura 9: Circuito utilizado para amplificar la señal recibida en la bobina receptora.

5.- Referencias

1. E. Whitaker, "A History of the Theories of Aether & Electricity", Dover Publications, Inc., New York (1989).
2. H. Zatzkis, Am. J. Phys. **33**, 898 (1965).
3. M. García Doncel, "Heinrich Hertz, Las Ondas Electromagnéticas", Publicaciones de la Universidad Autónoma de Barcelona, Belaterra (1990). Ver también, su artículo en la revista Investigación y Ciencia, número 208, 1994.
4. J. Buchwald, "The Creation of Scientific Effects", The University of Chicago Press, Chicago (1994).
5. R. Serway, "Física", tomo II, McGraw-Hill, México 1993, pag. 931.
6. H. Hertz, "Electric Waves", Dover, New York (1962).
7. E. Durand, "Electrostatique et Magnéto-statique", Masson et Cie Editeurs, Paris (1953).
8. J. Bryant, "The First Century of Microwaves - 1886-1896", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **36**, 5, (1988).
9. Kraus, "Heinrich Hertz - Theorist and Experimenter", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **36**, 5, (1988).

6.- Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a las siguientes personas: al Sr. F. Miotti, del Grupo de Desarrollo Electrónico de la FaMAF, por su fundamental ayuda en todo lo relacionado con la electrónica de nuestra réplica; lo mismo al Ing. C. Marqués por sus valiosas sugerencias; al Prof. M. García Doncel, de la Universidad Autónoma de Barcelona, por haberme hecho llegar un copia de la foto de la figura 4. Este trabajo fue realizado con apoyo de CONICOR y Secyt-UNC.