

Propuesta de recreación de los experimentos de Hertz en el Laboratorio de Enseñanza de la Física

Javier F. Martín¹, Mariano A. Nicotra¹, Carlos Leguizamón¹ y Ángel Galeasso¹

¹*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 01/09/2015

Fecha de aceptación del manuscrito: 19/05/2016

Fecha de publicación: 30/09/2016

Resumen—Este artículo describe el trabajo realizado por los autores para poner a punto un dispositivo experimental que permita la reproducción práctica de los pioneros experimentos sobre electromagnetismo llevados a cabo por Heinrich Hertz (1857-1894) en Karlsruhe alrededor de 1881. A lo largo del desarrollo experimental, se ha procurado respetar el diseño original de los equipos utilizados en esos tiempos, sobre todo en lo relativo al transmisor de Hertz. Se espera que con el uso de este equipo experimental en las clases de laboratorio los estudiantes que cursan los fundamentos de electromagnetismo puedan tener sus primeros contactos con experimentos demostrativos, a la vez sencillos y elegantes.

Palabras clave— electromagnetismo, ondas hertzianas, ecuaciones de Maxwell.

Abstract— This article describes the work performed by the authors in order to adjust the experimental devices that allows for the practical reproduction of the pioneer experiments on electromagnetism conducted by Heinrich Hertz (1857-1894) in Karlsruhe near 1881. Throughout the experimental development, the authors have tried to follow the original design for the equipment used in those times, especially with regard to the transmitter device used by Hertz. It is expected that the use of such experimental equipment in laboratory classes, will allow students who attend the fundamentals of Electromagnetism to have their first contact with such simple and elegant demonstrative experiments.

Keywords— electromagnetism, hertzian waves, Maxwell equations.

INTRODUCCIÓN

Los experimentos históricos constituyen una interesante herramienta a utilizar para la Enseñanza de la Física a fin de permitir un contacto directo entre alumno y la realidad que la Física pretende desentrañar y aprovechar en beneficio del hombre (Hurtado de Mendoza y Drewes, 2004). En este caso particular se eligió el Experimento de Hertz por la sencillez conceptual de los dispositivos experimentales involucrados y la intuitiva interpretación de los resultados que se pueden obtener. El laboratorio de Enseñanza de Física (LEF) cuenta con algunos de los elementos componentes similares a los utilizados para el armado del equipamiento empleado en tales experimentos pioneros y aquéllos que faltan se han podido construir con los moderados recursos al alcance del LEF. Entendemos que el estudiante de Física para Ingeniería habrá de enriquecerse especialmente si a los contenidos teóricos y ejercicios de cálculo que se abordan en clases teórico-prácticas se suma el contacto con la realidad del

electromagnetismo que los experimentos de Hertz facilitan (Bravo y Pesa, 2007). En consecuencia los autores decidimos construir un dispositivo experimental que permite poner a disposición de las Cátedras de Física Básica del Departamento una experiencia histórica que se podrá utilizar como equipo de demostración tanto en las clases teóricas como en las clases prácticas.

Las ondas electromagnéticas constituyen uno de los raros casos de la Física que antecedió al siglo XX que se descubrieron como consecuencia de estudios teóricos. Podría decirse que entra en esa categoría especial de descubrimientos que, como en el caso del planeta Neptuno, han sido producidos “en la punta de la pluma”¹. Hechos de esta clase pusieron de relieve la enorme capacidad de la mente humana que había transformado a las ciencias de la naturaleza en certeras herramientas de pronósticos, cuestión novedosa para ciencias de esos siglos.

Es público y notorio que las ondas electromagnéticas fueron el fruto de uno de los trabajos teóricos más brillantes de la historia de las ciencias, acometido a mediados del siglo XIX por el escocés James Clerk Maxwell (Maxwell, para la posteridad). Matemático de talla mayor, Maxwell

Dirección de contacto:

Ing. Javier Martín. Laboratorio de Enseñanza de la Física, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la UNC. Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria de Córdoba, X5016 CGA. Tel: 5353800 interno 29086, jmartin.cba@gmail.com

¹ Frase atribuida a Arago, mencionada por Papp, D. en Historia de las Ciencias, Editorial Andrés Bello, 1996. Algunos textos de Física de origen ruso se la atribuyen a Lenin en alguna de sus obras filosóficas.

sintetizó en 20 ecuaciones diferenciales a las leyes fundamentales del electromagnetismo, que en su origen se presentaban como ecuaciones integrales. Otro británico, Oliver Heaviside las redujo a cuatro ecuaciones diferenciales apelando al formato que brindaba el novedoso Análisis Vectorial. Hoy se las conoce como las cuatro ecuaciones de Maxwell, aunque en ciertas ocasiones se las ha denominado las cuatro ecuaciones de Maxwell-Heaviside (Hunt, 1991; Sengupta y Sarkar, 2006).

Aunque son ampliamente conocidas por la comunidad de la Ingeniería, se repasan aquí brevemente. Las cuatro ecuaciones parten de las integrales, a lo largo de dominios cerrados, del flujo y de la circulación de los campos eléctricos y magnéticos. En varias ramas de la Física, estas integrales definen en cierta manera la “personalidad” de los campos vectoriales bajo análisis. Las herramientas propias del Análisis Vectorial permiten convertir las ecuaciones integrales de flujo a través de superficies cerradas en ecuaciones diferenciales que determinan la divergencia de los campos involucrados. Para una región del espacio físico vacío de materia pero que incluya campos eléctricos y magnéticos, se tiene:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad ; \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1)$$

De manera análoga, la circulación de los campos vectoriales a lo largo de trayectorias cerradas se relaciona con el rotor de dichos campos:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad ; \quad \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

Es conveniente señalar que tanto la divergencia como el rotor no son otra cosa que operadores diferenciales que asocian de una manera ordenada las derivadas parciales primeras de las componentes de los campos con respecto a las coordenadas espaciales (por ejemplo, las coordenadas cartesianas x, y, z). La habilidad del planteo de Maxwell es que tales derivadas espaciales de uno de los campos (el eléctrico, por ejemplo) quedan vinculadas con las derivadas temporales del segundo campo (en el ejemplo, el campo magnético). Y recíprocamente.

El trabajo de Maxwell no hubiese sido nada más que una singular y bella forma de presentar un compacto de las leyes conocidas del electromagnetismo de no ser por una innovación y un hallazgo.

El segundo miembro de la última ecuación, que de acuerdo a los predecesores de Maxwell (principalmente Ampere) debía ser nulo en el vacío, fue modificado por Maxwell por una cuestión de “simetría” para que las ecuaciones de rotores quedasen similares. La falta de “simetría” que inicialmente había entre los rotores, ya que uno de ellos, E , se relacionaba con la derivada temporal de B , en tanto que el rotor de B no mostraba dependencia con la derivada de E respecto al tiempo, hizo que Maxwell sospechase que la ecuación original del rotor del campo magnético estuviese incompleta.

La consecuencia de la audaz propuesta de Maxwell al simetrizar las ecuaciones de rotores estaba todavía por verse. En efecto, el segundo miembro de la cuarta ecuación se relaciona con las *corrientes de desplazamiento*, que juegan un rol protagónico central en las telecomunicaciones ya que son las fuentes principales de señales viajeras. Con

esta propuesta se ponía de manifiesto una nueva fuente de magnetismo que se sumaba a las ya conocidas.

Por otra parte, la solución encontrada por Maxwell para su sistema de ecuaciones aplicable al vacío fue el verdadero hallazgo de su brillante pluma: compatible con las leyes de conocidas del electromagnetismo, aceptando la simetrización de ambos rotores, concluye que pueden existir campos eléctricos y magnético variables con el tiempo en el vacío más absoluto. Y estos campos son campos viajeros a la manera de ondas que, para colmar aún más la medida, se propagan a la velocidad de la luz.

Claro que todo esto era -por entonces- pura elucubración teórica que hubiera causado delicias de los antiguos pensadores griegos que confiaban al extremo en la fortaleza del pensamiento humano a la hora de desentrañar los misterios de la naturaleza. No obstante, la Física decimonónica era radicalmente diferente y sumamente reacia al pensamiento griego. Desde la revolución galileana, la naturaleza sólo podía conocerse experimentando, “provando e riprovando”². Para que las ondas de Maxwell tuvieran carta de ciudadanía en la Física, era imprescindible la prueba final de producirlas y detectarlas en el laboratorio. Precisamente de eso se iba a ocupar Heinrich Rudolf Hertz y lo iba a hacer con la sencillez y contundencia típica de los profesores universitarios alemanes de la segunda mitad del siglo XIX, aquéllos que durante casi un siglo impondrán a las ciencias en general la agudeza y solidez de sus investigaciones.

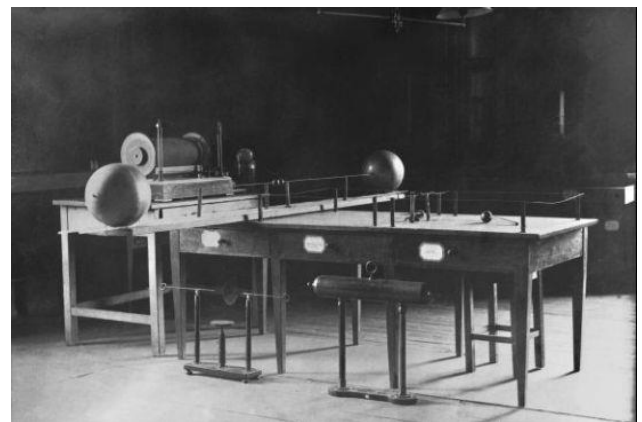


Fig. 1. Dispositivo experimental de Hertz. Fuente: Instituto Tecnológico de Karlsruhe

MONTAJE DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Basado en fotografías de la época en que se realizó el experimento original de Hertz (ver Fig. 1) se montó un primer dispositivo experimental compuesto por un generador de ondas electromagnéticas formado por un

² “Provando e riprovando”. Por ejemplo, Millefiorini, P. (Provando e riprovando: impegno, politica ed etica nella grande letteratura) aclara que se trata una frase de Paraíso 3, 3 de la Divina Comedia del Dante, que adoptada más tarde con un sentido ligeramente cambiado por la *Accademia del Cimento de Firenze* como expresión emblemática del método experimental galileano.

carrete de Ruhmkorff que tiene la función de elevar la baja diferencia de potencial eléctrico del primario, 12 V, a unos 50 kV en el secundario y por dos esferas metálicas de 5 cm de diámetro, unidas por dos cables de un metro de longitud a los explosores del carrete de Ruhmkorff, que proporcionan la capacidad del circuito oscilante. Como detector se utilizaron espiras rectangulares de diferentes medidas. A diferencia del experimento original, a fin de facilitar la detección, se conectó la espira receptora conectadas a un osciloscopio de 40 MHz de ancho de banda.



Fig. 2. Dispositivo experimental montado en el LEF. Fuente: Laboratorio de Enseñanza de la Física de la FCEFYN

A la luz de estos primeros resultados positivos se decidió mejorar el montaje incorporando dos esferas de chapa de aluminio de 30 cm de diámetro las que se conectaron al carrete de Ruhmkorff mediante dos varillas de bronce de 2,5 mm de diámetro y 1,5 m de longitud, detalles que forman parte del transmisor original de Hertz. También se cambió la configuración del regulador mecánico de la bobina de Ruhmkorff y reemplazaron los extremos del explosor terminados en puntas por elementos esféricos con la intención de lograr una descarga más regular entre ellos. Con esta nueva configuración se logró mejorar sensiblemente la intensidad y la periodicidad de la señal que se podía observar en el osciloscopio.

Finalmente, después de varios ensayos, probando con distintas configuraciones de los elementos que componen el sistema se estableció el dispositivo experimental que se muestra en la Fig. 2. Con este dispositivo se logró emitir ondas electromagnéticas que fueron captadas por una antena ubicada a unos 5 metros del aparato de Hertz. Para comprobar esta transmisión se conectó a la antena un osciloscopio, instrumento no disponible en la época de Hertz, que mostró en su pantalla una señal de forma senoidal amortiguada con una periodicidad de alrededor de 50 ns, equivalente a una frecuencia de 20 MHz (ver Fig. 3) que coincide con los cálculos teóricos basados en las características física del aparato de Hertz.

UNA DISCUSIÓN SOBRE EL OSCILADOR DE HERTZ

A diferencia de lo que suele verse en cierta bibliografía básica sobre el tema, conviene acotar que las ondas detectadas por Hertz no son las debidas a las oscilaciones producidas entre el secundario del carrete de Ruhmkorff y la capacidad de las esferas. Un cálculo aproximado de la frecuencia de oscilación de esos componentes indica oscilaciones del orden de las decenas de kHz. La eventual

producción de esas frecuencias es difícil de detectar con elementos pequeños, ya que se trata de ondas hectométricas (longitudes de onda de cientos de metros) que requieren de disponer de antenas largas y realizar la detección a distancias superiores a los 50 metros. Ni en el caso de Hertz, ni en el nuestro se contaba con material adecuado para hacer posible tal detección.

Por el contrario, el transmisor de Hertz tiene la posibilidad de producir oscilaciones en las decenas de MHz. Los elementos integrantes del circuito oscilante son las dos esferas (capacitor) y las dos varillas rectas (inductor) (Hertz, 1982; Durand, 1953; Lamberti, 1997).

Cálculos sencillos, como los que se hacen en las guías de problemas de Física Básica en las carreras de esta Facultad, permite determinar que el sistema cuenta con una capacidad del orden de los 9 pF y una inductancia de 4 μ Hy. Eso lleva a una frecuencia natural de oscilaciones cercana a los 26 MHz. Para campos que varían con dicha frecuencia, es suficiente una antena receptora en forma de cuadro rectangular de un par de decenas de centímetros de lado.

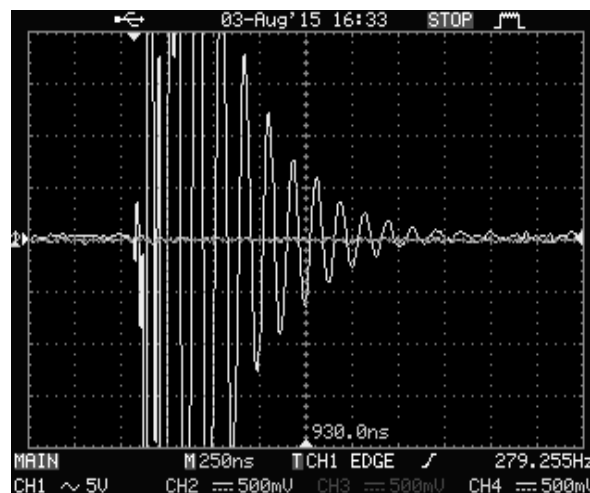


Fig. 3. Copia de la pantalla del osciloscopio. Fuente: Laboratorio de Enseñanza de la Física de la FCEFYN

Una mención aparte merece la presencia del explosor de Hertz, cuya finalidad no es la de producir las ondas en el espacio de aire entre los electrodos de descarga. La descarga se limita a facilitar las rápidas oscilaciones de la corriente de carga-descarga entre las esferas (armaduras del capacitor), la cual está obligada a circular por las dos mitades del alambre recto (el inductor), recorriendo alternativamente en un sentido y otro las partes componentes de lo que se conoce como el *dipolo de Hertz*. La corriente de conducción no es intensa, pero en cambio sí toma valores altos la derivada temporal del campo eléctrico entre esferas, lo cual implica la presencia de una significativa *corriente de desplazamiento*. Esta última es la responsable principal, de acuerdo a las ecuaciones de Maxwell, de que se produzcan campos magnéticos y eléctricos que se propaguen en forma ondulatoria en el aire que rodea al dipolo de Hertz. Las ondas debidas a esta rápida oscilación son aquellas susceptibles de ser detectadas por la pequeña antena de cuadro.

CONCLUSIONES Y PROPUESTAS

Tal vez se pueda esgrimir que no se descubre nada nuevo al repetir esta experiencia histórica. Sin embargo, el hecho de recrear un experimento histórico de la Física respetando los materiales, equipos y la tecnología de la época en que se realizó por primera vez, permite comprender la sencillez conceptual del dispositivo y las dificultades técnicas que tuvo que atravesar Heinrich Rudolf Hertz para concluir exitosamente sus experimentos.

Poner a punto este equipo resultó una tarea más compleja de lo que en principio se suponía. Obligó no sólo a revisar y discutir los principios teóricos que sustentan al experimento, sino que fue necesario consultar trabajos especializados llevados a cabo por profesionales expertos en telecomunicaciones. Fue necesario también agudizar las habilidades prácticas y apelar a la intuición para que, luego de varios fracasos iniciales, comprobar con cierta sorpresa que era posible observar las pequeñas oscilaciones amortiguadas en el trazo amarillo de la pantalla del osciloscopio.

Recomendamos a las Cátedras de Física Básica del Departamento de Física aborden estos pequeños desafíos vinculados con la historia de la ciencia y la tecnología. Otorgar la posibilidad a los estudiantes, para recrear en el aula, en el laboratorio de enseñanza o en espacios *ad hoc*, estos importantes experimentos, auténticos hitos en la historia de la Física, abre el camino para que el alumno -que debe ser siempre la razón de ser de los esfuerzos docentes- conozca por sí mismo estas cuestiones experimentales básicas permitiendo acceder al conocimiento de una forma diferente, más completa y significativa.

Para etapas posteriores se proyecta recrear otros dispositivos detectores que se utilizaron en fases posteriores del desarrollo histórico de estas tecnologías, como es el caso del *cohesor de Branly* inventado por médico y físico francés Edouard Branly, cohesor que fue utilizado Aleksandr Popoff en su primitivo detector de tormentas o por Nikola Tesla en sus experimentos e inventos vinculados al electromagnetismo. Y que también utilizaron y perfeccionaron pioneros de la radio como el ingeniero italiano Guillermo Marconi o como ingeniero Tebaldo Ricaldoni, de manera independiente, en las primitivas transmisiones de radiotelegrafía. Marconi conseguirá con este tipo de dispositivos, las primeras transmisiones de señales en código Morse, a través del canal de la Mancha primero, y entre Gran Bretaña y Canadá más adelante. Ricaldoni, olvidado ingeniero civil uruguayo egresado de la Universidad de Buenos Aires y radicado en nuestro país (fundador del Instituto de Física de la Plata por encargo de Joaquín V. González), hará por su parte las primeras transmisiones de radiotelegrafía en el Río de la Plata, por cuenta y orden de la Armada Argentina, en 1898 (tan sólo un año después de las primeras experiencias exitosas de Marconi, cuando muy pocos en el mundo eran capaces de tales logros). Se buscará, incluso, complementar dichos detectores, con sencillos dispositivos que proveen las tecnologías actuales, a fin de facilitar la comprensión por parte del alumno. Se intentará asimismo recrear el hallazgo de Hertz sobre las facilidades brindadas por la luz ultravioleta como auxiliar en los primitivos detectores, primera huella histórica del crucial efecto fotoeléctrico.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Enseñanza de la Física de la FCEFYN que nos presto sus instalaciones y equipos para montar el experimento.

A la Secretaría de Extensión de la FCEFYN por permitirnos exponer el dispositivo experimental en la Muestra Pasado y Presente de la Tecnología en Córdoba que tuvo lugar en la Sala Magna de la Academia Nacional de Ciencias durante el año 2015.

Al Reactor Nuclear RA-0 que nos facilito el instrumental electrónico (osciloscopio) con el cual se pudo medir y registrar la frecuencia de la oscilación producida por el oscilador de Hertz.

REFERENCIAS

- [1] Bravo S. y Pesa M. (2007), "El aprendizaje del concepto de error experimental en la medición de magnitudes físicas", *Memorias de REF XV*, Villa de Merlo, San Luis.
- [2] Durand E. (1953), *Electrostatique et Magnétostatique*, Masson et Cie, Editeurs, Paris.
- [3] Hertz H. R. (1982), *Las ondas electromagnéticas*, Universitat Autònoma de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Ediciones Bellaterra, Barcel·lona.
- [4] Hunt B. J. (1994), *The Maxwellians*, Cornell Univerity Press. Ithaca & London.
- [5] Hurtado de Mendoza D. y Drewes A. (2004), *Tradiciones y rupturas. La historia de la ciencia en la enseñanza*, Jorge Baudino Ediciones y UNSAM, Escuela de Humanidades, Colección Cuadernos de Cátedra, Buenos Aires.
- [6] Lamberti P. (1997), "Las investigaciones de Heinrich Hertz", *Revista de Enseñanza de la Física*, 10(2): 37-47.
- [7] Sarkar T. K., Mailloux R. J., Oliner A. A., Salazar-Palma M. y Sengupta D. L. (2006), *History of Wireless*. John Wiley & Sonc Inc. New Jersey.