

Microondas por chispa. Experimentos ópticos con microondas producidas con un equipo casero

Alejandro del Mazo Vivar

I.E.S. Francisco Salinas, Salamanca, España. amazo@serbal.pntic.mec.es

[Recibido en diciembre de 2009, aceptado en octubre de 2010]

La teoría del campo electromagnético fue el gran logro unificador del siglo XIX. Los experimentos de Hertz probaron la validez de la teoría y mostraron la existencia de otras ondas distintas a la luz pero con sus mismas propiedades. Queremos mostrar que es fácil comprobar algunas de esas propiedades con microondas generadas por medio de aparatos extremadamente simples hechos a mano. Para ello nos basaremos en las técnicas seguidas por los continuadores del trabajo de Hertz, como Righi o Lodge.

Palabras clave: Ondas hertzianas; Cohesor; Óptica.

Microwaves by spark. Optical experiments with microwaves produced with a home-made equipment

The electromagnetic field theory was the greatest unifying success of the 19th century. Hertz's experiments proved the validity of the theory and showed the existence of other waves, unlike to light, but having their same properties. It is easy to prove some of these properties by means of microwaves which we generate making use of simple home-made apparatus. Our procedure is based on techniques of Hertz's successors, such as Righi or Lodge.

Keywords: Hertzian waves; Coherer; Optics.

La teoría electromagnética

Desde la antigüedad eran conocidos algunos fenómenos eléctricos y magnéticos, aunque entre ellos no pareciera existir vínculo alguno. Sólo en 1820, diez años después del descubrimiento por Alessandro Volta (1745-1827) de la pila eléctrica, Hans Christian Ørsted (1777-1851) observó que una corriente eléctrica ejercía influencia sobre una aguja magnética próxima. Este hecho ponía de manifiesto que la electricidad podía crear un campo magnético al tiempo que daba pie a una pregunta: ¿puede un campo magnético producir una corriente eléctrica? En 1831 Michael Faraday (1791-1867) anunció haber descubierto ese fenómeno, que conocemos como inducción electromagnética.

Para la interpretación del electromagnetismo Faraday introdujo la idea de campo, con una importante característica, “que la acción magnética es progresiva y requiere tiempo”. Por otra parte, para representar ese campo utilizó con frecuencia líneas de fuerza, que para él eran algo más que elementos descriptivos; en cierto modo tenían entidad real.

Faraday creyó siempre en la existencia de una interrelación fundamental entre la electricidad, el magnetismo y la luz (Cantor *et al.* 1994). Sus investigaciones en este sentido le llevaron a descubrir que el campo magnético era capaz de girar el plano de polarización de la luz. Esto explica que en 1846, en su conferencia *Thoughts on ray vibrations*, ante la Royal Institution, Faraday especulara acerca de la naturaleza de la luz y sugiriera que la luz podía ser la vibración de las líneas de fuerza.

La representación del campo magnético mediante líneas de fuerza se convirtió en una importante herramienta teórica en manos de James Clerk Maxwell (1831-1879). Este físico escocés, fascinado por los trabajos y, sobre todo, por las ideas de Faraday, decidió crear una teoría matemática global para explicar todos los fenómenos eléctricos. En el siglo XIX, se

admitía que las interacciones a distancia tenían lugar en el seno de una sustancia imponderable conocida como *éter*. Esta sustancia presentaba un comportamiento paradójico: era lo bastante rígida como para transmitir las vibraciones luminosas y al tiempo no afectaba al movimiento de los cuerpos a su través, como es el caso de los planetas.

Maxwell decidió construir su modelo asignando a las líneas de fuerza una estructura basada en el *éter*. Para ello consideró que las líneas de campo magnético eran en realidad ejes de remolinos de *éter*, mientras que el giro de tales remolinos constituían la electricidad. El tratamiento matemático de esa idea, sin duda artificiosa, conducía a una teoría con suficiente coherencia interna como para explicar “mecánicamente” el electromagnetismo (Berkson 1981). Pero conviene no olvidar que los descubrimientos acerca del giro del plano de polarización de la luz por el campo magnético también necesitaban una explicación. Si la luz era el resultado de las vibraciones transversales del *éter luminífero* y el electromagnetismo podía interpretarse recurriendo a un *éter electromagnético*, parecía razonable admitir la existencia de un *éter* único que fuera el soporte de los fenómenos eléctricos, magnéticos y luminosos. Esta idea, que sin duda estaba en la mente de Maxwell desde que se enfrentó al problema, lo llevó a deducir que las acciones electromagnéticas no se ejercían instantáneamente, sino que lo hacían con una velocidad que en el vacío se asemejaba extraordinariamente a la velocidad de la luz. El hallazgo hizo manifestar a Maxwell: “Esta velocidad es tan cercana a la de la luz que parece que tenemos fuertes razones para concluir que la propia luz es una perturbación electromagnética...” (Maxwell 1864, 1998).

A diferencia de otras teorías sobre el electromagnetismo que existían a mediados del siglo XIX, la de Maxwell tenía carácter predictivo. Así, de sus resultados se infería que no sólo las corrientes eléctricas en los conductores producían campos magnéticos, sino que –y esto era lo novedoso– la polarización del dieléctrico de un condensador también haría su aportación a dicho campo. El problema estaba en que, según la teoría de Maxwell, la magnitud de ese campo magnético sólo sería significativa si el proceso de polarización del dieléctrico fuese rapidísimo. No obstante y, dado que este fenómeno se desprendía únicamente de la teoría maxwelliana, la confirmación experimental de ese campo sería una importante prueba a favor de la teoría.

Esta cuestión decisiva fue entendida claramente por Hermann von Helmholtz (1821-1894). Él fue responsable de que la Academia de Ciencias de Berlín planteara en 1879, como tema de concurso, la tarea de demostrar experimentalmente “alguna relación entre las fuerzas electrodinámicas y la polarización dieléctrica de los aislantes” (Berkson 1981). Helmholtz llamó la atención sobre este problema a su discípulo Heinrich Hertz (1857-1894), quien reflexionó sobre el problema, pero calculó que las posibilidades de obtener resultados eran muy reducidas, por lo que renunció a esa tarea. Años más tarde, siendo catedrático en la Escuela Técnica Superior de Karlsruhe, se encontró con algunos fenómenos tras los que vio la posibilidad de hacer frente al antiguo problema de la Academia de Ciencias de Berlín.

El punto de partida de los experimentos de Hertz (Hertz 1962, 1989) puede situarse en el hecho conocido en su tiempo de que las descargas eléctricas en un circuito abierto eran oscilantes. Si las ramas abiertas de ese circuito se comportaban como placas de un condensador cuya polaridad cambiaba rápidamente, cabría esperar, según la teoría de Maxwell, la aparición de campos magnéticos al colocar dieléctricos de azufre o parafina entre las placas. Hertz observó sus efectos inductivos sobre un circuito secundario, pero que no variaban de intensidad por la retirada del dieléctrico.

Los experimentos posteriores más decisivos los llevó a cabo modificando la estructura del condensador inicial. Sustituyó las placas por esferas colocadas en los extremos de un alambre cortado en el centro, donde se situaban pequeñas bolas entre las que se producía la descarga

gracias a una bobina de inducción. El circuito secundario era una espira circular o rectangular con un micrómetro de chispas. Cuando saltaban chispas en el circuito primario se producían también pequeñas chispas en el micrómetro del circuito secundario que no podían explicarse como un simple fenómeno de inducción. Desplazando el circuito secundario entre el circuito primario y una gran superficie metálica (figura 1) Hertz pudo reconocer la aparición de zonas de máxima y de mínima intensidad, que evidenciaban el carácter ondulatorio de la perturbación. Por último, con un circuito primario más pequeño, probó que esas ondas estaban polarizadas y podían refractarse, al igual que la luz. De este modo quedaba verificada la teoría de campos de Maxwell y sus previsiones acerca de las ondas electromagnéticas.

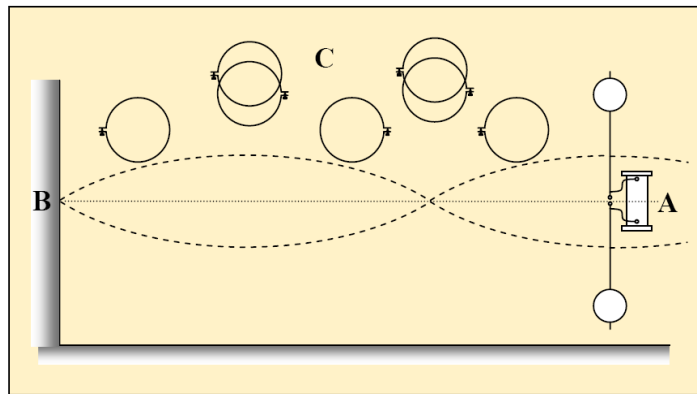


Figura 1. Frente al circuito primario A se encuentra una superficie metálica B. Desplazando un circuito secundario C a lo largo de la línea que va de A a B se detectan zonas de máxima y mínima intensidad, que corresponden a nodos y vientres de las ondas estacionarias.

Un equipo casero de microondas

Resulta extremadamente sencillo producir y detectar ondas hertzianas, así como poner de manifiesto algunas de las propiedades que las asemejan al resto de ondas electromagnéticas. Tanto en la fotografía de la figura 2 como en la figura 3 se muestran los principales componentes del equipo casero para producir microondas, que describiremos a continuación.

Fuente de alimentación. Es un encendedor piezoeléctrico de cocina que produce descargas instantáneas de alta tensión. Previamente, se prolongan sus terminales con un par de cables, que acaban en pinzas metálicas.

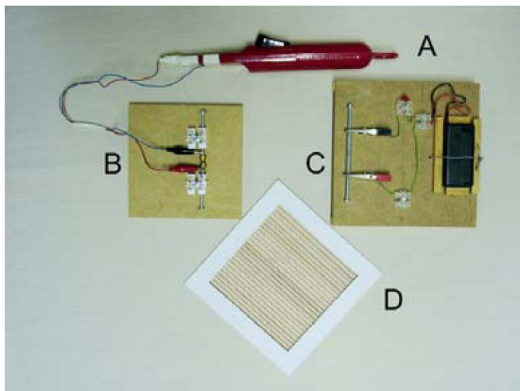


Figura 2. Componentes del equipo: A, encendedor piezoeléctrico. B, emisor. C, detector. D, pantalla polarizadora.

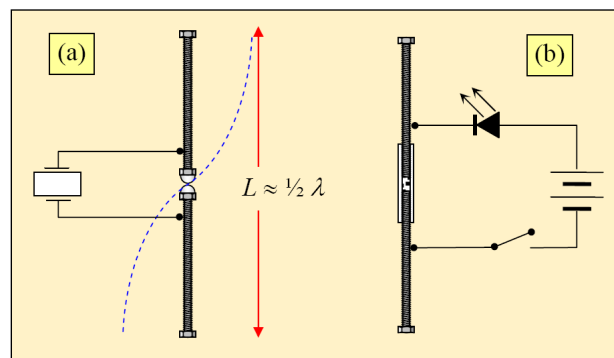


Figura 3. (a) Emisor. Está formado por un encendedor piezoeléctrico y un dipolo. (b) Detector. Consta de un cohesor, interruptor, dos pilas de 1,5 V y LED.

Emisor. Por medio del encendedor piezoeléctrico se produce una chispa entre dos tuercas ciegas muy próximas, que se encuentran en los extremos de sendos tornillos de 4 mm de diámetro (figura 3a). La chispa es oscilante y el sistema se comporta como una antena dipolo que emite ondas cuya longitud de onda es aproximadamente $2L$, siendo L la longitud del dipolo (figura 3a). Con tornillos de 5 cm de longitud la longitud de onda es aproximadamente 20 cm (lo cual corresponde a una frecuencia de 1,5 GHz), que se encuentra en la región de microondas. Puede variarse la longitud de onda con tornillos de distinta longitud.

Detector. El componente principal es el *cohesor*. Se trata de un dispositivo basado en un comportamiento peculiar que presentan los contactos eléctricos defectuosos, conocido mucho antes del descubrimiento de Hertz. Algunos investigadores como P. Munk af Rosenschöld, en 1835, y T. Calzecchi-Onesti, en 1884, habían observado la brusca disminución de la resistencia eléctrica en granos o polvos de carbón o metal tras la descarga de una máquina electrostática. En 1878, D. E. Hughes advirtió que el micrófono de carbón –del que fue inventor– era sensible a las chispas eléctricas y provocaba chasquidos en el auricular del teléfono. En 1890, É. Branly estudió el fenómeno con más profundidad, aunque no lo relacionó con las ondas hertzianas hasta 1895. Para entonces, en 1893, O. Lodge había repetido algunos experimentos de Hertz utilizando como detector un tubo con limaduras metálicas, al que llamó cohesor. Este dispositivo fue empleado por vez primera en 1896 por G. Marconi en sus pruebas iniciales de radiotelegrafía (Lodge 1911).

Nuestro detector (figura 3b) consta de dos pilas de 1,5 V en serie con un LED y un cohesor. Éste es un tubo de vinilo con dos tornillos que aprisionan una pequeña cantidad de partículas de hierro obtenidas de un clavo, con ayuda de una lima gruesa. La sensibilidad del cohesor se regula mejor dando forma biselada a los extremos de los tornillos (figura 4). No obstante, la sensibilidad de un cohesor no es estable y puede variar sin causa aparente. Además, la flexibilidad del vinilo afecta a la presión de los tornillos. Por ello, conviene manipular el cohesor lo menos posible una vez alcanzada una estabilidad razonable.

Como el contacto entre las limaduras es defectuoso la resistencia del circuito es alta y el LED no luce; pero las ondas hertzianas provocan una brusca disminución de la resistencia del cohesor y el LED se ilumina. Un leve golpe al cohesor lo restituye a las condiciones iniciales.

Pantalla polarizadora. Se recorta un marco de cartón cuadrado de 16 cm de lado y sobre él se pegan varillas metálicas de 1 mm de diámetro, separadas entre sí 5 mm.



Figura 4. Cohesor. Dos tornillos, con los extremos biselados y roscados en un tubo de vinilo, comprimen una pequeña cantidad de limaduras de hierro.

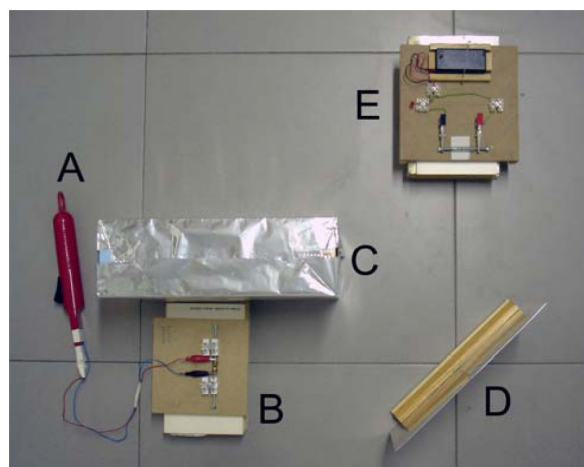


Figura 5. Reflexión: A, encendedor piezoeléctrico. B, emisor. C, caja recubierta de aluminio para proteger el detector de las ondas directas. D, espejo de aluminio. E, detector.

Espejos. Pueden fabricarse pegando hojas de papel de aluminio sobre cajas de cartón (por ejemplo cajas de cereales).

Jugando con el equipo

Ajuste del emisor. Hay que asegurarse de que las tuercas ciegas están muy próximas, en torno a unos 0,2 mm. Se conectan los terminales del encendedor piezoeléctrico a los tornillos, lo más cerca posible de las tuercas ciegas, como se muestra en las figuras 2 y 3, y se pulsa el encendedor. Deberá saltar entonces una pequeñísima chispa entre las tuercas. Si no lo hace, hay que ajustar levemente la distancia entre las tuercas hasta conseguirlo. El emisor está entonces listo.

Ajuste del detector. Al colocar las pilas en el detector el LED no debe iluminarse. Si lo hace es porque las limaduras del cohesor están muy comprimidas. Se afloja poco a poco uno de los tornillos del cohesor hasta el punto justo en el que el LED deje de lucir. Se pone entonces el emisor a unos 30 cm, con los tornillos paralelos y se pulsa el encendedor piezoeléctrico. El LED se iluminará pero será preciso desactivar el detector. Basta con dar un golpecito al cohesor para que el LED se apague. Si al saltar la chispa el LED no se ilumina, deberá aumentarse la presión de los tornillos del cohesor.

Emisión y detección. Se separan 1 m el emisor y el detector. Al accionar el encendedor se produce una chispa que genera un pulso amortiguado de microondas y el LED se ilumina. Si se interpone un cartón, la radiación llega, pero no ocurre igual si se interpone el espejo de papel de aluminio.

Un sencillo experimento consiste en analizar la absorción de las microondas por algunos líquidos. Si entre el emisor y el detector se interpone una garrafa llena de agua (moléculas polares), la radiación es absorbida y no llega al detector; pero con una garrafa de aceite vegetal (moléculas muy poco polares) o de gasoil,¹ la radiación no se absorbe y llega al detector.

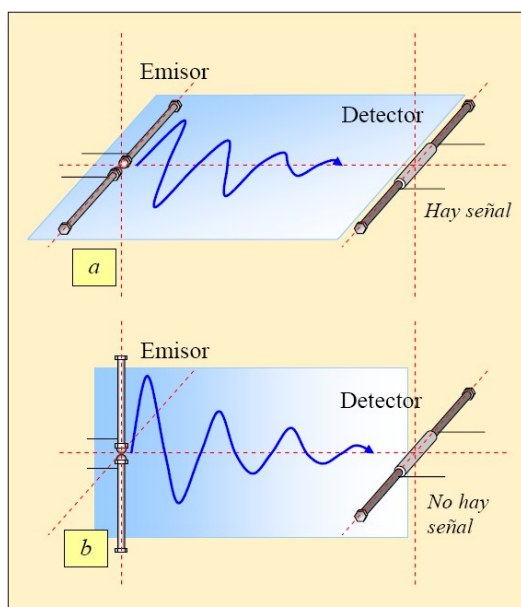


Figura 6. La polarización de las ondas se pone de manifiesto cuando el dipolo y el cohesor están en el mismo plano o en planos perpendiculares.

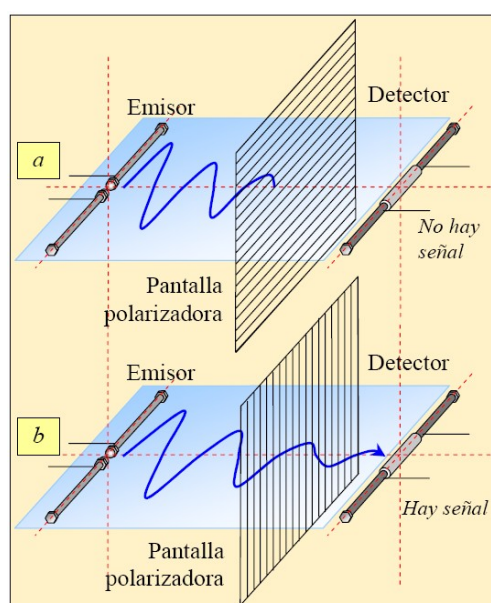


Figura 7. (a) La pantalla polarizadora con las varillas paralelas al dipolo absorbe la radiación. (b) La pantalla polarizadora con las varillas perpendiculares al dipolo transmite la radiación.

¹ El gasoil es inflamable, por lo que hay que extremar las precauciones para protegerlo de las chispas.

Reflexión. La disposición más conveniente sería aquella en la que el campo eléctrico fuese perpendicular al plano de incidencia sobre el espejo. Para colocar según este criterio el emisor, el espejo y el detector sobre una mesa, el dipolo y el cohesor deberían encontrarse verticales; pero así las limaduras presentan problemas de contacto. Por ello se adopta una disposición menos conveniente pero más cómoda en la que el campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia (figura 5). Las distancias entre los componentes deben ajustarse previamente. Puede comprobarse que la señal llega al detector si hay espejo, pero no llega cuando el espejo se retira.

Polarización. El emisor produce ondas con el campo eléctrico polarizado en el plano del dipolo. Si el cohesor está en el mismo plano que el cohesor, el LED se ilumina (figura 6a); pero si el dipolo se encuentra perpendicular al cohesor, no se registra señal (figura 6b).

Polarización con pantalla polarizadora. El dipolo y el cohesor se sitúan en el mismo plano, manteniéndolos a 1 m de separación. En primer lugar la pantalla polarizadora se coloca junto al detector con las varillas paralelas al cohesor. Al estar orientado el campo eléctrico del emisor en la misma dirección que las varillas la energía es absorbida por éstas y no llega al detector (figura 7a). Cuando se gira 90° la pantalla polarizadora la radiación llega al detector (figura 7b).

Ondas estacionarias. Es un experimento algo difícil, aunque merece la pena intentarlo. Se trata de reproducir con nuestros aparatos el experimento representado en la figura 1. En primer lugar se alejan emisor y receptor hasta una posición en que éste no detecte señal. A continuación se coloca un espejo detrás del cohesor, con lo que se producen ondas estacionarias. Cuando el cohesor está prácticamente pegado al espejo (figura 8a), se encuentra en un nodo y no se detecta señal (el LED no se ilumina). Si el cohesor se separa del espejo una distancia aproximadamente igual a la longitud de un tornillo –un cuarto de longitud de onda– (figura 8b), el receptor detecta señal (el LED se ilumina). Moviendo el cohesor a una distancia equivalente a dos tornillos –media longitud de onda–, puede llegar a detectarse un segundo nodo, aunque es preciso decir que los resultados no son claros, por la alta sensibilidad del cohesor.

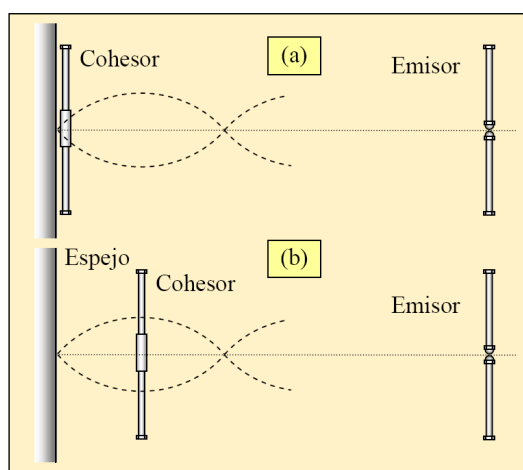


Figura 8. Detección de nodos y vientres al desplazar el cohesor frente a una superficie reflectante.

Bibliografía comentada

En esta sección se comentan algunas publicaciones especialmente relevantes, así como la forma de acceder a las mismas, puesto que pueden resultar de interés para aquellas personas que deseen profundizar más en este tema.

A través del sitio Web Internet Archive pueden accederse a las siguientes obras.

Faraday M. (1922). *Experimental researches in electricity*. London. J. M. Dent; New York. E. P. Dutton.

Hertz H. (1962). *Electric waves: being researches on the propagation of electric action with finite velocity through space*. New York. Dover Publications.

Lodge O. (1911). *Signalling across space without wires: being a description of the work of Hertz and his successors*. 4th ed. London. The Electrician.

Maxwell J. C. (1890). On physical lines of force. *The Scientific Papers* 1, 451-513. Cambridge: University Press.

Poco después de los descubrimientos de Hertz, el físico italiano Augusto Righi construyó pequeños osciladores para producir ondas centimétricas. Con ellas profundizó en el estudio del comportamiento óptico de tales ondas. Uno de los trabajos que puede consultarse es:

Righi A. (1895). Sulle oscillazioni elettriche a piccola lunghezza d'onda e sul loro impiego nella produzione di fenomeni analoghi ai principali fenomeni dell'ottica. *Il Nuovo Cimento* 1 (1), 25-40.

A finales del siglo XIX, un polifacético científico indio, Jagadis Chandra Bose (no confundir con Satyendranath Bose), construyó minúsculos osciladores para producir ondas milimétricas. Desarrolló además una amplia variedad de ingeniosos complementos con los que realizó gran número de delicados experimentos ópticos. Todos ellos fueron presentados en la Royal Society de Londres y se encuentran recogidos en sus Proceedings. Algunos de los más de doce trabajos expuestos ante esa institución, que pueden ser más significativos, son:

Bose J. C. (1895) On the determination of the indices of refraction of various substances for the electric ray. I. Index of refraction of sulphur. *Proceedings of the Royal Society of London* 59, 160-167.

Bose J. C. (1897) On the determination of the wavelength of electric radiation by a diffraction grating. *Proceedings of the Royal Society of London* 60, 167-178.

La figura de Jagadis Chandra Bose ha sido objeto de atención por parte de investigadores contemporáneos. En este sentido citamos dos:

Emerson D. T. *Jagadis Chandra Bose: Millimetre wave research in the nineteenth century*. http://www.tuc.nrao.edu/~demerson/bose/emerson_delhi.pdf

Sarkar K., Sengupta D. L. (1997) An appreciation of J. C. Bose's pioneering work in millimeter waves. *IEEE Antenas and Propagation Magazine* 39 (5), 55-63. http://www.cis.syr.edu/~tksarkar/pdf/1997_Oct.pdf

Referencias

Berkson W. (1981) *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*. Madrid. Alianza Universidad.

Cantor G., Gooding D., James F. (1994) *Faraday*. Madrid. Alianza Universidad.

- Hertz H. (1962) *Electric waves: being researches on the propagation of electric action with finite velocity through space*. New York. Dover Publications.
- Hertz H. (1989) *Las ondas electromagnéticas*. Selección de M. García Doncel y X. Roqué. Barcelona. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Lodge O. (1911) *Signalling across space without wires: being a description of the work of Hertz and his successors*. 4th ed. London. The Electrician.
- Maxwell J. C. (1864) A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions* 155, 459-512. <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/155/459.full.pdf+html>
- Maxwell J. C. (1998) *Escritos científicos*. Madrid. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.