

Sesquicentenario
de las Ecuaciones
de Maxwell

Lección Inaugural del Curso Académico 2015-2016,
pronunciada por el Profesor Dr. D. José Ignacio Íñiguez
de la Torre Bayo, Catedrático de Electromagnetismo
de la Universidad de Salamanca, en el solemne Acto Académico
celebrado el día 23 de septiembre de 2015
presidido por el Sr. Rector Magnífico
D. Daniel Hernández Ruipérez

| JOSÉ IGNACIO ÍÑIGUEZ DE LA TORRE BAYO |

Sesquicentenario de las Ecuaciones de Maxwell



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

SECRETARÍA GENERAL

2015



Universidad de Salamanca
José Ignacio Íñiguez de la Torre Bayo

Motivo de cubierta:
Antena de 70 metros de diámetro de la Red de Espacio
Profundo de la Nasa en Goldstone, California

Impreso en España - Printed in Spain
Gráficas Lope. Salamanca
www.graficaslope.com

Todos los derechos reservados. Ni la totalidad ni parte de este
libro puede reproducirse ni transmitirse sin permiso escrito de la
Universidad de Salamanca.

Como tantos físicos, estoy plenamente convencido de que la discusión científica entre colegas constituye una de las fuentes más importantes del conocimiento. Por ello quiero que mi dedicatoria sea también mi agradecimiento para aquellos con los que disfruté de largas discusiones sobre física y especialmente sobre electromagnetismo. Citaré aquí a mis compañeros en la docencia universitaria: Pepe, Daniel, Carlos (mi más cariñoso recuerdo), José María, Pablo, Mercedes, Esther, Arnaldo, Ana, Víctor, Luis, Marce, Luisito, Auxi y Eduardo. Algunas discusiones tuvieron lugar en mi casa, así que tampoco olvidaré nombrar a Ignacio y Ana, también por la revisión de este texto. Y a M^a Carmen, con quien tanto he compartido.

E igualmente a los estudiantes, cuyas preguntas siempre fueron para mí un excelente estímulo, y a José Antonio por su ayuda en el montaje de tantos artilugios para enseñar física experimental.

A todos, gracias.

| ÍNDICE |

Introducción

13

Las observaciones

21

¿Por qué?

37

Los experimentos y las leyes

43

La tecnología eléctrica

79

La síntesis de Maxwell

105

El legado de Maxwell

125

Bibliografía

135

*It is of great advantage to the student of any subject to read
the original memoirs on that subject, for science is always most
completely assimilated when it is in the nascent state...*

JAMES CLERK MAXWELL,
A Treatise on Electricity and Magnetism (1873),
Vol. I, Preface

| INTRODUCCIÓN |

LA ASAMBLEA GENERAL de las Naciones Unidas proclamó el año 2015 como “Año Internacional de la Luz y las Tecnologías Basadas en la Luz”. Desafortunadamente este tipo de conmemoraciones científicas tienen muy débil repercusión en la sociedad, que todavía es escasamente consciente del impacto de la Ciencia y la Tecnología en nuestros días.

Pues bien, hace ya ciento cincuenta años que conocemos la teoría electromagnética de la propagación de la luz, propuesta por el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879). En efecto, en enero de 1865 Maxwell publicó un artículo titulado “Una Teoría Dinámica del Campo Electromagnético” en el que desarrolló las ecuaciones del electromagnetismo, que hoy conocemos como ecuaciones de Maxwell. Además, en ese trabajo hizo la predicción de la existencia de ondas electromagnéticas y calculó su velocidad de propagación que resultó ser la velocidad de propagación de la luz,¹ de acuerdo con las medidas realizadas por Hippolyte Fi-

¹ 299 792 km/s.

zeau y Jean Léon Foucault quince años antes.² Esto le llevó a escribir: “Esta velocidad es tan próxima a la de la luz, que parece que tenemos sólidas razones para concluir que la propia luz (incluyendo el calor radiante, y otras radiaciones si las hay) es una perturbación electromagnética en forma de ondas que se propagan de acuerdo con las leyes del electromagnetismo”.

Es decir, Maxwell desarrolló una teoría electromagnética en la cual encajaba perfectamente la teoría de la propagación de la luz. Es más, en el amplio espectro electromagnético que hoy conocemos, desde frecuencia nula hasta radiación gamma, la luz concierne a un estrecho margen de frecuencias, a las frecuencias correspondientes al espectro visible.

Por ello, conviene destacar la síntesis realizada por Maxwell y apreciar cómo el desarrollo del electromagnetismo ha dado lugar a multitud de tecnologías que usamos a diario casi sin darnos cuenta, y sin las cuales nuestro mundo sería hoy completamente diferente. Cuando escuchamos un programa de radio o vemos la

² 315 000 km/s con el primer sistema y 298 000 mediante una técnica más depurada en 1862.

televisión, cuando nos comunicamos con nuestros teléfonos móviles, cuando nos conectamos a internet, cuando utilizamos una fibra óptica, un DVD, un puntero láser, un horno de microondas, una red wifi, un navegador GPS, o nos hacen una radiografía o una resonancia magnética o simplemente cuando manejamos un mando a distancia, deberíamos ser conscientes de que todas esas tecnologías son hoy posibles gracias a la extraordinaria contribución de Maxwell al conocimiento del electromagnetismo.

En fin, parece que hay buenas razones para dedicar esta lección inaugural a destacar la importancia del electromagnetismo en el desarrollo de nuestra sociedad cuando se cumple el “Sesquicentenario de las Ecuaciones de Maxwell”. Para ello, y para ser conscientes del desarrollo histórico de este campo del conocimiento dentro de la Física conviene enmarcarlo en el contexto de una serie de hitos relevantes, como son los siguientes:

- Ibn Al-Haytham (Alhazen), físico y matemático (nacido en Basora, actualmente Iraq) considerado el creador del método científico. Realizó importantes contribuciones a la óptica mediante experimentos

con lentes y espejos. Describió la importancia del cristalino en la formación de la imagen en la retina del ojo. Publicó en el año 1015 el primer tratado de óptica.

- Augustin Jean Fresnel, físico francés que propuso la noción del carácter ondulatorio transversal de la luz en 1815. Obtuvo las que hoy conocemos como ecuaciones de Fresnel, que son un conjunto de relaciones entre las magnitudes características de la luz reflejada y transmitida en función de la luz incidente cuando esta se propaga a través de medios con distinto índice de refracción, o lo que es lo mismo, con diferentes velocidades.
- James Clerk Maxwell, que formuló la teoría electromagnética de la propagación de la luz en 1865. Sus previsiones fueron comprobadas muy pronto, en 1888, por el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz que construyó el primer transmisor de ondas electromagnéticas de radiofrecuencia, alrededor de 100 MHz. A partir de esa fecha comenzó la carrera de las telecomunicaciones cuyos pioneros fueron Nikola Tesla y Guglielmo Marconi.

- Albert Einstein, físico alemán que en 1905 descubrió el efecto fotoeléctrico y formuló la teoría de la Relatividad Especial. Los estudios del electromagnetismo en sistemas en movimiento fueron fundamentales para el desarrollo de la relatividad. Más tarde, en 1915, enunció la teoría de la Relatividad General, destacando la importancia del conocimiento de la gravitación para comprender correctamente la propagación electromagnética en el espacio.
- Arno Allan Penzias (físico alemán) y Robert Woodrow Wilson (estadounidense), que en 1965 descubrieron el fondo cósmico de microondas, una radiación electromagnética que impregna todo el espacio, confirmando la teoría del *Big Bang* del origen del universo en contra de la teoría del estado estacionario. Ese accidental descubrimiento es la mayor aportación a la moderna cosmología.
- Charles Kuen Kao, físico chino pionero en las investigaciones que permitieron en 1965 el desarrollo de las comunicaciones por fibra óptica. Es conocido como el “pa-

dre de la banda ancha”, la red que hoy nos permite transferir ingentes cantidades de información en muy poco tiempo a través de fibra óptica, líneas conductoras o del propio espacio libre, incluyendo las comunicaciones vía satélite.

El propósito de esta lección es mostrar la síntesis y el legado de Maxwell sobre el electromagnetismo y para ello veremos cómo un conjunto de cuidadas experiencias permitieron poner los pilares de la teoría electromagnética, una hermosa historia que se hunde en tiempos remotos pero que se desarrolló como ciencia a lo largo de tan solo ochenta años. Hay que destacar que ese extraordinario trabajo corresponde a uno de los mayores logros de la Física, pues unificó el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos, permitió el desarrollo de la tecnología eléctrica y electrónica, el avance de la física de materiales, alentó el conocimiento de la teoría y aplicaciones de las ondas electromagnéticas incluida la luz; en definitiva, impulsó de una forma clara y decidida el progreso de nuestra sociedad.

Quizá sea este el momento de resaltar que, de acuerdo con un amplio consenso de la

comunidad científica internacional, después de Isaac Newton, que en 1687 formuló la ley de gravitación universal, Maxwell y Einstein son los científicos que mayor impacto han tenido en la historia del conocimiento del hombre. El propio Einstein, refiriéndose a Maxwell dijo en 1931: *This change in the conception of reality is the most profound and the most fruitful that physics has experienced since the time of Newton.* Y el físico Richard P. Feynman, Nobel en 1965, afirmó: *From a long view of the history of mankind, seen from, say, ten thousand years from now, there can be little doubt that the most significant event of the 19th century will be judged as Maxwell's discovery of the laws of electrodynamics.*

EL OBJETO DE LA FÍSICA es el estudio de las cuatro interacciones básicas. Estas son la gravitacional, la electromagnética, la fuerza débil y la interacción fuerte, siendo el reto actual de la Física el desarrollo de un marco común que permita unificar las cuatro fuerzas fundamentales. Es obvio que todos tenemos experiencia cotidiana de las dos primeras interacciones, la gravitacional y la electromagnética, mientras que no tenemos conocimiento inmediato de la fuerza débil (relacionada con los fenómenos de desintegración radiactiva) ni de la nuclear fuerte (responsable de la estabilidad de protones y neutrones en el núcleo atómico).

En efecto, tenemos una consciencia clara de la interacción gravitatoria, responsable de la fuerza con que nos atrae la Tierra, y nosotros la atraemos a ella. Lo notamos constantemente, especialmente cuando subimos una escalera, cuando sufrimos una caída o cuando permanecemos largo tiempo sentados en un lugar incómodo. Pero además el hombre de la antigüedad de todas las civilizaciones examinó el cielo durante el día y la noche, analizó el movimiento

de los objetos celestes y desarrolló complejas teorías para justificar esas observaciones. Pasaron muchos siglos hasta que obtuvo una teoría física que explicaba la dinámica celeste, cuando Isaac Newton formuló la ley de gravitación universal.

El hombre también prestó atención a otros fenómenos de la naturaleza. Quienes vivían en latitudes altas observaron preciosas auroras boreales, todos vieron el azul del cielo, los bellos tonos rojizos del amanecer y del atardecer, la luna llena roja incluso durante un eclipse o el magnífico arco iris.

Y hemos de pensar cómo el hombre se sintió profundamente estremecido y aterrado viendo y escuchando las enormes descargas y los truenos de una tormenta eléctrica. El rayo desempeñó un relevante papel en las antiguas mitologías como arma de un dios del cielo capaz de aplicar el castigo divino. Sin embargo el hombre también supo sacar partido de la caída del rayo pues le trajo el fuego, que tuvo que aprender a cuidar y mantener ya que en muchas ocasiones representaba su garantía de sustento y defensa. Hoy sabemos que cada día se producen en la Tierra varios millones de rayos con una dura-

ción típica de decenas de microsegundos, a través de descargas nube-tierra de hasta cientos de millones de voltios con intensidades de decenas de miles de amperios. Una potencia media de unos 40 GW, casi la mitad de la potencia eléctrica instalada en España.



| Tormenta eléctrica al anochecer |

Todos estos hechos tienen su explicación en la interacción electromagnética, que también determina en gran medida las propiedades físicas y químicas de la materia: átomos, moléculas y células vivas. Existen moléculas gigantes que contienen decenas o centenares de miles de átomos cuya complicada configuración geomé-

trica responde casi en exclusiva al delicado equilibrio de las interacciones electromagnéticas entre átomos. Pensemos por ejemplo en la compleja estructura del ácido desoxirribonucleico o ADN, formada por la unión de miles de nucleótidos, que a su vez están compuestos por una base nitrogenada, un monosacárido y un grupo fosfato, donde la sólida geometría en doble hélice y la interacción electromagnética garantizan nada menos que la preservación de las especies. O consideremos el orden de los átomos en un cristal de sal común donde en un tamaño de dimensiones milimétricas encontramos unos 10^{20} átomos³ perfectamente ordenados en una estructura cúbica en la que los átomos de cloro y de sodio se van alternando repitiendo un riguroso patrón cristalino. En fin, la mayor parte de los fenómenos de la Física, la Química o la Biología se describen básicamente en términos de la interacción electromagnética, por lo que su comprensión precisa resulta esencial para el desarrollo científico.

³ 10^{20} es un número tan grande como 250 veces la edad del universo (trece mil ochocientos millones de años) expresada en segundos.

Como ya se indicó anteriormente, las primeras observaciones sobre la electricidad, o mejor sobre la electricidad estática, se remontan a las más antiguas civilizaciones. Durante muchos siglos todo aquello quedó simplemente en un fenómeno curioso y sorprendente, sin una teoría capaz de dar una explicación mínimamente razonable y muchas veces confundiendo su origen con el del magnetismo. Se conocía la electrización por fricción, las propiedades del ámbar, el fuego de San Telmo y en el antiguo Egipto ya se sabía de la existencia en el Nilo de peces capaces de defenderse de otros predadores mediante intensas descargas eléctricas. De hecho, cabe afirmar que la historia de la electroterapia se remonta al Antiguo Egipto, con la aplicación de breves descargas eléctricas de varios cientos de voltios del pez gato, que se emplearon sin conocimiento previo alguno para el tratamiento de la gota, del dolor de cabeza y de enfermedades nerviosas.

Pero no hace falta disponer de ninguna instrumentación especial para experimentar con la electricidad estática. Todos hemos observado cómo nos cargamos eléctricamente en multitud de actividades cotidianas y después nos

descargamos con una sorpresa desagradable al tocar un objeto metálico. Por ejemplo, al andar por una alfombra, al vestirnos con prendas de tejidos acrílicos, al salir del automóvil y cerrar la puerta, cuando hacemos fotocopias (realmente son electrocopias) y las guardamos en una carpeta de plástico, cuando observamos el polvo que se pega a la pantalla de un antiguo televisor o simplemente cuando nos peinamos en una atmósfera muy seca. Es evidente que esas descargas eléctricas son molestas aunque no encierran mayor peligro pues si bien se generan diferencias de potencial de más de diez mil voltios, la cantidad de energía es muy pequeña, del orden de milésimas de julio que solo llegaría para calentar una gota de agua menos de una centésima de grado.

Resulta fascinante ver algunas experiencias de este tipo, como las que podemos observar en vídeos realizados en ingravidez en la Estación Espacial Internacional con gotas de agua alrededor de una aguja de tejer eléctricamente cargada,⁴ o también en el laboratorio con un

⁴ Disponible en: <https://news.slac.stanford.edu/video/nasa-science-sphere-knitting-needle-experiment>.

generador de Van de Graaff o simplemente en un tobogán de un parque infantil, alcanzando varias decenas de miles de voltios como consecuencia de la fricción.



| ¡Miles de voltios y pelos de punta! |

El descubrimiento del magnetismo tuvo lugar en la antigua Grecia, donde se observó por primera vez en la ciudad de Magnesia, en la península de Anatolia o Asia Menor, hoy Turquía. Precisamente el nombre de magnetismo proviene de la ciudad en la que se descubrió el fenómeno, apreciándose la existencia de ciertos minerales que eran capaces de atraer el hierro, y que este hierro magnetizado atraía a su vez

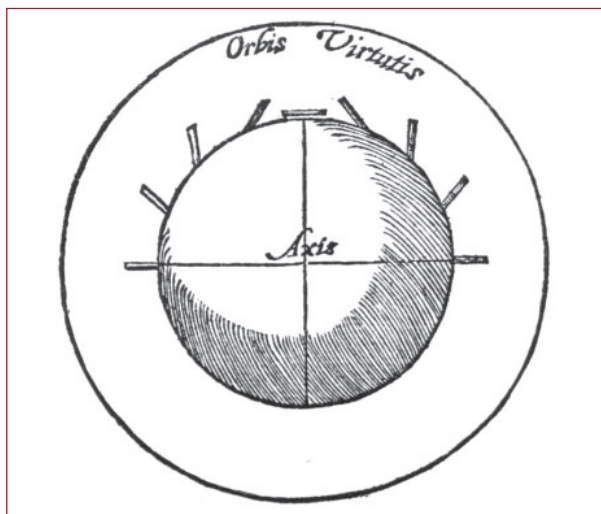
otros trozos de hierro. Esos minerales de óxidos de hierro o magnetita se denominaron imanes naturales, siendo el filósofo Tales de Mileto quien efectuó el primer estudio sobre magnetismo hace unos 2600 años.

Hace más de veinte siglos en China descubrieron la brújula cuando observaron la orientación de la piedra imán, fenómeno que usaron en prácticas adivinatorias. Mucho más tarde, en el siglo XI, la utilizaron como ayuda para la orientación de los ejércitos en tan vastas extensiones y ya en el XII para la navegación marítima, que fue así la primera aplicación significativa del magnetismo. Las primeras brújulas en Europa datan de finales del XII y principios del XIII y eran brújulas flotantes en agua realizadas primero a partir de magnetita natural y después con agujas de hierro imantadas, lo que les permitió mejorar la navegación con poca visibilidad durante los meses de invierno en el Mediterráneo. El mundo árabe también conoció la brújula a principios del siglo XIII y además la utilizó para señalar la dirección a La Meca y en el estudio de la astronomía. Las primeras brújulas con suspensión seca, como las que hoy

utilizamos,⁵ no aparecieron hasta principios del XIV y las mejoras del sistema de sustentación permitieron que la navegación marítima cobrara un gran impulso.

Más tarde, hacia el año 1600, William Gilbert, el físico y médico de la reina Isabel I de Inglaterra, hizo diversos estudios sobre las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales y muy especialmente sobre el magnetismo terrestre. Descubrió que la Tierra se comporta como un gigantesco imán y publicó su obra “De Magnete” describiendo multitud de experimentos cuidadosamente realizados. Observó fuerzas atractivas y repulsivas entre imanes destacando que la máxima fuerza ejercida por un imán tenía siempre lugar en sus extremos o polos magnéticos. Construyó una esfera magnetizada o *terrella* que simulaba correctamente el magnetismo terrestre, pues la orientación de una aguja magnetizada colocada en sus proximidades se correspondía con la declinación e inclinación de la brújula en la Tierra.

⁵ El líquido que contienen no es para su flotación sino para amortiguar las oscilaciones.



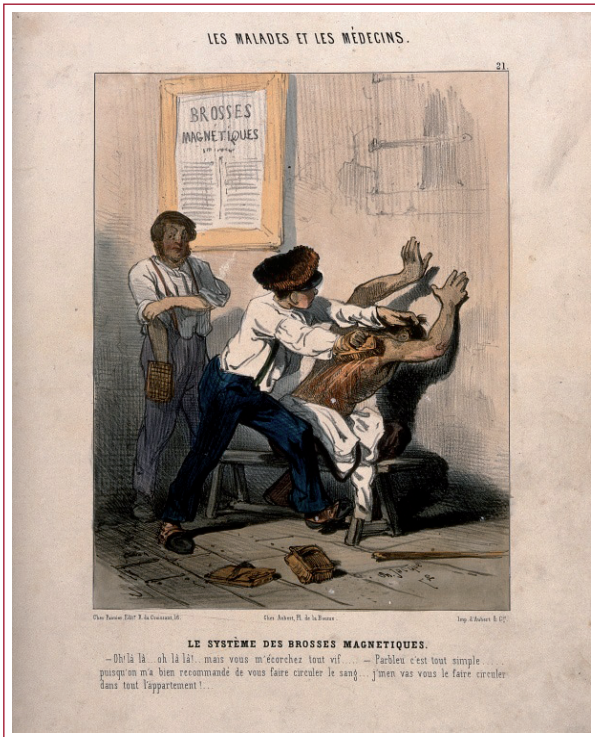
| Terrella de William Gilbert |

También el magnetismo tuvo su lugar en la incipiente medicina de la época y pronto nació la magnetoterapia. A principios del siglo XVI el médico suizo Paracelso usó imanes para tratar la epilepsia, la diarrea y las hemorragias. La terapia magnética se hizo más popular a mediados del XVIII, cuando el médico austríaco Franz Mesmer (fundador del mesmerismo o doctrina del magnetismo animal) abrió un suntuoso consultorio médico de curación magnética en Pa-

rís, que rápidamente reunió una notable clientela acumulando una gran fortuna personal. Su propósito era tratar “los adversos efectos del magnetismo natural del ser humano”. De hecho, para mejorar la circulación sanguínea se llegó a recomendar una técnica de enérgicos masajes con cepillos de hierro con cerdas magnetizadas. Ni que decir tiene que el efecto obtenido nada tenía que ver con lo que se pretendía, el paciente quedaba prácticamente desollado.

Aún hoy podemos sorprendernos viendo cómo se recomiendan diversas prácticas pseudocientíficas en el campo del magnetismo como son el uso de pulseras magnéticas, la conveniencia de dormir con la cama en dirección paralela al campo magnético terrestre, la ventaja de llevar pequeños imanes en las orejas, en las cervicales o en las plantas de los pies, usar bandas magnéticas adhesivas que, según informa el fabricante, “fomentan el polo norte” o la muy saludable costumbre de beber “agua magnetizada”, que ayuda a “eliminar las toxinas del cuerpo”. En fin, un gran negocio que mueve cada año miles de millones de euros mientras una tropa de desaprensivos abusa de la ingenuidad de tanta gente cuyas dolencias no

encuentran solución en la medicina, y donde ya es hora de que las autoridades competentes pongan coto a tantos desmanes.



| Terapia magnética |

Sin embargo no es así y todavía se imparten cursos sobre pseudociencias, como la magnetoterapia, el biomagnetismo o la homeopatía,⁶ y desgraciadamente algunos son auspiciados por hospitales públicos y universidades. Incluso un conocido magacín matinal de la televisión estatal dedica con frecuencia su tiempo a estos temas, mientras nuestro propio Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad desarrolló en 2014 una normativa que regularizó la comercialización de miles de productos homeopáticos, lo que puso en pie de guerra al mundo científico.

Y por fin señalar también que la electricidad y el magnetismo nos acompañaron en los juguetes de nuestra infancia. Podemos recordar el Telesketch, una pizarra borrable de los años 80 del pasado siglo. La superficie interna de la pantalla estaba recubierta electrostáticamente por aluminio pulverizado y partículas de estireno que, mediante una punta metálica móvil

⁶ Una dilución homeopática C20 contendría una molécula del principio activo en cada 10^{20} moléculas. Si la dosis que se administra no contiene ninguna molécula de ese principio “no importa”, será el “efecto memoria del agua”, cuyo tiempo de relajación es fracción de nanosegundo, quien aporte sus efectos.

controlada por dos mandos giratorios, se iban eliminando para dibujar una línea. Algunos recordamos lo difícil que resultaba trazar una



| Telesketch, Mago electrónico, Geomag y Levitrón |

recta oblicua manejando simultáneamente ambos mandos. Y el Mago Electrónico (que no era electrónico sino magnético) con el que podíamos repasar la historia o la geografía que aprendíamos en la escuela, y el Electro-L con el que muchos físicos aprendimos los primeros rudimentos de los circuitos eléctricos. Y más

recientemente la bola de plasma, las chicharras magnéticas, el Neocube, el Geomag y sobre todo el Levitron, un fascinante juguete de levitación magnética que ha sido objeto de importantes discusiones científicas y que no puede faltar en la casa de un físico.

| ¿POR QUÉ? |

HEMOS REPASADO la descripción de los fenómenos eléctricos y magnéticos más simples observados por el hombre, que tantas veces confundió unos y otros. Hoy sabemos mucho más y los distinguimos sin dificultad. En particular sabemos que el magnetismo está causado por el movimiento de las cargas, por la corriente eléctrica. Cuando las cargas están en reposo no hay magnetismo. Pero esta distinción se vuelve contra nosotros mismos cuando nos preguntamos qué significa decir “que la carga eléctrica se mueve”. En efecto, ¿y si las cargas están en reposo y quien se mueve es el observador, es decir nosotros? Evidentemente también entonces encontraremos magnetismo. ¿Cómo contrastarían sus cálculos unos y otros observadores? Pero, ¿cómo saber quién se mueve? ¿Moverse respecto de qué? ¿Cómo podríamos saberlo si el movimiento se realiza con velocidad uniforme?

Este tipo de reflexiones realizadas en el ámbito de la mecánica llevaron a Galileo en 1632 a formular su teoría de la Relatividad, que realmente es lo que todos aplicamos en nues-

tra experiencia diaria casi sin darnos cuenta. Por ejemplo, cuando calculamos la posibilidad de hacer una maniobra en la carretera mientras se acerca otro vehículo de frente (o por detrás). Hacemos mentalmente una estimación del tiempo del que disponemos calculando la distancia y sumando (o restando) las velocidades de ambos vehículos, y además incluimos un tiempo adicional como margen de seguridad y tomamos una decisión, y todo eso sin despeinarnos. Sin embargo hoy sabemos que esta teoría es solamente válida como una aproximación para bajas velocidades.

Los físicos de finales del XIX volvieron a plantearse estas mismas reflexiones, pero ahora en un contexto más amplio, incluyendo la mecánica y la teoría electromagnética que acababa de nacer a partir de las ecuaciones de Maxwell. ¿Cuál es la forma correcta de relacionar las medidas que de un fenómeno físico, electromagnético o no, realizan dos observadores que se desplazan entre sí con velocidad uniforme? Esta es la pregunta que respondió Einstein en 1905, cuando publicó la teoría de la Relatividad Especial. Más tarde Einstein generalizó su teoría, incorporando los sistemas de

referencia acelerados, y desarrolló en 1915 la teoría de la Relatividad General con base en el principio que establece la equivalencia entre la fuerza de gravitación y la correspondiente a un sistema de referencia acelerado, culminándose de esta forma la síntesis de Maxwell y la obra de Newton.

A partir de finales del XIX y principios del XX los avances de la Física en el campo del electromagnetismo y áreas afines fueron espectaculares. Destaquemos el descubrimiento del electrón por J. J. Thomson, el desarrollo de la física cuántica que describe la cuantización del campo electromagnético, y con ella a P. A. M. Dirac, Wolfgang Pauli y Werner Heisenberg. Y la física nuclear, el descubrimiento de nuevos elementos, la fisión nuclear con Otto Hahn, Ernest Rutherford y Pierre y Marie Curie. Y desde mediados del siglo XX hasta nuestros días resaltemos las teorías de unificación y el modelo estándar de partículas elementales con Steven Weinberg, Abdus Salam y Peter Higgs entre otros, el desarrollo de la física de materiales, la superconductividad, la electrónica con William B. Shockley, John Bardeen y Walter Brattain, los láseres, la optoelectrónica, los nuevos ma-

teriales magnéticos, la espintrónica, los materiales nanoestructurados, la nanotecnología...

Pero volvamos a nuestro punto de partida, todo eso ¿por qué es así? Los científicos se hacen las mismas preguntas que los niños: ¿Qué es eso?, ¿cómo se hace?, ¿cómo funciona? y sobre todo, ¿por qué? Son las preguntas más difíciles, las que más teme un científico cuando se las hace una persona sin formación científica. ¿Cómo le explicas, por ejemplo, por qué dos imanes se atraen o se repelen según los orientamos? ¿Cómo le haces ver que la mecánica cuántica demuestra la existencia de una interacción de intercambio entre electrones próximos cuyas funciones de onda se solapan, y que eso da lugar a una disposición ordenada de sus momentos magnéticos y en definitiva al ferromagnetismo? Y que el campo magnético que surge como consecuencia de ese orden es responsable de una interacción con los momentos magnéticos del otro imán y aparece una fuerza que... Y después de toda la explicación caben muchas preguntas: ¿Por qué describimos el electrón a través de su función de onda?, ¿por qué se solapan y se ordenan? o ¿qué es realmente el electrón? La serie de preguntas es muy

larga hasta que al final decimos que lo que está debajo de todo ello son las Leyes de la Naturaleza, aunque sea lícito preguntarse si es evidente que la Naturaleza deba tener leyes naturales. Los éxitos científicos del pasado justifican la idea de racionalidad del Universo, que la Naturaleza es cognoscible y que podemos llegar a entenderla si nos esforzamos en estudiarla, algo que empezó hace 2500 años cuando los griegos cambiaron el mito por la razón. Realmente la Ciencia se fundamenta en esa idea, que incluso nos lleva a pensar que nuestro conocimiento se ha de poder sintetizar en un pequeño conjunto de leyes naturales escritas en el lenguaje de la matemática.

En esta lección hemos de quedarnos en un planteamiento más fundamental, en la descripción básica de los hechos experimentales del electromagnetismo y de las leyes que lo rigen, una teoría desarrollada entre 1785 y 1865 gracias a la aplicación del método científico basado en observación, formulación de hipótesis, experimentación y emisión de conclusiones.

MIENTRAS EN EL CAMPO de la astronomía hubo un importante desarrollo durante los siglos XVI, XVII y primera mitad del XVIII con Copérnico, Galileo y Newton fundamentalmente, en el ámbito de la electricidad y el magnetismo solo hubo unos pocos eruditos cuya actividad se centró en una acumulación de experiencias incapaz de construir modelos y teorías. No obstante hay que destacar algunos hitos muy relevantes.

Aunque el italiano Gerolamo Cardano (1501-1576) fue quien primero distinguió entre fuerzas eléctricas y magnéticas, fue el inglés William Gilbert (1544-1603) quien estableció claramente las diferencias entre ambos conceptos. La reina Isabel I de Inglaterra le hizo el encargo de profundizar en el estudio del magnetismo para mejorar la precisión de la brújula en la navegación marítima, de importancia capital pues aún no se había resuelto el “problema de la longitud”.⁷ Gilbert descubrió que

⁷ Conocer la latitud es muy simple (basta medir el ángulo sobre la horizontal de la estrella Polar) pero obtener la longitud exige comparar la hora local con la del lugar de referencia. La

ciertos trozos de hierro podían magnetizarse golpeándolos en presencia de un imán y que la imantación desaparecía cuando se calentaban suficientemente.⁸ Observó asimismo cómo un objeto electrizado atrae cualquier otro material mientras un imán solo atrae piezas de hierro. Hizo los primeros estudios de geomagnetismo y realizó una clasificación elemental de los materiales de acuerdo con sus propiedades eléctricas. Distinguió los que se electrizan fácilmente por fricción (en la serie triboeléctrica y ordenados de positivo a negativo: vidrio, piel de gato, seda, algodón, lana, ámbar⁹ y azufre), que denominó materiales eléctricos porque se mantienen cargados, y los que prácticamente no se electrizan porque conducen la electricidad, a los que llamó no eléctricos. Esta confusa denominación fue aclarada mucho tiempo después por el físico inglés Stephen Gray (1666-1736) que en 1729 mostró experimentalmente las di-

solución la dio John Harrison con su cronómetro marino H4 en 1759.

⁸ Algo que ya conocían los chinos que en el siglo XI fabricaban agujas imantadas por enfriamiento de hierro al rojo.

⁹ El ámbar (electrón en griego) es una resina vegetal fosilizada. La magnetita es un óxido de hierro descubierto en Magnesia. Ambos dieron origen a los términos electricidad y magnetismo.

ferencias entre aislantes (los materiales eléctricos de Gilbert) y conductores de la electricidad o metales (que Gilbert llamó no eléctricos).

La repulsión entre cuerpos electrizados puestos previamente en contacto fue observada por el físico alemán Otto von Guericke (1602-1686) que alcanzó además gran popularidad con su famoso experimento de los hemisferios de Magdeburgo, mostrando las fuerzas debidas a la presión atmosférica. Construyó el primer generador electrostático de fricción obteniendo algunas chispas claramente apreciables, por lo que consideró la hipótesis de la naturaleza eléctrica de los rayos.

Mención especial merece Benjamin Franklin (1706-1790), gran estadista, uno de los Padres Fundadores de los Estados Unidos, luchó contra el esclavismo, fue embajador en Francia y trabajó en periodismo, ciencia y tecnología. Franklin fue el primero en afirmar que la electricidad “vítrea” y “resinosa” no eran cosas muy diferentes y las denominó carga positiva y negativa respectivamente y fue él también quien descubrió el principio de conservación de la carga, lo que significa intuir muy correctamente la relación entre carga y corriente. Ade-

más mostró la naturaleza eléctrica de los rayos mediante el nunca bien explicado experimento de la cometa. Efectivamente, la posibilidad de mantenerse fuera del camino de la descarga eléctrica con una simple cuerda seca atada a la parte baja de la sustentación de la cometa para derivar la corriente a tierra o a una botella de Leyden¹⁰ a través del cabo mojado por la lluvia no parece razonable. El experimentador ha de estar también a cubierto y perfectamente bien aislado durante la tormenta, por lo que hemos de descartar los grabados de la época que muestran a Franklin con su hijo y la botella de Leyden volando la cometa un día de fuerte tormenta eléctrica. Hoy existe amplio consenso en que Franklin no realizó la experiencia sino que simplemente la propuso y otros murieron por electrocución en el intento. Pero esos experimentos condujeron al descubrimiento del pararrayos tal y como hoy lo conocemos y del que aprovechamos la protección que nos brinda.

¹⁰ La botella de Leyden permite almacenar carga eléctrica como un condensador cuyo dieléctrico es el vidrio mientras los electrodos son las hojas metálicas cilíndricas interna y externa. El nombre de condensador proviene de la idea que equiparaba la carga eléctrica a un fluido que después de su “condensación” podría almacenarse.



| Cometa de Benjamin Franklin |

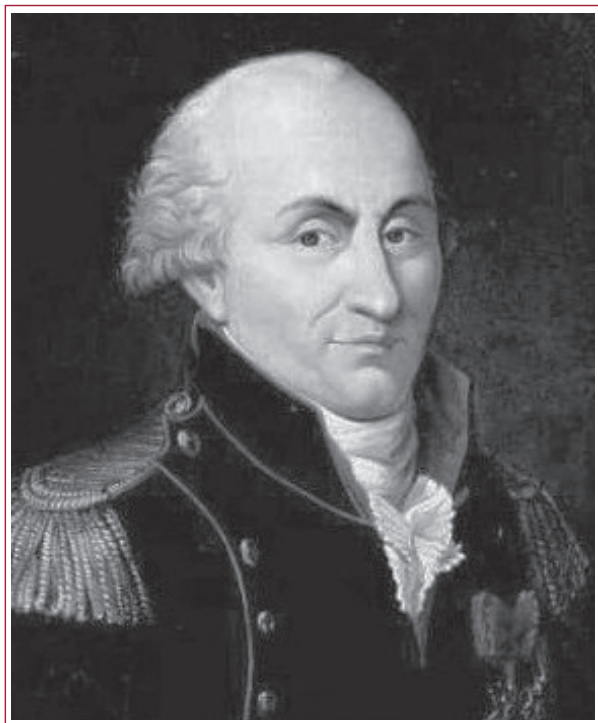
Este amplio cúmulo de conocimientos cualitativos de finales del XVIII dio paso al estudio cuantitativo de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Se harán multitud de escrupulosos experimentos y se aplicará rigurosamente el método científico. Tengamos en cuenta que ya se disponía del generador electrostático de Otto von Guericke y de la botella de Kleist (1745), del alemán Ewald Jürgen von Kleist (1700-1748), redescubierta en 1746 en Leyden, que permitía almacenar electricidad y generar descargas a voluntad como hoy lo hacemos con un condensador eléctrico.

En primer lugar tenemos que citar los trabajos del físico e ingeniero militar francés Charles Augustin Coulomb (1736-1806). Inventó la balanza de torsión para medir fuerzas muy débiles y la aplicó al estudio de la atracción y repulsión entre pequeños objetos eléctricamente cargados. Así, en 1785, publicó la relación que gobierna la fuerza de interacción eléctrica F_e entre dos cargas q y q' separadas una distancia d , lo que hoy conocemos como ley de Coulomb que se escribe

$$F_e = k_e \frac{q q'}{d^2}$$

siendo k_e una constante de proporcionalidad. Constató que esta fuerza de acción a distancia, como contraposición a las fuerzas de contacto, resulta atractiva entre cargas de signo opuesto y repulsiva entre cargas de igual signo, reduciéndose en ambos casos su intensidad con el cuadrado de la distancia entre ellas. En honor a Coulomb la unidad de carga eléctrica lleva su nombre. Con la balanza de torsión también realizó medidas magnéticas, observando que las fuerzas de atracción y repulsión entre los polos magnéticos de largas varillas imantadas

también satisfacían la misma dependencia con el cuadrado de la distancia, lo que hoy conocemos como ley de Coulomb del magnetismo.



| Charles Augustin Coulomb |

Es muy significativa la gran analogía entre la ley de Coulomb y la ley de Newton de la gravitación universal

$$F_G = G \frac{m m'}{d^2}$$

donde F_G es la fuerza de atracción entre dos masas m y m' separadas una distancia d , y G una constante de proporcionalidad.¹¹ Especialmente importante es la presencia del exponente 2 en el denominador de la ley de Coulomb. Sobre este aspecto, y especialmente sobre cómo sintetizó en su ley las medidas realizadas, ha habido innumerables discusiones. En los últimos años se han repetido escrupulosamente los experimentos de Coulomb con reproducciones fidedignas del material que él empleó. Hoy tenemos que afirmar categóricamente que Coulomb no pudo medir la carga eléctrica ni la fuerza con la precisión suficiente para demostrar su ley, que de hecho fue enormemente discutida durante décadas, especialmente en Alemania. La mayor parte de los experimentos de Coulomb

¹¹ La fuerza electromagnética es mucho más intensa que la gravitacional. Por ejemplo, para dos electrones es más de 10^{42} veces mayor.

no se ajustaban a una ley inversa del cuadrado de la distancia sino solamente unas pocas medidas. Las fluctuaciones en la diferencia de potencial aportada por un generador electrostático de fricción, el uso de un electroscopio elemental (cuyo funcionamiento está basado precisamente en la propia ley de Coulomb), el apreciable tamaño de los objetos cargados con los que trabajó,¹² la descarga a través del dispositivo experimental y del aire más o menos húmedo del laboratorio de Coulomb así como la simple perturbación asociada a su propia presencia como experimentador, nos permiten concluir que aquellos resultados no estaban suficientemente justificados. Sin embargo tengamos presente que en la Francia de finales del XVIII la Física estaba experimentando una notable transformación, pasando de ser una ciencia de observación cualitativa a una ciencia de leyes universales y medidas exactas. Coulomb contribuyó enormemente a ese cambio y ello permitió la aceptación de sus resultados por los científicos franceses mientras que en el resto de

¹² Piénsese en cómo definir la distancia entre los verdaderos centros de carga para cargas de igual signo y signos opuestos si el tamaño de los objetos cargados no es despreciable.

Europa la reacción fue inicialmente mucho menos favorable.

Antes de la publicación de Coulomb, el físico inglés Henry Cavendish (1731-1810) había deducido a partir de consideraciones teóricas la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Efectivamente, Cavendish demostró que si la intensidad de la fuerza (es decir, el campo eléctrico¹³) es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, la fuerza sobre una carga eléctrica en cualquier punto del interior de una esfera hueca electrizada sería nula, y posteriormente lo confirmó de forma experimental. A la vista de todo esto resulta lamentable constatar que sus excelentes trabajos no fueran conocidos hasta mucho después de su muerte pues sería Maxwell quien los publicara en el año 1879.

Hoy sabemos que la ley de Coulomb es rigurosamente exacta dentro de los límites de la extraordinaria precisión de los experimentos más modernos. En particular si el exponente no fuera exactamente 2, no solo dejaría de ser válida la ley de Gauss del flujo del campo eléctrico

¹³ El campo eléctrico se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga positiva.

y habría carga neta en el interior de un conductor cargado, sino que tendríamos también un grave conflicto con la Relatividad de Einstein. La posible desviación de ese exponente 2 está estrechamente relacionada con la masa del fotón¹⁴ en reposo, que debe ser rigurosamente nula. Los experimentos más recientes cifran la cota superior de esa masa en un valor tan pequeño que permite asegurar que el exponente de la ley de Coulomb difiere de 2 en menos de 5 partes en 10²⁰; momento muy oportuno para reflexionar sobre la escasa precisión que desafortunadamente pudo obtener Coulomb en sus medidas experimentales y el extraordinario éxito de su aventurada propuesta.¹⁵

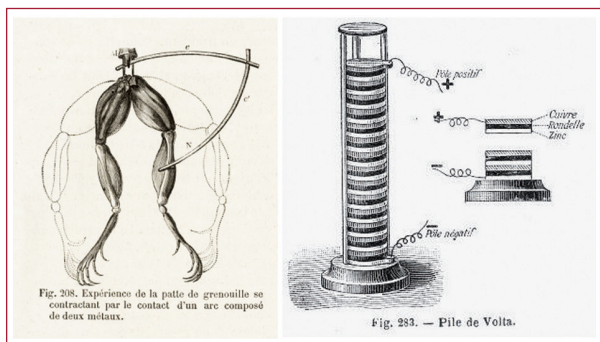
Hasta el final del siglo XVIII todas las experiencias de electricidad eran de tipo electrostático: objetos cargados, fuerzas de Coulomb y descargas eléctricas o corrientes instantáneas. Sin embargo, en 1800 el físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) comunicó al presidente de la

¹⁴ El fotón es el cuanto de energía de la radiación electromagnética.

¹⁵ Una precisión equivalente a la de conocer la edad del universo con un error de fracción de segundo.

Royal Society de Londres¹⁶ que había demostrado que una corriente eléctrica persistente podía obtenerse también a partir de procedimientos químicos, y no solo a partir de tejidos animales como observó el físico y médico italiano Luigi Galvani (1737-1798), cuyo hallazgo cuando estaba experimentando con un anca de rana es bien conocido. Este pensó que la contracción muscular observada era debida a una descarga electrostática desde su bisturí cargado y definió el concepto de electricidad animal para describir la fuerza que activa los músculos a través de un fluido eléctrico transportado por los nervios. Volta, conocedor de ese resultado que denominó galvanismo, hoy día base fundamental de la electrofisiología, lo repitió cuidadosamente y pronto observó que no era una descarga de electricidad estática sino una corriente eléctrica que exigía la presencia de dos metales diferentes. Hoy día es muy popular en los centros de enseñanza el experimento realizado con cobre y zinc conectados respectivamente al nervio ciático y a un músculo de la pata.

¹⁶ Una de las más antiguas sociedades científicas de Europa. Fundada en 1660 a partir de las reuniones impulsadas por Robert Boyle desde 1645.



| Experiencia de Galvani y pila de Volta |

Volta fue más allá y sustituyó la rana por fieltros humedecidos en soluciones salinas. Así descubrió la serie electroquímica, definió el concepto de potencial de electrodo y descubrió la celda galvánica, formada por un par de metales diferentes separados por un electrolito, mostrando que los pares más eficaces eran los de plata-zinc y cobre-zinc. Aunque inicialmente solo experimentó con celdas individuales, pronto las conectó en serie, apilándolas para conseguir corrientes más intensas, y de esa forma diseñó la pila voltaica en el año 1800. En su honor, el voltio es la unidad de fuerza electromotriz. Volta adquirió un gran relieve científico, gozó de la simpatía del emperador

Napoleón Bonaparte y fue invitado a mostrar su descubrimiento a los miembros del Instituto de Francia, a alguna de cuyas sesiones acudió el propio emperador fiel a su política de apoyo a científicos e intelectuales. Es de destacar la importancia científica y tecnológica de su descubrimiento en el que actualmente se sigue investigando, tanto en pilas como en baterías recargables de alto rendimiento que ya forman parte de nuestra vida diaria.

No puede omitirse aquí una referencia a la denominada “celda galvánica” de Bagdad, que algunos han considerado como precursora de la de Volta. Durante unas excavaciones en 1936 en una pequeña localidad al sureste de Bagdad, se descubrió una tumba fechada en el período partiano (entre 248 a. C. y 226 d. C.) de la que se extrajeron unos singulares recipientes de arcilla con forma de jarrón de unos 14 cm de altura. En su interior había un tubo de cobre fijado con asfalto a la embocadura del cuello y dentro de él una varilla de hierro. Mientras que el tubo de cobre no sobresalía al exterior, la varilla de hierro sí lo hacía en aproximadamente un 1 cm. El arqueólogo del Museo Estatal de Bagdad lo identificó como una celda galvánica

para dorar objetos de plata, pues anteriormente se habían encontrado en la región algunas figuras recubiertas con una fina capa de oro. Esta sugerente explicación despertó el interés de numerosos museos y especialistas en todo el mundo y se hicieron pruebas con vinagre y otros electrolitos observando efectivamente la producción de una débil corriente eléctrica. Sin embargo esta teoría está actualmente en entredicho, entre otras razones porque el tubo de cobre no era accesible desde el exterior, por lo que no podía cerrarse el circuito, y porque el par cobre-hierro (responsable de la temible corrosión galvánica en nuestras instalaciones de agua) suministra solamente 0.78 V. De hecho, a día de hoy, y debido a su semejanza con otros objetos encontrados, se concede más verosimilitud a la simple hipótesis del uso de esos jarrones para preservar manuscritos en rollos de papiro o pergamino.

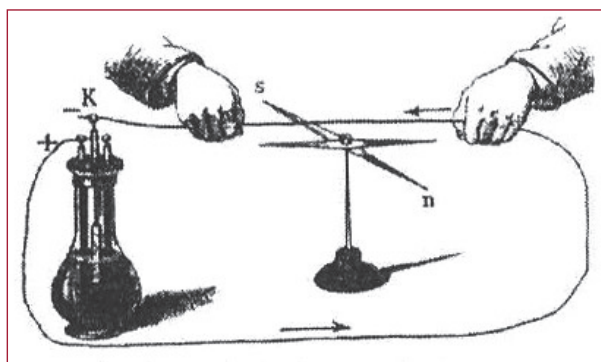


| “Celda galvánica” de Bagdad |

La posibilidad de disponer de la pila de Volta y por lo tanto de una corriente eléctrica duradera, a diferencia de las descargas instantáneas de electricidad estática, abrió infinitud de posibilidades pues permitió estudiar los circuitos y medir la resistividad eléctrica de los conductores.

Pero antes era necesario medir la intensidad de la corriente eléctrica y eso se lo debemos fundamentalmente al físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851), quien llevaba

mucho tiempo sospechando de la relación entre corriente eléctrica y magnetismo. En 1820, durante una clase impartida en la Universidad de Copenhague, advirtió que la brújula con la que hacía sus experimentos sufría un cambio de orientación cuando la corriente eléctrica suministrada por la pila se hacía circular por un cable próximo, confirmando por fin una relación clara entre electricidad y magnetismo. Aunque su interpretación inicial fue notablemente confusa, muy pronto fue capaz de publicar sus resultados mostrando que una corriente eléctrica produce un campo magnético circular alrededor de ella.



| Experiencia de Oersted |

Inmediatamente después muchos científicos se dedicaron a profundizar en el experimento de Oersted, destacando entre ellos el físico y matemático francés André Marie Ampère (1775-1836) en cuyo honor denominamos amperio a la unidad de corriente eléctrica. El trabajo de Ampère fue inicialmente de carácter más bien experimental, trabajando con el material de lo que se denomina “mesa de Ampère”. Disponía de balanza, espiras de diferentes tamaños y formas, pilas de Volta, bobinas, contactos de mercurio para sistemas en movimiento, etc. Hizo medidas cuantitativas acerca del experimento de Oersted y ello le llevó en el año 1824 a inventar el galvanómetro pudiendo así medir corriente eléctrica o, alternatively, campo magnético. Estaba construido como una brújula rodeada por una gran espira circular y se denominaba brújula de tangentes porque la tangente del ángulo de deflexión de la aguja magnética resulta proporcional a la intensidad de corriente en la espira. Observó cómo una bobina recorrida por una corriente se comporta como un imán y, lo que es más importante, descubrió que dos corrientes paralelas se atraen o se repelen según que sus sentidos sean iguales u opuestos.



| André Marie Ampère |

Pero Ampère también abordó los aspectos teóricos del fenómeno y condensó todos los resultados experimentales en lo que conocemos como ley de fuerzas de Ampère, que permite calcular la fuerza magnética entre circuitos recorridos por corrientes estacionarias. Para el caso particular de dos corriente rectilíneas paralelas indefinidas I e I' separadas una distancia d , la fuerza magnética para una longitud L se escribe

$$F_m = k_m \frac{I I'}{d} L$$

siendo k_m una constante de proporcionalidad. Los resultados, siempre apoyados en sus propias medidas experimentales, le llevaron a publicar en 1827 su obra *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*, que hoy hemos de considerar como la base fundamental de la electrodinámica. La fuerza de Ampère también se englobó en lo que se llamaron fuerzas de acción a distancia, a diferencia de las fuerzas de contacto como la de rozamiento o la asociada a la presión de un fluido. Es decir, las dos corrientes

interaccionan sin haber contacto físico entre ellas, como también ocurre con las cargas eléctricas en la ley de Coulomb o las masas en la de Newton. Hay que señalar que esa concepción de las fuerzas corresponde a una descripción prerrelativista, que no crea mayor dificultad en problemas estáticos pero sí cuando el fenómeno es dependiente del tiempo. El concepto de acción a distancia exige que en cada instante de tiempo la fuerza sobre una carga solo dependa de las coordenadas del resto de cargas en el mismo instante, confiriendo así a la fuerza un carácter de propagación instantánea, con velocidad infinita. Ya veremos más adelante cómo esta concepción de las fuerzas quedó superada por la Teoría de la Relatividad que atiende a la existencia de una velocidad finita de propagación electromagnética, la velocidad de la luz, de forma que el concepto de campo alcanzó su máxima importancia.

La posibilidad de medir la corriente eléctrica con la ayuda del galvanómetro de Ampère impulsó el desarrollo de muchos trabajos como los del físico inglés Peter Barlow (1776-1862) y sobre todo del alemán Georg Simon Ohm (1789-1854). Realizaron medidas sistemáticas

de corriente eléctrica en diferentes metales encontrando la relación existente entre la resistencia eléctrica R (cociente entre diferencia de potencial V e intensidad I) de un hilo conductor y su longitud y sección transversal. Precisamente la expresión $R=V/I$ es lo que denominamos ley de Ohm que simplemente pone de manifiesto el comportamiento lineal frente al campo eléctrico de multitud de materiales.

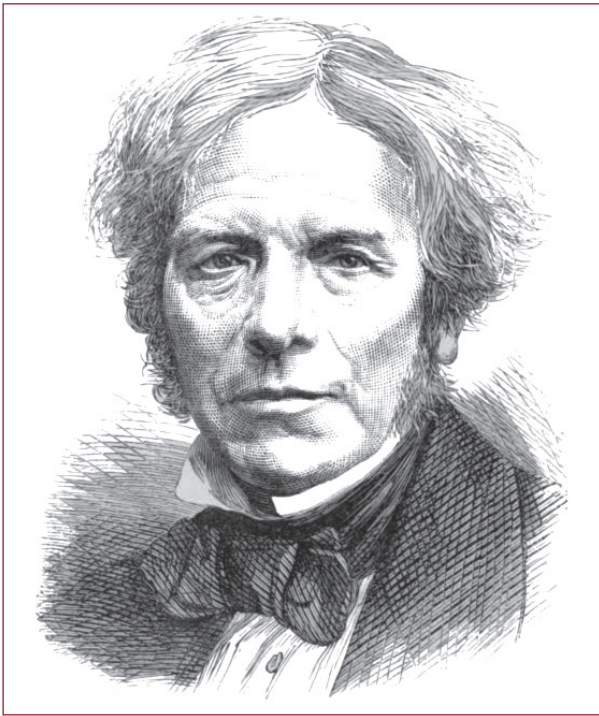
Una de las principales aportaciones al conocimiento de la electricidad y el magnetismo en el primer tercio del siglo XIX se la debemos sin duda alguna al científico inglés Michael Faraday (1791-1867). Nació en Newington Butts, cerca de Londres, en una familia muy humilde. Su padre era herrero y no pudo darle más que una formación académica limitada; fue un autodidacta que solamente recibió educación básica en lectura, escritura y aritmética. A los catorce años empezó a trabajar como aprendiz en un taller de encuadernación, lo que le permitió leer mucho durante los seis años que duró su oficio y desarrollar una gran curiosidad por la ciencia, especialmente por la electricidad. Este interés se despertó en Faraday cuando encontró el término “electricidad” en

la Enciclopedia Británica que estaba encuadernando y enseguida se dedicó a hacer experimentos con el escaso material del que disponía. Descubrió al químico inglés Sir Humphry Davy (1778-1829) a través de un libro que leía mientras lo encuadernaba (*Conversaciones en Química*, de Jane Marcet), y pronto comenzó a asistir a sus conferencias en la *Royal Institution* de Londres.¹⁷ Faraday lo admiraba y un día le mostró las notas que tomaba durante sus lecciones. La reacción de Davy fue inmediata y decidió contratarlo en 1813 como su ayudante de laboratorio en la *Royal Institution*, de la que fue elegido miembro en 1824 y donde trabajó hasta su muerte. Durante una larga época la relación y colaboración científica entre Davy y Faraday fue excelente y aprendió química y electroquímica con gran entusiasmo. Davy inventó la lámpara de arco voltaico¹⁸ y la lámpara de se-

¹⁷ Nacida en 1799 con el fin de fomentar la ciencia y la tecnología entre el gran público. Son famosas las *Christmas Lectures*, iniciadas por Michael Faraday en 1825.

¹⁸ Formada por dos varillas de carbón en contacto que, una vez encendida, se separan ligeramente para que la corriente siga circulando a través del brillante plasma asociado a la vaporización del carbón que se va consumiendo, lo que exige ajustar la separación entre las varillas frecuentemente.

guridad para su uso en la minería del carbón. Descubrió además ocho nuevos elementos de la tabla periódica, pero cuando una vez le preguntaron cuál había sido su mayor descubrimiento, respondió sin dudarle “Michael Faraday”.



| Michael Faraday |

A pesar de su corta formación en ciencias naturales y su escaso conocimiento de las matemáticas, Faraday fue un extraordinario científico en el campo experimental. En 1821, inmediatamente después del experimento de Oersted, diseñó un motor eléctrico que denominó “de rotación electromagnética” y que hoy conocemos como motor homopolar (el inverso del generador homopolar). Sobre un recipiente con mercurio colocó un imán y un alambre conductor que alimentaba con una batería, cerrando el circuito a través del mercurio cuya conexión deslizante le permitía mantener el sistema en rotación. Destacan sus trabajos en electroquímica, diamagnetismo y electrolisis, pero su mayor aportación fue el descubrimiento de la ley de la inducción electromagnética en 1831. En efecto, aunque los experimentos de Oersted y Ampère ya habían demostrado de forma fehaciente los efectos magnéticos de la corriente eléctrica, Faraday quiso profundizar en la relación entre electricidad y magnetismo. Quiso ver si el campo magnético podía dar lugar a corriente, es decir el recíproco de Oersted que vio como una corriente eléctrica era responsable de magnetismo. Para ello se ayudó de una nueva forma de entender los últimos expe-

rimentos, introduciendo los conceptos de campo eléctrico y magnético que mostró a través de líneas de fuerza dibujadas con gran esmero a partir de su visualización con semillas de hierbas y limaduras de hierro respectivamente. De esta forma Faraday dejó atrás las antiguas interpretaciones de los fluidos eléctrico y magnético y abandonó el concepto newtoniano de fuerza de acción a distancia. La presencia de cargas y corrientes representaba para Faraday una perturbación en el espacio circundante, un campo que se manifestaba como fuerzas sobre otras cargas y corrientes. En 1845 Faraday descubrió que un material magnetizado transparente interpuesto en el camino de propagación de la luz altera sus propiedades, que es lo que hoy llamamos rotación del plano de polarización o simplemente rotación de Faraday, y en 1846 publicó un artículo en el que reflexionaba sobre la posibilidad de que la luz pudiera ser una vibración transversal de las líneas de fuerza de los campos eléctrico y magnético.¹⁹ Téngase presente que en 1815, antes del descubrimiento de Oersted y de la elaboración del concepto

¹⁹ M. Faraday, *Thoughts on Ray-vibrations*, *Phil. Mag.* (188), 345-350, 1846. Nada menos que 19 años antes de la publicación de Maxwell.

de campo, Fresnel ya propuso el carácter transversal de la propagación de la luz profundizando en la teoría ondulatoria del físico holandés Christiaan Huygens (1629-1695). Aunque estas ideas nos resulten ahora sencillas hay que valorarlas en su contexto, en su época, y apreciar que las formuló un autodidacta como Faraday, un extraordinario científico, un genio.

El físico y matemático alemán Carl Friedrich Gauss (1777-1855) impulsó decididamente el concepto de campo y a él le debemos el teorema de la divergencia, en el que se relaciona la integral de volumen de la divergencia de un campo vectorial con el flujo a través de la superficie que lo envuelve. Por otro lado, al también físico y matemático irlandés Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), que realizó notables aportaciones a la dinámica de fluidos, le debemos el teorema que establece que la integral de superficie del rotacional de un campo vectorial sobre una superficie abierta es igual a la integral curvilínea del campo a lo largo del contorno en que se apoya. Ambos teoremas son extraordinariamente fructíferos en electromagnetismo pues permiten resolver multitud de problemas sin más que hacer consideraciones acerca de su simetría.

Para estudiar si el campo magnético podría ser responsable de corriente eléctrica, Faraday comenzó en 1824 disponiendo un circuito con una bobina sobre un núcleo de hierro con el que pretendía simplemente verificar si el campo magnético podía alterar una corriente muy próxima y previamente establecida mediante una pila en un hilo conductor, pero el resultado fue negativo. Faraday dedicó mucho tiempo a este experimento y a otros análogos, pero siempre obtuvo el mismo resultado. Más tarde emprendió una nueva serie de experimentos y por fin, el 29 de agosto de 1831, descubrió la ley de inducción electromagnética o ley de Faraday. Efectivamente, consiguió una muy breve y débil corriente solo debida al campo magnético. Para ello dispuso dos arrollamientos aislados sobre un anillo de hierro y descubrió que al conectar o desconectar la corriente en uno de ellos se detectaba una corriente instantánea inducida en el otro, como recogió en su famoso cuaderno de laboratorio. Esa serie de experimentos se completó observando el mismo efecto cuando un imán se movía en las proximidades de una bobina, lo que permite afirmar que la electricidad y el magnetismo quedaban defi-

nitivamente relacionados a través de la ley de inducción de Faraday. Esta nos dice que siempre que varía el flujo magnético Φ recogido por un contorno, ya sea por movimiento de este o por la variación temporal del campo magnético B , se induce una fuerza electromotriz ε dada por la expresión

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

donde el signo menos indica que la fuerza electromotriz se opone a la variación del flujo magnético.



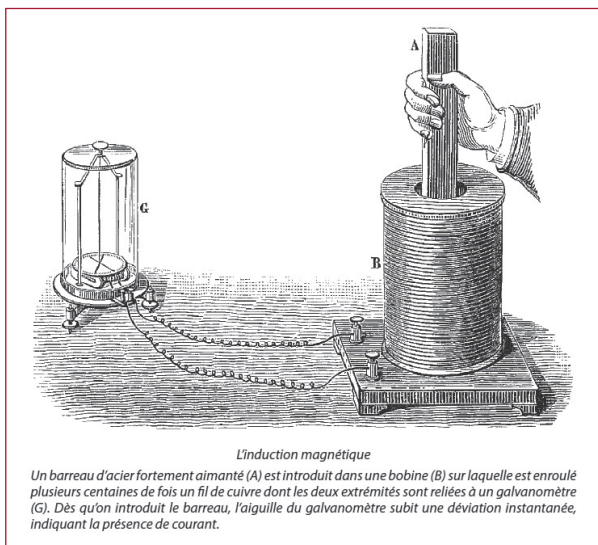
| Anillo de Faraday |

Es interesante resaltar que Faraday no advirtió la necesidad del signo menos. Esa importantísima aportación se la debemos al físico ruso Heinrich Lenz (1804-1865), que en 1833 estudió la inducción electromagnética en el contexto de la ley de conservación de la energía que exige la presencia de ese signo menos, lo que también comprobó experimentalmente. Por eso resulta muy frecuente en la bibliografía encontrar referencias a la ley de inducción como ley de Faraday-Lenz.

Acerca del descubrimiento de Faraday hay al menos cuatro trabajos poco conocidos de otros tantos científicos que lo intentaron antes y parece ser que lo encontraron, aunque poco se sabe de ello porque o no estaban seguros del hallazgo o no lo difundieron de la forma adecuada.

El primero es el caso de Fresnel, que se hospedó durante algún tiempo en la casa de Ampère, y en 1820 realizó experimentos similares a los de Faraday. Los resultados que obtuvo eran prácticamente imperceptibles y concluyó que probablemente eran debidos a “efectos parásitos” y no le dio mayor importancia.

Poco después, en 1822 y sin ningún soporte experimental, Ampère hizo la muy afortunada hipótesis de que el magnetismo de un imán está ocasionado por corrientes microscópicas en su interior. Y se planteó si esas corrientes se crean (inducen) en el momento de su imantación o si ya existían y simplemente se orientan (ordenan) bajo la influencia de un campo magnético. En el primer supuesto, si las corrientes se inducen en el hierro, también se inducirán en una bobina cuando la sometamos a un campo magnético. Para resolver la disyuntiva hizo experimentos similares a los de Fresnel, observando también efectos mínimos de inducción por lo que abandonó el trabajo. Sin embargo, resulta plausible pensar que rechazara el resultado encontrado porque le creaba una situación muy embarazosa que no le satisfacía por la complejidad de su explicación. Por ello, y de forma no excluyente con la otra alternativa como bien sabemos, se convenció de que la hipótesis de las corrientes moleculares preexistentes era la correcta. Más tarde tuvo que justificar su actitud y en 1833 escribió a Faraday para explicarle por qué no dio la importancia merecida a los resultados de sus experimentos.



| Experiencia de Colladon |

Especialmente relevante es el trabajo del físico e industrial suizo Jean-Daniel Colladon (1802-1893) en el año 1825. Utilizó para su experimento un galvanómetro muy sensible al que conectó una bobina en cuyo interior desplazaba un imán. Observó muy claramente que la aguja del galvanómetro se movía pero reparó en que esta era de hierro y consideró que aquello podría ser un efecto puramente mag-

netostático. Para evitar toda influencia directa del imán sobre la aguja indicadora, extendió los cables de conexión y llevó el galvanómetro a otra habitación en su casa de Ginebra, donde trabajaba en solitario. Movía el imán en una habitación y se iba a la otra a observar el resultado, encontrando siempre la aguja indicadora ya en reposo en el cero del galvanómetro. Parece evidente que Colladon observó el fenómeno de inducción electromagnética seis años antes que Faraday, pero una prudencia excesiva y la falta de un ayudante de laboratorio impidieron que su trabajo fuera conocido.

Y por último el físico italiano Francesco Zantedeschi (1797-1873) que, primero en 1829 y después en 1830, publicó los resultados de sus experimentos en los que demostró inequívocamente la producción de corrientes inducidas en bobinas como consecuencia del movimiento de un imán en sus inmediaciones (el experimento de Colladon), anticipándose a los resultados más completos y exhaustivos de Faraday de 1831.

Hay un par de anécdotas muy famosas relativas a lo ocurrido a Faraday cuando comunicó

sus resultados sobre la inducción electromagnética. Se refieren a la utilidad de su trabajo y pueden encontrarse de distintas maneras en escritos de finales del XIX y principios del XX, así como en textos universitarios más modernos. Una de ellas, similar a otra atribuida a Benjamin Franklin, cuenta que un alto dignatario, quizá el propio primer ministro, visitó a Faraday en su laboratorio de la *Royal Institution* y le hizo una de las preguntas que más preocupan a un físico: ¿Para qué vale todo esto?, a lo que Faraday respondió: “Pronto estará usted cobrando impuestos de ello”. La otra se refiere a lo sucedido cuando presentó sus hallazgos en una conferencia abierta al público. Cuando llegó el turno de preguntas, una señora le preguntó: ¿Qué aplicación podría tener su descubrimiento? y Faraday le contestó: ¿Y qué uso le podríamos dar a un niño recién nacido? Sin embargo hay que decir que estas anécdotas son probablemente leyenda pues no se mencionan en ningún documento de Faraday ni en los de sus contemporáneos con los que mantuvo correspondencia, sino que solo aparecieron después de su muerte.

Respecto a la utilidad de la ciencia y en particular de la ciencia básica, es evidente que los científicos debemos hacer un gran esfuerzo y luchar de forma decidida por llegar a toda la ciudadanía. Conviene llamar a los científicos al compromiso social, pues de otro modo la ciencia se hará sospechosa y ambigua ante la sociedad. Pocas áreas del conocimiento científico calan verdaderamente entre el gran público y quizá solo los grandes avances médicos son realmente aplaudidos por nuestra sociedad. Mientras, en el otro extremo, está la física fundamental, que tiene muy difícil conectar con la gente de la calle. A este respecto es muy significativa la discusión que tuvo lugar en una sesión parlamentaria en el Congreso de los Estados Unidos el 17 de abril de 1969, recién llegado a la presidencia del país Richard Nixon, en plena guerra fría. El físico estadounidense Robert R. Wilson conocido por su participación en el Proyecto Manhattan, tuvo que defender una solicitud multimillonaria de financiación para la construcción del acelerador del Fermilab, del que era director. En ella, el senador demócrata John Pastore le preguntó: “¿Hay alguna posibilidad de que la construcción de

ese acelerador suponga una esperanza de mayor seguridad para nuestro país?” La respuesta de Wilson fue: “No señor, nada en absoluto”. Pastore insistió repetidamente en el sentir de su pregunta mientras Wilson reiteraba la misma respuesta, hasta que después de un largo diálogo dijo: “Solo tiene relación con el respeto con el que nos tratamos los unos a los otros, con la dignidad del hombre, con nuestro amor por la cultura. Tiene que ver con si somos buenos pintores, escultores o poetas, con todas las cosas que verdaderamente valoramos y respetamos en nuestro país y que enaltecen nuestro sentido patriótico. Este proyecto no tiene nada que ver directamente con la defensa de nuestro país, sino con que merezca la pena defenderlo”. Una excelente respuesta del director del Fermilab poniendo de manifiesto la importancia y utilidad de la ciencia básica. Y huelga decir que el presupuesto para la construcción del acelerador se aprobó sin problema alguno.

A PARTIR DEL DESCUBRIMIENTO de la ley de inducción electromagnética de Faraday se sucedieron con gran rapidez los desarrollos tecnológicos y las nuevas aplicaciones, así como otros hallazgos que vinieron a completar la incipiente teoría electromagnética.

Cabe resaltar algunos como el descubrimiento del primer telégrafo eléctrico comercial en 1837 por los ingleses Sir Charles Wheatstone (1802-1875) y Sir William Fothergill Cooke (1806-1879), sistema de comunicaciones que se adoptó en el Reino Unido. En las mismas fechas e independientemente, el estadounidense Samuel Morse (1791-1872) creó su famoso código alfanumérico y un nuevo sistema telegráfico con dispositivos electromecánicos más simples, que tuvo gran aceptación a raíz de su presentación en el Instituto Franklin de Filadelfia y se impuso como estándar en el resto del mundo. Fue el propio Samuel Morse quien envió el primer telegrama usando este sistema en 1844, pero hasta 1861 no se dispuso de una línea telegráfica entre las costas americanas del Atlántico y del Pacífico.

En 1840, el físico inglés James Prescott Joule (1818-1889) formuló la ley que lleva su nombre y permite calcular la cantidad de potencia disipada en un conductor por el que circula una corriente eléctrica. Sus trabajos han de relacionarse con los de Lenz acerca de la conservación de la energía en circuitos inductivos, por lo que la ley de Joule se conoce también como ley de Joule-Lenz. En 1854 el físico prusiano (nacido en Königsberg, o Kaliningrado, hoy Rusia) Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), realizó importantes contribuciones científicas a la espectroscopía y al estudio de la emisión de radiación del cuerpo negro. Además desarrolló la teoría de circuitos eléctricos atendiendo a las leyes de conservación de la carga (primera ley de Kirchhoff) y de la energía (segunda ley de Kirchhoff). El principio de conservación de la carga muestra que todo flujo de corriente eléctrica I se corresponde con una variación de carga q , y se escribe como

$$I = - \frac{dq}{dt}$$

Es uno de los pilares básicos del electromagnetismo que se ha comprobado con extrema

precisión mediante estudios de desintegración de partículas elementales y puede garantizarse hoy con un error menor de una parte en 10^{26} ; incluso sabemos que la carga es un invariante relativista.

Y ya en 1862 Fizeau y Foucault midieron la velocidad de la luz con gran precisión, 298 000 km/s, resultado prácticamente coincidente con el obtenido después por Maxwell a partir de la teoría del campo electromagnético. También midieron la velocidad de la luz en el agua y otros medios transparentes encontrando que esas velocidades se correspondían con los índices de refracción estudiados dos siglos antes en la ley de Snell y nueve siglos antes en los trabajos de los físicos y matemáticos Ibn Sahl e Ibn Al-Haytham.

Aunque buena parte de la tecnología eléctrica basada en los resultados de Ampère y Faraday no se desarrollaría hasta más avanzado el siglo XIX, conviene repasar brevemente las enormes aplicaciones prácticas de sus descubrimientos. El ejemplo más importante es sin duda la generación de energía eléctrica en nuestras centrales ya sean hidráulicas, térmicas o nucleares, y más recientemente en los parques eólicos. Pero ¿cómo funciona una central

hidroeléctrica? Mediante una enorme pared de hormigón cuya curvatura responde a los esfuerzos que debe soportar por la presión hidrostática, almacenamos una formidable cantidad de agua que solo permitimos salir cayendo hasta el lecho del río a través de una gran tobera que la dirige a las palas de una turbina haciéndola girar. Solidaria con ella hay una máquina eléctrica, el alternador, que trabaja exactamente como prevé la ley de Faraday. Está diseñada con bobinas de cobre sobre núcleos de hierro que giran de forma que entre sus bornes obtenemos una fuerza electromotriz de miles de voltios capaz de suministrar miles de amperios. Mediante unas gruesas barras de cobre llevamos esa energía a un transformador muy cercano a la central, que también funciona de acuerdo con la ley de Faraday, y nos permitirá transportarla a grandes distancias de forma muy eficiente, con altos voltajes y bajas intensidades, a través de los tendidos eléctricos. Y así llegamos a nuestras ciudades y después de pasar de nuevo por los transformadores reductores llega a nuestras viviendas y a nuestras fábricas donde funcionan millones de motores, calefactores, lámparas y un sinfín de aparatos de todo tipo que consumen la energía generada

en aquella lejana central eléctrica. Y esos generadores producen exactamente la potencia que se demanda en cada instante y giran precisa y sincronizadamente a la velocidad prevista.²⁰ Podemos afirmar con gran acierto que la energía gravitatoria del agua del río se ha repartido por todo el país o por todo el mundo, pues las redes eléctricas de transporte están interconectadas. Entre el principio y el final de la historia, toneladas de hierro y cobre magníficamente dispuestos girando arrastrados por una turbina y más hierro y cobre en enormes transformadores eléctricos. Aunque la anécdota aquella de “¿qué uso le podríamos dar a un niño recién nacido?” sea una leyenda, está claro que ese niño, que esa débil corriente que apenas detectó Faraday, se transformó en una maravilla que cambió el mundo y nuestras vidas como nunca nadie podría haberlo soñado. Y es que ¿cómo viviría nuestra sociedad sin energía eléctrica?

²⁰ Que en revoluciones por segundo equivale a la frecuencia de la red dividida por el número de pares de polos del alternador.



| Presa de Aldeadávila |



| Alternadores de Aldeadávila |

Otra aportación extraordinaria fue sin duda el teléfono. Durante muchos años se consideró que el inventor del teléfono fue el británico Alexander Graham Bell²¹ (1847-1922). Esto no fue así pues Graham Bell fue simplemente el primero en patentarlo en 1876. Muchos años después, en 2002, el Congreso de los Estados Unidos aprobó una resolución por la que se reconocía que el verdadero inventor del teléfono había sido el ingeniero italiano Antonio Meucci (1808-1889) que lo llamó teletrófono. Las comunicaciones telegráficas se impulsaron decididamente y en 1850 se unió por cable Gran Bretaña y Francia pero hasta 1858 no se tendió el cable transatlántico que uniría el Reino Unido con los Estados Unidos. Esta imponente obra fue desarrollada por la *Atlantic Telegraph Company*, pero desgraciadamente la línea

²¹ En la historia de la autoría de los descubrimientos científicos, y más en la de los avances tecnológicos, es muy fácil encontrar notables discrepancias. Las preguntas de quién lo hizo primero, quién lo publicó antes o quién lo patentó han constituido tradicionalmente fuente de controversia. Las disputas entre Francia y Reino Unido, entre Francia y Alemania y entre Estados Unidos y Europa han sido muy frecuentes y según las fuentes elegidas encontraremos elogios para unos u otros autores.

se deterioró muy pronto, solo estuvo en funcionamiento algunas semanas, de forma que hasta la instalación de un nuevo cable submarino en 1866 no hubo comunicación intercontinental.

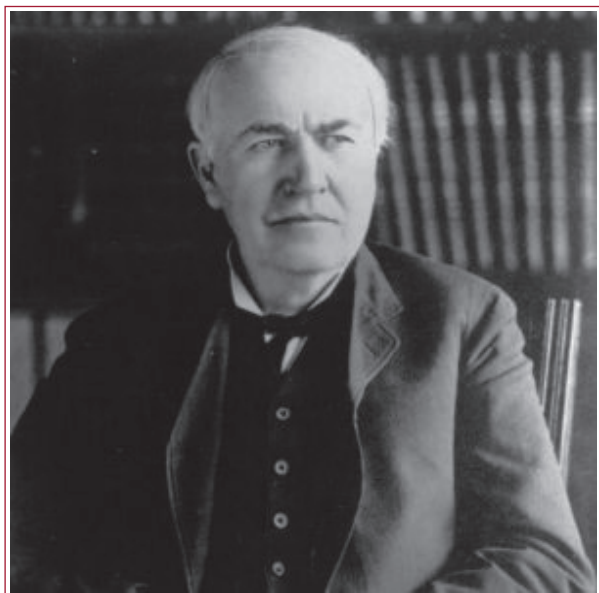
A principios de los años 1880 se inició una fuerte competencia por el control del incipiente mercado de la generación y distribución de energía eléctrica, es el principio de la Segunda Revolución Industrial. Algunos banqueros, empresarios, ingenieros y varios gobiernos en todo el mundo apreciaron enseguida el impacto que todo ello habría de tener. Sin embargo, en el caso de las redes de telecomunicaciones, telegrafía y telefonía, la previsión de negocio y la correspondiente pugna comercial se produjo algo más tarde, a partir de los años 1890, pues hubo que esperar a los trabajos realizados por Hertz sobre propagación electromagnética, directamente derivados de la obra de Maxwell.

“Guerra de las Corrientes” fue el término que hacía referencia al conflicto entre las dos distintas concepciones del mercado eléctrico: La corriente continua (DC)²² y la corriente

²² Corresponde a aquella que fluye por los conductores siempre en el mismo sentido.

alterna (AC).²³ El empresario y gran inventor Thomas Alva Edison (1847-1931) y el emprendedor e ingeniero George Westinghouse (1846-1914), ambos estadounidenses, protagonizaron una enconada batalla, Edison en defensa de la opción de corriente continua y Westinghouse de la de corriente alterna. Edison había presentado en la Exposición Universal de París de 1881 su lámpara incandescente de filamento de carbono, precursora de nuestras ya obsoletas lámparas de wolframio. Aquello fue un éxito extraordinario pues podía sustituir no solo a las antiguas lámparas de gas o de aceite sino también a las más modernas lámparas de arco de electrodo de carbón. La demanda de la lámpara incandescente fue tan extraordinaria que Edison se asoció con el banquero J. P. Morgan y otros financieros para costear, entre otras obras, la construcción en Nueva York de una fábrica de bombillas, la *Edison Electric Light Company* y de una central eléctrica, la *Pearl Street Station* en Manhattan en 1882. Fue la primera instalación para la producción de energía

²³ En este caso la corriente invierte periódicamente su sentido, repitiéndose 50 o 60 veces por segundo.



| Thomas Alva Edison |

eléctrica a nivel comercial desde la que se abastecía un pequeño barrio de la ciudad de tan solo unos 3 km². En los años siguientes Edison extendió sus instalaciones a otras ciudades del país obteniendo un gran beneficio económico durante algún tiempo. Reunió sus intereses comerciales bajo una única gran corporación que se denominó *Edison General Electric Company*, más

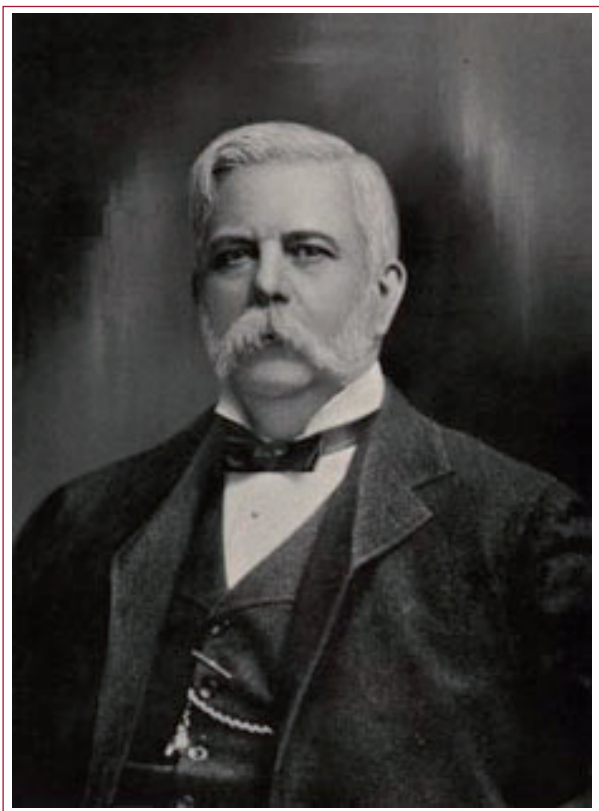
tarde *General Electric*. Sin embargo la tecnología de Edison de generación y distribución de corriente continua no le permitía llevar la energía eléctrica muy lejos de la central. Las pérdidas por calor en los tendidos eléctricos eran muy considerables y tenía que construir las centrales eléctricas en las proximidades de las zonas de consumo pues en las zonas alejadas el brillo de las lámparas resultaba muy pobre.

Mientras Edison iba ampliando sus empresas, se estaba desarrollando otra tecnología, la de la corriente alterna. Su ventaja fundamental era la posibilidad de poder transportar la energía eléctrica a grandes distancias con muy pocas pérdidas gracias al desarrollo de los transformadores que permitían elevar y reducir el voltaje de la línea a voluntad, lo que no era posible en corriente continua. En 1885 Westinghouse importó de Francia e Inglaterra una serie de transformadores usados y un alternador Siemens alemán y en 1886 instaló la primera central eléctrica de AC en el estado de Massachusetts. Era un generador hidroeléctrico que suministraba 500 voltios que elevaba a 3000 mediante un transformador para reducir después a 100 voltios, más adaptado para el

consumo. Ese mismo año fundó la compañía *Westinghouse Electric & Manufacturing Company* que después hemos conocido con el nombre de *Westinghouse Electric Corporation*.

El negocio de Edison basado en la corriente continua empezaba a tambalearse frente a la opción de Westinghouse por lo que aquel inició una campaña de desprestigio hacia la corriente alterna. Edison estaba convencido de la peligrosidad de esta última y trataba de demostrarlo a la prensa y al público en general. Para ello difundió dudosa información acerca de accidentes con corriente alterna y se sacrificaron gatos, perros callejeros, caballos e incluso vacas, resaltando los riesgos de la iniciativa de Westinghouse. Incluso se acuñó el término *westinghoused* para referirse a “electrocutado por AC”. Hasta una vieja elefanta de circo llamada *Topsy* fue electrocutada haciéndole pisar dos electrodos alimentados a 6000 voltios de AC después de suministrarle además una dosis de cianuro de potasio. La muerte del animal, grabada y difundida después por Edison en todo el país, tuvo lugar en casi un minuto ante un público de varios cientos de personas. Incluso la pena capital por electrocución en la silla

eléctrica fue objeto de discusión en el contexto de la “Guerra de las Corrientes”. Se encargó a un electricista de Nueva York llamado Harold Brown la construcción de una silla preparada para ejecuciones eléctricas. La Corte del Estado de Nueva York condenó a William Kemmler a la pena de muerte aplicándole corriente alterna y Edison dijo: “Es una buena idea, será todo tan rápido que el reo no sufrirá”. Westinghouse se opuso enérgicamente a aquella ejecución pero el 6 de agosto de 1890 Kemmler fue llevado a la silla eléctrica en la prisión de Auburn, en el estado de Nueva York. Fue un acto enormemente cruel, la agonía fue larguísima. Después de unos segundos, creyendo que todo había concluido, desconectaron la corriente pero tuvieron que volver a aplicarla durante varios minutos más, hasta que finalmente el Dr. Edward Spitzka certificó la defunción y dijo “nunca más habrá otra ejecución por corriente eléctrica”.



| George Westinghouse |

El impacto de estos hechos fue enorme en la sociedad estadounidense, pero el final de la

“Guerra de las Corrientes” nada tuvo que ver con ello sino que se precipitó como consecuencia de una inundación que destruyó en 1890 la central eléctrica de Willamette, en el estado de Oregon. Esa importante instalación alimentaba la primera línea de transmisión de electricidad en corriente continua. El desgraciado accidente abrió a Westinghouse la posibilidad de establecer la primera línea de transporte eléctrico en corriente alterna a media distancia en Estados Unidos.²⁴ Para ello solo tuvo que conseguir los permisos para emplazar allí sus alternadores. Inmediatamente lo hizo y poco después recibió informe favorable para la instalación de una nueva central eléctrica de AC en las cataratas del Niágara. En la Exposición Universal de Chicago de 1893 se presentó con gran éxito un completo sistema trifásico desarrollado por Westinghouse y por fin, en 1896, llegó a la ciudad de Búfalo (a 35 km) la energía eléctrica proveniente de las cataratas del Niágara, cuyos alternadores construyó Westinghouse

²⁴ Sin embargo, la primera transmisión a larga distancia en el mundo tuvo lugar en Lauffen am Neckar, Alemania en el año 1891. La distancia era 175 km y la potencia 200 kVA en montaje trifásico.

gracias a las patentes del físico e ingeniero serbio Nikola Tesla (1856-1943).

Junto a las crecientes necesidades de iluminación pública también aumentó la demanda de energía eléctrica para las viviendas particulares y sobre todo para la industria. La construcción de motores eléctricos cada vez más eficientes permitió aumentar la productividad de muchas empresas que hasta esos años se abastecían de fuerza motriz mediante máquinas de vapor.

Los primeros motores eléctricos eran muy poco prácticos y como ejemplo baste aludir el motor homopolar de Faraday ya explicado anteriormente. Hubo que esperar hasta 1834, fecha en que el ingeniero y físico alemán Moritz von Jacobi (1801-1874) construyó un motor eléctrico basado en el principio de fuerzas de atracción y repulsión entre electroimanes con alimentación de corriente continua en conmutación. El propio motor, a través de una serie de engranajes y palancas, actuaba sobre los conmutadores por lo que había que impulsarlo inicialmente para comenzar su funcionamiento. Ese motor alcanzaba ya una potencia de unos 15 W por lo que se considera a Jacobi

como el padre del motor eléctrico. Más tarde, en 1838, Jacobi desarrolló un motor de 300 W alimentado por baterías con el que un barco de ocho metros de eslora navegaba lentamente con ruedas de palas por el río Neva, en San Petersburgo. Al otro lado del Atlántico y en las mismas fechas, el inventor estadounidense Thomas Davenport (1802-1851) construyó el primer motor eléctrico americano. Estaba alimentado por baterías y diseñado con el propósito de construir un vehículo eléctrico. Pero las ideas de Jacobi no condujeron a los motores eléctricos que conocemos en la actualidad sino que se desarrollaron a partir de máquinas generadoras de corriente continua, o dínamos, trabajando en operación inversa, como motores, de acuerdo con las ideas de Lenz. Para ello hubo que perfeccionar el colector de delgas y los sistemas de contactos deslizantes o escobillas. Hoy seguimos usando motores de ese tipo para bajas potencias en corriente continua.

Las dificultades inherentes al funcionamiento del colector, sobre todo para potencias elevadas, se pudieron resolver en corriente alterna gracias a los motores de inducción. Están basados en la disposición de dos o más bobinados

alimentados adecuadamente para obtener un campo magnético rotatorio. Se pueden construir con corriente alterna monofásica y circuitos desfasadores, como nuestros pequeños motores domésticos, aunque resultan mucho más convenientes los realizados con base en una red bifásica o trifásica. Las ideas fundamentales de esta nueva tecnología de campo magnético rotatorio se deben al físico e ingeniero italiano Galileo Ferraris (1847-1897) y sobre todo a Nikola Tesla. Consiste en disponer un rotor conductor de forma que las corrientes inducidas en él experimenten una fuerza debida al campo magnético giratorio del estator. En definitiva, aparece un par motor que tiende a llevar el rotor a la velocidad de giro del campo. La conveniencia de usar sistemas completos trifásicos es evidente, en ellos se optimiza tanto la generación de energía eléctrica como su transporte y además se consiguen motores de inducción de potencias más elevadas.

Las aportaciones científicas y tecnológicas de Tesla fueron extraordinarias. Emigró a Estados Unidos desde su Serbia natal en 1884 y se afincó en Nueva York donde instaló una pequeña empresa de desarrollo de tecnologías

eléctricas. Tesla desconocía que el italiano Ferraris había construido un pequeño motor bifásico de inducción y lo reinventó poco después. Y siguió trabajando en sus múltiples proyectos hasta que en 1887 presentó sus primeras patentes, entre ellas un conjunto trifásico compuesto por generador, sistema de transmisión y motor. George Westinghouse se dio cuenta de la valía de Tesla y le compró más de cuarenta patentes por un millón de dólares y además lo contrató como consultor para su compañía. Tesla, inicialmente partidario de los sistemas monofásicos, pronto se dio cuenta de la ventaja que representa la tecnología trifásica que impulsaría decididamente de la mano de Westinghouse. Estos se corresponden exactamente con los sistemas de que disponemos actualmente en todo el mundo donde la única diferencia es la frecuencia de operación, 50 o 60 Hz según el país. Las aportaciones de Tesla no se quedan simplemente en la tecnología eléctrica pues sus contribuciones en el mundo de las telecomunicaciones también fueron importantes. En su honor la unidad de campo magnético recibe el nombre de Tesla.

En lo relativo a la formulación matemática de la ingeniería eléctrica, incluyendo las ecuaciones circuitales, la histéresis ferromagnética, el análisis de rendimiento y pérdidas en transformadores y la implantación de la notación compleja, hay que citar al ingeniero e inventor alemán Charles Proteus Steinmetz (1865-1923), cuyo trabajo se desarrolló básicamente en la *General Electric* que fundara Edison. También fue un técnico muy experto y se cuenta una curiosa anécdota que tuvo lugar cuando fue llamado a resolver un problema en un generador de una de las fábricas de Henry Ford. Dos días enteros pasó Steinmetz estudiando el problema y haciendo cálculos y cuando acabó marcó con tiza una señal en la carcasa de la máquina y dijo: “Hay que eliminar dieciséis espiras a partir de la marca”. Lo hicieron y el generador funcionó perfectamente y la empresa recibió una factura sin detallar por un importe de 10 000 dólares. Le solicitaron un desglose y Steinmetz rehízo la factura escribiendo: “Hacer una marca de tiza, 1 dólar. Saber dónde hacer la marca, 9999 dólares. Total a pagar, 10 000 dólares”.



| Einstein, Tesla y Steinmetz |

En la fotografía realizada en 1921 durante una visita a la *Marconi Wireless Station* en New Jersey, podemos ver en el centro con traje blanco a Steinmetz, al lado de Einstein y en segunda fila, entre ellos, a Tesla.

Mientras todo esto ocurría a un lado y otro del Atlántico y el mundo se iba electrificando, España, gracias a una serie de emprendedores en diferentes ciudades, consiguió sumarse tímidamente a esta línea de progreso. Las dos primeras centrales eléctricas de España, o fábricas de la luz como se llamaron entonces, se

instalaron en Barcelona en 1875 y en Madrid en 1878, aunque su producción estaba destinada básicamente al alumbrado de locales comerciales del entorno de la central. Un rudimentario alumbrado público llegó a Madrid en 1881 y a Barcelona en 1882, pero hasta cien años después la electricidad no llegó a la localidad asturiana de Sotres. Por el contrario, en 1890 la ciudad riojana de Haro fue la primera en disponer de un alumbrado público eléctrico generalizado en las 62 calles del casco urbano.²⁵

En cuanto a Salamanca decir que hubo algunos proyectos que no cuajaron hasta septiembre de 1884 cuando se instaló media docena de focos eléctricos en el parque de la Alamedilla, durante las Ferias y Fiestas de aquel año. Pero la electrificación vino a Salamanca de la mano del emprendedor y empresario madrileño Carlos Luna Beovide (1852-1916)²⁶

²⁵ La filoxera arrasó las viñas de Burdeos y muchos bodegueros franceses venían a comprar a La Rioja estimulando su economía, por lo que se dice que a Haro la electricidad le vino con el vino. Y se hicieron famosos los dichos “Ya estamos en Haro, que se ven las luces” o “Haro, París y Londres”.

²⁶ Se casó en 1887 con Inés Terrero Salcedo y se instaló en Salamanca. La fundación, con el nombre de su única hija Inés

que en 1888 creó la sociedad “La Electricista Salmantina” con el objeto de la instalación y explotación del alumbrado eléctrico por arco e incandescencia. En los primeros meses de 1889 construyó las acometidas desde la pequeña central eléctrica del Campo de San Francisco hasta la Plaza Mayor. Se trataba de corriente continua generada con dínamos compradas en Francia y accionadas por vapor. Por fin, el 19 de marzo de 1889 Salamanca ya disponía de un pequeño alumbrado público eléctrico. En 1896 se crea otra empresa eléctrica, “La Unión Salmantina”, cuyas instalaciones estaban en el actual Museo de Automoción, y la rivalidad entre ambas se hace patente. La “Guerra de las Corrientes” también llega a nuestra ciudad y en 1905 con el decidido apoyo de “La Unión Salmantina” el suministro ya se hace en corriente alterna, lo que permite llegar a toda la ciudad tanto en alumbrado público como en suministro para otros menesteres.

Poco a poco, en todo el país se fueron instalando centrales eléctricas, primero de vapor y

Luna Terrero, tiene como objeto el “cumplimiento de fines culturales, benéficos y sociales”.

después hidroeléctricas, que abastecían pequeñas regiones de forma que a finales del primer tercio del siglo XX se podía considerar que una gran parte del territorio español disponía de energía eléctrica suficiente para satisfacer unas necesidades moderadas en alumbrado público, transporte y usos domésticos e industriales. Varios cientos de pequeñas y medianas empresas dedicadas a la explotación del negocio eléctrico se fueron poco a poco fusionando en grandes operadoras. Salamanca fue así una de las primeras ciudades españolas en disponer de alumbrado eléctrico, aunque habría que esperar más de un siglo para conseguir un ferrocarril de vía única electrificada en la línea Salamanca-Medina del Campo.

Actualmente el sector eléctrico, tanto en generación como en transporte de energía eléctrica, sigue funcionando bajo el mismo esquema que acabamos de resumir. Se han mejorado muchos aspectos como son rendimiento, seguridad y fiabilidad, y solo merece la pena destacar algunos puntos particulares. Por ejemplo, las nuevas conexiones internacionales y las conexiones submarinas con territorios insulares que se proyectan últimamente en corriente

continua, tanto por su simplicidad como por la posibilidad de disponer de electrónica de potencia de alto rendimiento para hacer la doble conversión AC-DC-AC. Y también destacar las fuentes de energías renovables y entre ellas la fotovoltaica, por el creciente rendimiento que alcanzan las placas solares que ha superado ampliamente el 20% y está cerca de alcanzar el 40% con las tecnologías más modernas,²⁷ y la eólica que desde el desarrollo de los nuevos imanes de tierras raras ha experimentado un gran auge. Y por fin la posibilidad de almacenamiento de energía eléctrica, que hasta hace poco era algo simbólico y hoy puede considerarse una opción viable con las nuevas baterías de iones de litio de alta capacidad y precio competitivo (10 kWh, 3000 €). Si esta propuesta se abre camino en el sector eléctrico podría representar un duro golpe para el sistema conven-

²⁷ La potencia de radiación solar en capas altas de la atmósfera es de 1353 W/m². A nivel del suelo es muy variable pues depende del día, la hora y la climatología. En España la energía recibida está entre 3 y 5.5 kWh/m²día. Si nuestro consumo eléctrico nacional es aproximadamente 265 TWh/año se podría satisfacer con unos quince metros cuadrados de panel fotovoltaico por persona, junto con la electrónica correspondiente y las ineludibles baterías de almacenamiento.

cional de redes eléctricas pues ya no habría que transportar energía a largas distancias sino que se generaría a partir de fuentes sostenibles y se almacenaría y consumiría in situ. Sin embargo esto solo parece factible en el ámbito del consumo familiar y de los pequeños negocios pues las necesidades de energía de la industria son muy elevadas y no sería posible prescindir del aporte de la red eléctrica. En cualquier caso, ni siquiera para los pequeños consumidores resultaría sencillo garantizar completamente una producción suficiente, por lo que su conexión a la red eléctrica sería poco menos que imprescindible.²⁸ Es ahí donde está la clave de esta incipiente tecnología pues si se imponen peajes excesivos a los usuarios que, aun generando la energía que consumen se conecten a la red eléctrica, se desincentivará completamente su desarrollo.

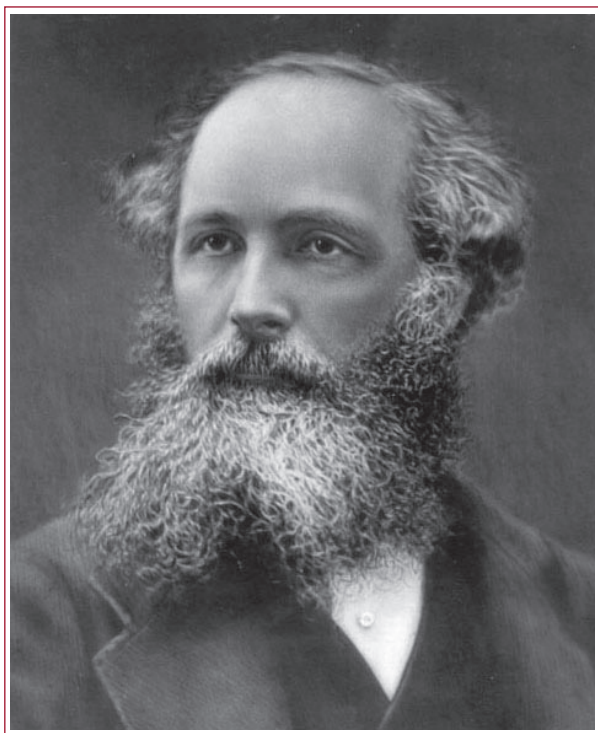
²⁸ Además, durante la noche, cuando el precio de la energía cae notablemente, se podrían abastecer recargando sus baterías.

JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879) nació en la ciudad escocesa de Edimburgo en el seno de una familia muy acomodada. Su apellido debería ser simplemente Clerk pero cuando su familia heredó una importante hacienda de los Maxwell, de Middlebie, con la que había emparentado gracias al matrimonio de su bisabuelo Sir George Clerk con una prima hermana, ese apellido se añadió al suyo.²⁹

Su madre murió cuando Maxwell tenía nueve años por lo que su formación académica estuvo enteramente a cargo de su padre, John Clerk Maxwell, jurista de formación pero muy interesado en la ciencia y en la tecnología. A la edad de once años y tras una formación primaria en la residencia familiar de Glenlair con un exigente preceptor, fue a estudiar a la Academia de Edimburgo. Con catorce años realizó su primer trabajo científico. Versaba sobre la construcción de curvas, pero no lo pudo presentar personalmente pues se le consideró demasiado joven para ello. En su nombre, ante

²⁹ James Clerk Maxwell of Glenlair y John Clerk Maxwell of Middlebie, su padre.

la Real Sociedad de Edimburgo, lo expuso su profesor y mentor James Forbes.



| James Clerk Maxwell |

En 1847 ingresó en la universidad de Edimburgo. A Maxwell no le pareció especialmente

exigente el curso universitario y tuvo tiempo libre para trabajar por su cuenta en Glenlair donde realizó algunos experimentos de electricidad, magnetismo, química y óptica, mostrando especial interés en el estudio de la refracción de la luz polarizada en un prisma sometido a presión. Además desarrolló nuevos trabajos en el campo de la geometría. Su afición por la poesía, que ya tenía desde pequeño, creció en esta etapa de su vida y algunos trabajos y problemas de física los escribía en verso.

Transcurridos tres años en la universidad de Edimburgo fue admitido en la de Cambridge ingresando en el *Trinity College*. A la finalización de sus estudios en 1854 obtuvo muy brillantes resultados logrando la segunda mejor calificación de su curso (*Second Wrangler*).³⁰ Más adelante, en 1859, ganó el premio Adams³¹ con un trabajo sobre los anillos de Saturno demostrando que necesariamente tenían que estar formados por una acumulación de masas dispersas, lo que fue comprobado experimentalmente en 1895.

³⁰ Llegar a *Senior Wrangler* era casi una distinción nacional.

³¹ En honor al astrónomo inglés John Couch Adams (1819-1892).

Al terminar sus estudios en Cambridge obtuvo una plaza de profesor en el *Marischal College* de la ciudad escocesa de Aberdeen y en 1860 obtuvo una cátedra en el *King's College* de Londres donde desarrolló su etapa científica más fértil. Maxwell asistía con frecuencia a las conferencias de la *Royal Institution* lo que le permitió conocer personalmente a Michael Faraday y establecer con él una estrecha relación científica. En 1861 fue elegido miembro de la *Royal Society* y en 1865 renunció a su puesto en el *King's College* para volver a su residencia de Glenlair donde escribió su obra *A treatise on electricity and magnetism* y continuó trabajando hasta 1871.

En esa fecha la Universidad de Cambridge decidió crear una sección de Física Experimental y llamó a Maxwell para encargarle la correspondiente cátedra y la supervisión de la construcción y dotación del nuevo edificio de lo que sería el *Cavendish Laboratory* cuya financiación corrió a cargo de William Cavendish, canciller de la universidad y descendiente de Henry Cavendish. A la edad de 48 años Maxwell murió en Cambridge como consecuencia de un cáncer de estómago.

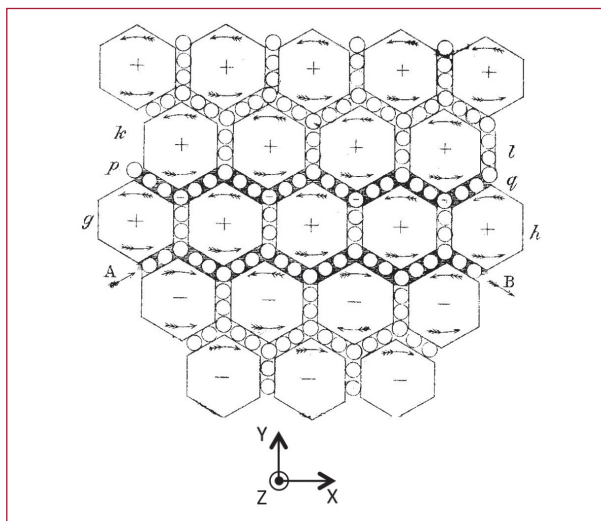
Las aportaciones de Maxwell a la ciencia fueron muy numerosas y destacan sus trabajos en física molecular, física estadística, óptica, teoría del color, mecánica de sólidos, viscosidad, teoría de la elasticidad, conductividad térmica y electromagnetismo. Mostró la naturaleza estadística de la segunda ley de la termodinámica, es el fundador de la teoría cinética de los gases, produjo la primera fotografía en color, fue pionero en el cálculo de tensiones en estructuras mecánicas, a partir del estudio de la viscoelasticidad introdujo un concepto tan fructífero en física como es el de tiempo de relajación y desarrolló la noción de rotacional como magnitud derivada de un campo vectorial.

Centrándonos en la aportación más importante de Maxwell, es decir en lo correspondiente a la teoría del campo electromagnético, sus trabajos comienzan tras su graduación en Cambridge. Aunque su formación inicial en Edimburgo corrió a cargo del profesor Forbes, al graduarse prefirió pedir consejo al profesor William Thomson (Belfast, 1824-1907, primer Barón de Kelvin, más tarde Lord Kelvin) sobre qué línea de investigación seguir. Le escribió haciéndole esa consulta y mostrando su interés por trabajar en electricidad y magnetismo.

Maxwell comenzó leyendo los trabajos de Faraday, Thomson, Ampère, Kirchhoff, Neumann y Weber de forma que en poco tiempo se empapó de los conceptos de campo y línea de fuerza de Faraday. Maxwell estaba muy al corriente de los experimentos de electricidad y magnetismo realizados anteriormente y conocía muy bien los resultados. Pero su idea era tratar de dar a todo aquello una formulación más consistente dentro de un esquema matemático potente. Maxwell encontraba difícil la idea de tratar el problema con fuerzas no instantáneas, fuerzas que dependen no solo de las coordenadas sino también de la velocidad y aceleración de las cargas, pero se propuso desarrollar las ideas de Faraday dentro de una teoría matemática del electromagnetismo.

Para abordar su tarea se apoyó en el método de las analogías, en la línea de lo que ya había hecho Thomson con la semejanza entre calor y electricidad, y en tanto que es una analogía matemática formal se consideró libre para incluir en ella todas las propiedades necesarias para su modelo, cuyos resultados sabía en buena medida. Comenzó por perfeccionar la teoría de Faraday de línea de fuerza incluyendo el concepto de tubo de fuerza, finos tubos de sec-

ción variable que transportan un fluido incompresible. Así, la densidad de líneas nos informa de la intensidad del campo mientras que en el concepto de Faraday solamente hay información de dirección y sentido. A continuación visualizó las cargas como fuentes y sumideros de ese fluido e incorporó la presencia de los materiales. Su comportamiento lo relacionaba con el flujo de ese fluido a través del material ejerciendo una fuerza proporcional a su velocidad. De acuerdo con la resistencia que presentara, el flujo pasaría por dentro de él o lo rodearía desviando las líneas de fuerza como ocurre con conductores y dieléctricos respectivamente, y análogamente con las líneas del campo magnético. En fin, Maxwell construyó un modelo al que incorporó muchos de los conceptos de la dinámica de fluidos y se sirvió de todo ello para reescribir el electromagnetismo como una teoría matemática rigurosa. Y sobre todo hacer su gran aportación: la introducción de una nueva fuente, la corriente de desplazamiento. Toda su labor en este tema la expuso en una serie de tres artículos entre los años 1856 y 1865: *On Faraday's Lines of Force*, *On Physical Lines of Force* y *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*.



| Modelo de vórtices de Maxwell |

Sería enormemente extenso explicar el trabajo de Maxwell por lo que nos limitaremos aquí a hacer énfasis en algunas de las consideraciones más importantes de su pensamiento. Maxwell estaba convencido de la existencia de una velocidad finita de propagación pues entendía que cada partícula de éter solo podía interactuar con otras próximas y así sucesivamente. Si el éter es un medio elástico con masa, la velocidad de propagación ha de ser necesari-

riamente finita. Y si conocía el valor de la velocidad finita de la luz, como era efectivamente, ¿no sería la luz una propagación electromagnética a través del éter? Maxwell tenía que encontrar un modelo que diera cuenta de las propiedades del éter y se sirvió de la idea de Thomson que establecía la necesidad de un flujo turbulento de corriente alrededor de las líneas de fuerza del campo magnético \mathbf{H} . Pero ¿cómo relacionar una distribución de vórtices de corriente con el campo magnético en un caso general? Para dar respuesta a esta pregunta y desarrollar su modelo análogo construyó una representación de sus ideas mediante un conjunto de “vórtices moleculares” constituidos por hexágonos y partículas esféricas como se muestra en la figura. Los hexágonos representan pequeñas regiones con campo magnético perpendicular al dibujo hacia afuera o hacia adentro según el signo $+$ o $-$ respectivamente y están formados por vórtices de corriente en superficie en la dirección que indican las flechas. Las esferas cargadas pueden simplemente rotar entre vórtices o rotar y desplazarse simultáneamente según el caso. Si la zona que analizamos corresponde a un campo magnético uniforme todos los vórtices giran en la misma dirección con igual velocidad. La

fricción que tendría lugar entre dos hexágonos adyacentes se evita con ese conjunto de partículas que Maxwell incluyó. Estas hacen el papel de piñón loco, como en un engranaje mecánico, de forma que no se desplazarían y simplemente estarían rotando. Si dos vórtices contiguos no giran con la misma velocidad las bolas cargadas se desplazarán a la vez que rotan. Por ejemplo, si los vórtices son paralelos al eje OZ y la velocidad de rotación, es decir H_z , crece en la dirección OY, la corriente de partículas cargadas tendrá lugar en la dirección OX con una intensidad proporcional a $\partial H_z / \partial y$, en la figura entrando por A y saliendo por B. Es decir, en general la deriva lateral de las cargas está dada por $\nabla \times \mathbf{H}$,³² que es la corriente eléctrica. Además, como consecuencia de la acción tangencial del flujo de esferas sobre los hexágonos aparece un par de giro sobre ellos que se corresponde con la variación temporal del momento angular, al fin y al cabo proporcional a \mathbf{H} , y Maxwell lo interpretó como una fuerza electromotriz, $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial(\mu\mathbf{H})/\partial t$.³³

³² Se trata de una operación de derivación llamada rotacional.

³³ Maxwell no escribió la ecuación (ley de inducción de Faraday) de esta forma sino que utilizó los potenciales escalar φ y vector \mathbf{A} .

Y por último, la parte más interesante del trabajo, cuando Maxwell se dio cuenta de que admitiendo cierto comportamiento elástico en el sistema de vórtices podría encontrar la conexión entre las ecuaciones del caso estacionario y la electrodinámica. Admitió que la acción tangencial de las partículas sobre los hexágonos originaba una deformación elástica que haría que las partículas en contacto con ellos sufrieran un desplazamiento. Este habría de ser proporcional al campo eléctrico a través de un coeficiente relacionado con las constantes elásticas y la geometría del sistema. Llamando \mathbf{D} al valor medio de este desplazamiento, escribió $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ y de acuerdo con el principio de conservación de la carga y la ley de Gauss concluyó $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t$.³⁴ Es decir, una variación temporal en la corriente, un cambio de velocidad

³⁴ Maxwell añadió: *In a dielectric under the action of electromotive force, we may conceive that the electricity in each molecule is so displaced that one side is rendered positively and the other negatively electrical, but that the electricity remains entirely connected with the molecule, and does not pass from one molecule to another. The effect of this action on the whole dielectric mass is to produce a general displacement of electricity in a certain direction. This displacement does not amount to a current, because when it has attained to a certain value it remains constant, but it is the commencement of a current, and its variations constitute currents in the positive or*

del flujo de partículas, exige una variación en la velocidad de los vórtices adyacentes de forma que el cambio experimentado por su momento angular queda inicialmente absorbido por una deformación elástica que ralentiza la velocidad de las partículas más rápidas. Este comportamiento se extiende sucesivamente a otros vórtices contiguos y luego más lejanos dando lugar a una onda de desplazamiento de partículas y de campo magnético.

Por fin Maxwell calculó la velocidad de propagación de esa onda electromagnética que resultó ser solo dependiente de las constantes k_e y k_m que aparecen en las leyes de fuerzas de Coulomb y Ampère.³⁵ Se escribe como

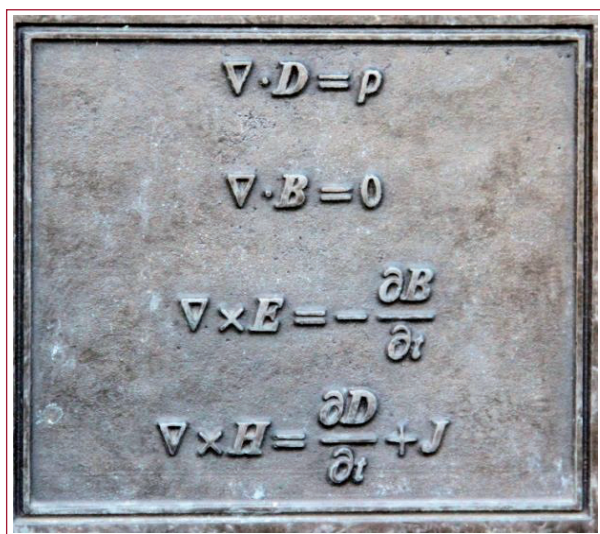
$$c = \sqrt{\frac{k_e}{k_m}}$$

y su valor es el de la velocidad de la luz. Al llegar a este resultado concluyó que la luz debe ser una perturbación electromagnética que se propaga de acuerdo con las leyes del electromag-

the negative direction according as the displacement is increasing or decreasing.

³⁵ O si se prefiere de ϵ y μ .

netismo, por lo que Maxwell no solo proporcionó una teoría matemática a los fenómenos electromagnéticos conocidos sino que también desarrolló la teoría electromagnética de la luz. Es de señalar que Maxwell se mantuvo firmemente convencido de la existencia real del éter, como tantos físicos del siglo XIX que entendían que el objetivo fundamental era encontrar sus propiedades físicas y matemáticas considerando que o existía el éter o el edificio de la Física se derrumbaría.



| Ecuaciones de Maxwell |

En suma, la teoría del campo electromagnético, primera teoría de unificación de la Física, se sintetiza en las ecuaciones de Maxwell que forman un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales lineales que relacionan campos, cargas y corrientes condensando todo el conocimiento obtenido a partir de las leyes experimentales, además de su magistral y novedosa aportación de la corriente de desplazamiento. Si les añadimos la ecuación de la fuerza de Lorentz obtenemos nada menos que toda una síntesis de la Física Clásica.³⁶

Sin embargo Maxwell no formuló sus ecuaciones en la forma que hoy conocemos pues el cálculo diferencial no estaba suficientemente desarrollado sino que las escribió componente a componente, utilizando los potenciales escalar y vector, en un conjunto de veinte ecuaciones que para un físico de hoy resulta difícil comprender. Pasaron 23 largos años hasta que fueron aceptadas y utilizadas por los físicos, y no solo por su dificultad matemática sino también por el rechazo frontal que obtuvo la corriente

³⁶ La fuerza de Lorentz se escribirá como la derivada temporal del momento lineal relativista y si es necesario se considerará también la fuerza gravitacional.

de desplazamiento de Maxwell. Quizá podrían admitir los físicos de la época esa contribución en un dieléctrico pero resultaba imposible hacerlo pensando en el vacío. Hubo que esperar a encontrar una formulación más comprensible y sobre todo a la comprobación experimental de la generación de ondas electromagnéticas y su propagación con la velocidad de la luz. La primera parte se la debemos a un grupo de entusiastas físicos británicos, *The Maxwellians*, encabezado por Oliver Heaviside (1850-1925), Oliver Lodge (1851-1940) y George FitzGerald (1851-1901) y la segunda parte al físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) en 1888.

Heaviside, aficionado al ciclismo como FitzGerald, trabajó de telegrafista en la línea Inglaterra-Dinamarca y comenzó su labor científica en 1873, en cuanto conoció el libro de Maxwell. Su primera tarea fue escribir la ecuación de propagación de las señales eléctricas en una línea de transmisión a partir de las ecuaciones de Maxwell, es decir, la ecuación del telegrafista, una ecuación de ondas.³⁷ Mostró cómo las se-

³⁷ Para ello mejoró la teoría de Thomson y además de considerar capacidad y resistencia del cableado introdujo la resistencia de pérdidas y la autoinducción, resaltando la importancia de

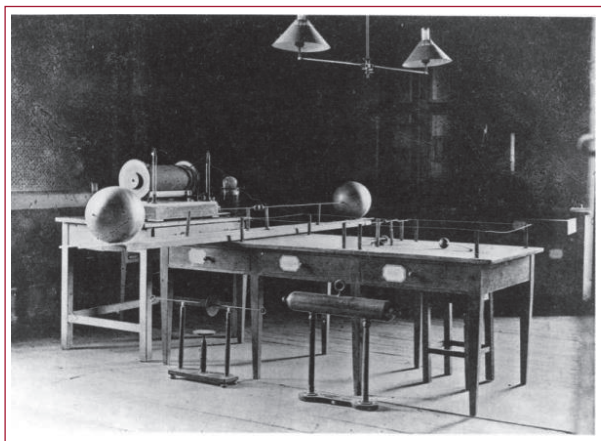
ñales no se difunden sin más a lo largo del cable sino que se propagan como ondas incidente y reflejada, lo que demostró experimentalmente Oliver Lodge en 1888 mediante la descarga de un condensador sobre una línea de transmisión. Más tarde estudió el flujo de energía del campo electromagnético, algo muy complejo pero con un resultado extremadamente sencillo, $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$,³⁸ que muestra que la energía viaja con los campos, también a velocidad finita. Y por fin, tras un arduo trabajo encontró una forma alternativa de expresar la teoría de Maxwell, con solamente cuatro ecuaciones que algunas veces se citan como ecuaciones de Maxwell-Heaviside y que constituyen simplemente la forma habitual en que las escribimos.

El físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894), que estudiaba en la Universidad de Berlín las oscilaciones eléctricas sin obtener resultados especialmente relevantes, encargó a su alumno Hertz que siguiera con su trabajo

esta última en la llamada condición de Heaviside o de *pupinización*, lo que revolucionó el negocio telegráfico.

³⁸ Resultado al que llegó muy poco después que el físico inglés John Henry Poynting, alumno de Maxwell en el *Cavendish Laboratory* de Cambridge.

analizando la validez de la teoría de Maxwell. Hertz se tomó la tarea con gran entusiasmo y realizó un amplio conjunto de experiencias con las que demostró que podía generar ondas electromagnéticas a partir de la descarga de un condensador mediante circuitos resonantes LC y que esas ondas tenían las mismas propiedades que la luz, algunos de cuyos resultados ya habían sido observados por Lodge en líneas de transmisión pero no en el “aire”. Ajustando la longitud del sistema resonante pudo variar la frecuencia de operación, calculó la velocidad de propagación y estudió la reflexión, refracción, difracción y polarización de las ondas generadas con su dispositivo. Presentó sus resultados en 1888 haciendo sombra a los de Lodge y a partir de ese momento las ecuaciones de Maxwell fueron admitidas sin discusión alguna. Desafortunadamente Maxwell no pudo ver este gran triunfo de su teoría pues había fallecido nueve años antes.

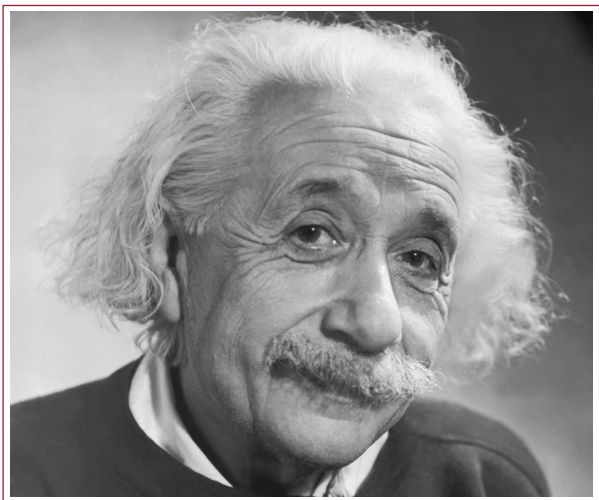


| Laboratorio de Hertz |

La última confirmación a la teoría de Maxwell del campo electromagnético no tardó en llegar. Sabemos que las leyes de la mecánica son invariantes bajo una transformación galileana, satisfacen el principio de relatividad de Galileo. ¿Pero lo satisfacen también las leyes del electromagnetismo? Evidentemente no, la forma de la ecuación de ondas no se conserva frente a esa transformación por lo que la velocidad de la luz sería distinta en diferentes sistemas de referencia. Así, si aceptamos la validez de las ecuaciones de Maxwell y de la cinemática se si-

gue que existe un único sistema de referencia privilegiado, el éter, en el que las ondas electromagnéticas se propagan con la velocidad de la luz. Puesto que la relatividad galileana se aplica a las leyes de la mecánica pero no a las del electromagnetismo se debe elegir una entre las siguientes tres alternativas: a) Existe un principio de relatividad para la mecánica pero no para el electromagnetismo, y por lo tanto hay un referencial privilegiado para el electromagnetismo; b) Existe un principio de relatividad para ambas teorías, mecánica y electromagnetismo, pero el electromagnetismo de Maxwell no es correcto; y c) Existe un principio de relatividad para ambas teorías, mecánica y electromagnetismo, pero las leyes de la mecánica en la forma desarrollada por Newton necesitan modificarse. La elección entre estas alternativas tiene que justificarse necesariamente a través de medidas experimentales, entre ellas la más importante la de Michelson y Morley de 1887.³⁹ Todas esas experiencias condujeron a la tercera opción y eso exigía abandonar la relatividad de Galileo y el concep-

³⁹ Experiencia interferométrica que demostró la ausencia de referencial absoluto.



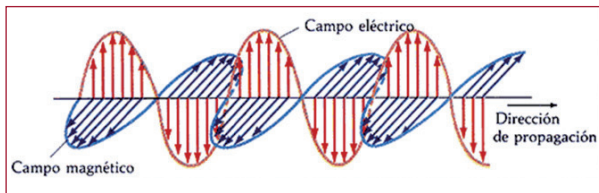
| Albert Einstein |

to de éter y encontrar una nueva transformación de coordenadas, lo que fue realizado por el físico alemán y premio Nobel Albert Einstein (1879-1955) que en 1905 publicó su teoría de la Relatividad Especial. En 1915, Einstein formuló la teoría de la Relatividad General mostrando cómo el conocimiento de la gravitación es esencial para entender con toda profundidad el electromagnetismo de Maxwell especialmente en lo relativo al campo de la astrofísica.

BIEN, YA TENEMOS las ecuaciones y ahora alguien podría preguntarse ¿cuál es la solución? No, esa pregunta no tiene sentido, debemos preguntarnos por la solución de un problema concreto, por cualquier problema de electromagnetismo y esas ecuaciones nos darán la solución siempre y cuando sepamos resolverlas. Podemos estudiar la descarga eléctrica de un rayo, el azul del cielo o las auroras boreales y también las telecomunicaciones, la resonancia magnética, la luz láser o los rayos x y tantas y tantas cosas que obedecen a la misma teoría.

La solución más elemental para un problema de propagación electromagnética corresponde a una onda plana pues cualquier otro problema de propagación se puede entender como la superposición de varios de estos casos simples. La diferencia fundamental será la frecuencia con la que los campos oscilan lo que nos lleva directamente al concepto de espectro electromagnético, que es una clasificación or-

denada en bandas de frecuencia del conjunto de las radiaciones electromagnéticas, desde frecuencia nula hasta 10^{20} Hz. Yendo de baja a alta frecuencia encontramos los circuitos de corriente continua, la red eléctrica industrial, los sistemas de inducción (como la cocina de inducción), la radio (con modulación de amplitud en onda larga, media, corta y modulación de frecuencia), la resonancia magnética, la televisión, la telefonía móvil, el bluetooth, el wifi, los microondas, el radar, las comunicaciones vía satélite, la radioastronomía, el GPS, la navegación espacial, la región del terahertzio, la del infrarrojo, la luz láser, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.



| Onda electromagnética plana |

Ahora sí parece impresionante el legado de Maxwell y aún más teniendo en cuenta que

hasta mucho tiempo después poco se supo de la estructura de la materia. Fue el físico inglés Joseph John Thomson (1856-1940) quien descubrió el electrón, la fuente del campo electromagnético, en sus trabajos sobre descargas en gases enrarecidos entre 1897 y 1899 en el *Cavendish Laboratory*, hallazgo por el que obtuvo el premio Nobel en 1906.

Y tenemos que añadir a todo ello el extraordinario impulso que la teoría formulada por Maxwell ha dado al desarrollo de la práctica totalidad de las áreas de la ciencia y la tecnología, como por ejemplo la electrónica de alta frecuencia, las comunicaciones por internet, los nuevos materiales, la nanotecnología, la biotecnología, la biofísica, la física médica, la física del plasma, la investigación espacial, la astrofísica y tantos campos interdisciplinarios donde el electromagnetismo juega un papel esencial. Y sobre todo, desde un punto de vista teórico, le debemos la unificación de la electricidad y el magnetismo como dos aspectos de una misma cosa, que solo tienen entidad por separado cuando se desacoplan las ecuaciones de Maxwell en el caso independiente del tiempo, lo que inmediatamente se vuelve contra sí

mismo en cuanto lo consideramos en un contexto relativista.

Especial mención hay que hacer al impacto que las ecuaciones de Maxwell y los experimentos de Hertz tuvieron en el mundo de las comunicaciones. Nuestra sociedad de principios del siglo xx se interesó extraordinariamente en ello pues pronto se vio la posibilidad de establecer comunicación radioeléctrica a larga distancia, sin necesidad de cables o líneas de transmisión. Podría comunicarse Europa con los Estados Unidos prescindiendo de las conexiones submarinas, lo que evidentemente auguraba una importante área de negocio.

En el año 1894 el ingeniero eléctrico italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) consideró la posibilidad de construir un sistema de telegrafía sin hilos. Aprovechando las ideas de Hertz desarrolló pequeños transmisores y receptores de radiofrecuencia en la propia terraza de su casa. El sistema era similar al de Hertz, simplemente añadió un manipulador telegráfico y un cohesor⁴⁰ como detector. En 1895 fue capaz de

⁴⁰ Formado por dos electrodos en una cápsula de vidrio llena de limaduras metálicas. Cuando recibe una señal electromag-

establecer comunicación a distancias de hasta dos kilómetros y medio y consideró que contando con una financiación adecuada podría llegar a mayores distancias, logrando así un interés tecnológico para su proyecto. Buscó esa ayuda económica en Italia pero no fue correspondido, por lo que a través de un amigo de la familia y del embajador italiano en Londres se puso en contacto con el ingeniero jefe del *British Post Office*. En 1896, con 21 años, Marconi viajó a Inglaterra con su madre y enseguida hizo pruebas de transmisión llegando hasta 16 km y patentó su sistema de telegrafía sin hilos. En 1899 estableció comunicación a través del Canal de la Mancha y se propuso el reto definitivo de cruzar el Atlántico compitiendo abiertamente con las compañías de comunicaciones por cable. En 1901 alcanzó su sueño consiguiendo transmitir tres breves señales (tres puntos, la letra S en código Morse) desde Poldhu, en la costa irlandesa de Cornualles, hasta St. John's, en Terranova, a más de 3000 kilómetros de distancia.

nética de intensidad suficiente el dispositivo pasa de aislante a conductor.

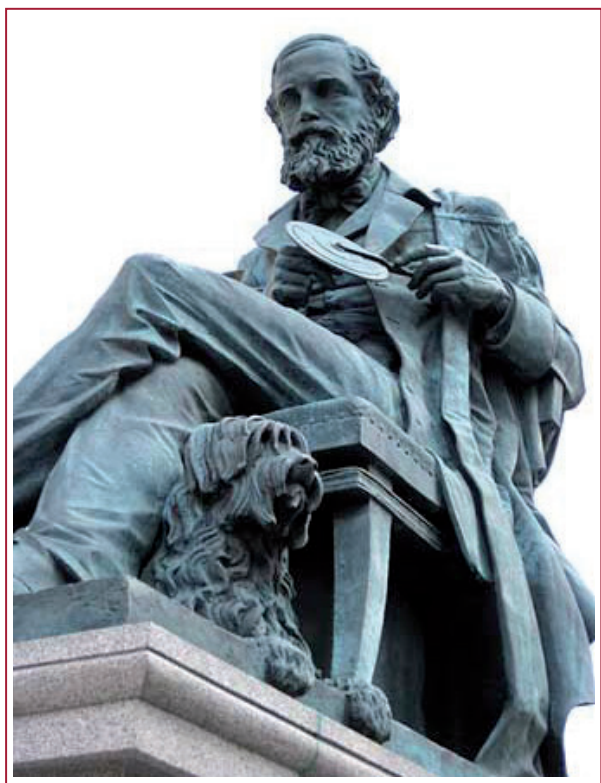


| Guglielmo Marconi |

Los trabajos de Tesla también fueron relevantes en los primeros años de las comunicaciones por radio. En 1898 realizó una exhibición

de radio control de corto alcance en Nueva York y en 1900 patentó “un sistema de transmisión de energía eléctrica” y “un transmisor eléctrico”. Cuando Marconi consiguió en 1901 la conexión transatlántica Tesla le denunció afirmando que había utilizado sus patentes. Se entabló una dura disputa que se resolvió cuando la Corte Suprema de los Estados Unidos declaró que Marconi no había violado las patentes de Tesla. En 1909 Marconi recibió el premio Nobel “por sus contribuciones al desarrollo de la comunicación inalámbrica”.

El progreso de las telecomunicaciones no se hizo esperar y el negocio del telégrafo sin hilos fue la avanzadilla de donde surgieron las grandes empresas de telefonía que todos conocemos. Las dos guerras mundiales estimularon vigorosamente el avance de la tecnología radioeléctrica. Como es bien sabido las comunicaciones de largo alcance con reflexión ionosférica en onda corta y el radar de microondas, de máximo interés en navegación aérea y marítima, resultaron fundamentales en la Segunda Guerra Mundial. El mundo de las telecomunicaciones entendido como el intercambio de información a través de distancias significativas por medios electromagnéticos ha cambiado completamente nuestras



| James Clerk Maxwell, Edimburgo⁴¹ |

⁴¹ Estatua en bronce de James Clerk Maxwell erigida en 2008 en Edimburgo. Aparece con su perro Toby y en la mano izquierda el disco giratorio de colores con el que estudió la

vidas. La telefonía, la radio, la televisión e Internet, con su enorme capacidad de transmisión de datos, han tenido un impacto social, económico y cultural extraordinario.

Sí, son realmente impresionantes las posibilidades que se nos han abierto con la teoría de Maxwell del campo electromagnético. Es fascinante pensar que el hombre haya conseguido, tras diez años de viaje, en noviembre de 2014, hacer llegar la nave *Rosetta* a un cometa de unos 3.5 km de “diámetro” (67P/Churyumov-Gerasimenko) situado a una distancia de 500 millones de kilómetros. Y que haya dejado allí la sonda *Philae*, un aparato lleno de sofisticada instrumentación científica que sobre el cometa pesa como un gramo en la Tierra, mientras *Rosetta* sigue orbitando alrededor del cometa. Y que toda la operación se pudo gobernar desde las estaciones de control de la ESA⁴² recibándose datos científicos a través de una enorme

percepción del color. En la base hay un relieve con las ecuaciones de Maxwell, otro dedicado a Isaac Newton (que hace referencia a la descomposición de la luz blanca por un prisma) y un tercero a Albert Einstein (relativo a la curvatura del espacio-tiempo). Se reúnen así los tres científicos que mayor impacto han tenido en la historia del conocimiento.

⁴² Agencia Espacial Europea, ESA por sus siglas en inglés.

distancia que las señales de radio tardan en recorrer casi media hora.

Y más aún, es maravilloso pensar que mediante los modernos telescopios podemos recoger información remota del origen del universo, de la formación de las primeras galaxias, lo que nos hace sentirnos cada vez más insignificantes aunque sepamos tanto, y tanto que nos falta por saber.

Rector Magnífico de la Universidad de Salamanca, autoridades y representantes sociales, compañeros de la Comunidad Universitaria, señoras y señores, gracias por su atención.

| BIBLIOGRAFÍA |

- THE JAMES CLERK MAXWELL FOUNDATION, disponible en: <http://www.clerkmaxwellfoundation.org/>
- JAMES CLERK MAXWELL, A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, Phil. Trans. R. Soc. Lond., **155**, 459-512, 1865
- JAMES CLERK MAXWELL, A treatise on electricity and magnetism Vol I and II, Oxford, Clarendon Press (1873), New York, Dover (1954)
- MICHAEL FARADAY, Faraday's Diary of Experimental Investigation, Edited by Thomas Martin, (2008), disponible en: www.faradaysdiary.com
- WOLFGANG K. PANOFSKY AND MELBA PHILLIPS, Classical Electricity and Magnetism, Addison-Wesley (1955)
- ROBIN L. ARMSTRONG AND JAMES DOUGLAS KING, The electromagnetic interaction, Prentice-Hall (1973)
- BRUCE J. HUNT, The Maxwellians, Cornell University Press (1991)
- JOHN H. BRYANT, Heinrich Hertz, the beginning of microwaves, New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers (1988)
- OLIVIER DARRIGOL, Electrodynamics from Ampère to Einstein, Oxford University Press (2003)
- BRUCE J. HUNT, Oliver Heaviside: A first-rate oddity, Physics Today, **65** (11), 48-54, 2012
- JAMES C. RAUTIO, The Long Road to Maxwell's Equations, IEEE Spectrum, **51** (12), 32-37, 2014
- RICHARD P. FEYNMAN, The Feynman Lectures on Physics Vol II, Addison Wesley Longman (1970)

JOHN D. JACKSON, Classical electrodynamics, John Wiley & Sons (1999)

Resolución 68/221 aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas del 20 de diciembre de 2013 por el que se declara el año 2015 como Año Internacional de la Luz y las Tecnologías Basadas en la Luz, disponible en:

<http://www.light2015.org/Home.html>

Al comenzar a escribir este texto el reto era que todo el que se acercase a él debería encontrar contenidos de interés. Por ello, manteniendo el rigor en todo lo posible, se redujo el bagaje físico y matemático al mínimo. Es una tarea difícil, quizá conseguida al menos parcialmente.

El borrador del manuscrito se terminó a mediados de junio, cuando se hizo público que la sonda *Philae* había despertado después de siete meses de silencio. Ahora necesita un copioso desayuno de luz que cargue sus baterías, para que en el Gran Tour Solar de los próximos meses las ondas electromagnéticas de Maxwell nos traigan información obtenida in situ de un cometa activo.

*Esta Lección Inaugural se terminó de escribir en
Salamanca, al día 3 de septiembre de 2015,
cuando se cumplen exactamente 194 años del inicio
de los trabajos sobre electromagnetismo
de Michael Faraday en los sótanos de la Royal Institution.*

