

## LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO. LA EVOLUCIÓN DE LAS MEDICIONES ELÉCTRICAS

*Josep Simón Castel*

*Departamento De Historia de la Ciencia y Documentación*

*Universitat de Valencia*

En el estado actual de la ciencia eléctrica, la determinación de la resistencia eléctrica de un conductor puede ser considerada la operación en electricidad, en el mismo sentido que la determinación del peso es la operación cardinal en Química.

J. C. Maxwell. *A treatise on Electricity and Magnetism*.

La segunda mitad del siglo XIX es escenario de cambios fundamentales en el campo de la electricidad y el magnetismo, tanto en los aspectos experimentales como en los teóricos y, en general, en sus características como disciplina.

Los nuevos y rápidos descubrimientos hacen que muchos investigadores reorienten sus trabajos, centrados a menudo en otros campos de la Física como la Óptica, para dedicarse de lleno a la Electricidad. Al mismo tiempo empiezan a aparecer los primeros laboratorios universitarios en que se cultiva tanto la enseñanza como la investigación. Este fenómeno ha sido analizado por varios autores: Gooday (1990) en el Reino Unido, Blondel (1998) y Caron (1991) en Francia, Cahan (1985) en Alemania, Fox (1999) y Caron (1991) en Europa en general. A pesar de que en cada país los procesos tienen desarrollos, tiempos y situaciones característicos se pueden distinguir algunos rasgos comunes. En general hay un acercamiento del físico académico al mundo de la industria. En Francia se trabajó al lado de los fabricantes de instrumentos o de los industriales, sobre todo del sector de las máquinas y del alumbrado eléctrico. En el Reino Unido ocurre lo mismo con respecto a la gran empresa del imperio británico, la telegrafía. Como sugiere Blondel, se pasa de las demostraciones públicas de fenómenos eléctricos “espectaculares”, tan característica del siglo XVIII, a las demostraciones y las pruebas en los talleres y en las fábricas para poner a punto y patentar productos que se puedan comercializar. Hay que tener en cuenta que hasta este momento las aplicaciones industriales de la Física eran marginales y insignificantes en comparación a las disciplinas como la Química.

Las exposiciones universales serán la ocasión para ofrecer los nuevos descubrimientos al gran público, pero al mismo tiempo también servirán de gran escaparate de la actividad comercial privada y estatal. Estos acontecimientos tenían una gran repercusión. Muestra de eso es, por ejemplo, el debate surgido en el Reino Unido después de la Exposición de París de 1867. La representación británica recibió menos premios que en ediciones anteriores, y eso provocó un intenso debate autocrítico que fue aprovechado por los físicos académicos para reivindicar las inversiones en educación técnica, incluyendo la construcción de laboratorios universitarios destinados tanto para la enseñanza como para la

investigación. Aunque este tipo de establecimientos son tan comunes actualmente, no aparecieron de carácter privado hasta la segunda mitad del siglo XIX.

La Exposición Universal de París, en 1881, tendrá un significado especial. Por primera vez se hace una exposición dedicada a un solo tema: la electricidad. Además, paralelamente se celebra un congreso en que se producirán los acuerdos fundamentales para adoptar un sistema internacional de unidades electromagnéticas. Así se conseguirá el consenso para un acuerdo en que se ven particularmente aludidos los científicos británicos que trabajan para la *British Association for the Advancement of Science* (Asociación Británica para el Fomento de la Ciencia) y el fabricante alemán Siemens, productores de patrones de medida, rivales hasta el momento, como veremos después. Según se aproxima el final del siglo se multiplica la creación de centros de formación e investigación y la especialización de éstos. Ingenieros, físicos y industriales habían trabajado en estrecha colaboración pero con la especialización que desemboca en la creación de la Electrotecnia como disciplina autónoma, el físico se retira hacia otros campos de investigación, más circunscritos al mundo académico.

Los nuevos cursos de Electricidad a partir de la segunda mitad del siglo XIX, incluyen en muchos casos la construcción de instrumentos por los propios estudiantes y la repetición de experimentos clásicos, antes de pasar a hacer investigaciones personales.

Con el paso al siglo XX se hacen evidentes las aplicaciones de la corriente alterna y su estudio llevará al desarrollo de instrumentos como el osciloscopio. Desde principios de siglo habrá una actividad investigadora importante sobre nuevos instrumentos para la recepción y transmisión de señales pero que también tendrán aplicaciones en los instrumentos de medición eléctricos. Por ejemplo, en 1904, J. A. Fleming patentará la válvula termiónica, ideada como un medidor de corrientes alternas de alta frecuencia y transformada por Marconi en receptor de telegrafía sin hilos. Este elemento sufrirá modificaciones posteriores y varias aplicaciones (Hong, 1996). La válvula desplazó comercialmente los rectificadores contruidos con cristales semiconductores. Estos elementos ya habían sido investigados, con desarrollos importantes en 1875 por Braun y se usaban como detectores de ondas de radio. Aunque las investigaciones quedaron en un segundo plano con el desarrollo de la válvula, se fueron retomadas durante la Segunda Guerra Mundial, con relación a la detección de señales de radar. Éstas llevaron a la invención del transistor en 1947 por parte de los laboratorios Bell. El transistor que se desarrolló con diversos modelos y materiales, tuvo numerosas aplicaciones en todos los instrumentos de mediciones eléctricas y sustituyó paulatinamente a los sistemas de desviación mecánicos.

A lo largo de este trayecto histórico veremos como lo que inicialmente eran montajes o métodos experimentales formados por varios elementos, acaban transformados en instrumentos con entidad propia, en los cuales los diferentes elementos se cierran en una caja con conexiones por la cuales se introduce información y conexiones por donde se extrae, pero desconociendo lo que pasa en el interior. Aspecto éste que se suele designar en la literatura especializada como “caja negra”. También será especialmente relevante el análisis del proceso de institución del sistema de unidades electromagnéticas. Lo que actualmente nos puede parecer inevitable o intrínsecamente universal no lo es tanto. La creación del sistema de unidades electromagnéticas no se hizo sin discusión y la adopción necesitó de estímulo, y una vez regulada, tuvo que vigilarse. En este proceso, como veremos, los instrumentos actúan como emisores o mensajeros del mundo del laboratorio, mediante los cuales éste crea sus redes al mundo exterior. Esta

proyección del laboratorio hacia el exterior es la que permite que sus productos tengan sentido o sobrevivan fuera del lugar de origen (Latour, 1987).

En 1829, Oersted se da cuenta durante una clase, que un cable conductor de corriente desviaba una aguja de brújula. Esto le llevó a realizar algunas investigaciones, que publicó y difundió ese mismo año. Este descubrimiento causó mucha excitación en la comunidad científica y, por ejemplo, l'Académie des Sciences formó un comité para estudiar y informar sobre cualquier avance relacionado con el estudio del fenómeno.

En este contexto, Ampère desarrolló el sistema astático, tan usado después en el diseño de galvanómetros. Se trataba de un sistema de dos agujas magnetizadas antiparalelas (paralelas pero con los polos magnéticos en posiciones opuestas) el objetivo del cual era eliminar la acción del campo geomagnético que orientaba la aguja de la brújula y estorbaba las mediciones. Después, este instrumento se utilizó precisamente para poder hacer mediciones cuantitativas de corriente y discernir la desviación causada por el campo magnético creado por el paso de corriente que se medía de la causada por el campo magnético de la Tierra. Este método fue ideado, por lo que parece, por Haüy (1743-1822) y se llama "sistema astático".

Schweigger (1799-1857), Poggendorff (1796-1861) y Cumming (1777-1861) inventaron un dispositivo para amplificar el efecto de las corrientes, en general muy débiles, al alcance del físico del momento. En lugar de utilizar sólo una espira de hilo, se enrolló esta varias veces en un soporte, de forma que la desviación de la aguja se multiplicaba proporcionalmente al número de espiras incluidas. Este dispositivo fue nombrado "multiplicador" (véase el ejemplar F-0091, destinado a la enseñanza). Junto al sistema astático y a un hilo de suspensión, formaron las partes fundamentales del primer galvanómetro, ideado por Nobili en 1825. Los sistemas de suspensión se habían utilizado en las investigaciones sobre el magnetismo desde la época de Gilbert y se habían ensayado varios materiales (Lauridsen, 1998). El de Nobili era un hilo de seda, sobre el cual estaba fijada la aguja indicadora.

La lectura de las pequeñas desviaciones de aguja sobre la escala era difícil. El aumento del tamaño de estos dos elementos no solucionaba el problema porque una aguja grande tienen un gran momento de inercia y, por tanto, un gran periodo de oscilación que alarga las mediciones. Un método que permitió eliminar estos inconvenientes fue el "método de escala y lámpara" introducido en 1826 por Poggendorff (Lauridsen, 1998), (Poggendorff, 1826), aunque por lo que parece ya lo usaba Gauss y más tarde W. Weber en el campo de sus estudios sobre el geomagnetismo (Brenni, 1986).

En este método, en lugar de una aguja, se fija un pequeño espejo en el hilo de suspensión del galvanómetro, sobre el cual se hace incidir un haz de luz. Frente al instrumento se sitúa una regla graduada, de forma que cuando está en reposo, la proyección del rayo de luz sobre el espejo marque el cero de la escala. Cuando la aguja del galvanómetro se desvía a causa del paso de corriente, el espejo gira en el mismo ángulo. Esta desviación se ve reflejada y amplificada (el ángulo de desviación se dobla) sobre la regla. A partir de esta medida y el valor de la distancia entre galvanómetro y regla, la desviación que el paso de la corriente produce en el espejo se obtiene mediante un cálculo trigonométrico trivial. Por tanto, el haz de luz hace las veces de una aguja sin peso y se evitan los problemas de la inercia. El método se perfeccionó con el uso de lentes que hacían converger los rayos, y otros dispositivos, como se puede ver en la figura.

También había dos métodos de lectura diferentes. El llamado “método objetivo” de Poggendorff, usaba una regla transparente y la medida se podía observar tanto por delante como por detrás. Por el contrario, el “método subjetivo” de W. Thomson utilizaba una mira telescópica situada debajo del galvanómetro apuntando hacia la escala. En la colección de la Universitat de València, F-0189 es una regla de cristal diseñada para el uso que describimos.

Estos métodos y los galvanómetros de espejo fueron los instrumentos usados de manera generalizada durante la segunda mitad del siglo XIX, mientras que los instrumentos de aguja eran utilizados en la industria y las aplicaciones didácticas por ser menos precisos.

Durante esta época se introdujeron numerosos modelos diferentes de galvanómetros pero, sin duda, es necesario destacar el galvanómetro que se conoce como de Deprez-D’Arsonval. Este instrumento, que vemos “en acción” en la figura adjunta, fue presentado por estos dos autores en 1882 a los Comptes Rendus de la Académie des Sciences. Se trataba de un diseño de D’Arsonval a partir del galvanómetro de Deprez (una imagen de éste se puede ver en el texto sobre la colección del Instituto Luis Vives en este mismo volumen).

El mecanismo móvil consistía en una bobina suspendida en un hilo, entre los polos de un imán de herradura. La corriente llegaba a la bobina a través del hilo y, por tanto, se creaba un par que la hacía girar, y así giraba también el hilo y el pequeño espejo solidario. Este mecanismo se fue modificando a lo largo del tiempo, disminuyó el tamaño de la bobina, se añadió un núcleo de hierro dulce en el centro de la bobina para concentrar la acción del campo del imán fijo, se usaron imanes circulares o con otras formas y se mejoraron los materiales para garantizar la constancia del campo.

Los dos galvanómetros de espejo de la colección que es el objeto de este estudio (F-0083, F-0084), funcionan con este mecanismo, con las mejoras citadas. Se trata de piezas más modernas, fabricadas en el siglo XX, pero el mecanismo básico es el mismo. De hecho éste es probablemente uno de los más utilizados para la medición de corriente continua y se encuentra en la mayoría de galvanómetros, voltímetros y amperímetros de la colección.

Precisamente en ésta hay un tipo de galvanómetros más actuales (comercializados en general a partir de la década de los cincuenta del siglo XX) sobre los cuales valdría la pena hacer algunas observaciones. Se trata de modelos como los fabricados por W. G. Pye & Co. (por ejemplo F-0138), Cambridge Instrument Co. (Q-0192), EEL (F-0411), Dr. B. Lange (F-0342) o WPA (Q-0201). Estos instrumentos responden a numerosas y variadas aplicaciones, desde mediciones en colorimetría (Lange, s.a.) o análisis potenciométricos de disoluciones (Kolthoff, 1931), (Hiltner, 1936) hasta toda clase de mediciones eléctricas (intensidades, resistencias, etc.).

En la figura adjunta vemos el interior del galvanómetro modelo “Sacalamp” de la casa W. G. Pye & Co., extraído de su folleto técnico. En éste se comenta que el nombre del modelo es una abreviación de *scale* y *lamp* (escala y lámpara). De hecho si nos fijamos, resulta que hay encerrados en una caja (el armazón de este galvanómetro) todos los elementos que forman desde la segunda mitad del siglo XIX las mediciones de corrientes eléctricas en los laboratorios. Lo que eran antes elementos individuales, relacionados por un montaje experimental (mecanismo de imán fijo y bobina móvil de Deprez-D’Arsonval con espejo, regla o escala, lámpara y sistema de proyección, y shunt o resistencia), ilustrado en la segunda figura de este texto, ahora han quedado indisolublemente unidos para formar otro

instrumento autónomo, el galvanómetro Pye modelo Scalamp. Hay que en cuenta que la mayoría de estos instrumentos podían ser usados en otros montajes diferentes a los de las mediciones galvanométricas de espejo y, por tanto, tenían una identidad propia. Ésta ahora ha desaparecido y además es escondida por la caja del instrumento que se ha convertido en “caja negra”.

Pero hablaremos ahora de los instrumentos de lectura directa a que está habituado el público actual. Instrumentos como los voltímetros o amperímetros que dan lecturas directas en unidades internacionales (voltios y amperios, respectivamente). La cotidianeidad de estos instrumentos en la actualidad nos puede hacer olvidar que su adopción no estuvo exenta de controversia.

Hasta finales del siglo XIX sólo había un instrumento que proporcionara medidas absolutas de corriente: la brújula de tangentes (o también la análoga brújula de senos). Este galvanómetro, presentado por Pouillet en 1837, se convirtió en el instrumento canónico para mediciones absolutas de precisión gracias a los trabajos que con éste llevaron a cabo W. Thomson y W. Weber, personalidades con mucha influencia en la física de la época. La figura adjunta ilustra un modelo parecido al original. En la colección presentada en estas páginas hay un ejemplar más moderno (F-0569) que al diseño original incorpora, entre algunas cosas, la posibilidad de más de un rango de escala.

La brújula de tangentes está formada por un marco circular que lleva un devanado de hilo por el que pasa la corriente que se quiere medir. En el centro de éste hay una aguja magnetizada que es desviada por el campo magnético creado por el paso de la corriente. Para hacer las mediciones, el plano del marco con las espiras de hilo se tenía que alinear con el del meridiano geomagnético ya que la posición de la aguja en reposo, determinada por este campo, definía el cero del instrumento. Conocido el valor de la componente horizontal del campo magnético de la tierra en el lugar donde se efectuaban las mediciones y las dimensiones y el número de espiras, se calculaba el valor de la corriente medida que resultaba ser proporcional a la tangente del ángulo de desviación de la aguja.

Las medidas son absolutas porque pueden ser reducidas a magnitudes de tipo distinto a la corriente medida. Por el contrario, en el resto de instrumentos se obtenía un ángulo de desviación, resultado de las mediciones. Para poder relacionar este ángulo con una corriente de una magnitud determinada se tenía que referir a un instrumento absoluto que permitía calibrar el instrumento relativo, esto es, determinar la relación entre sus desviaciones y las corrientes medidas. En la cultura de la precisión de la época el cariz absoluto de las medidas se refería también a su reductibilidad última a determinaciones directas de masa, longitud y tiempo, magnitudes por las cuales ya había sido determinado y consensuado un patrón internacional de medición.

En este contexto Ayrton y Perry, ingenieros eléctricos británicos, trabajaron hacia 1880 en el diseño de un instrumento que pudiese proporcionar medidas directas. El interés principal residía en crear instrumentos de manipulación fácil y lectura rápida, así como una cierta robustez para uso industrial. Como precedente importante tenían el galvanómetro de Deprez, citado antes que, sin embargo, no daba lecturas directas y, por lo tanto, se tenía que usar asociado a un gráfico de calibración. Después de una serie de investigaciones Ayrton y Perry presentaron los nuevos instrumentos en una sesión de la *British Association for the Advancement of Science*. Esta presentación fue el inicio de una intensa actividad publicitaria que llegaría a su cenit en 1884 con la presentación en la *Physical Society of London* y la comercialización de sus productos.

Estos nuevos productos fueron bautizados por los creadores como *ammeter* (abreviatura de *ampèremeter*, que denominamos amperímetro) y *voltmeter* (voltímetro). La gran novedad es que —según sus autores— estos instrumentos ofrecían lecturas directas en amperios y en voltios, respectivamente. De hecho la ocasión era perfecta ya que apenas se acababa de instituir el sistema de unidades electromagnéticas en el Congreso de Electricidad de París, simultáneo a la Exposición Universal de 1881.

Sin embargo, estos instrumentos fueron contestados y crearon polémicas extensas en la comunidad científica. Primero, la pretensión de exactitud en las medidas no era tal en los primeros prototipos. La variación de las propiedades del imán fijo de los instrumentos hacía que estos tuviesen que ser recalibrados prácticamente cada día, lo que, lógicamente, desvirtuaba el interés de éstos. Los problemas se fueron solucionaron pero paulatinamente.

No obstante, el problema no residía tanto en este aspecto como en las prácticas y la cultura experimental asociadas a los nuevos instrumentos. Las mediciones de precisión en que el alumnado era adiestrado en los laboratorios requerían largos y delicados procedimientos así como una pericia o “conocimiento táctico” que sólo se adquiría con la práctica. Por eso los nuevos amperímetros y voltímetros agilizaban el trabajo porque estos conocimientos tácitos habían sido introducidos en el instrumento por los fabricantes. Pero, ¿cual era el mérito y el aprendizaje del alumnado para hacer una medición? La medición, ¿la realizaba él realmente o el investigador que había llevado a cabo las determinaciones absolutas que sirviesen para calibrar el instrumento?

En las polémicas sobre esta cuestión se discutía, por lo tanto, la ética y el valor moral u pedagógico de la introducción de estos instrumentos que profesores como Ayrton y Perry hacían en las prácticas docentes (Gooday, 1995).

Los amperímetros y voltímetros, como ya sabemos, se acabaron imponiendo. Los fabricantes adoptaron en general la taxonomía creada por Ayrton y Perry e iniciaron la comercialización de amperímetros y voltímetros con mejoras substanciales en la precisión.

En la colección hay muchos ejemplares que responden a este patrón, entre los cuales destacaremos por la antigüedad el f-0309, fabricado por Carpentier o el F-0074 manufacturado por la Central Scientific Co. Estos dos instrumentos tienen además la característica de tener más de un rango de medidas. Esto se consigue simplemente por la adición de resistencias llamadas shunts (véase F-0095, F-0125, F-0153, F-0583, F-0092). De hecho, voltímetro y amperímetro tienen el mismo mecanismo (el de un galvanómetro) pero el primero lleva resistencias en serie para evitar que la corriente que se quiere medir se desvíe por su rama del circuito y altere así su resultado.

Ya en el siglo XX se introdujeron paulatinamente nuevas tecnologías como la válvula o el transistor. El uso de rectificadores ha permitido que sigan utilizando en los instrumentos de medición sistemas de desviación mecánicos como el de imán fijo y bobina móvil, incluso para mediciones de corriente alterna. No obstante, a partir de los años cincuenta se empezaron a introducir varios sistemas de lectura digital. En la colección hay un instrumento (F-0334), que aunque está fabricado a finales de los años sesenta tiene una pantalla digital formada por un conjunto de lámparas de incandescencia, un de los primeros sistemas. Las lecturas digitales dan un paso más hacia la objetivización del acto de medición, algo que los instrumentos de aguja intentaban conseguir mediante bandas de espejo antiparalaxis (véase, por ejemplo, F-0304).

## 2. La medición de resistencias y de fuerzas electromotrices

La declaración de Maxwell que encabeza este texto, deja clara la importancia de la medición de resistencias durante la segunda mitad del siglo XIX. F. Jenkin, ingeniero eléctrico que colaboró asiduamente con Maxwell, se expresaba en 1861 en términos parecidos: “Las bobinas de resistencia [...] son ahora tan necesarias para el electricista como la balanza para el químico” (Hunt, 1993). Explorando la metáfora, Hunt añade que se puede comparar las piezas graduadas del químico con las bobinas de resistencia del electricista, siento entonces la balanza, el puente de Wheatstone.

De hecho J. C. Maxwell estuvo implicado en la construcción de un patrón de resistencia desde la década de los sesenta. Como veremos, lo interesante es la conjunción de factores que intervinieron en la orientación de sus investigaciones.

La necesidad de un sistema internacional de unidades electromagnéticas era evidente. Por otra parte, el uso de resistencias se había hecho fundamental en muchos métodos de medición y aplicaciones en pleno desarrollo, como la telegrafía. Por esta razón, Thomson, personalidad dominante en la Física británica, pidió a la *British Association for the Advancement of Science* (BAAS) la formación de un comité que trabajase en la creación de un patrón de resistencia. Se trataba de construir una definición del ohmio y crear a continuación un patrón preciso y reproducible. Éstos tenían que poder reducirse pero, a las unidades de trabajo, ya consensuadas y aceptadas. Éste es un aspecto muy característico de la Física del siglo XIX (Harman, 1982) y en particular del desarrollo de la electricidad y el magnetismo (Blondel, 1997).

Thomson abogaba claramente por la adopción del sistema absoluto de unidades electromagnéticas creado por Weber. Pero este sistema trabajaba con un orden de magnitudes muy pequeño y, por tanto, poco práctico por el campo de la telegrafía. Por eso se decidió construir un patrón de resistencia que tuviese un valor igual a un múltiplo de la unidad de resistencia definida por el sistema de Weber (Hopley, 1957). Como patrón se escogió una bobina de resistencia (hay que tener en cuenta que la referencia de los valores de resistencia a longitudes de cables ya se hacía en tiempos de Wheatstone y era una herramienta habitual en el trabajo del ingeniero de telegrafía).

La determinación experimental, medida absoluta de la resistencia de una bobina de hilo, se confió a J. C. Maxwell, B. Stewart y F. Jenkins. Más tarde, a causa de la complejidad de la determinación que retardaba la creación del patrón, se formaron otros grupos que trabajaron en esta labor. Lo interesante es que esta investigación, en que hay un juego muchos intereses económicos, es al mismo tiempo, para Maxwell, una forma de justificar su teoría electromagnética de la luz, que establece que ésta se produce por el desplazamiento de ondas transversales en el éter electromagnético (Schaffer, 1995). En efecto, para instituir el sistema de unidades propuesto por la BAAS se tiene que relacionar las unidades electrostáticas y las electromagnéticas. La relación es una constante de proporcionalidad que Maxwell llamó  $v$ , a cuya determinación dedicará muchos esfuerzos. Su hipótesis de trabajo y herramienta necesaria para justificar la teoría será el hecho de pensar que el valor de esta constante es el mismo que el de la velocidad de la luz.

El congreso celebrado en París en 1881, supone una solución de consenso con respecto a los dos rivales en la comercialización de patrones de resistencia: la BAAS y Siemens. Éste último había creado un

patrón arbitrario, formado por una columna de mercurio pero que funcionaba bastante bien en la práctica y se había difundido mucho por la Europa continental. El nuevo sistema internacional adoptó la definición absoluta del ohmio propuesta por la BAAS y el patrón de resistencia propuesto por Siemens.

El proceso de adopción de las unidades internacionales para el resto de magnitudes electromagnéticas tiene puntos comunes con el caso del ohmio y lo cierto es que no nos podemos extender más aquí sobre el tema.

En la colección de la Universitat de València podemos ver una caja de resistencias de fabricante francés (Q-0108) de finales del siglo XIX, que lleva inscrito en la plancha “Ohms internationaux” (i.e. Ohmios internacionales). El instrumento actúa así como difusor al exterior del mundo del laboratorio, el de las determinaciones absolutas que ha llevado a la creación de un patrón material y un sistema de unidades consensuado por la comunidad científica. Como sugiere Latour, un mapa de carreteras en nuestras manos no tendría sentido si las carreteras no estuviesen a su vez rotuladas (Latour, 1987).

Hay otros patrones más modernos en la colección pero que demuestran su importancia y necesidad en un laboratorio, como por ejemplo las pilas F-0156 y F-0157.

Una vez se tiene un buen patrón es cuando intervienen instrumentos como los puentes que permiten medir magnitudes como la resistencia o la capacidad por comparación con el patrón. Muchos de estos instrumentos utilizan métodos de cero. En éstos se sitúa un galvanómetro en el circuito de forma que cuando la lectura es cero se sabe que se ha obtenido un balance entre la resistencia que se quiere medir y las resistencias de valor definido usadas. La mayoría de los galvanómetros de escala traslucida, que ya hemos tratado en el punto anterior, tienen escalas centradas en cero, aspecto que delata que se han concebido para usos de este tipo.

De entre todos los puentes de resistencias el más famoso y familiar es, sin duda, el de Wheatstone. Incluso un importante fabricante de instrumentos, la Cambridge Instrument Co. utilizó un esquema de su circuito para el logotipo.

De hecho, el montaje experimental, que hoy en día se conoce con este nombre, fue presentado por primera vez por S. Christie (Christie, 1833). Diez años más tarde, Wheatstone presentó un montaje con la misma estructura que llamó “medidor diferencial de resistencia”. Con éste se mostraba que el método se podía utilizar para medir resistencias, al transformar el montaje en un instrumento y difundirlo. Originalmente el añadido de resistencias para obtener el equilibrio en el circuito se hacía mediante el añadido de resistencias de valores discretos. Más tarde se substituyeron por resistencias de hilo con cursor o por reóstatos. Este último instrumento (con numerosos ejemplares para la enseñanza en la Universitat de València) se introdujo en el mismo artículo por Wheatstone que además lo bautizó con este nombre, partiendo de la raíz griega *rheo* que significa corriente (Bowers, 2000).

La colección dispone de numerosos ejemplares, desde los fabricados por Ducretet o Carpentier a los más modernos de Tinsley & Co., desde modelos didácticos a puentes para telegrafía. Evidentemente hay otros tipos de puentes, algunos, como el de Wheatstone, con alguna capacidad en lugar de resistencia, otros con esquemas distintos como el Kelvin, para la medición de resistencias muy pequeñas. También hay ejemplares de puente de Kohlrausch que tiene el mismo circuito pero se destina a la medición de resistencia de los electrólitos. Con este objetivo no se puede usar corriente continua porque penetraría en

el líquido y variaría su composición química. Por esta razón se usa la corriente alterna y en lugar de un galvanómetro un auricular de teléfono.

Poggendorff también se encuentra con este problema hacia 1841. Se trataba de idear métodos para medir la fuerza electromotriz de las pilas. Pero en la época las pilas eran líquidas, por eso existía el mismo problema. Este hecho le llevó a diseñar un montaje experimental en que la corriente de la pila se viese compensada por una corriente en sentido contrario. Se trataba de un método de cero como el de Wheatstone. Al principio varió la fuerza electromotriz variando el número de pilas de referencia incluidas. Poco después se dio cuenta que era más sencillo utilizar una resistencia variable con la misma finalidad. Aunque hubo muchas contribuciones posteriores al problema y también desarrollos del instrumento, el montaje experimental de Poggendorff es, fundamentalmente, el potenciómetro que conocemos hoy en día. (Rutenberg, 1939).

Éste es un instrumento versátil con numerosas aplicaciones en electricidad pero también en Química, por ejemplo en el análisis de las concentraciones de soluciones (Kolthoff, 1931; Hiltner, 1936).

### 3. Visualizar las ondas electromagnéticas. El osciloscopio

La historia del osciloscopio se desarrolló entre varias áreas de la Física, como la acústica, la óptica y la electricidad y el magnetismo. Algo que de hecho, como hemos visto, es característico del siglo XIX. La necesidad de un instrumento que permitiese observar y analizar las ondas eléctricas fue quizás más urgente a principios del siglo XX, por la generalización del uso de la corriente alterna.

A lo largo del siglo XIX se desarrollaron varios métodos para obtener información sobre las características de las ondas, en muchos casos relacionados con el análisis de otros movimientos vibratorios como el sonido.

En los años treinta del siglo XIX, Wheatstone introdujo una innovación importante con su método de análisis del movimiento vibratorio mediante un espejo giratorio. La observación por medio de este sistema, de una luz parpadeante o un objeto que vibra permiten ver franjas luminosas y negras o una línea con forma de onda, respectivamente. Así se podían observar las oscilaciones de la luz producida por una chispa eléctrica o los movimientos vibratorios de un objeto imantado sometido al campo magnético producido por una corriente variable. En los años ochenta, el francés Jules Joubert introdujo una versión eléctrica de los métodos ópticos estroboscópicos usados para la observación de los movimientos angulares. Lo que se llamó entonces el método de Joubert, permitía obtener distintos valores de voltaje de un circuito eléctrico, en tiempos diferentes, de forma que punto por punto, se podía reconstruir la onda eléctrica. Este procedimiento era largo y tedioso, según un autor de principios del siglo XX, la descripción de una sola onda podía comportar de “cuatro a cinco horas” de trabajo. Por eso sólo era aplicable a ondas eléctricas estacionarias y no a fenómenos de corta duración (Philips, 1987).

Todos estos métodos desarrollados en el siglo XIX, se abandonaron paulatinamente con la aplicación de los tubos de rayos catódicos al estudio de las ondas electromagnéticas. Gracias a las investigaciones de autores como el alemán Ferdinand Braun (1850-1918), surgieron los modernos osciloscopios que se convirtieron en pieza fundamental de los laboratorios de Física después de la Segunda Guerra Mundial. La parte principal de este aparato es un emisor de electrones. Un haz de éstos pasa entre dos pares de placas entre las cuales se aplican campos electrostáticos deflectores horizontales y verticales, respectivamente. Finalmente, las partículas inciden

sobre una pantalla fluorescente. El haz de electrones es desviado proporcionalmente a la corriente aplicada a las placas y la observación de la desviación en la pantalla permite deducir sus características. En general, conviene conocer la frecuencia de la corriente aplicada, y así se pueden hacer mediciones de tensión, frecuencia y otras variables de un circuito eléctrico, que permiten comprobar los componentes electrónicos (micrófonos, radios, televisores) (Lenk, 1971). Esta gran variedad de usos, y las aplicaciones a la enseñanza, explica el gran número de osciloscopios que hay en la colección, tanto en la Facultad de Física (F-004, F-0244, F-0245, F-0248, F-0318, F-0340, F-0557) como en la de Química (Q-0130) o en la Escuela de Magisterio (M-0067, M-0069, M-0126). Entre éstos se puede destacar uno de los primeros osciloscopios de haz doble (Q-0130), introducidos en los años cincuenta, que permiten analizar dos señales simultáneamente gracias al revestimiento de fósforo que mantiene cierto tiempo el rastro de los electrones.