



HISTORIA DE LA CARDIOLOGÍA

Bioamplificadores *Bioamplifiers*

Jorge Reynolds, Ing. Electrónico⁽¹⁾; Liliana Barragán, Ing. Biomédico⁽¹⁾, Fabián Cuéllar, Ing. Biomédico⁽¹⁾

Bogotá, Colombia.

Las señales bioeléctricas se remiten a estudios que comenzaron con el descubrimiento de la electricidad en seres vivos, vislumbrada por Luigi Galvani y Alessandro Volta en el siglo XVII (Figuras 1A y 1B), y demostrada por Carlo Matteucci y sus continuadores en el siglo XIX. El alcance de este artículo tiene como objetivo explicar el origen de los amplificadores utilizados en Electrofisiología, a través del análisis de una necesidad científica de la época que llevó a la construcción de aparatos cada vez más especializados, supliendo así las insuficiencias tecnológicas de la experimentación en Física y Fisiología y a su vez, sentando las bases de disciplinas como la Electrocardiografía, las Neurociencias, la Electromiografía y la Electrofisiología, en general.

PALABRAS CLAVE: bioamplificadores, valvulómetro, osciloscopio, transistores, tubos, Electrocardiografía.



A B
Figura 1. A. Luigi Galvani. Bolonia, Italia (1737-1798). B. Alessandro Volta. Como, Italia (1745-1827)

Bioelectric signals refer to studies that began with the discovery of electricity in living subjects envisioned by Luigi Galvani and Alessandro Volta in the seventeenth century (Figure 1A and 1B) and demonstrated by Carlo Matteucci and his followers in the nineteenth century. The scope of this article aims to explain the origin of the amplifiers used in electrophysiology, analyzing a scientific need of the time that led to the construction of ever more specialized equipment, supplying the technological shortcomings of the experimentation in physics and physiology, to in turn, laying the foundations of disciplines such as electrocardiography, neurosciences, electromyography and electrophysiology in general.

KEYWORDS: bioamplifiers, galvanometer, oscilloscope, transistors, tubes, Electrocardiography.

(Rev Colomb Cardiol 2011; 18: 131-143)

Introducción

Existe una gran relación entre investigadores y eventos que llevaron al descubrimiento, el estudio y eventual conocimiento de la medición de los potenciales

(1) Grupo de Investigación Seguimiento del Corazón Vía Satélite (SCVS).
Bogotá, Colombia.

Correspondencia: Ing. Jorge Reynolds Pombo. Calle 94 A No. 11A-66.
Teléfono: (57-1) 7 52 49 13. Bogotá, Colombia. Correo electrónico:
jorgereynolds@hotmail.com

Recibido: 08/06/2009. Aceptado: 01/12/2010.

electrofisiológicos, así como de los instrumentos para su registro y visualización, dentro de los cuales uno de los más antiguos es el galvanómetro (el de Schweigger en 1820, el astático por Nobili en 1825, el de bobina por William Sturgeon en 1836, el capilar por Lippmann en 1873, y el de cuerda por Einthoven en 1901), cuyo principio se basa en la fuerza que se produce entre un campo magnético y una bobina inclinada por la que pasa una corriente produciendo la desviación de la bobina, y de los instrumentos de visualización, que inicia con diversos medios, desde los más complejos sistemas de espejos y velas como fuente de luz, llegando al gran

adelanto de la época «el sistema de fotografía en un cajón oscuro, Cámara de Marey» (Marey, 1876), hasta alcanzar la invención del osciloscopio.

Sin embargo, hay un instrumento de visualización intermedio entre la Cámara de Marey y el osciloscopio, que permitió consolidar el método gráfico para el registro de los signos vitales, el «quimógrafo», inventado por el fisiólogo alemán Karl Ludwig en 1847 (Figuras 2, 3, 4), el cual consiste en un tambor ahumado que gira uniformemente mientras la pluma de un galvanómetro se desplaza horizontalmente mediante un husillo (actualmente ha sido desplazado por el polígrafo). Este complejo medidor de funciones vitales entre las que se encontraba la presión arterial, cuyos catéteres se insertaban directamente en la arteria, incurría en procedimientos invasivos que no satisfacían plenamente a la comunidad médica, y además se limitaba a explicar los fenómenos biológicos en términos exclusivamente mecánicos.

A raíz de este intento se multiplicaron las tentativas para encontrar un sistema no invasivo que permitiera registrar la presión arterial (primer sistema no invasivo desarrollado por el fisiólogo alemán Karl Von Vierordt en 1854) (1), posibilitando el registro de la actividad mecánica del corazón y dando nacimiento a los sistemas de registro desarrollados por el médico y cinematógrafo francés Étienne Jules Marey desde 1859, quien desarrolló varios de los aparatos de la Revolución Industrial (Figuras 5, 6, 7) (3).

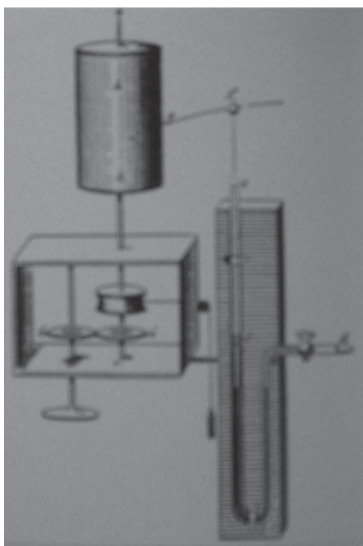


Figura 2. Quimógrafo de Ludwig.

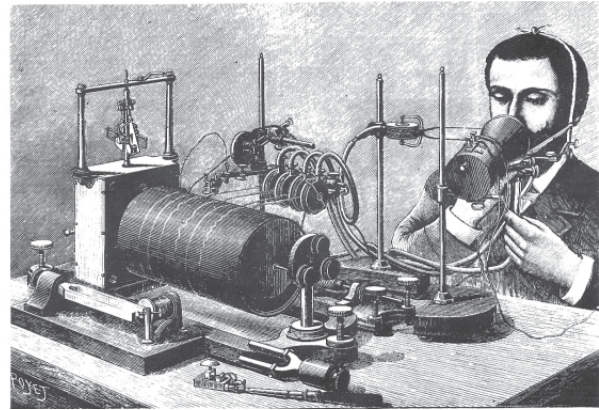


Figura 3. Quimógrafo de Ludwig. Análisis cardiorrespiratorio (2).



Figura 4. Quimógrafo de Ludwig. Adquisición de la presión sanguínea (1).



Figura 5. Aparatos de Marey. Esfigmógrafo (1860). Permitía el registro de las ondas de la compresión sanguínea producida por las pulsaciones humanas; éste se producía por medio de un mecanismo de relojería (1).

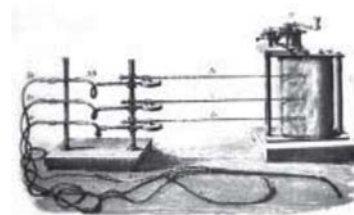


Figura 6. Aparatos de Marey. Cardiógrafo y quimógrafo usado para medir la frecuencia, fuerza y velocidad del flujo sanguíneo en caballos (1). Constituido por tres tubos flexibles con ampollas sensoras en sus extremos, las cuales se introducían dentro de la aurícula y el ventrículo, o entre el corazón y la pared torácica y cada tubo estaba sujeto a su vez a un sistema de palancas que imprimían un papel sobre un tambor que giraba.

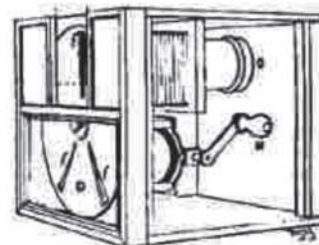


Figura 7. Aparatos de Marey. Sistema de fotografía en una cámara oscura.

Con la invención del osciloscopio de rayos catódicos (por el físico inglés William du Bois Dudell en 1908 y el físico alemán Karl Ferdinand Braun en 1909) por los fisiólogos alemanes Herbert Gesser y Joseph Erlanger¹ (Premio Nobel 1944), y del tubo al vacío por el físico inglés Walter Fleming en 1904, se contó desde entonces con un aparato más sensible para el registro de las bioseñales, y totalmente diferente en aquel tiempo, cuyo principio cambió drásticamente el registro de los gráficos en comparación con el galvanómetro (Tabla 1), que necesitaba de medios menos sofisticados para la visualización de la bioseñal.

Su funcionamiento se basa en la incidencia de un haz de electrones sobre una pantalla donde magnéticamente se desvía el haz de luz entre punto y punto (horizontal: tiempo; vertical: magnitud del voltaje) (Figura 8) permitiendo variar la ubicación de la incidencia del haz sobre la pantalla fluorescente. Con su evolución fue posible obtener diversas figuras y aplicaciones en todos los campos de medición de parámetros electrofisiológicos, tanto científicos como médicos (métodos terapéuticos y de diagnóstico) y en otras áreas del quehacer humano como sus aplicaciones en la industria y variados campos, continuando con estos mismos principios en la imagenología y la electrónica moderna.

Es así, como este artículo está dedicado a considerar la evolución histórica de las ideas acerca del fenómeno de la bioelectricidad y su aporte en el desarrollo de los amplificadores de instrumentación, haciendo hincapié en el desarrollo de la tecnología médica y su convergencia con la Física, la Química, y la Óptica para lograr un prodigioso avance que promovió su aplicación en los campos de la Fisiología, la Electrónica y las Comunicaciones.

Hechos que enmarcaron la Revolución Tecnológica de la Electrónica como herramienta en la Biomedicina

Algunos hechos que supusieron una revolución en el campo de la tecnología para la medición de los potenciales eléctricos y la era del semiconductor dando paso a la electrónica moderna y a su aplicación en medicina e instrumentación fueron:

¹ De esta forma abrieron las puertas a la investigación neurofisiológica contemporánea.

1. Desarrollo del galvanómetro de cuerda por el médico William Einthoven en 1901, con el cual se pudo realizar el primer registrador de electrocardiografía de alta calidad³ (electrocardiógrafo de Einthoven, fabricado por primera vez en la compañía *Cambridge Scientific Instruments*, en Inglaterra) (5).

Tabla 1.
 GALVANÓMETRO VS. OSCILOSCOPIO

Ventajas del osciloscopio	Desventajas del galvanómetro
Ausencia de inercia del rayo de luz.	Por la inercia del sistema, las frecuencias altas no se registran con precisión.
Registro fiel, aun de los componentes que tienen frecuencias más elevadas.	Velocidad lenta, lo cual no permite registrar con precisión ritmos tan rápidos como los biopotenciales ² EMG y las altas frecuencias en EEG.
Mejoría en las características físicas de los instrumentos de registro.	Insensibilidad.

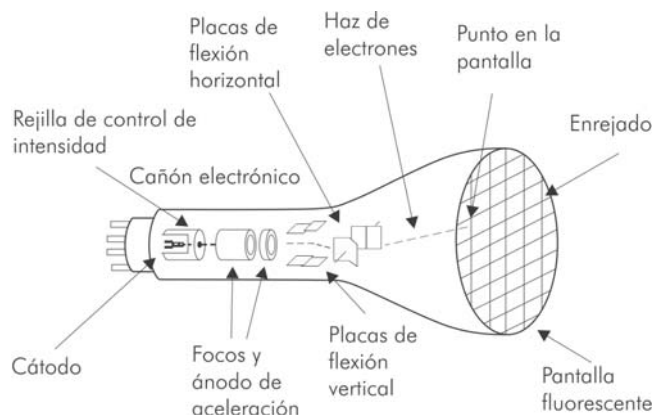


Figura 8. Osciloscopio de rayos catódicos. Redibujado de <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/22/ayuda/introduccion.htm>.

² Problemas solucionados temporalmente por el reótomo diferencial de Bernstein (1902).

³ El registro de la señal electrocardiográfica proveniente del paciente se forma de la siguiente manera: la línea horizontal representa el tiempo de desplazamiento del barrido eléctrico o del papel a 25 mm/S, creado artificialmente; y la línea vertical representa la magnitud del voltaje de la bioseñal, con la que se dibuja la imagen del complejo PQRST.

2. Introducción de los tubos a comienzos del siglo XX, que propició el rápido crecimiento de la electrónica moderna (Figura 9). El desarrollo del tubo de vacío fue el paso más importante en la evolución de la tecnología electrónica. Durante 1904 a 1947, el tubo fue sin duda el dispositivo electrónico más interesante y también el que más se desarrolló dentro de toda la electrónica contemporánea. El diodo de tubo (para la rectificación) fue introducido por el físico inglés Walter Fleming en 1904; más tarde, en 1906, el ingeniero estadounidense Lee de Forest le incorporó un tercer elemento al diodo de tubo denominado «rejilla de control», dando como resultado «el triodo» (para la amplificación), siendo éste el primer amplificador de su género. La rejilla de alambre producía un flujo de electrones cuando se colocaba dentro de un tubo al vacío, pudiendo ser controlado de diferentes formas: podía ser interrumpido, reducido o incluso ser detenido por completo; así por ejemplo, una muy baja corriente de electrones en la entrada del tubo llegaba a ser amplificada, a fin de producir una intensa corriente a la salida. Con todo este potencial en el control de la electricidad, el hombre pudo manipular señales electrónicas (electricidad transportando información) y fue así como surgieron y se desarrollaron nuevas formas de comunicación como la radio y la televisión y el comienzo de los usos más precisos y prácticos en el campo de la electrofisiología (amplificando señales de radio y de sonido eléctricas débiles, además de poder superponer señales de sonido a las ondas de radio), y nuevos avances tecnológicos, como el radar y las primeras computadoras análogas de «primera generación» durante y después de la Segunda Guerra Mundial; en fin, cualquier otro equipo en el que se requiriera aumentar la amplificación de una señal de entrada, ofreciendo así un gran estímulo a la industria de los tubos antes de la Segunda Guerra Mundial, logrando por lo tanto, grandes avances en diseño, técnicas de manufactura, aplicaciones de alta potencia, alta frecuencia y, por supuesto, llegando a la miniaturización de dispositivos.

3. Aparición de un nuevo campo de interés y desarrollo en 1946, cuando la industria electrónica registró el primer transistor desarrollado por Walter H. Brattain (doctor en Ciencias Físicas, nacido en China), Joseph Bardeen (norteamericano, licenciado en Letras y Ciencias) y William Shockley (físico inglés), quienes demostraron la acción amplificadora en la compañía *Bell Telephone Laboratories* (Figura 10), solicitaron la patente en Washington, USA, y rápidamente recibieron una respuesta de la oficina de patentes de los Estados Unidos en la cual se les rechazaba la solicitud con el



Figura 9. Tubo al vacío (6).

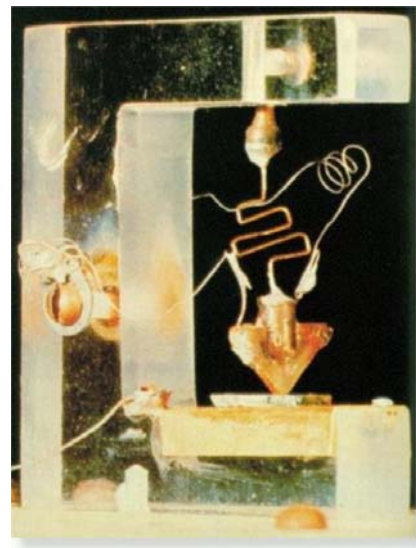


Figura 10. Primer transistor (6).

argumento de que era un elemento que no tenía ninguna aplicación lógica. Diez años más tarde estos tres investigadores recibieron el premio Nobel por el desarrollo del transistor, elemento que en electrónica cambió y sigue cambiando el mundo de la tecnología, permitiendo de esta manera el nacimiento de lo que se conoce como la «segunda generación» de los procesadores electrónicos, en la que se aprovechó una característica especial de los transistores: su capacidad como interruptores de voltaje

o corriente (técnica de compuertas), para realizar cálculos matemáticos en fracciones de segundo (denominada electrónica digital y el comienzo de la era de los computadores modernos).

El primer transistor fue construido en una base plástica en forma de C, en la cual se montaron dos piezas de un elemento poco conocido en ese entonces, el cristal de germanio, sostenidas por un resorte elaborado en último momento con un clip de oficina. De las terminales de esta estructura salían delgados hilos de oro, que hacían las veces de conectores (bigotes de gato) para la entrada y salida de señales. Con este dispositivo tan rudimentario los investigadores pudieron amplificar señales de la misma forma como lo hubieran hecho con un triodo, ya que no había necesidad de una envoltura de cristal al vacío, así como de filamentos incandescentes o elevados voltajes de operación (7).

El uso generalizado de los amplificadores operacionales comenzó hacia los años 60, cuando empezaron a aplicarse las técnicas de estado sólido al diseño de circuitos de amplificadores operacionales, debido a lo cual los costos de los transistores bajaron notoriamente, permitiendo su ingreso a la industria y multiplicando sus usos rápidamente. En efecto, el transistor, llamado así debido a que transfiere una señal eléctrica a través de una resistencia, pudo realizar las mismas funciones del tubo, pero con notorias ventajas que se manifestaron de inmediato (Tabla 2). No sólo sustituyó *el complejo y delicado tubo* por un sencillo montaje que consiste básicamente en un conjunto de finos alambres llamados «bigotes de gato» (es el mismo sistema que se usó en los comienzos de las comunicaciones con los detectores de cristal de Galena) acoplado en un pequeño cristal semiconductor, sino que hizo innecesaria la *condición de vacío*. Además no tenía

Tabla 2.
 TRANSISTORES VS. TUBOS AL VACÍO

	Ventajas	Desventajas
Tubo al vacío	Se emplean en: Transmisores de radio de potencia alta Amplificadores de microondas Osciladores Tubos de rayos catódicos (televisores, monitores, pantallas de diversos aparatos y algunos equipos de sonido, dadas sus condiciones de calidad vuelven a tener vigencia)	Gran tamaño Temperatura de operación alta, recalentamiento Requerimiento de elevados voltajes de operación (250-300 V) No funcionamiento inmediato Excesivo gasto de energía Alto riesgo eléctrico por choque No respuesta a señales de frecuencia alta Necesidad de condición de vacío Necesidad de filamentos incandescentes Compleja conexión Mantenimiento complicado
Transistor	Diez años de vida útil Pequeño y liviano Miniaturización de los aparatos electrónicos Operación en frío y voltajes bajos Requerimientos de energía muy bajos Funcionamiento inmediato Ahorro de energía (económico) Bajo riesgo eléctrico por choque Respuesta efectiva a señales de frecuencia muy altas y bajas No necesidad de condiciones de vacío No necesidad de filamentos incandescentes Fácil conexión Capacidad de cambiar de estado (estado conductor o no conductor) Mantenimiento fácil Reducción de fuentes de ruido e interferencias Reducción de tamaño físico	En algunos casos necesitan sistemas de disipación de calor auxiliares

requerimientos de disipación de calor y su construcción era resistente y eficiente debido a que el mismo dispositivo consumía menos potencia, es decir, no requería de dos fuentes de alimentación de altos voltajes y miliamperajes (a los componentes internos del tubo). Tampoco requería de un período de calentamiento ni un voltaje independiente para el filamento, ni de un gran volumen para su encapsulado, siendo así posible utilizar voltajes de operación más bajos para reducir los problemas de estabilidad de voltaje como las señales parásitas generadas por la fuente. Su estructura fija hacía de él un dispositivo más confiable y duradero, y su consumo de energía era más bajo, cuyo resultado era un dispositivo más sencillo y versátil, de manipulación fácil, funcionamiento seguro y mantenimiento sencillo (se había eliminado el riesgo de choque eléctrico y de heridas mecánicas por sobrecalentamiento, más resistente a vibraciones y a golpes), lo que hizo posible su uso más confiable en equipos móviles como los de transporte terrestre, aéreo y marítimo, facilitando también las comunicaciones y el desarrollo de equipos médicos.

El progreso de la Electrónica: los circuitos integrados

Ya en 1964 («tercera generación»), las placas del circuito impreso con múltiples componentes pasaron a ser reemplazadas por los circuitos integrados inventados en 1958 por el ingeniero eléctrico norteamericano Jack Kilby, de modo, que un puñado de transistores y otros componentes se integraban ahora en una placa de silicio (Figura 11). Así, en pocos años, los amplificadores operacionales integrados o *chips*, se convirtieron en una herramienta estándar de diseño, abarcando aplicaciones mucho más allá del ámbito original de los computadores análogos, alcanzando los microprocesadores de la «quinta generación» a finales 1970 (Figura 12).

La era científica

Las limitaciones tecnológicas como factor decisivo en el desarrollo de los amplificadores en Neurociencias y Electrocardiografía

La curiosidad intelectual fue un factor decisivo en el desarrollo de los amplificadores electrónicos, y mucho más que ningún otro dispositivo electrónico, el amplificador tiene sus raíces en la teoría por encima del desarrollo tecnológico. Así, la necesidad de medir la intensidad y las variaciones del potencial eléctrico originadas en los músculos, se traduce en el desarrollo de instrumentos capaces de medir y trazar el registro gráfico de las funciones electrofisiológicas.

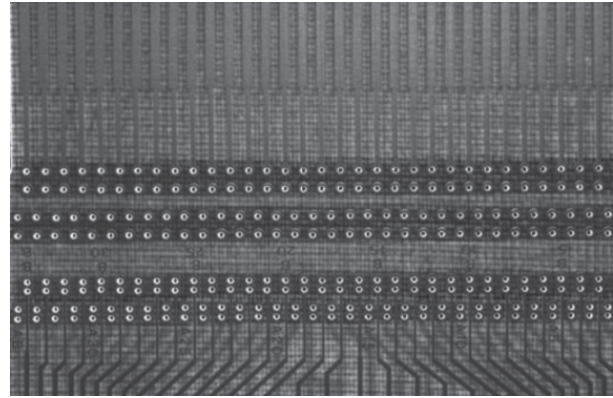


Figura 11. Placa de silicio (1961). Comercialización de los circuitos integrados por Texas Instruments y Fairchild, con una pequeña escala de integración (SSI), menos de diez componentes (6).

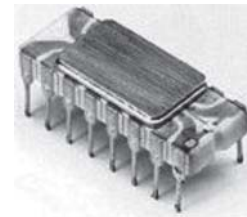


Figura 12. Intel 4004. Primer microprocesador (1971) (en un circuito integrado todo el procesador de una computadora), desarrollado por los ingenieros Ted Hoff y Federico Faggin en Intel; fue el 4004, de 4 bits y 275 transistores (6).

La idea de realizar un amplificador, se la habían planteado ya muchos investigadores en la búsqueda de la electricidad en los seres vivos que había sido facilitada por el descubrimiento del electromagnetismo (por el físico y químico danés, Oersted⁴ en 1820), cuya experiencia llevó a Nobili al desarrollo del galvanómetro astático (1825) (Figura 13) (8), más tarde utilizado por el físico y político italiano Carlo Matteucci para demostrar la existencia de la electricidad en los seres vivos. Sin embargo, es importante resaltar, que aunque no se conoce información exacta, probablemente los egipcios y otras civilizaciones antiguas ya conocían la electrofisiología en humanos (30).

Los primeros intentos aparecieron vinculados a la detección de la primera señal bioeléctrica, midiendo el impulso en un músculo de rana (Matteucci, 1838), en donde se hacía uso de una aguja imantada como detector (Figura 14), y debido a que el campo

⁴ La demostración de la relación entre el magnetismo y la electricidad hizo posible la preparación de instrumentos capaces de medir la intensidad de la corriente eléctrica originada en los músculos.

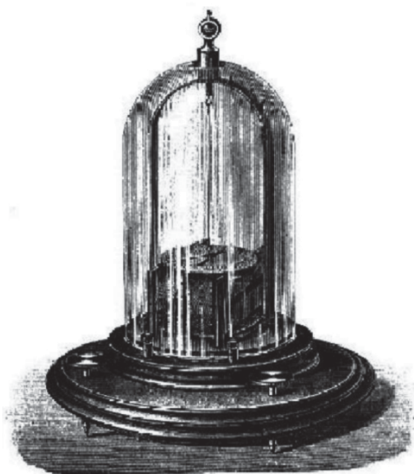


Figura 13. Galvanómetro astático de bobina fija e imán móvil, inventado por Nobili en 1825 (9).

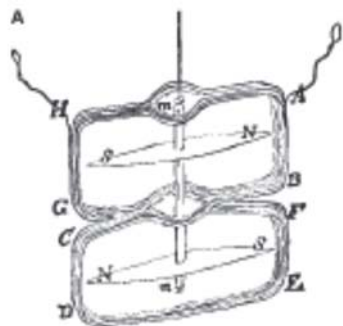


Figura 14. Galvanómetro utilizado por Matteucci para medir la primera señal bioeléctrica (1838) (10).

biomagnético era demasiado débil para desviar la aguja, era necesario amplificarlo, de manera que se hacía circular una corriente a través de una bobina, situando la aguja en su interior (9).

En 1849, el físico berlinés Emil Du Bois-Reymond⁵ continuó de forma magistral la obra de Matteucci, perfeccionando el galvanómetro astático, en el cual el conductor estaba dispuesto como dos bobinas arrolladas en direcciones opuestas, para así neutralizar el efecto del magnetismo terrestre. Este era un aparato capaz de detectar las «corrientes» bioeléctricas débiles con la mayor sensibilidad posible en aquel tiempo (Figura 15⁶), demostrando la variación negativa de la corriente en un músculo lesionado, explicando de esta forma la existencia del potencial de acción en una fibra nerviosa (11, 12).

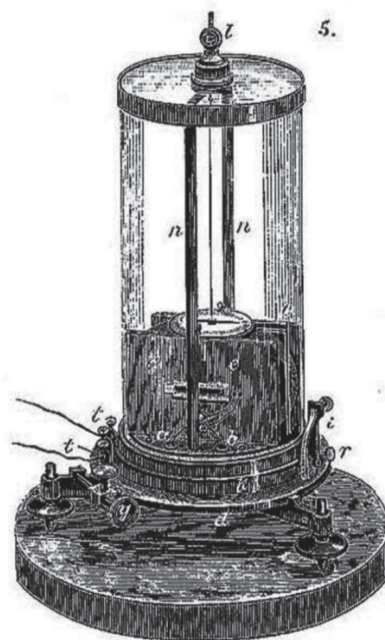


Figura 15. Galvanómetro de du Bois-Reymond; sólo detectan el paso de la corriente eléctrica pero no dan indicación de su magnitud ni del valor de la fuerza que la impulsa (10).

Sin embargo, las limitaciones producidas por la gran inercia de la aguja imantada, producían una gran lentitud de desplazamiento, lo que no permitía seguir el curso temporal de un evento tan rápido como el potencial de acción. Esto promovió el avance y la adaptación de estos instrumentos, modificados inicialmente por el fisiólogo berlinés Julius Bernstein (1868, reótomio diferencial).

Con la invención del galvanómetro capilar⁷ (Figura 16) por el físico francés Gabriel Lippmann (1872-73), un instrumento más satisfactorio para medir los biopotenciales, cuya sensibilidad era mayor que la del

⁵ Se destaca por su destreza en el empleo de la instrumentación eléctrica de la época.

⁶ Para ese entonces no se habían definido las unidades eléctricas.

⁷ Se trataba de un delgado tubo de vidrio terminado en una de sus extremidades por un capilar muy fino, parcialmente lleno de mercurio, sobre el que reposaba una capa de ácido sulfúrico diluido. Los electrodos se unían al ácido y al mercurio. Las variaciones de potencial que se producían entre ellos modificaban la tensión superficial y hacían que el menisco de separación entre las capas de ácido y de mercurio se desplazara hacia arriba o hacia abajo del tubo. Se iluminaba la zona de separación entre ambas capas y la imagen se aumentaba por medio de una lente a la vez que se proyectaba sobre una hendidura vertical, detrás de la cual se desplazaba una placa fotográfica a una velocidad constante. Era mucho mejor que el galvanómetro (1866) y el «sifón» de Thompson (1867) para detectar la actividad eléctrica cardíaca. Una innovación de este sistema fue la colocación de una vela en la parte posterior del capilar para facilitar la visualización.

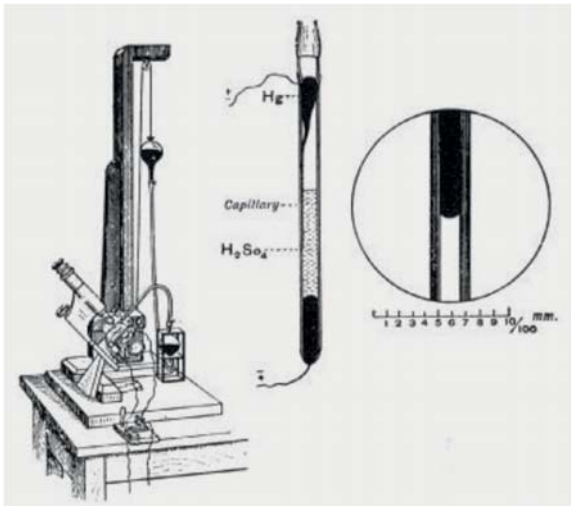


Figura 16. Electrómetro capilar construido por Lippmann; contaba con microscopio para observar y fotografiar la imagen de la derecha, con el mercurio arriba y el ácido sulfúrico abajo, que es la imagen ampliada e invertida de la parte inferior del tubo cuyo esquema está en el centro (13).

reótomos diferenciales, y especialmente con el desarrollo de los amplificadores electrónicos, dejó de ser necesario el uso de los campos magnéticos, con lo que las medidas bioeléctricas y biomagnéticas siguieron caminos distintos (1). A su vez, Étienne-Jules Marey elaboró, en 1876, un sistema para fotografiar las variaciones de corriente registradas con el galvanómetro capilar, momento a partir del cual se contó con un aparato sensible, que podía proporcionar registros gráficos de los fenómenos bioeléctricos (3).

Todos estos avances para la demostración de la existencia de la electricidad en los seres vivos llevaron al médico y físico alemán Von Helmholtz (1850), al fisiólogo y matemático berlinés du Bois Reymond, y a Julius Bernstein a la demostración de los potenciales de acción y, posteriormente por medio de la técnica⁸ experimental realizada por el médico inglés Richard Caton para medir la actividad eléctrica del cerebro de conejos y monos (cuyos informes fueron publicados en 1875) (14), al descubrimiento de la actividad eléctrica del cerebro, la electroencefalografía, sentando los fundamentos de las Neurociencias. Sin embargo, es hasta 1924 cuando el fisiólogo alemán Hans Berger logra el primer registro electroencefalográfico de un humano sin procedimientos quirúrgicos invasivos (Figura 17), identificando los dos ritmos principales (15).

⁸ Galvanómetro mejorado de Thompson (galvanómetro de espejos).

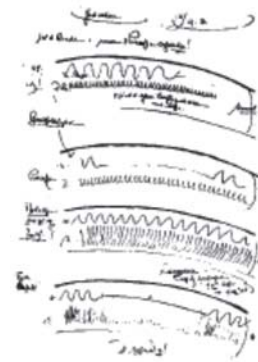


Figura 17. Reproducción de una página del libro de notas de Berger, donde muestra los primeros registros de electroencefalogramas humanos, logrados con el galvanómetro de Edelman (15).

Finalmente, con la invención de Erlanger y Gasser (premio Nobel en 1944), quienes emplearon el osciloscopio de rayos catódicos para diferenciar la distinta capacidad de conducción de las fibras nerviosas (Figura 18), hallaron que ésta estaba en relación directa con el grosor de las mismas, con lo cual abrieron las puertas a la investigación en Neurofisiología contemporánea (16).

La convergencia de los campos

Durante ese período del siglo XIX, se observó una creciente aplicación del conocimiento obtenido de la física en los campos de la electricidad, la óptica y la mecánica a los problemas planteados en el terreno de la fisiología humana. Esto permitió la aplicación de instrumentos que lograron el registro de potenciales de pequeña magnitud.

En vista de que la inercia de la aguja imantada constituía un serio problema para el estudio de fenómenos eléctricos relativamente rápidos (los trabajos de du Bois-Reymond y de Bernstein), como los originados por la actividad eléctrica del corazón, la electrocardiografía, o por el cerebro, la electroencefalografía y en el sistema nervioso con la electromiografía, para registrar estos fenómenos se desarrollaron instrumentos en los cuales se fijaba el imán y se dejaba libre el conductor. La inercia de estos últimos fue reduciéndose progresivamente. El primero de estos instrumentos fue el galvanómetro de bobina libre de d'Arsonval en 1958 (Figura 19).

Fue así como a comienzos del siglo XX, el galvanómetro fue perfeccionado por Einthoven, quien desarrolló su propio galvanómetro, lo cual permitió lograr el registro de pequeñas variaciones del potencial eléctrico del corazón y abrió la vía a la Electrocardiografía contemporánea (18).

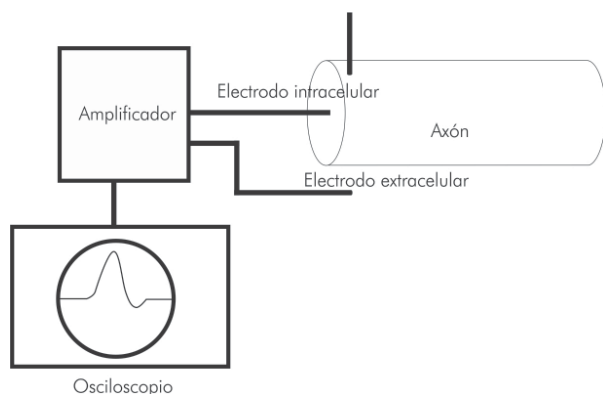


Figura 18. Invención en Neurofisiología. Gasser y Erlanger (premio Nobel 1944).

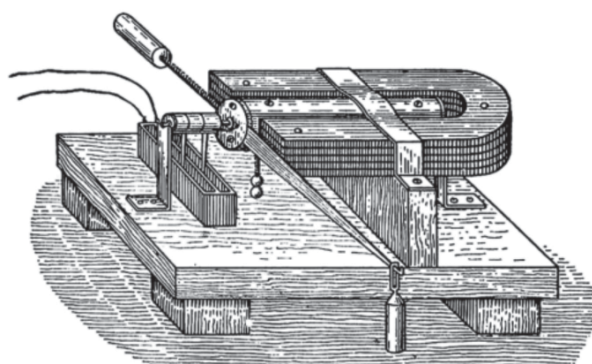


Figura 19. Primer galvanómetro de d'Arsonval (17).

Electrocardiografía

La actividad bioeléctrica del corazón humano fue descubierta por Kolliker y Mueller en 1856 (19), mientras que el primer registro de la actividad eléctrica del corazón humano, al parecer fue obtenido por el inglés Alexandre Muirhead en el hospital londinense de San Bartolomé (1869-70, mediante el dispositivo diseñado por Sir William Thompson, el sifón de Thompson) (20). Por su lado, en 1887 el fisiólogo inglés Augustus Desiré Waller, utilizando el electrómetro capilar, registró los potenciales eléctricos del miocardio en animales vivos (su perro Jimmy) y después en seres humanos⁹, aproximándose sistemáticamente a este órgano; a este registro lo llamó cardiograma (Figura 20¹⁰) (21, 22).

No obstante, pese a la sensibilidad relativamente grande del galvanómetro capilar, su respuesta era lenta. Motivo por el cual la atención de los fisiólogos se volvió hacia los galvanómetros de bobina móvil. Éstos com-

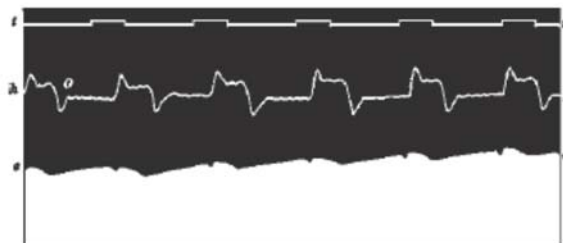


Figura 20. Registro electrocardiográfico. Abajo: Primer registro de un electrocardiograma humano realizado por Augustus Waller utilizando un electrómetro capilar (21). La curva de arriba (t) es cronométrica marcando los intervalos de tiempo. «h»: es el trazado cardíaco (choque de punta o apexcardiograma) y «e»: es la silueta del menisco del electrómetro capilar, y que es el electrocardiograma directo, sin corregir; Arriba: fotografía de Augustus Waller.

prendían un alambre enrollado y suspendido en el campo magnético de un imán. Las variaciones de la corriente que pasaba a través de la bobina, la hacían moverse y tales movimientos se registraban por medio de espejos y otros dispositivos. De todos estos galvanómetros el más aceptado fue el que construyó el biofísico francés Jacques Arsène d'Arsonval en 1889 (un galvanómetro de mediano poder).

No obstante, el logro llegó cuando Einthoven (1901), vio la necesidad de hallar nuevos recursos técnicos, e insatisfecho con los registros obtenidos con el galvanómetro capilar, trabajó con el galvanómetro de Desprez y d'Arsonval, los cuales halló poco sensibles, para finalmente diseñar y construir su propio galvanómetro de cuerda (5 de agosto de 1926) (Figuras 21, 22, 23), ignorando probablemente la existencia de un aparato

⁹ Captando los fenómenos eléctricos cardíacos en el hombre utilizando electrodos torácicos y, más tarde con un electrodo colocado en la boca del paciente. En su publicación original, llamó «electrograma» al registro obtenido; sin embargo, en 1888-1889 los denominó «cardiogramas». La expresión «electrocardiograma» se debe a Einthoven.

¹⁰ El registro comparado con uno de la época no tiene relación debido a la inercia del sistema que provocaba la deformación de la señal.

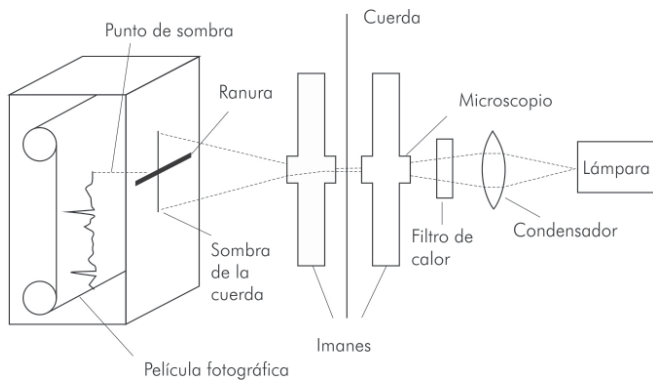


Figura 21. Esquema del galvanómetro de cuerda de Einthoven (24).

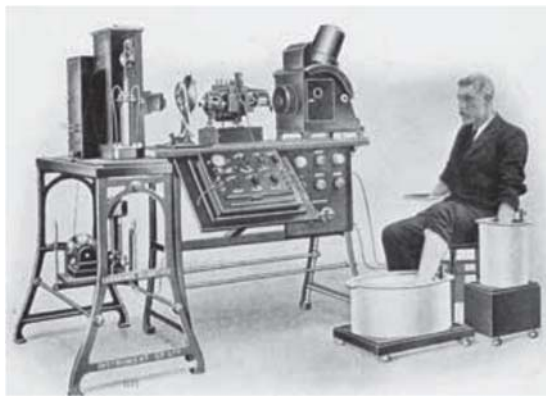


Figura 22. Galvanómetro de Einthoven (25). Realizado con cubos de madera llenos de agua salada y una lámina de cobre en el fondo que desempeñaba el papel de electrodo (1903).

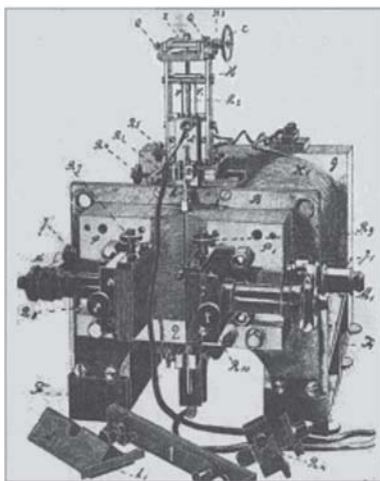


Figura 23. Modelo original de Leyden (1).

semejante construido en 1897 por Clement Ader¹¹ con otros fines, transformando la media espiral de la bobina en un hilo único recubierto de plata extendido entre dos soportes y sometido al campo electromagnético de un electroimán, de modo que lo consiguió utilizando el primer registrador de electrocardiografía de alta calidad mucho más exacto que el galvanómetro capilar (Tabla 3). De esta forma se sentaron las bases de la Electrocardiografía (27).

Tabla 3.
GALVANÓMETRO DE EINTHOVEN.

Ventajas	Desventajas
	Pesaba 270 kilos.
	Ocupaba dos piezas.
	Requería al menos cinco personas.
	La complejidad de la asistencia técnica impedía su ubicación en el laboratorio de fisiología.
Telecardiografía (1913)	Difícil desplazamiento de pacientes del hospital.
Sistemas Holter	

Los electrodos de ese tiempo tenían la forma de unos cubos de madera¹² y contenían una solución concentrada de cloruro de sodio (Figura 24); en éstos se introducían los miembros, por lo que había poca dificultad para decidir la ubicación de los electrodos. Estos cilindros llenos de soluciones de electrolitos, originales de Einthoven, fueron mejorados posteriormente por la *Cambridge Scientific Instruments*, quienes redujeron su tamaño, por lo cual se mantuvieron vigentes hasta 1930. En ese año la *Cambridge Instruments Company* de Nueva York introdujo los electrodos de placa, hechos de plata alemana.

En 1920 se inventaron los tubos al vacío, que podían amplificar las corrientes eléctricas cardiacas, y que conectados con el galvanómetro de d'Arsonval, permitieron utilizarlo en lugar del galvanómetro de cuerda, menos resistente aunque más sensible. Debido a su gran resistencia, los galvanómetros con amplificadores se emplearon en la construcción de aparatos portátiles, permitiendo desde ese momento diseñar y fabricar equipos transportables, que a su vez sufrieron grandes transformaciones con invenciones como la del transistor y los circuitos integrados.

¹¹El aparato de Ader tenía una sensibilidad muy baja y no hubiera podido emplearse nunca para la electrocardiografía clínica (26).

¹² Estos baldes eran los mismos que se usaban en el ordeño de vacas en Europa.



Figura 24. Los electrodos. Ejemplo de la conexión de los electrodos a los miembros para el registro del electrocardiograma (1).

Dentro de los grandes desarrollos en electrocardiografía ha sido fundamental y de gran importancia el avance en el diseño de nuevos componentes en los amplificadores y también en los sistemas de visualización, para obtener los equipos médicos portátiles y seguros con los que se cuenta hoy día (Figura 25).

Ya en 1960 las arritmias cardíacas empezaron a ser estudiadas, hecho estimulado en parte por el interés en la electrofisiología. El Dr. Jesús Alanis registró el potencial del haz de His en corazón aislado. Posteriormente, Sodi Pallares y sus colaboradores lo hicieron *in situ*. Más tarde, Paul Puech, quien fue residente del Instituto de Cardiología de México, lo registró en humanos en Montpellier (31).



Figura 25. Miniscopio para electrocardiografía (29).

Electrocardiografía en Colombia

La electrocardiografía en Colombia empezó a ser estudiada en 1920 por el Dr. Carlos Trujillo G., en su trabajo de tesis de grado titulado: «Análisis de la arritmia cardíaca con pulso alternante», convirtiéndose en el primero en incursionar en este campo.

Posteriormente, en 1928, el Dr. Juan Pablo Llinás realizó su tesis de grado titulada: «Investigaciones sobre Electrocardiografía en Bogotá», laureada por la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia.

En 1931 el Dr. Jorge Salcedo Salgar, presentó su tesis de grado en Medicina y Cirugía, denominada: «Estudio experimental y la importancia de cardionectores y su fisiopatología» con ayuda de un equipo de electrocardiografía marca Bulliet construido en Francia.

Más tarde, en 1930, el Dr. J. Hernando Ordóñez, presentó un trabajo libre titulado: «Sobre una contracción rítmica hallada en el músculo gastrocnemio de la rana durante un tétanos perfecto», con el equipo de electrocardiografía marca Cambridge Instruments Company de Estados Unidos.

Entre otros trabajos conocidos figuran el del Dr. Gilberto Martínez en el hospital San Vicente de Paúl en Medellín entre 1972 y 1974, quién grabó los primeros registros de electrocardiografía intracavitaria con un equipo de un canal. Posteriormente, el doctor Óscar Lopera, entre 1976 y 1980, en la Clínica Santa María de Medellín, inició los primeros electrogramas de His con un equipo multicanal y estimuladores en aproximadamente 150 pacientes (30).



Figura 26. Primer paciente conectado al detector de arritmias (Nielsen Arrhythmia Computer). Se observa además un visoscopio y un inscriptor (30).

En Bogotá, en junio de 1974, se realizó el primer estudio de electrocardiografía continua utilizando para este fin un sistema de detección de arritmias con un equipo *Nielsen Arrhythmia Computer*, al que se le programaban cinco diferentes tipos de arritmias. Cuando éstas se presentaban, automáticamente marcaba en una cinta de papel la hora y el tipo de evento que se había producido. En el sistema de inscripción la memoria del equipo grababa el trazado electrocardiográfico de los 15 segundos anteriores al episodio anormal (Figura 26).

Para poder llevar a cabo este estudio la paciente estuvo conectada al detector de arritmias durante 24 horas, con un cable de 6 metros de largo unido al sistema. Durante este tiempo se le programó una serie de



Figura 27. Primer equipo de lectura automática llegado al país de electrocardiografía continua (Holter) con un computador auxiliar (30).

ejercicios para observar si se presentaban trastornos del ritmo. Se pudo comprobar la presencia de un bloqueo A-V completo intermitente en tres ocasiones. Más adelante se le implantó un marcapaso que le corrigió el bloqueo. Este estudio puede considerarse como el primer registro electrocardiográfico precursor al sistema Holter en nuestro medio (Figura 27). Por esta razón, en 1978 se instaló el primer laboratorio de electrocardiografía continua, Holter en Colombia, aunque tomó casi tres años poder definir cuáles serían los equipos adecuados ya que los avances técnicos los modificaban continuamente (30).

Comentarios

La línea desde Galvani, Nobili, hasta Matteucci, llevó al conocimiento de la auténtica electricidad en seres vivos, con lo que los datos y conocimientos obtenidos hasta ahora constituyen el ejemplo de la

evolución de unos procedimientos científicos de utilidad clínica sorprendente (hace 200 años), con lo cual los amplificadores también han evolucionado en complejidad y sensibilidad, y han reducido en volumen, permitiendo la manipulación de la señal análoga a digital y haciendo que el análisis de la señal no sólo se reduzca a la inspección visual, sino que sea susceptible al manejo con complejos algoritmos que permitan determinar el origen de un suceso en tres dimensiones, de forma más eficiente y versátil. Las características propias de estos sistemas posibilitan su uso por parte de diferentes registros así como de distintas implementaciones computacionales, dando paso al surgimiento de programas especializados para el procesamiento de señales análogas, lo cual representa grandes avances tecnológicos en medicina, que van desde la electrocardiografía y la electroencefalografía, hasta las famosas interfases hombre-máquina, conocidas por la interacción directa de los biopotenciales con los ordenadores personales.

Bibliografía

1. Aciero L. The history of cardiology, Basel. Switzerland: Ediciones Roche; 1994. p. 519-22, 496-505.
2. http://liceu.uab.es/~joaquim/phonetics/fon_met_exper/met_exp_historia.html
3. Gorny. Histoire illustrée de la cardiologie, de la préhistoire a nos jours. p. 289-90.
4. <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/22/ayuda/introduccion.htm>
5. Einthoven W. Weiteres über das elektrokardiogram. Pflüger Arch Ges Physiol 1908; 122: 517-48.
6. http://www.dma.eui.upm.es/historia_informatica/Doc/Componentes.htm
7. Boylestad R. Electrónica: teoría de circuitos. En: transistores bipolares de unión. Sexta edición. México: Prentice Hall, p. 114-119.
8. Brazier MAB. The historic development of neurophysiology. En: J Field, HW Magoun, VE Hall, editores. Neurophysiology, Vol 1. Handbook of Physiology. Washington: American Physiological Society; 1965. p. 1-58.
9. Gscheidlen R. Physiologische Methodik. Ein Handbuch del Praktischen Physiologie 1876: 94.
10. Matteucci C. Sur le courant électrique où propre de la grenouille. Second memoire sur l'électricité animale, faisant suite à celui sur la torpille. Ann. Chim Phys 1838 (2^{ème}. serie) 67: 93-106.
11. DuBois-Reymond E. Untersuchungen über thierische Electricität. Erster Band. Berlin: G. Reimer; 1848.
12. du Bois-Reymond EH. Vorläufiger Abriss einer Untersuchung ueber den sogenannten Froschstrom und ueber die elektromotorischen Fische. Ann Physik und Chemie 1843; 58: 1-30.
13. <http://www.svcardio.org/formacion/revisiones/opinion/5/02.asp>
14. Caton R. The electric currents of the brain. Br Med J 1875; 2: 278.
15. Berger H. Über das elektroencephalogram des menschen. Arch F Psychiat 1929; 87: 527-70.
16. Gasser HS, Erlanger J. The cathode ray oscillograph as a means of recording nerve action currents and induction shocks. Amer J Physiol 1921; 59: 473-474.
17. Tomado de Lloyd W. Taylor. Physics the pioneers science. Volume 2. Light - Electricity. New York: Dover Publications, Inc.; 1959.
18. Einthoven W. Un nouveau galvanomètre. Arch Neerland Sc Ex Nat. 1901; 6: 625-633.
19. Burch GE, DePasquale NP. A history of electrocardiography. Chicago: Year Book Medical Publishers; 1964.

20. Buernett J. The origins of the electrocardiograph as a clinical instrument. *Med Hist* 1985 (Suppl. 5): 53-76.
21. Waller AD. A demonstration on man of electromotive changes accompanying the heart's beat. *J Physiol (Lond.)* 1887; 8: 229-34.
22. Burchell HB. A centennial note on Waller and the first human electrocardiogram. *Am J Cardiol* 1987; 59: 979-83.
23. LAMA T, Alexis. Einthoven: El hombre y su invento. *Rev Méd Chile* 2004, 132 (2): 260-264.
24. Keynes RE, Bennet MVL, Grundfest H. Studies on the morphology and electrophysiology of electric organs. II. Electrophysiology of the electric organ of *Malapterurus electricus*. En: Chagas C, Paes de Carvalho A, editores. *Bioelectrogenesis. Proceedings of the symposium on Comparative Bioelectrogenesis*, Rio de Janeiro, August 1959. Amsterdam, Elsevier Publishing Co.; 1961. p. 102-112.
25. <http://www.historiadelamedicina.org/einthoven.html>
26. ADER, M. Sur un nouvel appareil enregistreur pour cables sous-marins. Note de «electricité» présentée par M. Léauté. *Comptes Rendus Hebdom. des Séances. Acad. Sci. Paris* 1897; 124: 1440-1442.
27. Einthoven W. Weiteres über das elektrokardiogram. *Pflüger Arch Ges Physiol* 1908; 122: 517-48.
28. Williams HB. On the cause of the phase difference frequently observed between homonymous peaks of the electrocardiogram. *Am J Physiol* 1914; 35: 292-300.
29. http://www.schiller.ch/navigation/powerslave,id,950,nodeid,950,_country,hq,_language,en.html.
30. Reynolds J. Treinta años de la estimulación cardiaca en Colombia, Bogotá, Colombia: Ediciones Roche; 1988. p. 25, 58-59.
31. Attie F, Rosas Peralta M, Pastelín Hernández G. Pasado, presente y futuro de la cardiología pediátrica. <http://www.medigraphic.com/pdfs/archi/ac-2006/acs062b.pdf>