

INFLUENCIA DE LAS INVESTIGACIONES DE HELMHOLTZ EN LA ELECTROCARDIOGRAFIA *

DEMETRIO SODI PALLARES
Académico de número

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz nació el 31 de agosto de 1821 en Potsdam,¹ cerca de Berlín. Murió el 8 de septiembre de 1894, siete años antes que Willem Einthoven terminara su galvanómetro de cuerda. La realización de este aparato señala el principio de la electrocardiografía clínica, por lo que parece difícil admitir que el filósofo germano llevara a cabo investigaciones que día a día tienen mayor importancia en el campo de la electrocardiografía actual.

Son bien conocidos los estudios de Helmholtz sobre fisiología del ojo, óptica, fisiología del oído y acústica. Es bien sabido que en 1851 descubrió el oftalmoscopio¹ y que en 1850 pudo medir la velocidad del estímulo nervioso.² Estudió las cajas de resonancia para la emisión de los tonos vocales, sobre todo en relación con la forma de la boca y en su trabajo sobre "Sensaciones del Tono" que publicó en 1862, analizó la intensidad de los armónicos que forman la estructura del timbre musical.¹

Si sus contribuciones en el campo de la medicina son de la mayor importancia, creo que aún más importantes son sus contribuciones en el campo de la física. Una de las más conocidas se refiere a la primera ley de la termodinámica, es decir, a la conservación de la energía.

Los trabajos de Benjamín Thompson (conde de Rumford) lo llevaron a concluir (1840) que el calor no era una sustancia material, ya que él observó que un cuerpo aislado podía producir calor sin límite alguno; sin embargo, sus trabajos no fueron aceptados por los sabios de la época.¹

Dos años más tarde Roberto Mayer¹ expuso en una memoria, que pasó inadvertida para los físicos de su tiempo, los hechos que lo llevaron a aceptar la transformación de trabajo en calor. Todo el trabajo que se realiza al comprimir el aire se convierte en calor.

En 1844 y 1845, el doctor James Prescott Joule¹ continúa los trabajos de Mayer sobre la compresión y expansión del aire y después de minuciosas investigaciones llega a establecer el equivalente mecánico del calor; por

* Trabajo reglamentario leído en la sesión del 24 de agosto de 1955.

ello, sus trabajos ocupan el lugar de honor para el establecimiento de la ley sobre la conservación de la energía. En varios de sus experimentos colaboró con W. Thomson, el famoso Lord Kelvin.

Los trabajos anteriores permitieron a Helmholtz publicar en 1847 su memoria clásica sobre la "Conservación de la energía". En el aspecto teórico, este trabajo constituye el mayor aporte para llegar a concluir que la energía del universo es constante.*

No es posible, por la índole de la presente comunicación, detenernos a esbozar, de igual manera, los descubrimientos de Helmholtz en hidrodinámica, en electrodinámica y teorías eléctricas, en física meteorológica, en oscilaciones eléctricas, en cajas de resonancia, en las expresiones generales matemáticas aplicables a los circuitos cerrados, en sus fórmulas aplicables a la propagación de los trastornos eléctricos y magnéticos, en sus estudios de polarización eléctrica y magnética, en los fenómenos de electrolisis y en las sugerencias que llevaron a su discípulo Hertz a demostrar la existencia de las ondas electromagnéticas.

Veamos ahora cuáles investigaciones de Helmholtz tienen influencia en el estudio del fenómeno eléctrico del corazón y si, en realidad, son tan importantes como en un principio expuse.

Tres principios enunciados por el investigador³ tienen enorme aplicación en la electrocardiografía moderna. Ellos son, de acuerdo con la importancia (de menor a mayor) que les adjudico, los siguientes: el Principio de la Superposición; el Principio de la Reciprocidad y el Principio de la Superficie Electromotriz o Principio de la Doble Capa.

A los 32 años de edad Helmholtz mostró gran interés en las investigaciones bioeléctricas realizadas por Emil du Bois Reymond³ y en 1853 estudió la distribución de las corrientes eléctricas en los conductores de volumen y llegó a demostrar los tres teoremas que arriba mencionamos. Recientemente, un estudio importante sobre el mismo tema ha sido realizado por Frank N. Wilson y Robert H. Bayley.³

Estudiemos, ahora, por separado, cada uno de los teoremas de Helmholtz.

* En termodinámica, la ecuación general consistente con las investigaciones relatadas puede enunciarse en la siguiente forma: el calor que entra a un sistema es igual al aumento de energía de ese sistema más el trabajo externo realizado para el mismo sistema mientras el calor entra.¹

1. EL PRINCIPIO DE LA SUPERPOSICIÓN.

Este teorema puede definirse de la manera siguiente: si en un sistema de conductores se encuentran distribuidas arbitrariamente varias fuerzas electromotrices, las corrientes eléctricas y las diferencias de potencial debidas a todas las fuerzas electromotrices, si obran juntas en un momento dado, serán las mismas que si se suman algebraicamente cada una de las corrientes y diferencias de potencial en el caso de que las fuerzas electromotrices actuaran por separado.³

Este principio se aplica a las fuerzas eléctricas generadas por el corazón. Por ejemplo, si la actividad auricular y ventricular se llevan a cabo simultáneamente, el trazo que se registra muestra deflexiones que corresponden a la suma algebraica de los dos fenómenos, auricular y ventricular.

En la fig. 1-B puede verse cómo el complejo ventricular se superpone a una onda monofásica auricular; tanto el principio de Q como el final de S están muy distantes de la línea de base y ni siquiera sus relaciones con dicha línea son las mismas. La morfología de QRS se ha modificado, de acuerdo con el principio de la superposición, al sumarse a la actividad ventricular un fenómeno auricular que va siendo cada vez menor. En el control (Fig. 1-A) el complejo ventricular es del tipo qRs y cuando el mismo complejo se superpone a la onda monofásica auricular (Fig. 1-B), la reflexión positiva disminuye considerablemente de voltaje; en cambio, la S es más profunda y de mayor voltaje que R.

No es difícil el conocimiento del principio de la superposición; antes de estudiarlo hicimos inferencias que hoy vemos que tienen como base dicho principio. Se trataba de explicar el por qué la onda R de V5 y V6 en los bloqueos completos de rama izquierda tiene voltaje menor que la misma deflexión en los bloqueos incompletos y en los trazos normales, es decir, sin bloqueo. Cuando el bloqueo es completo hay una poderosa fuerza septal que apunta de derecha a izquierda y que determina positividad en V5 y V6; no obstante ello, el voltaje de R es menor en esas derivaciones si se compara con el control cuando esa fuerza septal no existe. En el control el voltaje de R está fundamentalmente dado por las fuerzas que corresponden a la actividad eléctrica de la pared libre V.I.

Estas fuerzas no se modifican cuando el bloqueo es completo y además existen las fuerzas septales ya mencionadas que tenderían a aumentar el voltaje de R. ¿Por qué, entonces, disminuye el voltaje de la deflexión positiva?

El análisis de las curvas y el principio de la superposición nos dan la

explicación. El registro de las fuerzas eléctricas que corresponden a la pared libre se lleva a cabo en el momento en que se inscribe la deflexión intrínseca de las fuerzas septales. Esto es válido, sobre todo, para las porciones inferiores de la pared libre y del tabique. Ahora en V5 y V6, que exploran fundamentalmente regiones bajas ventriculares hay dos fuerzas opuestas y antagónicas: la deflexión intrínseca de las fuerzas septales que tiende a dar negatividad y las fuerzas de la pared libre V.I. que determinan positividad. De la magnitud y de la rapidez en la inscripción de estas fuerzas, depende el voltaje de R en las derivaciones precordiales izquierdas.

20. EL PRINCIPIO DE LA RECIPROCIDAD

Este teorema es válido para cualquier conductor de volumen, sea homogéneo o heterogéneo, sin importar la forma del conductor. En relación con el corazón, se puede enunciar el principio de la manera siguiente: si una corriente i de magnitud dada fluye entre dos elementos a y b del músculo cardíaco, la diferencia de potencial resultante y que se registra entre dos electrodos cualesquiera colocados en la superficie corporal, será igual a la diferencia de potencial entre los elementos a y b cuando una corriente i de igual magnitud se aplica entre los dos electrodos de la superficie.³

Recientemente, McFee y sus colaboradores⁴ mostraron un nuevo método para conocer el valor de las derivaciones electrocardiográficas. Este método, que se basa en el principio de la reciprocidad de Helmholtz, estudia, en modelos hidráulicos, el flujo de fluidos que semejan el flujo de las corrientes eléctricas. Las líneas de flujo de los líquidos que usan, se hacen visibles por medio de colorantes especiales.

Wilson y sus colaboradores⁵ estudiaron, por consejo de Keneth S. Cole, el principio de la reciprocidad. Para ello aplicaban una corriente eléctrica a dos electrodos de cualesquiera de los miembros, y con ello podían determinar la línea isopotencial, que correspondía al electrodo del otro miembro en la superficie del cuerpo humano. Con este procedimiento se tiene una idea bastante aproximada de las propiedades eléctricas del cuerpo humano y de la distribución de las corrientes eléctricas en el mismo. Varios autores, por otra parte, estudian las características de los diferentes tipos de derivación basados en el mismo principio. Nuevamente se refieren a las líneas de flujo de corriente y Lepeschkin⁶ aplicando el método de los cuadrados curvilíneos define los "tubos de flujo", de tamaños variables,

pero de resistencia igual y cada uno con la misma fracción de la corriente total.

Para conocer el campo, este autor, al igual que Wilson, aplica una corriente a los electrodos de la derivación en estudio. Esta corriente puede ser la misma o proporcional a la que determina la diferencia de potencial entre los electrodos cuando una o varias superficies polarizadas existen en el corazón.

De esta manera, y trabajando sobre todo en modelos, ha sido posible conocer la distribución en los tubos de flujo a los que denomina "tubos de influencia de una derivación".

En conociendo la distribución de los tubos de flujo para cualquier derivación, es posible inferir, a través de la forma y del voltaje del electrocardiograma obtenido en esa derivación, las posibles situaciones de las superficies polarizadas en el músculo cardíaco.

Recientemente McFee y Johnston,⁷ aplicando también el principio de la reciprocidad, llegaron al siguiente teorema fundamental que define las relaciones entre una derivación y las fuerzas electromotrices del corazón.

"El voltaje v en circuito abierto, producido en cualquier derivación, está relacionado con las fuerzas electromotrices del corazón por la ecuación:

$$v = e_1 i_1 + e_2 i_2 + \dots$$

en donde las "e" son las diferencias de potencial de los elementos con fuerza electromotriz y en donde las "i" son las corrientes que pasan a través de dichos elementos cuando una corriente unitaria se introduce en la derivación".

Los mismos autores⁷ analizan a las derivaciones como vectores al introducir en ellos corrientes unitarias. De ello deriva un flujo de corriente que tiene cierta intensidad y dirección en cada punto del cuerpo humano. En otras palabras, el flujo de corriente forma un "campo vectorial". La magnitud y dirección del flujo de corriente en cualquier punto puede

representarse por el símbolo $\vec{J}$. Los autores logran transformar la ecuación anterior para obtener la siguiente:

$$v = \vec{J}_1 \cdot \vec{e} + \vec{J}_2 \cdot \vec{e} + \dots$$

El significado de esta ecuación es el siguiente: la densidad de corriente, $\vec{J}$, en un punto del corazón, que resulta de introducir una corriente unitaria en la derivación en estudio, tiene la misma dirección e intensidad que la derivación vector descrita por Burger para esa derivación

cuando se relaciona con las fuerzas electromotrices localizadas en ese mismo punto del corazón.⁷

También en relación con las líneas de flujo se puede definir en una derivación unipolar a los electrodos explorador e indiferente.

En una derivación unipolar, los dos electrodos producen un campo vectorial cuando se introduce una corriente unitaria a dicha derivación. Las líneas de corriente parece que radican del electrodo explorador y la densidad de corriente disminuye proporcionalmente a 4 veces la distancia al electrodo explorador.⁷ Ello significa que la densidad de corriente y la concentración de las líneas de flujo disminuye mucho en el electrodo distante; ahí las líneas de flujo tienden a ser paralelas (fig. 2).

En una derivación bipolar con los dos electrodos en contacto o próximos al corazón, las líneas de flujo radian de ambos electrodos (fig. 3).

3. EL PRINCIPIO DE LA SUPERFICIE ELECTROMOTRIZ

Creo que este principio es el que tiene mayor importancia y mayor aplicación en nuestros conocimientos electrocardiográficos. Veamos, al definirlo, cómo se aplica al corazón y al cuerpo humano.

Para cualquier conductor (corazón) en el interior del cual se encuentran fuerzas electromotrices distribuidas arbitrariamente (dipolos cardíacos o fuentes de ondas de activación), hay una doble capa localizada en la superficie del conductor (variaciones de potencial en la superficie epicárdica del corazón) que determinará en un segundo conductor (tejidos que rodean al corazón y que forman un conductor de volumen) puesto en contacto con el primero, las mismas corrientes y diferencias de potencial (evidenciadas por nuestras derivaciones próximas o distantes) que hubieran sido producidas por las fuerzas electromotrices (ondas de activación) del conductor primero (corazón) obrando solas en las mismas *circunstancias*.

Basta estudiar la demostración que dio Helmholtz³ a su teorema para aceptar como equivalentes la doble capa localizada en la superficie del primer conductor con las variaciones o diferencias de potencial en su misma superficie.

Este teorema no define el potencial de un punto del segundo conductor en relación con los potenciales de superficie del primero; pero indudablemente este estudio de Helmholtz fue el que inspiró a Wilson a aplicar la integral de Poisson en estos problemas y a definir el potencial de

cualquier punto del segundo conductor en función del potencial de cada uno de los elementos de la superficie del primero.

Cuando empleamos el término "potencial" no nos referimos a fuerza electromotriz, como a menudo se piensa en investigaciones de fisiología pura, sino que entendemos con ello al concepto que se emplea en los tratados de electricidad y que fue igualmente definido por Green y por Gauss.⁹ Es decir, no hablamos de "potencial de acción" sino de "potencial Gaussiano".⁹

Con el análisis de Wilson es fácil demostrar, sobre todo en las derivaciones precordiales, que las variaciones de potencial del electrodo precordial son semejantes a las variaciones de potencial de las regiones epicárdica subyacente y próximas al electrodo. Esto sucede preferentemente cuando las variaciones de superficie son las mismas o cercanamente las mismas en zonas epicárdicas extensas. Lo anterior significa que la morfología de los trazos epicárdicos es muy semejante a la morfología de los trazos precordiales. El análisis teórico tendría poco valor si no hubiera sido completado con estudios realizados en el hombre y en animales que han demostrado la gran semejanza mencionada.

El conocimiento de la morfología de los trazos unipolares en casos normales y patológicos es indispensable para entender y realizar una correcta interpretación electrocardiográfica.

Creo que así queda plenamente demostrada la enorme influencia de las investigaciones de Helmholtz en la electrocardiografía moderna.

RESUMEN

El autor pone de manifiesto la enorme influencia que las investigaciones de Helmholtz y, en particular, sus tres teoremas (Principio de la superposición, Principio de la reciprocidad y Principio de la superficie electromotriz) han tenido y siguen teniendo en la actualidad, para entender la conducta de las corrientes eléctricas en el cuerpo humano y, específicamente, para interpretar correctamente el trazo electrocardiográfico.

SUMMARY

The author stresses the paramount influence that Helmholtz investigations and his three physical theorems (Superposition principle, Reciprocity principle and Electromotive surface principle) have borne and still bear nowadays in the understanding of the behavior of electrical currents within the human body and, specifically, in the correct interpretation of electrocardiographic lectures.

BIBLIOGRAFIA

1. Citado en la *Encyclopaedia Britannica*. Volumen II, pág. 411 y volumen VIII, pág. 437. *Encyclopaedia Britannica, Inc.* Chicago. London. Toronto. 1947.
2. Citado por Bayliss, W. M.: *General Physiology*. Second Edition, Revised. Longmans, Green and Co. London. 1918.
3. Wilson, F. N. y Bayley, R. H.: The Electric Field of an Eccentric Dipole in a Homogeneous Spherical Conducting Medium. *Circulation* 1: 84, 1950.
4. McFee, R., Stow, R. M. y Johnston, F. D.: Experimental Studies of Electrocardiographic Leads Using Fluid Mappers. *Circulation* 6: 21, 1952.
5. Wilson, F. N., Bryant, J. M. y Johnston, F. D.: On the Possibility of Constructing an Einthoven Triangle for a Given Subject. *Am. Heart. J.* 37: 493, 1949.
6. Lepeschkin, E.: *Modern Electrocardiography*. Volumen I. The Williams E. Wilkins Co. Baltimore, 1951.
7. McFee, R. y Johnston, F. D.: *Electrocardiographic Leads*. I. Introduction. *Circulation* 8: 554, 1953.
8. Wilson, F. N.: On the choice of a Reference Point for the Study of the Electrical Field of a Tissue Immersed in a Volume Conductor. Libro Homenaje al Prof. Ignacio Chávez. México. 1945.
9. Wilson, F. N.: The Methods of Potential Distribution and of Current Flow in the Analysis of Electrocardiographic Leads. Tomado de la obra: "Selected Papers of Dr. Frank N. Wilson". Editada por Dr. Franklin D. Johnston y Dr. Eugene Lepeschkin. Ann Harbor. Michigan. 1954.