

I. INTRODUCCIÓN

Willem Einthoven desarrolló en 1901 un “galvanómetro de cables” que podía registrar la actividad eléctrica del corazón. Aunque no fue el primero en desarrollar estudios de esa naturaleza, su equipo tuvo la insuperable capacidad de ser lo suficientemente exacto como para reproducir datos de un mismo sujeto. El trabajo de Einthoven estableció una configuración estándar para los registros de ECG y por ello ganó el premio Nobel en 1924. Desde entonces, el ECG se ha convertido en una herramienta muy importante en el diagnóstico de desórdenes del corazón. [Se debería tener en cuenta que la interpretación clínica del ECG es bastante empírica a la práctica, y ha evolucionado desde una larga historia de referencia y correlación con los desórdenes cardíacos conocidos.]

La actividad eléctrica de cada ciclo cardíaco empieza con la depolarización del nodo sinoatrial (SA), el marcapasos primario del corazón. La onda de depolarización se extiende a través de la atria iniciando la contracción del miocardio atrial (ver Lección 5 ECG I para detalles). La Depolarización del atria se registra como la onda-P del ECG. La Repolarización del atria inmediatamente sigue la depolarización y ocurre durante el segmento PR del ECG. En el nodo AV, la transmisión de la señal eléctrica se ralentiza, permitiendo al atrio tiempo suficiente para completar su contracción, antes de que la señal sea conducida al AV, a las ramas izquierda y derecha y a las fibras Purkinje hacia el ventrículo miocardio. La depolarización de los ventrículos se registra como el complejo QRS en el ECG y la repolarización de los ventrículos como la onda-T.

Durante el ciclo cardíaco, la corriente se extiende a través de diferentes caminos y despolariza las partes por donde fluye en secuencias específicas mencionadas anteriormente. Consecuentemente, la actividad eléctrica tiene direccionalidad, que es la orientación espacial representada por un eje eléctrico. La dirección preponderante del flujo de corriente durante el ciclo cardíaco se denomina *eje eléctrico medio*. Normalmente en adultos, el eje eléctrico medio se sitúa a lo largo de una línea extendida desde la base al ápice del corazón y a la izquierda del septum interventricular situado hacia la caja torácica izquierda más baja.

La magnitud del voltaje adquirido en el ECG es directamente proporcional a la cantidad de tejido siendo depolarizado. La mayoría de la masa del corazón está hecha de miocardio ventricular. Por lo tanto, la onda registrada más grande, el complejo QRS, refleja la depolarización de los ventrículos. Además, la masa izquierda ventricular es significativamente más grande que la derecha, la mayoría del complejo QRS refleja la depolarización del ventrículo izquierdo, y la orientación del eje eléctrico medio es a la izquierda del septum ventricular.

El cuerpo contiene fluidos iónicos que permiten la conducción eléctrica. Esto hace posible medir la actividad eléctrica del corazón desde la superficie de la piel (asumiendo que un buen contacto eléctrico ha sido realizado con los fluidos gracias al uso de electrodos). Esto permite que los brazos y piernas actúen como simples extensiones de puntos en el tórax. Mediciones desde las piernas se aproximan a aquellas que se obtienen desde la ingle y las mediciones realizadas en los brazos se parecen a las obtenidas desde los hombros.

Idealmente los electrodos son colocados en las muñecas y en los tobillos por conveniencia para el sujeto al que se le mide ECG. Para que el registro de ECG funcione apropiadamente se requiere un punto referencial de tierra en el cuerpo. Este punto de tierra se obtiene desde un electrodo colocado sobre el tobillo derecho. Para representar el cuerpo en tres dimensiones, tres planos corporales son definidos para electrocardiografía (Fig. 6.1). Las derivaciones del miembro bipolar registran la actividad eléctrica del ciclo cardíaco en el plano frontal y se utilizarán en esta lección para introducir principios vectocardiográficos.

Acerca de Willem Einthoven:

1860-1927

Nacido Semarang, Java, Holanda

Médico Holandés

Profesor, Universidad de Leiden,

1885-1927

Premio Nobel: 1924

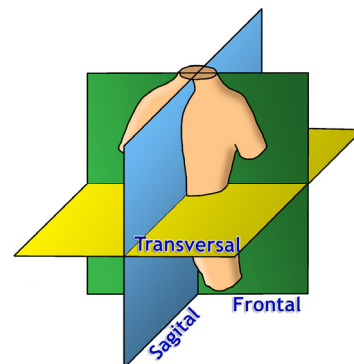


Fig. 6.1 Planos del ECG

Una derivación se compone de dos electrodos de polaridad opuesta, uno positivo y otro negativo. Una hipotética línea junta los polos de una derivación llamada la *derivación del Eje*. La colocación de los electrodos define la dirección del registro de la derivación, cuando se realiza desde el *electrodo negativo al positivo*. El medidor del ECG computa la diferencia (magnitud) entre los electrodos positivo y negativo y muestra los cambios de la diferencia de voltaje con el tiempo. Un Electrocardiógrafo estándar clínico registra 12 derivaciones, tres de las cuales se llaman derivaciones del miembro estándar (bipolares).

La derivación del miembro bipolar Estándar, su polaridad y ejes son los siguientes:

Derivación	Polaridad	Eje
Derivación I	Brazo derecho (-) a Brazo izquierdo (+)	$\pm 180^\circ - 0^\circ$
Derivación II	Brazo derecho (-) a Pierna izquierda (+)	$-120^\circ - +60^\circ$
Derivación III	Brazo izquierdo (-) a Pierna izquierda (+)	$-60^\circ - +120^\circ$

La relación de las derivaciones bipolares del miembro son tales que la suma de las corrientes eléctricas registradas en las derivaciones I y III son iguales a la suma de la corriente eléctrica registrada en la derivación II. Esta relación se denomina la *Ley de Einthoven*, y se expresa matemáticamente como:

$$\text{Derivación I} + \text{Derivación III} = \text{Derivación II}$$

Esto significa que si los valores de cualquiera de las 2 derivaciones son conocidas, el valor de la tercera derivación se puede calcular.

Una buena herramienta matemática para representar las mediciones de una derivación son los vectores. Un *vector* es una entidad que tiene ambas magnitudes y direcciones, como la velocidad. En cualquier momento durante el ciclo cardiaco, un vector puede representar la actividad eléctrica vista desde el electrodo. Un vector eléctrico tiene magnitud, dirección, polaridad y es mayormente visualizado gráficamente como una flecha:

- La longitud de la onda representa la magnitud de la corriente eléctrica.
- La orientación de la flecha representa la dirección del flujo de corriente.
- La punta de la flecha representa el polo positivo de la corriente eléctrica.
- La cola de la flecha representa el polo negativo de la corriente eléctrica.

La corriente eléctrica del ciclo cardiaco fluye hacia el polo positivo de un eje produciendo una deflexión en el registro del ECG de esta derivación. Una corriente eléctrica fluye hacia el polo negativo produciendo una deflexión negativa. La amplitud de la deflexión, negativa o positiva, es directamente proporcional a la magnitud de la corriente. Si el flujo de la corriente es perpendicular al eje de la derivación, no se producirá una deflexión en el registro de la derivación. Si persiste dará una magnitud de la corriente eléctrica, la deflexión positiva más grande producida por el flujo de corriente a lo largo del eje de la derivación hacia el polo positivo, y la deflexión negativa más grande producida por el flujo de corriente a lo largo del eje de la derivación hacia el polo negativo (Fig.6.2). Cuando la dirección del flujo de corriente está entre el eje de la derivación y su perpendicular, la deflexión es más pequeña.

Debido a la anatomía del corazón y su sistema de conducción, el flujo de corriente durante el ciclo cardiaco eléctrico es en parte hacia y en parte lejos del polo positivo de las derivaciones bipolares de los miembros. Esto puede producir una deflexión bifásica (parcialmente +, parcialmente -) en el registro de la derivación del ECG. Un buen ejemplo es el acoplamiento de las deflexiones Q-R o R-S del complejo QRS típicamente vistos en la Derivación II. En cualquier momento dado, la corriente eléctrica bidireccional puede ser representada por un vector medio aislado que es el promedio de todos los vectores eléctricos negativos y positivos en ese momento (Fig. 6.3).

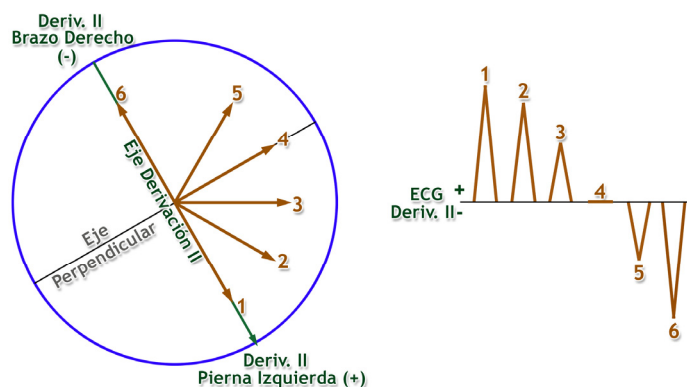


Fig. 6.2

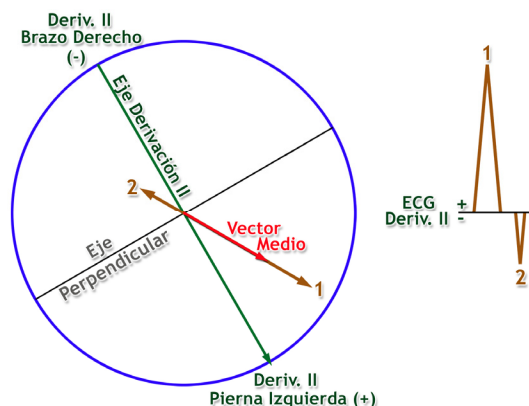


Fig. 6.3

Los ejes de la derivación bipolar se puede utilizar para construir un triángulo equilátero, llamado el triángulo de Einthoven, en el centro donde se encuentra el corazón (Fig. 6.4). Cada lado del triángulo representa uno de las derivaciones bipolares. Los electrodos positivos de las 3 derivaciones bipolares están eléctricamente a la misma distancia del cero del punto de referencia en el centro del corazón. Además, los 3 lados del triángulo equilátero se pueden desplazar a la derecha, izquierda y abajo sin cambiar el ángulo de su orientación hasta sus puntos de intersección en el centro del corazón (Fig. 6.4). Esto crea un vectógrafo estándar con cada uno de los ejes formando un ángulo de 60° con sus derivaciones contiguas. El vectograma se puede utilizar para visualizar el vector representando el eje eléctrico medio del corazón en el plano frontal.

Un vector puede representar la actividad eléctrica del corazón en cualquier instante del tiempo. El eje eléctrico medio del corazón corresponde a la suma de todos los vectores que se originan durante un ciclo cardíaco.

Dado que el intervalo QRS causado por la depolarización ventricular representa la mayor parte de la actividad eléctrica del corazón, se puede aproximar el eje eléctrico medio del corazón mirando solo a este intervalo, primero a la amplitud de la onda-R, y luego en la combinación de amplitudes de las ondas-Q, R, y S. El vector resultante, llamado eje QRS, es aproximadamente el eje eléctrico medio del corazón.

Una aproximación inicial del eje eléctrico medio en el plano frontal se puede realizar mostrando la magnitud de la onda-R desde la derivación I y III (Fig. 6.5). Para ver la magnitud de la onda-R:

1. Dibuje una línea perpendicular desde los extremos de los vectores (ángulo derecho al eje de la derivación).
2. Determine el punto de intersección de estas dos líneas perpendiculares.
3. Dibuje un nuevo vector desde el punto 0,0 hacia el punto de intersección.

La dirección del vector resultante se aproxima al eje eléctrico medio del corazón. El largo del vector se aproxima al potencial medio del corazón.

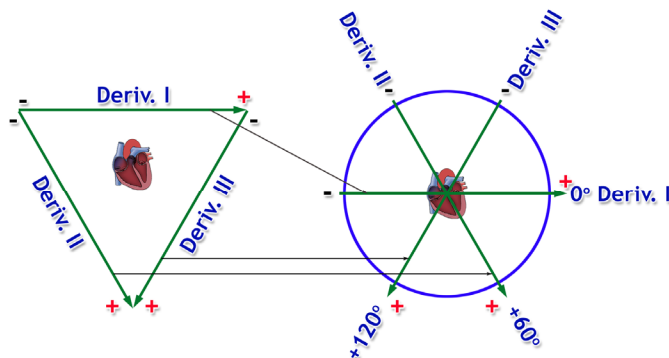


Fig. 6.4

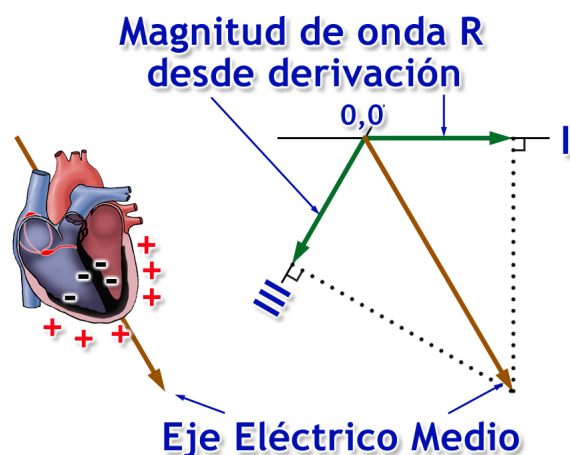


Fig. 6.5

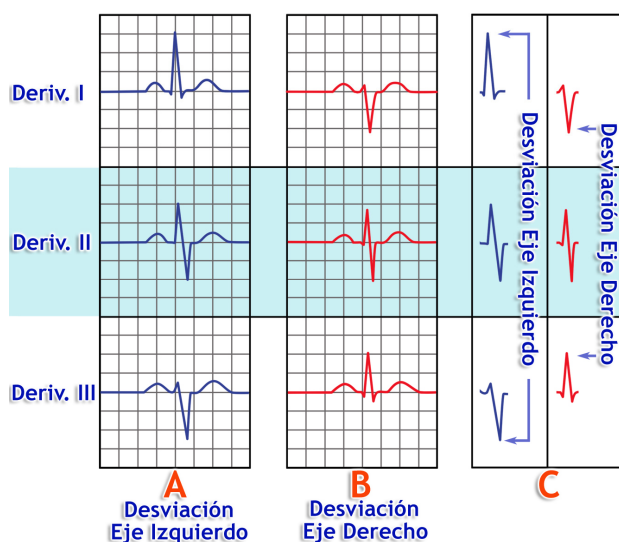


Fig. 6.6

Un método más exacto de aproximación al eje eléctrico medio es la suma algebraica de los potenciales Q, R y S para una derivación en vez de usar sólo la magnitud de la onda-R. El resto del procedimiento será el mismo que arriba.

El rango normal del eje eléctrico medio de los ventrículos es aproximadamente -30° a $+90^\circ$. El eje se puede desplazar ligeramente con un cambio de la posición del cuerpo (e.g., de pie versus tumbado) y variaciones individuales dentro del rango normal que ocurran como resultado de diferencias individuales en la masa del corazón, orientación del corazón en el tórax, índice de masa del cuerpo y la distribución anatómica del sistema de conducción cardíaca.

Una variación en la dirección del eje QRS de normal a uno entre -30° y -90° se denomina Desviación del eje izquierdo (LAD). La desviación del eje izquierdo es anormal y ocurre en condiciones que causan que el ventrículo izquierdo tarde más tiempo que el normal en depolarizar. Un ejemplo es hipertrofia (agrandecimiento, de las conducciones de las vías) del ventrículo izquierdo asociado con hipertensión sistémica o estenosis (estrechamiento) de la válvula aorta.

La desviación del eje izquierdo puede ocurrir cuando la vía de conducción del miocardio ventricular izquierdo se encuentra dañada, creando un bloqueo y un alentecimiento de la señal de depolarización. Las causas comunes incluyen la oclusión coronaria (espasmo, trombosis, etc.) y daños producidos por el uso de drogas. Fig. 6.6A muestra los patrones típicos del ECG de las derivaciones I, II, y III asociadas con el LAD.

Una variación en la dirección del eje QRS de normal a uno entre $+90^\circ$ y $+180^\circ$ se denomina Desviación del eje derecho (RAD). En algunos casos la desviación del eje derecho puede ser normal, como en personas jóvenes adultas con un pecho largo y estrecho y un corazón vertical, pero en la mayoría de adultos, la desviación del eje derecho generalmente se asocia con hipertrofia del ventrículo derecho o daño en el sistema de conducción en el ventrículo derecho. En ambas condiciones, la desviación del eje derecho provoca un alentecimiento y bloqueo de la señal de depolarización del ventrículo derecho. Fig. 6.6B muestra los patrones típicos del ECG de las derivaciones I, II, y III asociadas con el RAD. Un método conveniente para diferenciar el LAD y RAD es examinar los patrones QRS de las derivaciones I y III. Un patrón donde los ápices de los complejos QRS se alejan unos de otros es la desviación del eje izquierdo (Fig. 6.6C). Un patrón donde los ápices se aproximan unos con otros es una desviación del eje derecho.